

کلیدواژه‌ها: پهنه‌بندی، حداکثر آنتروپی، فرسایش خندقی، کرمانشاه

مقدمه

فرسایش خندقی یکی از شکل‌های پیشرفته و بحرانی فرسایش آبی است که باعث نابودی حجم بزرگی از خاک زمین‌ها می‌شود. شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع این نوع فرسایش و پهنه‌بندی آن یکی از ابزارهای مهم کنترل این پدیده است [۱۳].

فرسایش خندقی بر اثر فعالیت‌های انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی، کشاورزی غیر اصولی، چرای زیاد دام، جنگل‌زدایی است که پیامد آن تنزل کیفیت اراضی، تخریب بیشتر، کاهش بازده محصولات، فقر انسانی و سایر پیامدهای دیگر اقتصادی و اجتماعی است [۳]. فعالیت‌های انسانی بویژه شخم غلط و تخریب، پوشش گیاهی منجر به آغاز جریان سطحی شده و این رواناب و کنش زمین، نطفه اولیه توسعه خندق را در مناطق اقلیمی مستعد، بویژه در نواحی با سیستم‌های اقلیمی مدیترانه‌ای نظیر مناطق زاگرس مرکزی و شمالی را ایجاد خواهد کرد [۳۹]. عباسی [۲] در پهنه‌بندی حساسیت اراضی حوزه آبخیز زواریان استان قم به فرسایش خندقی با استفاده از روش شاخص روی هم‌گذاری، نشان داد که ۹۱/۸۴ درصد خندق‌های حوضه مورد مطالعه در مناطق با حساسیت خیلی زیاد و زیاد رخ داده است.

در دهه ۱۹۹۰ پژوهش‌ها به صورت گسترده انجام شده و بر اساس نتایج به دست آمده اقدام به ارائه مدل‌هایی درباره روند شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی به‌ویژه در دامنه‌های شیب‌دار و بستر دره‌های عریض شده است که امروزه پایه و اساس مطالعات تکمیلی درباره فرسایش خندقی می‌باشد [۴۱]. در سال‌های اخیر تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و یادگیری ماشینی در مقایسه با روش‌های سنتی در زمینه تعیین مناطق حساس به فرسایش آب‌کندی که زمان‌بر هستند، دارای کارایی بالایی بوده‌اند و باعث افزایش دقت و سرعت در زمینه ارزیابی و پتانسیل فرسایش آب‌کندی شده‌اند [۳۳]. در دهه‌های اخیر چندین مدل برای ارزیابی میزان فرسایش خندقی توسعه پیدا کرده‌اند. از جمله این مدل‌ها که فیزیکی محور هستند می‌توان مدل‌های WEPP [۱۶] و CREAMS [۲۲] را نام برد. با این حال، مدل‌های فوق توزیع مکانی خندق‌ها را به‌عنوان ابزاری اساسی برای ارزیابی تأثیر خندق بر تغییرات محیطی و برنامه‌ریزی روش‌های کنترل فرسایش، پیش‌بینی نمی‌کنند

اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی و تعیین پهنه‌های حساس در استان کرمانشاه با استفاده از مدل MaxEnt

خسرو شهبازی^۱ و فرزانه وکیلی تجربه^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱

چکیده

پژوهش حاضر با هدف تعیین عرصه‌های حساس به فرسایش خندقی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر آن در استان کرمانشاه، با روش حداکثر آنتروپی (مدل MaxEnt) می‌باشد. ۹ عامل مؤثر بر پتانسیل فرسایش خندقی منطقه شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحناء سطح، تراکم آبراهه و RSP انتخاب و تست هم‌خطی عوامل با آزمون فاکتور تورم واریانس (VIF) در نرم‌افزار SPSS بررسی شد. از مجموع خندق‌های مورد بررسی در تحقیق، ۷۰ درصد به صورت تصادفی، به‌عنوان داده‌های آزمون و ۳۰ درصد به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی طبقه‌بندی شدند. جهت تعیین مهم‌ترین پارامترها از نمودار جکنایف و از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) جهت قدرت پیش‌بینی مدل استفاده شد. نتایج نشان داد که، هم‌خطی بین عوامل مورد استفاده وجود ندارد. بر اساس نمودار جکنایف لایه‌های لیتولوژی، شیب، ارتفاع و تراکم آبراهه به‌ترتیب مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر حساسیت وقوع فرسایش خندقی بودند. سطح زیر منحنی بر اساس منحنی ROC، نشان‌دهنده دقت ۹۱ درصد روش حداکثر آنتروپی در مرحله آموزش و ۷۲ درصد در مرحله اعتبارسنجی بود. بر اساس نقشه پهنه‌بندی حساسیت خندق حدود ۲۳/۳۹ درصد سطح منطقه دارای حساسیت کم، ۴۸/۱۴ درصد خیلی کم، ۹/۳۱ درصد زیاد و ۴/۷۱ درصد خیلی زیاد و ۱۴/۴۶ درصد دارای حساسیت متوسط می‌باشد.

۱. نویسنده مسئول و استادیار موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، ایران.

پست الکترونیک: khosrw_shahbazi@yahoo.com

۲. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

[۳۲]. علاوه بر این، توزیع مکانی فرسایش خاک، به‌ویژه فرسایش آب‌کندی، عامل بسیار مهمی در مدیریت حوزه‌های آبخیز و منابع طبیعی است [۲۳]. از طرفی مدل‌هایی وجود دارد که به محققان اجازه می‌دهد نقشه حساسیت به فرسایش آب‌کندی را تهیه کنند و با تعیین روابط آماری بین عوامل محیطی و توزیع مکانی آب‌کندها، احتمال مکانی وقوع آب‌کنند را ارزیابی و پیش‌بینی کنند [۷ و ۳۳]. از جمله این مدل‌ها می‌توان مدل‌های جنگل تصادفی^۱، حداکثر آنتروپی^۲، رگرسیون خطی و لجستیک^۳، شبکه عصبی مصنوعی^۴ و ماشین بردار پشتیبان^۵ را نام برد که به روش‌های یادگیری ماشینی معروف هستند. بررسی عوامل مؤثر بر تشکیل و گسترش فرسایش خندقی، مدل‌سازی و تغییرات ابعاد هندسی خندق‌ها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. نتایج مدل‌سازی پتانسیل فرسایش خندقی در منطقه سیمره‌ی لرستان بر اساس روش‌های آماری و آنتروپی شانون که جهت مدل‌سازی از ۹ عامل استفاده شده بود، نشان داد که مدل‌های مذکور توانایی بالایی در شناسایی مناطق حساس به فرسایش خندقی دارند. همچنین عوامل لیتولوژی، ارتفاع و کاربری اراضی را به‌عنوان عوامل مؤثر شناسایی کردند [۱۷]. نتایج پژوهش‌های ذکر شده [۴۲] نشان داد که شاخص‌های قدرت فرسایش‌دهی جریان آب، بافت خاک و لیتولوژی دارای بیشترین تأثیر بر پهنه‌بندی نقشه فرسایش خندقی بود. همچنین مقدار AUC برای پهنه‌بندی فرسایش خندقی برای داده‌های تعلیمی و داده‌های آزمایشی به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۹۰ می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی این می‌باشد که مدل مکسنت بالاترین کارایی را در مقایسه با مدل تصادفی داشته است. در مطالعه‌ی در زمینه کاربرد مدل آماری حداکثر آنتروپی مکسنت در مناطق مرکزی ایران با تأکید بر اهمیت شاخص‌های توپوگرافی مستخرج از مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM و ASTER با قدرت تفکیک ۳۰ متر در تهیه نقشه خطر فرسایش خندق، پارامترهای خاک، زمین‌شناسی منطقه، تکنیک، هیدرولوژی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و توپوگرافی بررسی شد و معیار توپوگرافی منطقه از پارامترهای مهم در ایجاد فرسایش آبی از جمله فرسایش خندقی مشخص گردید، که در هر منطقه با توجه به ویژگی‌های فیزیکی منطقه منحصربه‌فرد عمل می‌کند [۴۳].

اسدی و همکاران [۶] در پژوهشی با استفاده از دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و حداکثر آنتروپی به تعیین عوامل اثرگذار بر فرسایش خندقی در حوزه آبخیز سد گلستان پرداختند و ۱۴ عامل به‌عنوان فاکتورهای پیش‌بینی‌کننده حساسیت در نظر گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که پارامترهای ارتفاع، بارندگی و عمق دره مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر پیش‌بینی فرسایش آب‌کندی می‌باشند و بر اساس مدل Jackknife بیش از ۲۰ درصد حوزه دارای حساسیت زیاد و

خیلی زیاد به فرسایش خندقی بود.

ماردن و همکاران [۲۴]، در تحقیق خود در شمال نیوزلند نشان دادند که جنگل‌کاری و کشت درختان بومی، بروز و شدت فرسایش خندقی را تا ۲۷ درصد کاهش خواهد داد. ناوانکو^۶ و همکاران [۲۷] در پژوهشی با بررسی وضعیت فرسایش خندقی در ایالت آبی^۷ نیجریه به این نتیجه دست یافتند که علل اصلی ایجاد فرسایش خندقی در این منطقه فعالیت‌های کشاورزی نادرست، وجود معدن شن، سیستم‌های زهکشی ضعیف و نامناسب، و جاده‌سازی و ساخت و سازهای غیراصولی می‌باشد. تین بوی و همکاران [۳۸]، در پژوهشی با استفاده از ۱۹ شاخص مهم و تأثیرگذار پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از شش مدل هیبریدی ترکیبی جدید یادگیری ماشینی در استان کردستان اعلام نمودند که مدل ترکیبی RF-ADTree نسبت به سایر مدل‌ها بر اساس شاخص AUC برتری دارد. همچنین شاخص‌های فاصله از رودخانه، ژئومورفولوژی، کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، لیتولوژی و درصد شیب را به‌عنوان مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر فرسایش خندقی تشخیص دادند.

در کشور ما با وجود وسعت زیاد مناطق تحت تأثیر فرسایش خندقی و با توجه به خطرات ناشی از این نوع فرسایش برای منابع خاک و آب، تعیین پتانسیل مناطق به فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز بسیار ضروری به‌نظر می‌رسد.

بیشتر مناطق استان کرمانشاه و به‌ویژه دشت‌های زراعی استان با کاربری دیم‌زار و همچنین تشکیلات مارنی در مناطقی نظیر قصرشیرین تحت تأثیر فرسایش خندقی قرار دارد. دلایل ایجاد خندق‌ها در استان می‌توان عواملی از جمله فرسایش‌پذیری خاک، شدت بارندگی، شیب، تبدیل اراضی مرتعی به اراضی دیم زراعی، تخریب پوشش گیاهی اعم از جنگلی و مرتعی، و تجمع رواناب به‌دلیل جاده‌سازی نامناسب، فعالیت‌های معدن و اقدامات غیراصولی کشاورزی از جمله شخم را برشمرد. تا زمان انجام مراحل این تحقیق مطالعه جامع و کاملی که ضمن جانمایی و پهنه‌بندی عرصه‌های بحرانی از نظر فرسایش خندقی، ویژگی‌های خندق‌ها و فرسایش خندقی استان را احصاء نماید و آستانه‌های شروع فرسایش خندقی را در استان مشخص نماید انجام نشده است. لذا پژوهش حاضر با هدف پهنه‌بندی عرصه‌های خندقی در استان و همچنین اولویت‌بندی آب‌کندهای استان از نظر میزان خسارات و نیز تعیین عوامل مؤثر در ایجاد و گسترش خندق‌ها طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه عرصه جغرافیایی استان کرمانشاه با وسعت حدود ۲۴۶۲۲/۶۲۳ کیلومتر مربع بوده و در محدوده بین طول‌های

1. Random Forest
2. Maximum Entropy
3. Linear and Logistic Regression
4. Artificial Neural Network
5. Support Vector Machine

6. Nwankwo

7. Abia

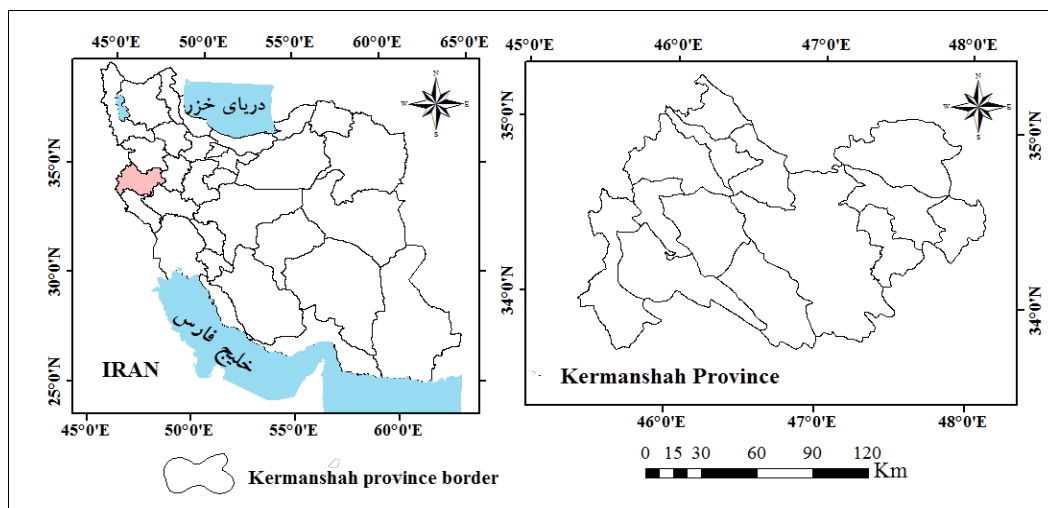
جغرافیایی ۴۵ درجه ۲۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی و عرض‌های ۳۲ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی واقع شده است. (شکل ۱). ارتفاع متوسط آن از سطح دریاهای آزاد حدود ۱۲۰۰ متر است.

اولین مرحله مطالعه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی شناخت و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به عواملی است، که در وقوع این نوع فرسایش نقش مؤثری دارند. گردآوری اطلاعات به صورت میدانی، کتابخانه‌ای و مراجعه به اداره کل منابع طبیعی استان کرمانشاه صورت گرفته است. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی، بر اساس مرور منابع و شرایط منطقه مورد مطالعه عبارتند از:

ارتفاع: تغییرات ارتفاع موجب تغییرات بارندگی می‌شود و در نتیجه بر میزان هوازدهی و میزان نفوذ آب تأثیرگذار خواهد بود و از این طریق فرسایش خندقی را کنترل می‌کند [۳۳]. لایه مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از نقاط ارتفاعی و خطوط تراز در ابعاد ۳۰*۳۰

متر تهیه شد.
شیب: لایه شیب یکی از پارامترهای توپوگرافی خیلی مهم در کنترل وقوع فرسایش آبکندی است و شیب‌های ملایم برای تجمع جریان‌های سطحی و در نتیجه فرسایش آبکندی مساعد می‌باشند [۲۱]. نقشه شیب منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه DEM در محیط سامانه داده‌های مکانی ArcGIS و با استفاده از تابع Slope، تهیه گردید.

جهت شیب: جهت شیب بر میزان دریافت بارندگی، تبخیر و تعرق و میزان رطوبت اثرگذار است و بر همین اساس نوع پوشش گیاهی و توزیع آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴۰]. شاخص طول شیب نیز به نوعی بر فرسایش آبکندی تأثیرگذار است و طول شیب‌های بیشتر باعث گسترش بیشتر فرسایش آبکندی می‌شوند [۴]. نقشه جهت شیب منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه DEM و در نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از تابع Aspect، تهیه گردید.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig1. Geographical location of the study area



شکل ۲- نمونه‌ای از فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه

Fig 2. An example of Gully erosion in the study area

شاخص RSP: این شاخص نشان‌دهنده موقعیت شیب هر سلول و موقعیت نسبی آن بین کف دره تا خط‌الراس است (رابطه ۲).

$$RSP = \left(\frac{Z(s) - Z(s)_v}{Z(s)_r - Z(s)_v} \right) \times 100 + 0.5 \quad (2)$$

که در آن $Z(s)$: ارتفاع؛ $Z(s)_v$: ارتفاع دره؛ $Z(s)_r$: ارتفاع خط‌الراس.

روش پژوهش

از مجموع خندق‌های مورد بررسی در تحقیق، ۷۰ درصد به صورت تصادفی، به‌عنوان داده‌های آزمون و ۳۰ درصد به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی طبقه‌بندی شدند و در مرحله بعد تست هم خطی بین پارامترها با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام گردید. با استفاده از شاخص‌های ضریب تحمل (Tolerance) و عامل تورم واریانس (VIF) در صورت وجود هم خطی بین پارامترها ($Tolerance < 0.1$ و $VIF > 5$) از روند مدل‌سازی حذف خواهند شد [۲۸ و ۲۰].

مدل‌های آماری و سایر روش‌ها در مطالعات خندق‌ها علاوه بر موقعیت‌های وقوع فرسایش خندقی، نیازمند موقعیت‌های عدم وقوع فرسایش خندقی نیز هستند. از آنجا که یافتن نقاط غیرمستعد فرسایش خندقی و اطمینان از این عدم استعداد مشکلات زیادی در مطالعات در پی خواهد داشت، استفاده از مدل MaxEnt به‌عنوان روشی که فقط وابسته به نقاطی هستند که مستعد فرسایش خندقی هستند، می‌تواند منجر به حذف بسیاری از ناکارآمدی‌ها و عدم قطعیت ناشی از نقاط عدم حضور گردد. روش حداکثر آنتروپی از روش‌های یادگیری ماشینی است در سال‌های اخیر در زمینه‌های مختلف منابع طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است.

مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt)

مدل حداکثر آنتروپی یکی از روش‌های یادگیری ماشینی است که قابلیت پیش‌بینی مکانی بالایی در زمینه‌های مختلف علوم محیطی دارد [۲۹]. مدل قادر است توزیع احتمالاتی داده‌های هریک از لایه‌های رستری مربوط به عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش آبکندی را استخراج نماید. آنتروپی این توزیع‌ها بر اساس رابطه (۳) قابل محاسبه است [۳۰]:

$$H(\hat{\pi}) = - \sum_{x \in X} \hat{\pi}(x) \ln \hat{\pi}(x) \quad (3)$$

که در آن $H(\hat{\pi})$ مقدار آنتروپی توزیع احتمالاتی متغیر موردنظر، $\ln$ لگاریتم طبیعی، x مقدار ارزش هر سلول و X مجموعه‌ای از داده‌های یک لایه رستری است. به‌منظور تعیین رابطه وقایع فرسایش آبکندی، برای هریک از عوامل مؤثر بر تولید آبکند، باید بسط "اصل آنتروپی" و استخراج منحنی‌های پاسخ یادگیری ماشینی صورت گیرد [۳۰]. در این تحقیق همبستگی پارامترهای مؤثر بر فرسایش خندقی با نقاط مستعد فرسایش خندقی محاسبه و با همبستگی متغیرها با نقاط تصادفی از منطقه به‌عنوان نقاط زمینه یا شبه عدم حضور مقایسه گردید. استفاده از مدل MaxEnt به‌عنوان یک روشی که فقط وابسته به نقاطی هست که مستعد فرسایش خندقی هستند، می‌تواند منجر به حذف بسیاری از ناکارآمدی‌ها و عدم قطعیت ناشی از نقاط عدم حضور گردد [۳۰]. همچنین یکی از مهم‌ترین مزایای به‌کارگیری

لیتولوژی: نوع سنگ‌شناسی و سازندهای موجود عامل بسیار مهمی در وقوع فرسایش آبکندی محسوب می‌شوند و واحدهای سنگی مختلف دارای درجات حساسیت گوناگونی در وقوع فرسایش خندقی هستند [۹]. واحدهای زمین‌شناسی از طریق افزایش و کاهش نفوذپذیری بر وقوع این نوع فرسایش اثر می‌گذارند. واحدهای سنگ شناسی Em شامل مارن، سنگ آهک، توف و واحد سنگ شناسی M2 شامل ماسه سنگ، شیل و کنگلومرا از سازندهای دوران سنوزوئیک (دوره میوسن) به‌ترتیب دارای بیشترین میزان مناطق تحت تأثیر فرسایش خندقی می‌باشند. لایه لیتولوژی با استفاده نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده از سازمان زمین‌شناسی، تهیه گردید.

کاربری اراضی: نتایج حاصل از مطالعات انجام شده درباره عوامل مؤثر در رخداد فرسایش خندقی نشان‌گر این است که کاربری اراضی بر روی رواناب سطحی و میزان نفوذ آب اثرگذار است و از طریق مقدار نفوذ بر وقوع فرسایش خندقی تأثیرگذار است و پوشش گیاهی نقش مهمی در پایداری دامنه دارد [۱۱]. نقشه کاربری منطقه از اداره کل منابع طبیعی استان کرمانشاه تهیه گردید سپس با کمک Google Earth و تفسیر عکس‌های هوایی و بازدید میدانی تکمیل گردید.

تراکم آبراهه: لایه‌های تراکم آبراهه بر اساس نقشه آبراهه‌ها در منطقه و با استفاده از تابع Line Density در نرم‌افزار ArcGIS بدست آمدند. تراکم آبراهه بیشتر باعث کاهش نفوذپذیری، رواناب بیشتر و به تبع آن اثر بر حساسیت فرسایش خندقی از طریق افزایش قدرت جریان دارد [۱۰].

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI): شاخص رطوبت توپوگرافیکی ابزاری مفید و رایج برای توصیف شرایط رطوبتی در مقیاس حوضه می‌باشد که می‌تواند تأثیر توپوگرافی را بر روی تولید رواناب به‌صورت کمی بیان کند [۸]. این شاخص یک پارامتر ساده ریاضی از وضعیت رطوبت خاک است. این شاخص گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از حوضه و تمایل نیروهای گرانشی به انتقال آب به پایین دست را توصیف می‌کند. شاخص رطوبت توپوگرافی که از ترکیب مساحت حوضه بالادست و شیب به دست می‌آید، معمولاً برای کمی کردن کنترل توپوگرافی روی فرآیندهای هیدرولوژیکی می‌باشد، که از رابطه ۱ در محیط نرم‌افزار SAGA تهیه گردید.

$$TWI = \ln A_s / \tan \beta \quad (1)$$

A_s : مساحت ویژه حوضه (متر) β : شیب منطقه‌ای (درجه)

شاخص انحناي دامنه: انحناي شیب یکی از عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی می‌باشد. در انحناي شیب، خمیدگی منفی نشان‌دهنده مقعر بودن دامنه، انحناي شیب صفر نشان‌دهنده مسطح بودن دامنه و خمیدگی مثبت نشان‌دهنده محدب بودن دامنه می‌باشد [۳۱].

نتایج

همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد ابتدا تست هم‌خطی بین پارامترها انجام گرفت (جدول ۱). نتایج نشان داد که بین پارامترها هم خطی وجود ندارد و لذا کلیه پارامترها در روند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱- نتایج آنالیز تست هم‌خطی بین پارامترهای مورد استفاده در تحقیق

Table 1. Results of linear test analysis between the parameters used in the research

VIF	Tolerance	parameters
1.023	0.955	Land use
1.078	0.921	Drainage density
1.248	0.874	TWI
1.465	0.796	Lithology
2.173	0.621	Slope direction
2.391	0.513	Slope
2.583	0.442	Height
2.675	0.411	Surface curvature
2.779	0.321	RSP

بررسی پاسخ تغییرات پارامترهای مورد استفاده جهت تعیین مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی و نحوه اثر آن بر روی پیش‌بینی مدل MaxEnt در شکل ۳ ارائه شده است.

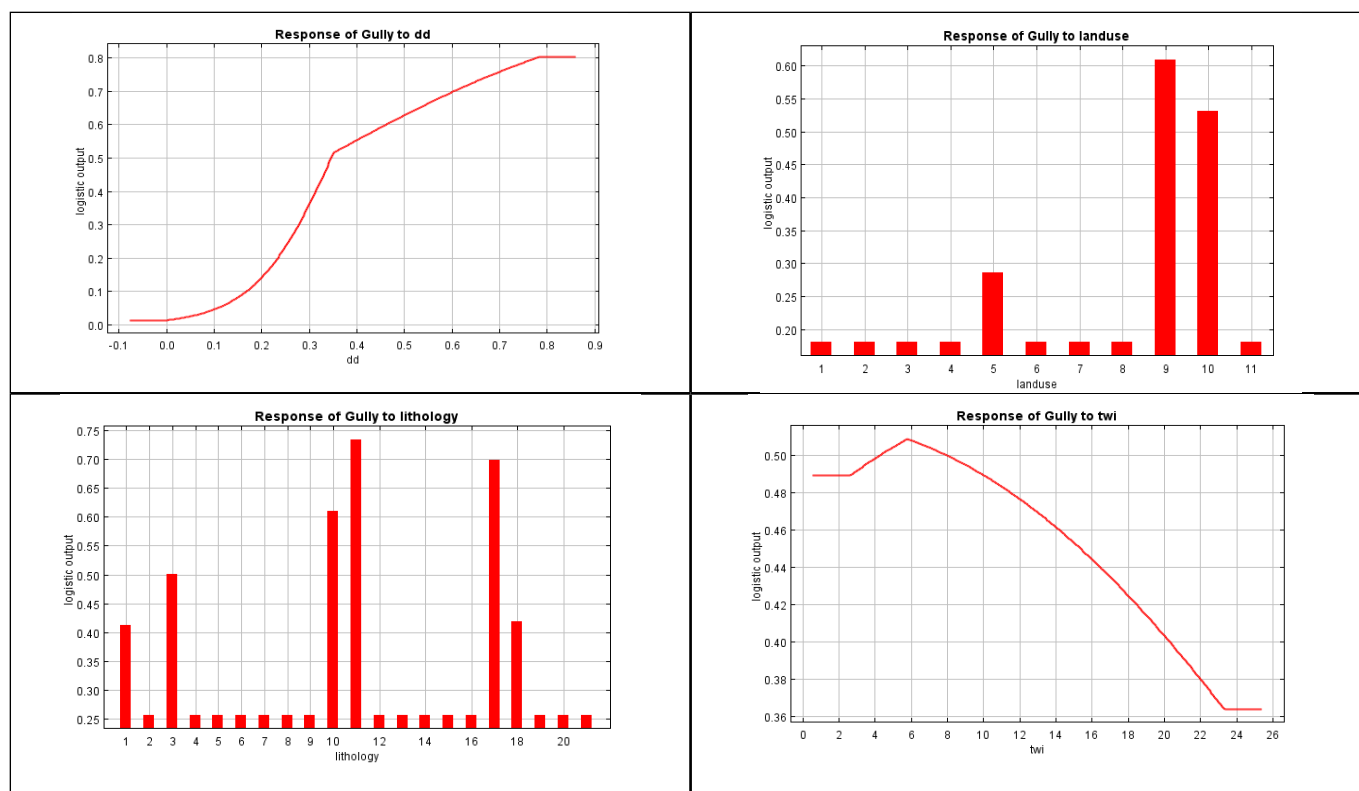
الگوریتم حداکثر آنتروپی به کمک نرم‌افزار MaxEnt، قابلیت این مدل در شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار و تعیین اهمیت نسبی هریک از عوامل مؤثر بر شناسایی مناطق فرسایش خندقی و تحلیل حساسیت مدل به روش Jackknife می‌باشد [۳۰].

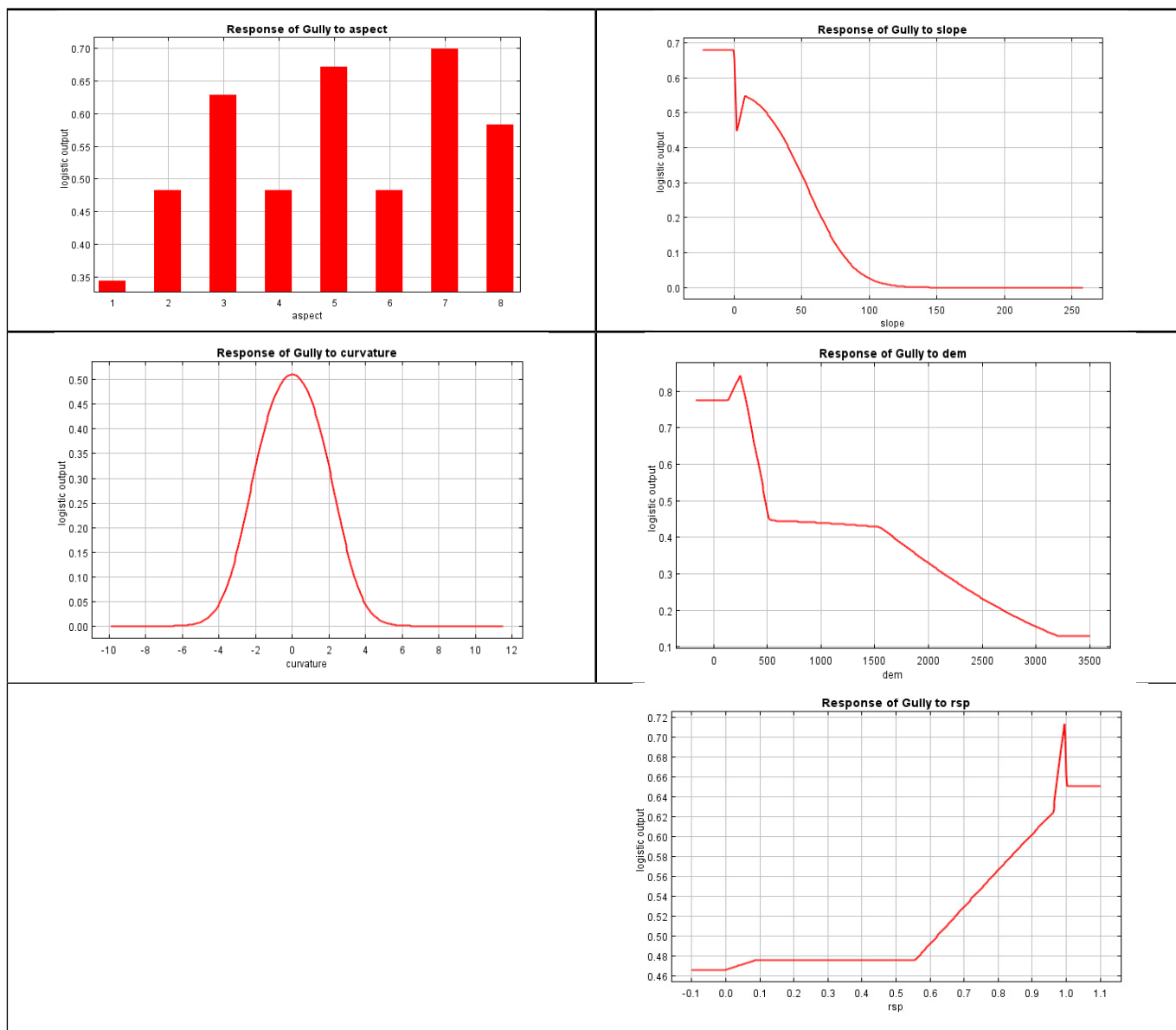
روش Jackknife

در این روش پس از ایجاد مدل کامل با دخالت تمامی متغیرها، مدل‌سازی به تعداد متغیرها تکرار شده و هر بار یکی از متغیرها از روند مدل‌سازی حذف می‌گردد. بدین ترتیب میزان تأثیر هر یک از متغیرها در پیش‌بینی نواحی مطلوب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۳۰].

ارزیابی مدل MaxEnt

ارزیابی این مدل با استفاده از منحنی ROC امکان‌پذیر است، این منحنی به صورت نموداری ارائه می‌شود که در آن احتمال تشخیص صحیح نقاط حضور مدل با احتمال تشخیص صحیح نقاط عدم حضور مورد مقایسه قرار می‌گیرد [۱۴]. و سطح زیر نمودار AUC بدست آمده به عنوان معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقاط حضور و عدم حضور مورد توجه قرار می‌گیرد. این سطح مدلی با قدرت پیشگویی بسیار کم، ۰/۵ و مدلی کامل با قدرت پیشگویی بسیار زیاد دارای AUC به میزان یک خواهد بود. منحنی ROC به صورت پیکسلی نقشه حساسیت را با واقعیت زمینی مورد مقایسه قرار می‌دهد و این نشان‌دهنده آن است که این منحنی خیلی جزئی حساسیت آبکند را بررسی می‌کند. از طرف دیگر منحنی ROC قبل از طبقه‌بندی نقشه‌های حساسیت اعمال می‌شود، لذا خطای طبقه‌بندی در آن اثر ندارد [۶].



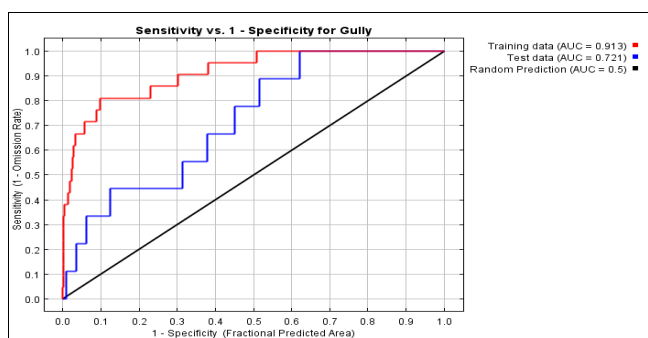


شکل ۳- منحنی پاسخ عوامل مورد استفاده و تأثیر آن بر مدل‌سازی حساسیت فرسایش خندقی
Fig 3. Response curve of the factors used and its effect on Gully erosion sensitivity modeling

طبقه‌های مختلف شیب و خندق‌های بوقوع پیوسته در منطقه نشان می‌دهد که طبقه شیب حدود ۰ تا ۱۰ درصد بیش‌ترین تأثیر را بر وقوع فرسایش خندقی دارد دلیل آن را می‌توان این‌طور بیان کرد که در شیب‌های پایین فرصت نفوذ آب در داخل خاک بیشتر و احتمال ایجاد حفره برای تشکیل خندق‌ها افزایش می‌یابد [۱]. انحنا سطح در بازه ۰-۵ تا صفر باعث افزایش حساسیت وقوع فرسایش خندقی شده است و در خارج از این دامنه با افزایش مقدار عددی انحنا سطح، حساسیت فرسایش خندقی با کاهش همراه بوده است. در تحلیل پیکسل‌های خندق‌دار مرتبط با پروفیل و انحنا، قسمت‌هایی که مورفولوژی مقعر دارند بیش‌ترین حساسیت به خندق را دارا هستند. مورفولوژی مقعر با تمرکز جریان آب و رطوبت می‌تواند

دامنه ارتفاعی منطقه بین ۱۰۹ الی ۳۳۷۲ متر متغیر و از شرق به سمت غرب حوزه ارتفاع کاهش داشته و شمال شرقی دارای بیش‌ترین ارتفاع از سطح دریا و جنوب غربی دارای کم‌ترین ارتفاع از سطح دریا است. پهنه خندقی نفت شهر با ۲۵۰ متر ارتفاع از سطح دریا حداقل ارتفاع و پهنه خندقی تخت‌گاه با ۱۸۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا مرتفع‌ترین پهنه می‌باشد. بر اساس شکل ۳ بیش‌ترین تراکم خندق‌ها در طبقات ارتفاعی کم‌تر از ۵۰۰ متر مشاهده شده است با افزایش ارتفاع، دما کاهش یافته و بارش اغلب به‌صورت برف است و پدیده یخبندان نیز باعث کندی پدیده خاک‌زایی و کاهش فرسایش آبی می‌گردد. بر اساس شکل ۳ و نتایج به دست آمده از تحلیل روابط بین

اساس مدل در مرحله آموزش دقت ۹۱ درصد (عالی) و در مرحله اعتبارسنجی دقت ۷۲ درصد (خیلی خوب) را داشت.



شکل ۵- نتایج مقادیر ROC در بخش آموزش و اعتبارسنجی مدل

Fig5. Results of ROC values in training and model validation

شکل ۶ نقشه نهایی مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی در استان کرمانشاه را نشان می‌دهد. بر اساس این نقشه ۲۸/۴۷ درصد از پهنه حوزه مورد مطالعه دارای پتانسیل حساسیت فرسایش خندقی متوسط رو به بالا می‌باشد. در جدول ۲ مساحت و درصد مساحت هر یک از طبقات حساسیت فرسایش خندقی را نشان می‌دهد. طبقه حساسیت فرسایش خندقی خیلی کم، معادل ۴۸/۱۴ درصد سطح حوزه و طبقه متوسط مساحت معادل ۱۴/۶۶ درصد سطح حوزه را شامل می‌شوند. بر اساس جدول ۲ میزان مساحت حساسیت فرسایش خندقی طبقه زیاد و خیلی زیاد مساحت معادل ۱۴/۰۲ درصد سطح حوزه را شامل می‌شوند.

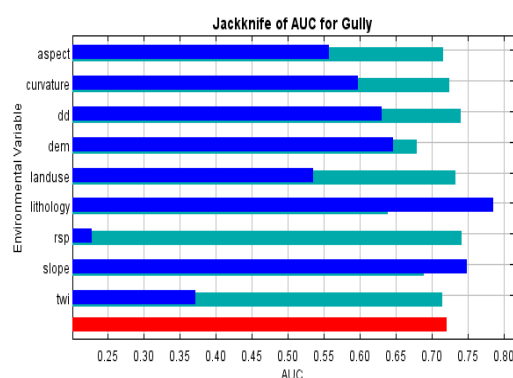
جدول ۲- مساحت و درصد مساحت طبقات حساسیت فرسایش خندقی در حوزه آبخیز کرمانشاه

Table 2. Area and percentage of gully erosion sensitivity classes in the watershed of Kermanshah

درصد مساحت Percentage of area	مساحت (هکتار) Area (hectares)	طبقه حساسیت Sensitivity class
48.14	1187089.6	very little
23.39	576820.4	Low
14.46	356508.4	medium
9.31	229518.2	Much
4.71	116138.1	very much
100	2466074.7	Total

مناطق مستعدی برای ایجاد فرسایش خندقی باشد. نوع کاربری به طور معنی‌داری فرآیندهای فرسایشی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. عموماً سطوح عریان و خالی از پوشش گیاهی در مقابل سطوح پوشیده شده از جنگل که قدرت فرسایش پذیری خاک را پایین می‌آورد فرسایش سریع‌تر و شدیدتری را تجربه می‌کند [۱۲]. در منطقه مورد مطالعه حدود ۷۰ درصد از مناطق تحت تأثیر فرسایش خندقی در کاربری مرتع و ۳۰ درصد در مناطق کشاورزی رخ داده‌اند. منحنی پاسخ تراکم آبراهه نشان داد که با افزایش میزان تراکم آبراهه‌ها در سطح حوزه میزان حساسیت فرسایش خندقی افزایش پیدا می‌کند. از دلایل این امر می‌توان به کاهش زمان تمرکز در سطح حوزه اشاره کرد که هر چقدر تراکم آبراهه افزایش پیدا کند جریان‌های سطحی زودتر تجمع پیدا می‌کنند و باعث افزایش میزان حساسیت فرسایش خندقی می‌شوند. منحنی پاسخ موقعیت شیب نسبی نشان داد که با افزایش موقعیت شیب نسبی میزان حساسیت فرسایش خندقی افزایش پیدا می‌کند. منحنی پاسخ شاخص رطوبت توپوگرافیک نشان داد که بیشترین خندق‌ها در TWI ۳ تا ۶ رخ داده‌اند. نتایج نشان داد شاخص رطوبت توپوگرافی یک رابطه معنی‌دار با فرسایش خندقی دارد.

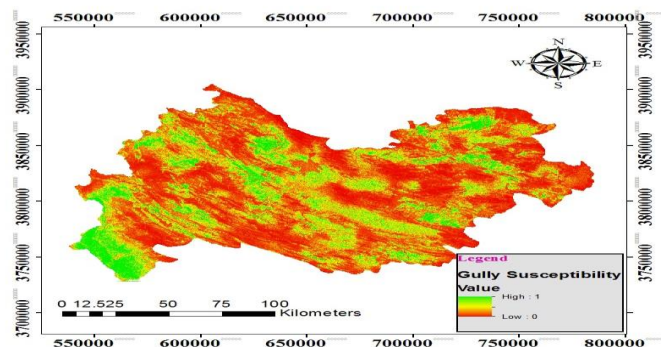
نتایج حاصل از نمودار جکنایف جهت تعیین مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار و سهم هر یک از پارامترها را در پیش‌بینی مدل MaxEnt در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل ۴ لیتولوژی ۷۹ درصد، کاربری اراضی ۵۸ درصد، شیب ۷۴ درصد، ارتفاع ۶۴ درصد، انحنای سطح ۵۹ درصد، شاخص رطوبت توپوگرافی ۳۷ درصد، تراکم آبراهه ۶۷ درصد، شاخص rsp، ۲۰ درصد و جهت شیب ۵۶ درصد در پیش‌بینی مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی تأثیرگذار بوده‌اند.



شکل ۴- نتایج حاصل از آزمون جکنایف جهت تعیین مهم‌ترین پارامترها

Fig 4. Results of the Jackknife test to determine the most important parameters

در مرحله‌ی بعدی اعتبارسنجی مدل با استفاده از منحنی ROC انجام گرفت که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. بر این



شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی در استان کرمانشاه

Fig 7. Zoning map of gully erosion sensitivity in Kermanshah Province

بحث و نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی در استان کرمانشاه با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و ارزیابی آن با استفاده از منحنی ROC صورت گرفت. براساس مطالعات سالیان اخیر، ساز و کار فرسایش خندقی جدا از سایر اشکال فرسایش آبی است و معمولاً در اراضی کم‌شیب (دشت‌ها) شدت فرسایش خندقی چندین برابر اراضی شیب‌دار است [۱۵].

روش‌های جدید به دنبال افزایش دقت و سرعت در ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی، با کمک گرفتن از داده‌های محیطی، توپوگرافی و اقلیمی هستند، در سال‌های اخیر روش‌های سنجش از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی و یادگیری ماشینی در مقایسه با روش‌های زمان‌بر و پرهزینه سنتی در تشخیص مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی، کارایی زیادی داشته‌اند یکی از این روش‌های نوین یادگیری ماشینی روش حداکثر آنتروپی است که در این مطالعه با در نظر گرفتن عوامل محیطی و انسانی تأثیرگذار (در مجموع ۹ عامل) و با استفاده از این روش نقشه حساسیت وقوع زمین‌لغزش استان کرمانشاه تهیه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که عوامل لیتولوژی، شیب، ارتفاع و تراکم آبراهه به ترتیب مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر حساسیت وقوع زمین‌لغزش بودند. بخش مهمی از خندق‌های استان بر روی تشکیلات مارنی با فرسایش پذیری بالا بویژه در مناطق غربی استان قرار دارد. نتایج حشمتی و همکاران [۱۹] نیز نشان داد که از میان ۸ سازند مارنی که در استان کرمانشاه پراکنش دارند، سه سازند امیران، کشکان و آغاچاری به دلیل شرایط توپوگرافی، حساسیت به انحلال و تغییر کاربری، آسیب‌پذیرترین سازندهای مارنی از نظر فرسایش خاک هستند. رابطه بین فرسایش خندقی و ارتفاع (طبقات ارتفاعی) نشان داد که کلاس ارتفاعی پایین‌تر حساسیت بیشتری نسبت به کلاس ارتفاعی بالاتر دارد. و احتمال ایجاد فرسایش خندقی در کلاس‌های پایین‌تر در قسمت

جنوب غربی منطقه مورد مطالعه بیشتر است که این موضوع با نتایج محققان دیگر [۵] مطابقت دارد. نتایج نشان داد که ارتفاع یکی از متغیرهای مهم و تأثیرگذار بر فرسایش خندقی بوده است که در تحقیقات [۲۵ و ۳۳] نیز به اهمیت تأثیر این عامل بر فرسایش خندقی تأکید شده است. نتایج نشان داد که رابطه بین تراکم آبراهه با حساسیت فرسایش خندقی به صورت مستقیم بوده است و با افزایش تراکم آبراهه احتمال رخداد فرسایش خندقی بیشتر شده است که با نتایج تحقیقات مشابه مطابقت دارد و محققان بسیاری، افزایش تراکم آبراهه را یکی از متغیرهای اساسی در فرسایش خندقی تلقی کرده‌اند [۴، ۳۲ و ۳۳]. بررسی نتایج حاصل از واحدهای لیتولوژیکی نشان داد که بیش‌ترین خندق‌ها در تشکیلات مارنی اتفاق افتاده‌اند که این امر نقش رسوبات سست آبرفتی کواترنر را در ایجاد و رشد خندق نشان می‌دهد که با نتایج پژوهش زوکا و همکاران [۴۵] و شادفر و همکاران [۳۶] مطابقت دارد.

نتایج نشان داد که افزایش حساسیت فرسایش خندقی با افزایش شاخص رطوبت توپوگرافی، دارای رابطه مستقیم است. هرچه رطوبت و قدرت جریان بیشتر باشد خندق‌های بیش‌تری رخ می‌دهد و در رابطه با میزان رسوب حمل شده در صورتی که این شاخص به مقدار کم‌تر تا متوسط باشد، با این موضوع مطابقت دارد. نتیجه بیان‌گر این است که در مناطقی که رطوبت و میزان سطوح اشباع افزایش می‌یابد، احتمال رخداد و حساسیت فرسایش خندقی افزایش پیدا می‌کند که با نتایج [۳۷] مبنی بر اهمیت و تأثیر این شاخص بر احتمال رخداد فرسایش خندقی مطابقت دارد. نتایج نشان داد که کاربری مرتع و کشاورزی دارای بیشترین احتمال رخداد فرسایش خندقی هستند. عدم وجود پوشش گیاهی در کاربری‌های مذکور احتمال رخداد این نوع فرسایش را افزایش داده است که با نتایج پژوهش ذاکری نژاد [۴۴] مطابقت دارد. و محققان دیگر نیز در تحقیقاتشان، بر اهمیت نقش متغیر کاربری بر احتمال رخداد فرسایش خندقی تأکید داشته‌اند [۲۵، ۱۸، ۳۲ و ۳۵]. نتایج نشان داد که طبقه شیب ۰ تا ۱۰ درصد بیش‌ترین تأثیر را بر وقوع فرسایش خندقی دارد دلیل آن را می‌توان این‌طور بیان کرد که در شیب‌های پایین فرصت نفوذ آب در داخل خاک بیشتر و احتمال ایجاد حفره برای تشکیل خندق‌ها افزایش می‌یابد [۲] ولی در شیب‌های تند نیز به دلیل ضعیف بودن فرآیند خاک‌سازی و استحکام سازندها، احتمال وقوع فرسایش خندقی کم می‌باشد [۳۴]. ثروتی و همکاران [۳۴] شیب ۱۰-۰ و نوحه گر و همکاران [۲۶] شیب ۶-۰ را مؤثرترین درصد شیب بر وقوع فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی خویش معرفی کردند که نتایج آنها با تحقیق حاضر در وقوع فرسایش خندقی در شیب‌های پایین مطابقت دارد.

منحنی ROC رسم شده نشان داد که دقت مدل در برآورد مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی هم در مرحله آزمون و هم در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب عالی و خیلی خوب بوده است که بر اساس نظر فیلیپس و همکاران [۳۰] به معنای عملکرد عالی مدل

erosion susceptibility mapping in toroud watershed using data-driven Evidential Belief Function method. *Journal of Range and Watershed Management*, 71(1), 97-114. (In Persian).

6. Asadi nalivan, O. Shahbazi, A. Vakili tajareh, F. Alvandi, E and Bayat, A. 2021. Assessment of Artificial Neural Network Models and Maximum Entropy in Zoning of Gully Erosion Sensitivity of Golestan Dam Basin. *Journal of Watershed Management Science & Engineering*. 15 (52) :12-23.

7. Azareh, A., Rahmati, O., Rafiei, E., Sankey, J., Lee, S., Shahabi, H. and Ahmad, B. 2019. Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran: Investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models. *Science of the Total Environment*, 655, 684–696.

8. Azimpoormoghadam, V. 2015. Landslide risk zoning using Bayesian and Dempster-Schiffer theory (Case study: Part of Babolrood watershed). Master Thesis. Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources. Sari University.

9. Conforti, M., Auccelli, P.P.C., Robustelli, G. and Scarciglia, F. 2011. Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy). *Natural Hazards*, 56, 881–898.

10. Conoscenti, C., Agnesi, V., Cama, M., Caraballo-Arias, N.A. and Rotigliano, E. 2018. Assessment of gully erosion susceptibility using multivariate adaptive regression splines and accounting for terrain connectivity. *Land Degradation and Development*, 29, 724–736.

11. Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V. and Märker, M. 2014. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: a case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, 204, 399–411.

12. Dai, F. C. Lee, C. F. Xu, Z.W. 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environment Geology* 40, 381-391.

13. Dube, F. Nhapi, I. Murwira, A. Gumindoga, W. Goldin, J. Mashauri, D. A. 2014. Potential of weight of

می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که مدل MaxEnt توانایی بالایی در تعیین مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی دارد محققان دیگر از جمله اسدی و همکاران [۶]، پاندی و همکاران [۲۸] نیز توانایی این مدل را تأیید کرده‌اند. علاوه بر عوامل طبیعی نظیر لیتولوژی برخی عوامل انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی نقش مهمی بر وقوع فرسایش خندقی دارد که جهت کاهش نسبی خطرات لازم است از تغییر کاربری اراضی به‌عنوان محرک فرسایش خندقی اجتناب نمود. در منطقه‌ی مورد مطالعه اقدامات نادرست کشاورزی نظیر شخم در جهت شیب، از عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی می‌باشد لذا برای کنترل این خندق‌ها با توجه به حساسیت خاک مناطق به فرسایش توصیه می‌گردد از اجرای طرح‌های بیولوژیکی و بیومکانیک استفاده شود. در بعضی از مناطق خندقی کشت دیم از عملکرد پایین برخوردار است، پیشنهاد می‌گردد از این اراضی جهت کشت گونه‌های علوفه‌ای و گیاهان دارویی پایا به‌منظور تقویت خاک سطحی و کاهش رواناب سطحی و اقتصادی بودن آن استفاده شود. می‌توان طرح‌های تحقیقی - ترویجی در چنین مناطقی شروع نمود تا نتایج بررسی و بهره‌برداران بتوانند در بلند مدت، اراضی را حفظ و استفاده نمایند. همچنین ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی با روش حداکثر آنتروپی جهت تعیین مناطق دارای حساسیت فرسایش خندقی مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه مثل ایران که دسترسی به اطلاعات و داده‌ها با محدودیت مواجه هستند پیشنهاد می‌گردد.

منابع

1. Abbasi, M. 2008, Investigating the Factors Affecting Gully Erosion in Qom Province Case Study (Rahjerd Basin). *Scientific Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*. 17(66):32-34. (In Persian).

2. Abbasi, M. 2008. Zoning of Sensitivity of Lands of Qom Zavarian Basin to Gully Erosion, Master Thesis in Natural Geography, majoring in Geomorphology in Environmental Planning, Faculty of Geography, University of Tehran.

3. Ahmadi, H. 2011. *Applied Geomorphology (Water Erosion)*, University of Tehran Press, Fifth Edition, 688 p. (In Persian)

4. Arabameri, a., Cerda, A. and Tiefenbacher, J. 2019. Spatial Pattern Analysis and Prediction of Gully Erosion Using Novel Hybrid Model of Entropy-Weight of Evidence. *Water*, 11, 1129

5. Arabameri, A., Rezaei, K. and Yamani, M. 2018. Analysis of Geo-environmental parameters and gully

of loess plateau in China based on digital elevation model. *China Geographic Science*, 24(3), 328–338.

22. Knisel, W.G. 1980. CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. US Department of Agriculture. Conservation research report (USA), 26, 474–485.

23. Kumar, B.M. and Nair, P.K.R. 2006. Tropical homegardens: a time-tested example of sustainable agroforestry. Springer Science, Dordrecht, 380 p.

24. Marden, M., A. Gregory. A. Seymour and R. Hambling. 2012. 102- Marden., History and distribution of steep land gullies in response to land use change, East Coast Region, North Island, New Zealand, *Geomorphology*, 154: 81-90.

25. Mehraban, M., Golkarian, A. and Khosravi, K. 2018. Evaluation of susceptibility to gully erosion using maximum entropy model (Case study: Shorlough region of Khorasan Razavi province). Third National Conference on Soil Conservation and Watershed Management, Soil Conservation and Watershed Management Institute, Tehran, Iran. (In Persian)

26. Nohegar, A and Heidarzadeh, M. 2011. Study of Physico-Chemical Characteristics and Morphometry of Trench Areas Case Study, Goziri, Hormozgan Province, *Erosion Research Environmental*, No1. (In Persian).

27. Nwankwo, C. and Nwankwoala. HO. 2018. Gully Erosion Susceptibility Mapping in Ikwuano Local Government Area of Abia State, Nigeria Using GIS Techniques. *Earth Sciences Malaysia*. 2(1): 8-15.

28. Pandey, V.K., Pourghasemi, H.R., Sharma, M.C. 2018. Landslide susceptibility mapping using maximum entropy and support vector machine models along the Highway Corridor, Garhwal Himalaya. *Geocarto International*. DOI:10.1080/10106049.2018.1510038.

29. Park, N.W. 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environmental Earth Sciences*, 73, 937-949.

30. Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*, 190, 231–259.

evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District–Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 67: 145-152.

14. Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudik, M., Chee, Y.E. and Yates, C.J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Divers Distribution*, 17(1), 43–57.

15. Feyznia, S. Heshmati, M. Ahmadi H. and Qudussi, J. 2007. Study of gully erosion of Marni Aghajari Formation In Qasr Shirin region, research and construction in natural resources, Nos. 40: 32-74. (In Persian).

16. Flanagan, D.C. and Nearing, M.A. 1995. USDA-water erosion prediction project: hill slope profile and watershed model documentation. NSERL Report #10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.

17. Ghorbani Nejad, S., Rahmati, O. and Noormohammadi, F. 2017. Modeling the Potential of Gully Erosion Occurrence Applying Shannon Entropy and Statistical Index Models in Seymareh Region. *Environmental Erosion Research*, 7(1), 25, 69–89. (In Persian)

18. Gornami, R. and Shadfar, S. 2019. Application of the GIS in the Determination of Susceptible Areas to Gully Erosion Using the Analytic Network Process (ANP). *Watershed Management Research*, 31(4), 121, 58-68. (In Persian)

19. Heshmati, M. Qeytouri, M. Parvizi, Y. and Heshmati, S. 2015. The role of smectite mineral in landslide and gully erosion on Kashkan detrital formation in Merck basin of Kermanshah province. *Watershed Management Research (Research and Construction)*, 28 (109): 93-103. (In Persian).

20. Hong, H., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chen, W., Chapi, K., Ahmad, B., Shadman, M., Yari, A., Tian, Y., Bui, D. 2019. Landslide susceptibility assessment at the Wuning area, China: a comparison between multi criteria decision making, bivariate statistical and machine learning methods. *Natural Hazards*. 96, 173-212.

21. Hongchun, Z.H.U., Guoan, T., Kejian, Q. and Haiying, L. 2014. Extraction and analysis of gully head

39. Vente, J.d., Poesen, J., Verstraeten, G., Rompaey, A.V. and Govers, G. 2008. Spatially distributed modeling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Global and Planetary Change*, 60: 393–415.
40. Wang, L., Wei, S., Horton, R. and Shao, M.A. 2011. Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the loess plateau of china. *Catena*, 2011, 87, 90–100.
41. Willgoose G, Bras RL, Rodriguez-Iturbe I. Results from a new model of river basin evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*. 1991 May 1; 16(3):237-54.
42. Zakeri nejad, R. 2018. Gully erosion zoning using maximum entropy model and GIS; Case study of the south of Semirom city, the third national conference on the application of advanced models of spatial analysis (remote sensing and GIS) in land management, Yazd, <https://civilica.com/doc/971839>. (In Persian).
43. Zakeri nejad, R. 2020. Evaluation of digital elevation models to prepare a gully erosion potential map using Maxent model and GIS (Case study: Semirom watershed, south of Isfahan province). *Remote Sensing and GIS in Natural Resources (Application of Remote Sensing and GIS in Natural Resources Science)*, 11 (3), 21-22. (In Persian).
44. Zakeri nejad, R. and Maerker, M. 2015. An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Nat Hazards*, doi: 10.1007/s11069-015-1700-3.
45. Zucca, C. Canu, A. Della Peruta, R. 2006. Effects of land use and landscape on spatial distribution and morphological features of gullies in an agro-pastoral area in Sardinia (Italy). *Catena* 88: 87–95.
31. Pradhan B. 2011. “Use of GIS-based fuzzy logic relations and its cross application to produce landslide susceptibility maps in Malaysia”, *Environmental Earth Sciences* 63:329–349.
32. Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. and Noormohammadi, F. 2016. Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Natural Hazards*, 82, 1231-1258.
33. Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. and Feizizadeh, B. 2017. Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework. *Science of the Total Environment*, 579, 913–927.
34. Servati, M.R. Qudusi, J. Dadkhah, M. 2008. Factors affecting formation and spread of gully erosion in loesses, 21(1): 20 - 33. (In Persian).
35. Shadfar, S. 2016. Identifying the gully erosion potential by using artificial neural network (ANN), case study: Troud Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 8(3), 256-263. (In Persian)
36. Shadfar, Samad, 2011, Study of gully erosion using hierarchical analysis method in Rudbar city of Gilan province, *Quarterly Journal of Environmental Research*, First year, Third issue, University Hormozgan, pp. 30 - 16. (In Persian).
37. Shit, P.K., Paira, R., Bhunia, G. and Maiti, R. 2015. Modeling of potential gully erosion hazard using geo-spatial technology at Garbheta block, West Bengal in India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1(1–2), 1–16.
38. Tien Bui, D., Shirzadi, A., Shahabi, H., Chapi, K., Omidvar, E., Thai Pham, B., Talebpour, D., Khaledian, H., Pradhan, B., Panahi, M., Ahmad, B., Rahmani, H, Grof, G. and Lee, S. 2019. A Novel Ensemble Artificial Intelligence Approach for Gully Erosion Mapping in a Semi-Arid Watershed (Iran). *Sensors*, 19, 2444.

Prioritization of Effective Factors on Gully Erosion and Determination of Sensitive Areas in Kermanshah Province Using MaxEnt Model

Kh. Shahbazi¹ and F. Vakili Tajareh²

Received: 17-06-2021 Accepted: 22-09-2021

Abstract

The aim of this study was to determine the areas sensitive to gully erosion and prioritize the factors affecting it in Kermanshah province, using the maximum entropy method (MaxEnt model). 9 factors affecting gully erosion potential in the area Including Elevation, Slope, Slope Direction, Lithology, Land Use, Topographic Moisture Index, Surface Curvature, Drainage Density and RSP was reviewed. Of the total gullies studied in the study, 70 percent were randomly classified as test data and 30 percent as validation data. To determine the most important parameters, the Jackknife diagram and the relative performance detection curve ROC were used to predict the model. The results showed that there is no alignment between the factors used. According to the Jackknife diagram, the lithological layers, slope, height and drainage density were the most important factors influencing the susceptibility of gully erosion, respectively. ROC curve showed 91percent accuracy of the maximum entropy method in the training phase and 72 percent in the validation phase. According to the moat susceptibility zoning map, about 23.39 percent of the area has low sensitivity, 48.14 percent very low, 9.31percent high and 4.71percent very high and 14.46 percent has moderate sensitivity.

Keywords: *Gully erosion, Kermanshah, Maximum entropy, Zoning*

1. Corresponding Author and Assistant Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: khosrw_shahbazi@yahoo.com

2. Ph.D Student in Watershed Science and Engineering, Reclamation of Arid and Mountainous Regions Department, Faculty of Natural Resources, University of Tehran.