

## تحلیل متغیرهای محیطی به منظور تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی در حوضه طرود با روش شواهد وزن قطعی

❖ علیرضا عرب عامری\*؛ دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تربیت مدرس

❖ خلیل رضایی؛ استادیار دانشگاه خوارزمی

❖ مجتبی یمانی؛ استاد دانشگاه تهران

### چکیده

فرسایش خندقی یکی از فرآیندهای فرساینده سطح زمین است که عمدتاً باعث تغییر شکل سطح زمین و ایجاد خسارت شدید محیطی و اقتصادی می‌گردد. هدف از این پژوهش مدل‌سازی بین متغیرهای محیطی مؤثر در فرسایش خندقی موجود در منطقه مطالعاتی و تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی با روش داده محور شواهد وزن قطعی در حوضه طرود که دارای حساسیت بالایی نسبت به فرسایش خندقی است، می‌باشد. در ابتدا نقشه پراکنش خندق‌ها با استفاده از عملیات میدانی تهیه گردید و از ۸۰ مورد شناسایی شده، ۷۰ درصد (۵۶ خندق) به طور تصادفی به منظور مدل‌سازی و بقیه ۳۰ درصد (۲۴ خندق) برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. در جریان مدل‌سازی اگر بین متغیرها همبستگی بالایی وجود داشته باشد دقت مدل کاهش پیدا می‌کند، بدین‌منظور تست هم‌خطی بین متغیرهای وابسته انجام گرفت. ضریب تحمل یک شاخص مهم برای محاسبه تست هم‌خطی می‌باشند. در نهایت ۱۵ متغیر شامل شاخص‌های ژئومورفومتری، زمین‌شناختی، محیطی و هیدرولوژیک به منظور مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. در جریان مدل‌سازی با روش شواهد وزن قطعی چهار رابطه قطعیت (Bel)، عدم قطعیت (Dis)، عدم اطمینان (Unc) و احتمال (Pls) محاسبه گردید و از تابع قطعیت برای تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی استفاده گردید. به منظور اعتبارسنجی مدل از مساحت زیرمنحنی AUC استفاده گردید و مقادیر نرخ پیش‌بینی و نرخ موفقیت برای مدل محاسبه گردید. طبق نتایج روش شواهد وزن قطعی با نرخ پیش‌بینی ۱ و نرخ موفقیت ۰/۹۵۹ دارای دقت عالی بوده و قابلیت فوق‌العاده‌ای در شناسایی مناطق حساس به فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی داشته است. نتایج نشان داد که ۲۱/۷۹ درصد (۹۰/۸۴ کیلومتر مربع) از سطح منطقه مطالعاتی در کلاس حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است.

کلید واژگان: خندق، متغیرهای محیطی، شواهد وزن قطعی، منحنی ROC، حوضه طرود

## ۱. مقدمه

فرسایش آبی به عنوان بخشی از چرخه زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیک سیستم زمین است [۱۸]. فرسایش خندقی به عنوان مخرب‌ترین نوع فرسایش آبی یکی از مشکلات جدی جهت مدیریت منابع طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شود که باعث تخریب شدید زمین و ایجاد خسارات اقتصادی گسترده در این مناطق می‌گردد [۱]. این پدیده باعث انواع مختلف خسارات به زیرساخت‌ها، منابع طبیعی و زمین‌های کشاورزی می‌گردد [۴ و ۳۷]. همانند دیگر خطرات طبیعی مانند سیل، زمین‌لغزش، زلزله و غیره پیش‌بینی فرسایش خندقی بسیار مشکل می‌باشد و نیازمند پایش دقیق است [۳۰]. به منظور درک بهتر مکانیزم و تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی، تهیه نقشه پراکنش فرسایش خندقی لازم است. توپوگرافی، شبکه زهکشی، لیتولوژی، بارندگی، کاربری اراضی/پوشش سطحی و خصوصیات خاک به عنوان متغیرهای محیطی مرتبط با کنترل شرایط بحرانی در زمینه رخداد و توسعه فرسایش خندقی شناخته شده‌اند [۲۱]. نقشه پراکنش فرسایش خندقی و نقشه حساسیت فرسایش خندقی به منظور حفاظت از منابع آب و خاک و ارزیابی رابطه بین ایجاد فرسایش خندقی و متغیرهای زمین محیطی مؤثر در ایجاد آن ضروری می‌باشند. در مقایسه با دیگر اقدامات حفاظت آب و خاک، پایش فرسایش خندقی و ایجاد نقشه حساسیت آن با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی ارزان‌تر و سریع‌تر است [۱۹]. از نقطه نظر کاهش رخداد فرسایش خندقی و توسعه پایدار، مدل‌های زیادی وجود دارند که به‌وسیله ایجاد رابطه آماری بین متغیرهای مؤثر و پراکنش فضایی خندق‌ها باعث شناسایی مناطق حساس به فرسایش خندقی و تهیه نقشه حساسیت فرسایش

خندقی می‌گردند. از جمله این روش‌ها می‌توان به رگرسیون لجستیک<sup>۱</sup> [۱۳]، ارزش اطلاعات<sup>۲</sup> [۳]، وزن واقعه<sup>۳</sup> [۶]، نسبت فراوانی<sup>۴</sup> [۲۶]، رگرسیون چندمتغیره<sup>۵</sup> [۸]، جنگل تصادفی<sup>۶</sup> [۱۲]، حداکثر آنتروپی<sup>۷</sup> [۶]، شبکه عصبی مصنوعی [۲۴]، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی<sup>۸</sup> [۲۹]، و تکنیک اطلاعات مکانی<sup>۹</sup> [۱۶] اشاره کرد. [۶] به تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از روش‌های دو متغیره نسبت فراوانی و وزن واقعه در قسمت شمالی ایلام پرداختند. بدین‌منظور از متغیرهای لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از آبراهه، بافت خاک، جهت شیب، درجه شیب، شکل شیب، شاخص خیزی توپوگرافی، تراکم آبراهه و طبقات ارتفاعی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل نسبت فراوانی با مساحت زیر منحنی ۷۸/۱۱ درصد دارای توانایی و کارایی بالاتری نسبت به مدل وزن واقعه در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی است. [۲۴] به ارزیابی عملکرد روش‌های داده محور ترکیبی و انفرادی به منظور تهیه نقشه فرسایش خندقی با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، ماشین‌های بردار پشتیبان و حداکثر آنتروپی پرداختند. بدین منظور از ۱۶ متغیر محیطی شامل ارتفاع، بارندگی سالیانه، درجه شیب، جهت شیب، طول شیب، شکل شیب، انحنای مقطع، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، کاربری اراضی/پوشش سطحی، لیتولوژی، بافت خاک و واحدهای هیدرولوژی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که روش‌های ترکیبی دارای

<sup>1</sup> Logistic Regression

<sup>2</sup> Information Value

<sup>3</sup> Weight of Evidence

<sup>4</sup> Frequency Ratio

<sup>5</sup> Multivariate Regression

<sup>6</sup> Random Forest

<sup>7</sup> Maximum entropy

<sup>8</sup> Analytical Hierarchy Process

<sup>9</sup> Spatial information technology

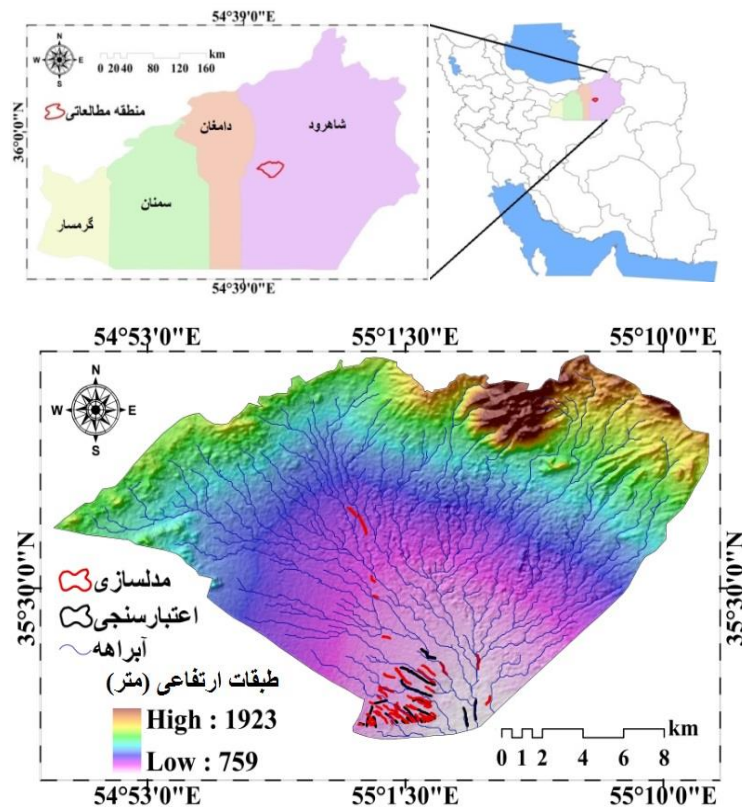
## ۲. روش شناسی

### ۱.۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز طرود در ۱۳۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان شاهرود در استان سمنان واقع شده است. این حوضه با وسعت ۴۱۷/۶۲ کیلومتر مربع در مختصات جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه و ۳۶ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۳۷ دقیقه و ۵۵ ثانیه عرض شمالی و ۵۴ درجه و ۴۹ دقیقه و ۵۵ ثانیه تا ۵۵ درجه و ۱۱ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول شرقی واقع شده است. حداقل ارتفاع منطقه ۷۵۹ و حداکثر آن ۱۹۲۳ متر می‌باشد. کمینه بارندگی در منطقه ۸۱ میلی‌متر و بیشینه آن ۱۰۲ میلی‌متر است. مهم‌ترین سکونت‌گاه موجود در منطقه روستای طرود است که در قسمت جنوبی حوضه واقع شده است. از مهم‌ترین سازندهای موجود در منطقه می‌توان به سازندهای کرج و سازند قرمز بالایی اشاره کرد.

کارایی بالاتری نسبت به روش‌های انفرادی در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی هستند.

مهم‌ترین اهداف این پژوهش عبارتند از محاسبه تست هم‌خطی بین متغیرهای زمین محیطی مؤثر در فرسایش خطی و انتخاب متغیرهای مناسب، ارزیابی توانایی مدل وزن شواهد قطعی در شناسایی و پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی و نهایتاً اعتبارسنجی مدل با استفاده از منحنی ROC. با وجود اینکه فرسایش خندقی یکی از مشکلات محیطی در منطقه طرود است تاکنون در زمینه ارزیابی و تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی هیچ تحقیقی در این منطقه صورت نگرفته است. طبق نتایج حاصل از مرور ادبیات تحقیق، استفاده از مدل شواهد وزن قطعی نیز در ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی دارای نوآوری بوده و تاکنون تحقیقی در این زمینه با این روش صورت نگرفته است.



شکل ۱. موقعیت منطقه

## ۲،۲. روش تحقیق

رویکرد روش شناختی به کار رفته در این پژوهش شامل ۶ گام است که عبارتند از ۱- تهیه نقشه پراکنش فرسایش خندقی، ۲- تهیه نقشه متغیرهای زمین محیطی مؤثر در فرسایش خندقی، ۳- آنالیز تست هم خطی بین متغیرها برای انتخاب متغیرها، ۴- اجرای مدل شواهد وزن قطعی به منظور ایجاد رابطه آماری بین متغیرهای زمین محیطی و فرسایش‌های خندقی موجود، ۵- تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی، ۶- اعتبارسنجی نقشه حساسیت فرسایش خندقی با منحنی ROC. به منظور تهیه نقشه پراکنش فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی اقدام به عملیات میدانی گسترده گردید [۲۶]. مجموعه‌ای از خندق‌های ۷ شکل و U شکل با عرض و عمق چندین متر با مساحت ۴۹/۲۳ هکتار در منطقه شناسایی گردید. در کل تعداد ۸۰ خندق در منطقه شناسایی گردید و به صورت تصادفی ۷۰ درصد (۵۶)

خندق) به منظور اجرای مدل و ۳۰ درصد (۲۴ خندق) برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت [۱۰]. همین تعداد مناطق فاقد فرسایش خندقی به منظور فرآیند کالیبراسیون و صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت [۱۴]. در شکل ۲ تعدادی از خندق‌های منطقه مطالعاتی نشان داده شده است. خندق‌های منطقه مطالعاتی عمدتاً در دشت و شیب کم که دارای تراکم بالای آبراهه است ایجاد شده‌اند. همچنین بارندگی‌های شدید و سیلابی که از خصوصیات مناطق کویری می‌باشد، وجود املاح گچ و نمک به دلیل تبخیر زیاد در منطقه و عدم وجود پوشش گیاهی و مواد آلی باعث ایجاد پایپینگ و در گذر زمان خندق در منطقه مطالعاتی شده‌اند. بنابراین می‌توان اذعان کرد که جریان‌های سطحی و پدیده پایپینگ از فرآیندهای غالب ایجاد خندق در منطقه مطالعاتی می‌باشند.



شکل ۲. نمونه‌ای از خندق‌های منطقه مطالعاتی

ژئومورفولوژیکی مفید و توصیف مرفومتری سطح با استفاده از آنالیز شکل شیب قابل استخراج است [۳۲]. به طور کلی تأثیر شکل شیب بر فرسایش خندقی به صورت همگرایی و واگرایی جریان آب در طول شیب است [۸].

نقشه شکل شیب پس از استخراج از مدل رقومی در ArcGIS 10.3 به ۳ کلاس محذب، هموار و مقعر تقسیم‌بندی گردید. در بسیاری از موارد، خندق‌ها با شبکه‌های آبراهه مرتبط هستند [۲]. به منظور بررسی تأثیر شبکه زهکشی، متغیر فاصله از آبراهه مورد بررسی قرار گرفت [۳۷]. شبکه زهکشی منطقه از مدل رقومی در نرم‌افزار ArcHydro استخراج و نقشه فاصله از آبراهه در ArcGIS 10.3 تهیه و به ۵ کلاس طبقه‌بندی گردید. شاخص خیسی. قدرت فرساینده‌گی رواناب، پتانسیل تخلیه و ظرفیت حمل به کمک شاخص خیسی توپوگرافی مدله می‌گردد [۳۱]. نقشه شاخص خیسی توپوگرافی به کمک رابطه ۱ استخراج و به ۴ کلاس طبقه‌بندی گردید. شاخص توان حمل رسوب یکی از مهم‌ترین متغیرهای کنترل‌کننده فرآیندهای فرسایش شیب، است. مناطق دارای قدرت جریان بالا دارای پتانسیل فرسایشی بالایی می‌باشند. نقشه توان جریان با استفاده از رابطه ۲ استخراج و به ۵ کلاس طبقه‌بندی گردید.

$$TWI = \ln(A_S / \tan \beta) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$SPI = A_S \times \tan \beta \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن:  $A_S$ : مساحت حوضه آبخیز و  $\beta$ : شیب بر حسب درجه است.

الگوی زهکشی یک منطقه به وسیله متغیرهای متعددی مانند طبیعت و ساختار سازندهای زمین‌شناسی، ویژگی‌های خاک، شرایط پوشش گیاهی، نرخ نفوذ و درجه شیب تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۱۷]. تراکم زهکشی بالا باعث نرخ رواناب سطحی بالا می‌گردد و در نتیجه فرسایش خندقی را افزایش می‌دهد. نقشه تراکم زهکشی در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 و ابزار Line Density با ابعاد

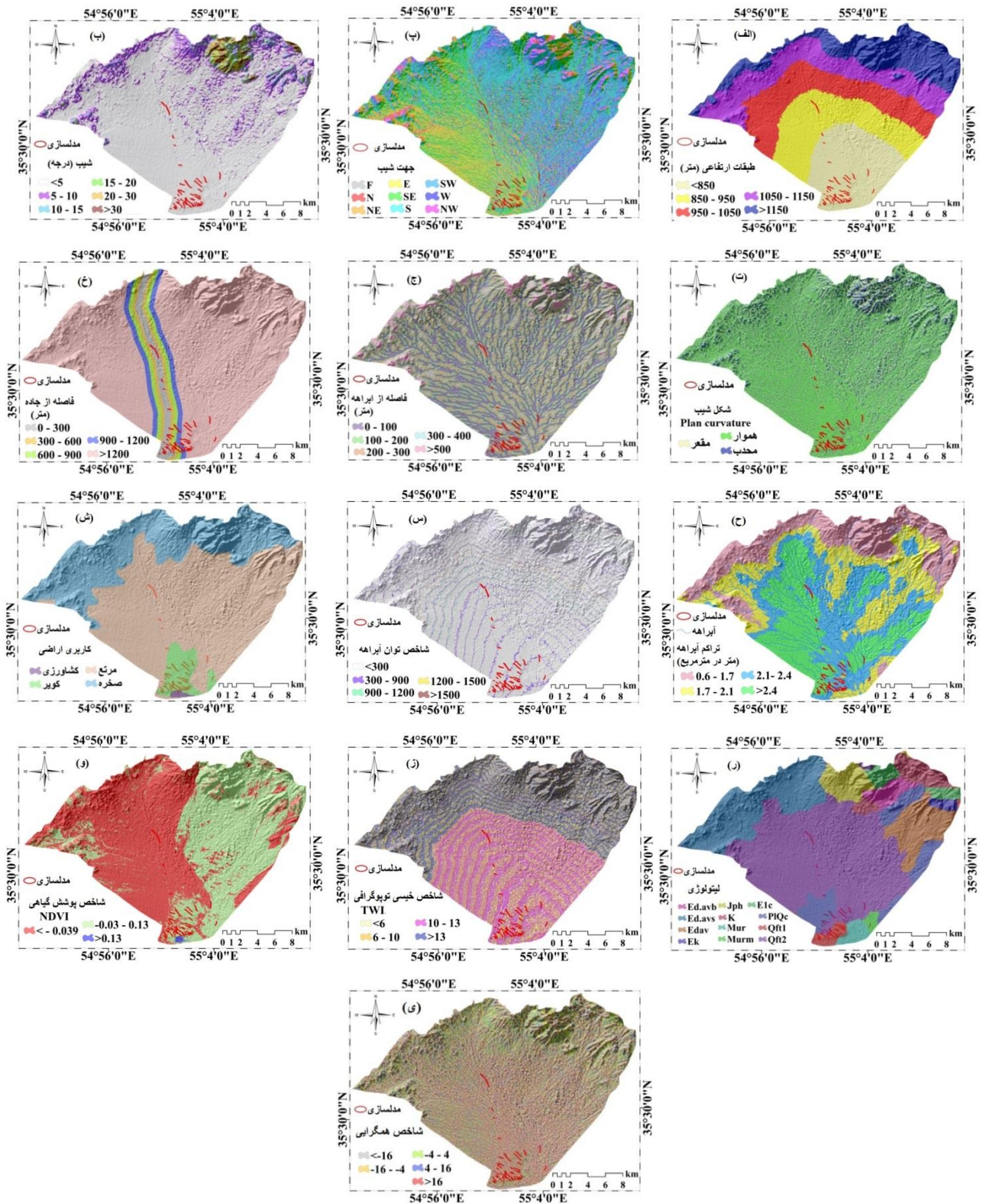
با توجه به این که فرایند فرسایش خندقی به وسیله فرساینده‌گی رواناب‌های سطحی و فرسایش‌پذیری خاک کنترل می‌گردد، چندین متغیر محیطی مؤثر در فرسایش خندقی باید مورد بررسی قرار گیرد [۲۶]. با توجه به مطالعه ادبیات تحقیق، دسترسی به داده‌ها و پیمایشات میدانی متغیرهای مؤثر شناسایی گردیدند [۲۶]. پس از انجام تست هم خطی ۱۳ متغیر شامل ارتفاع، شیب، جهت‌شیب، شکل‌شیب، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، فاصله از جاده، لیتولوژی، کاربری اراضی، شاخص خیسی توپوگرافی، شاخص توان حمل رسوب، NDVI، و شاخص همگرایی انتخاب گردیدند (اشکال ۳ الف تا ۳ ی). برای تهیه متغیرهای ارتفاع، شیب، جهت‌شیب، شکل‌شیب، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه، شاخص خیسی توپوگرافی، شاخص توان حمل رسوب و شاخص همگرایی از مدل رقومی ارتفاعی ASTER با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده گردید. به منظور طبقه‌بندی متغیرها از روش طبقه‌بندی *quantile* استفاده گردید [۶]. در این روش هر کلاس دارای تعداد مشابهی از ویژگی‌ها می‌باشد. این روش به علت کارایی بالا در پژوهش‌های زیادی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۶ و ۳۴]. ویژگی‌های توپوگرافی مانند ارتفاع بر روی نوع پوشش گیاهی و ویژگی‌های بارش تأثیر می‌گذارد، در نتیجه فرآیند فرسایش خندقی را کنترل می‌کند [۸]. نقشه ارتفاع منطقه مطالعاتی از مدل رقومی ASTER با قدرت تفکیک ۳۰ متر استخراج و به ۵ کلاس طبقه‌بندی گردید. مناطق با شیب‌های ملایم برای تجمع جریان‌های سطحی و در نتیجه فرسایش خندقی مساعد می‌باشند [۹]. نقشه شیب منطقه مطالعاتی از مدل رقومی استخراج و به ۶ طبقه طبقه‌بندی گردید. جهت‌شیب به علت تأثیر بر نوع پوشش گیاهی، کنترل مدت زمان تابش خورشید، رطوبت، تبخیر و تعرق و پراکنش پوشش گیاهی در شیب‌ها به طور غیر مستقیم بر روی فرآیند فرسایش تأثیرگذار است [۱۱]. نقشه جهت شیب از مدل رقومی استخراج و به ۹ کلاس طبقه‌بندی گردید. اطلاعات

نسبت به فرسایش دارند [۲۶]. برای تهیه نقشه کاربری اراضی/پوشش سطحی از تصاویر راداری لندست ۸ در نرم افزار ENVI استفاده گردید. برای صحت‌سنجی نقشه کاربری اراضی/پوشش سطحی نیز از پیمایشات میدانی استفاده گردید. مهم‌ترین کاربری‌های شناسایی شده در منطقه شامل کشاورزی، مرتع، صخره و کویر است. شاخص پوشش گیاهی نیز از متغیرهای مؤثر در فرسایش خندقی است. در مناطقی که دارای پوشش گیاهی فشرده می‌باشند، احتمال رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. برای تهیه نقشه شاخص پوشش گیاهی از تصاویر لندست ۸ در تاریخ (۲۰۱۷/۰۹/۲۹) استفاده گردید و نقشه NDVI پس از تهیه به ۳ کلاس طبقه‌بندی گردید. فاصله از جاده از متغیرهای مؤثر در فرسایش خندقی است [۲۴]. نقشه فاصله از جاده در نرم‌افزار ArcGIS10.3 تهیه و به ۵ کلاس طبقه‌بندی گردید.

سلولی ۳۰ متر تهیه و به ۴ کلاس طبقه‌بندی گردید. شاخص همگرایی نیز از متغیرهای مؤثر بر فرسایش خندقی است [۲]. نقشه شاخص همگرایی از مدل رقومی استخراج و به ۵ کلاس طبقه‌بندی گردید. متغیر لیتولوژی به عنوان یک متغیر مهم در آنالیز خطرات طبیعی است [۲۳]. فرسایش خندقی وابسته به ویژگی‌های لیتولوژیکی مواد سطح زمین و نزدیک سطح زمین است [۷]. برای تهیه نقشه لیتولوژی از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده گردید. نقشه لیتولوژی پس از تهیه به ۱۲ کلاس طبقه‌بندی گردید. مدیریت کاربری اراضی تأثیر زیادی در ثبات ژئومورفولوژیکی شیب و رخداد فرسایش خندقی دارد [۳۷]. به طور کلی مناطق بایر و مناطق با پوشش گیاهی پراکنده در مقایسه با مناطق جنگلی که پوشش گیاهی قدرت فرساینده‌ی رواناب‌های سطحی را به شدت کاهش می‌دهد، حساسیت بیشتری

جدول ۱. متغیرهای مؤثر در فرسایش خندقی به همراه دامنه تغییرات و منبع داده

متغیرهای محیطی	دامنه تغییرات		منبع	مقیاس یا قدرت فکیک	تعداد کلاس
	حداقل	حداکثر			
ارتفاع (متر)	۷۵۹	۱۹۲۳	مدل رقومی ASTER	۳۰×۳۰ متر	۵
شیب (درجه)	۰	۵۳/۱۴۷	مدل رقومی ASTER	۳۰×۳۰ متر	۶
جهت شیب	-۱	۳۶۰	مدل رقومی STER	۳۰×۳۰ متر	۹
شکل شیب (متر/۱۰۰)	-۰/۰۴۸	۰/۰۵۸	مدل رقومی ASTER	۳۰×۳۰ متر	۳
فاصله از آبراهه (متر)	۰	۹۶۰/۴۶	مدل رقومی ASTER	۳۰×۳۰ متر	۵
تراکم آبراهه (متر در مترمربع)	۰/۶۰۲	۳/۲۱۳	مدل رقومی ASTER	۳۰×۳۰ متر	۴
فاصله از جاده (متر)	۰	۱۸۰۴۴	نقشه توپوگرافی	۱:۵۰۰۰۰	۵
سنگ‌شناسی	-	-	نقشه زمین‌شناسی	۱:۱۰۰۰۰۰	۱۲
کاربری اراضی/پوشش سطحی	-	-	تصویر لندست ۸ (OLI)	۳۰×۳۰ متر	۴
TWI	۱/۵۱۹	۱۴/۴۶۸	مدل رقومی ASTER	۳۰×۳۰ متر	۴
SPI	۱۲۰	۳۰۰۰	مدل رقومی ASTER	۳۰×۳۰ متر	۴
NDVI	-۰/۱۱۲	۰/۴۰۳	تصویر لندست ۸ (OLI)	۳۰×۳۰ متر	۳
شاخص همگرایی	-۱۰۰	۱۰۰	مدل رقومی ASTER	۳۰×۳۰ متر	۵



شکل ۳. متغیرهای محیطی مؤثر در فرسایش خندقی

۳،۲. مدل تابع شواهد قطعی<sup>۱</sup>

$$[\lambda(\bar{T}_p)_{A_{ij}}] = \left[ \frac{N(F \cap A_{ij})}{N(F)} \right] / [(N(P) - N(F) - (6))$$

$$N(A_{ij}) + N(F \cap A_{ij}) / N(P) - N(F)]$$

$$(Dis) = \frac{[\lambda(\bar{T}_p)_{A_{ij}}]}{\sum [\lambda(\bar{T}_p)_{A_{ij}}]} \quad (7)$$

توابع عدم اطمینان (Unc) و احتمال (Pls) به صورت روابط (۸ و ۹) تعریف می‌گردد:

$$(Unc) = [1 - (Bel) - (Dis)] \quad (8)$$

$$(Pls) = [1 - (Dis)] \quad (9)$$

که در آن Bel تابع قطعیت و Dis تابع عدم قطعیت است. اگر عدم قطعیت (Unc) برابر با صفر باشد، آنگاه تابع قطعیت برابر با تابع احتمال (Pls) می‌باشد. در مجموع حاصل جمع تابع قطعیت، عدم قطعیت و عدم اطمینان یک می‌باشد. در نهایت پس از محاسبه وزن تابع قطعیت (Bel) هر یک از زیرکلاس‌های متغیرها، وزن مربوطه در سلول‌های هر یک از زیرکلاس‌ها ضرب شده و با تجمیع آن نقشه حساسیت فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی حاصل می‌گردد [۲۰].

۴،۲. اعتبارسنجی مدل<sup>۶</sup>

به منظور تعیین دقت نقشه حساسیت فرسایش خندقی در این پژوهش، منحنی ROC مورد استفاده قرار گرفت [۲۴]. مساحت زیر منحنی (AUC) در منحنی ROC کیفیت پیش‌بینی سیستم را با استفاده از ارائه توانایی در مدل کردن وقوع و عدم وقوع وقایع از پیش تعیین شده، نشان می‌دهد [۲۲]. در آنالیز منحنی ROC، مدل ایده آل دارای مقدار AUC برابر با یک است، در حالی که مقادیر AUC نزدیک به ۰/۵ بیانگر عدم دقت مدل پیش‌بینی کننده می‌باشد [۲۶]. طبق تحقیقات قبلی ارتباط کمی-کیفی بین مقادیر AUC و دقت پیش‌بینی مدل به صورت زیر قابل تقسیم بندی می‌باشد: ۰/۶ - ۰/۵ ضعیف، ۰/۷ - ۰/۶ متوسط، ۰/۸ - ۰/۷ خوب، ۰/۹

مدل تابع شواهد قطعی بر اساس تئوری دمپستر-شیفر می‌باشد که نوع ساده شده احتمالات بالا و پایین بیزین است [۲۸]. این مدل شامل درجاتی از قطعیت (Bel)<sup>۲</sup>، عدم قطعیت (Bel)<sup>۳</sup>، عدم اطمینان (Unc)<sup>۴</sup> و احتمال (Pls)<sup>۵</sup> در دامنه‌ای بین ۰ و ۱ است و مجموع مقادیر قطعیت، عدم قطعیت و عدم اطمینان ۱ است [۱۵]. در آنالیز پتانسیل فرسایش خندقی بر اساس مدل تابع شواهد قطعی، ساختار مدل می‌تواند به شکل رابطه زیر نشان داده شود:

$$m = 2^\theta = \{\emptyset, T_p, \bar{T}_p, \theta\} \quad \theta = \{T_p, \bar{T}_p\} \quad (3)$$

که در آن  $T_p$  پیکسل‌هایی است که به وسیله فرسایش خندقی تحت تأثیر قرار می‌گیرد،  $\bar{T}_p$  پیکسل‌هایی است که به وسیله فرسایش خندقی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد و  $\emptyset$  مجموعه خالی است. بر اساس رابطه بالا، تابع قطعیت (Bel) می‌تواند به صورت روابط (۴ و ۵) بیان گردد:

$$[\lambda(T_p)_{A_{ij}}] = \left[ \frac{N(F \cap A_{ij})}{N(F)} \right] / [(N(A_{ij}) - N(F \cap A_{ij})) / (N(P) - N(F))] \quad (4)$$

$$(Bel) = \left[ \frac{[\lambda(T_p)_{A_{ij}}]}{\sum [\lambda(T_p)_{A_{ij}}]} \right] \quad (5)$$

که در آن  $N(F \cap A_{ij})$  تعداد سلول‌های خندقی‌هایی است که در طبقه  $i$  عامل  $A_{ij}$  رخ داده‌اند،  $N(F)$  تعداد تمامی سلول‌های خندقی‌ها در منطقه مطالعاتی است،  $N(A_{ij})$  تراکم سلول‌ها در  $A_{ij}$  و  $N(P)$  تراکم سلول‌ها در کل منطقه مطالعاتی است. به عبارت دیگر تابع عدم قطعیت (Dis) می‌تواند بر اساس روابط (۶ و ۷) محاسبه گردد (۱۵).

<sup>1</sup> Evidential Belief Function

<sup>2</sup> belief (Bel)

<sup>3</sup> disbelief (Dis)

<sup>4</sup> uncertainty (Unc)

<sup>5</sup> plausibility (Pls)

<sup>6</sup> Evidential Belief Function



### ۳. نتایج

برای مدل‌سازی اگر بین متغیرهای وابسته همبستگی بالایی وجود داشته باشد دقت مدل کاهش پیدا می‌کند، بدین منظور در ابتدا تست هم‌خطی بین متغیرها انجام گرفت و متغیرهایی که دارای همبستگی بالایی بودند از مدل حذف گردیدند. برای انجام تست هم‌خطی از متغیر ضریب تحمل استفاده گردید. اگر مقادیر ضریب تحمل  $\geq 0.1$  باشد، بین متغیرها هم‌خطی وجود دارد [۵]. برای محاسبه این متغیرها مقادیر عددی هر یک از متغیرها در مناطق فرسایش خندقی و مناطقی که فرسایش خندقی وجود ندارد استخراج گردید و در نرم‌افزار SPSS مقادیر متغیر ضریب تحمل برای هر یک از متغیرهای وابسته محاسبه گردید. نتایج حاصل از تست هم‌خطی بین متغیرها در جدول ۲ نشان داده شده است.

۰/۸ - خیلی خوب و ۱ - ۰/۹ عالی [۳۵]. در این پژوهش با استفاده از منحنی ROC نرخ موفقیت و نرخ پیش‌بینی به منظور ارزیابی دقت و توانایی پیش‌بینی مدل محاسبه گردید. برای محاسبه نرخ موفقیت از داده‌های خندق که در جریان مدل‌سازی استفاده شده است و برای محاسبه نرخ پیش‌بینی از داده‌های اعتبارسنجی استفاده گردید. نرخ موفقیت و نرخ پیش‌بینی یک نمایش گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌هاست، به عبارت دیگر این دو شاخص درصد سلول‌ها یا واحدهای ناپایدار که به درستی به وسیله مدل پیش‌بینی شده‌اند (Sensitivity) را در برابر درصد سلول‌های ناپایدار پیش‌بینی شده نسبت به کل 1- (Sensitivity) رسم می‌کنند. این مقادیر توانایی مدل را نسبت به تمایز درست بین مشاهدات مثبت و منفی در نمونه اعتبارسنجی بیان می‌کند. حساسیت (Sensitivity) بالا بیانگر شمار بالای پیش‌بینی‌های درست است، در حالی که ویژگی بالا (Sensitivity) 1- بیانگر عدد کم و نبود مثبت‌های غیر حقیقی است.

جدول ۲. تست هم‌خطی بین متغیرهای مؤثر در فرسایش خندقی

متغیر	ضرایب غیراستاندارد		ضرایب استاندارد	T	Sig	ضریب تحمل
	B	SE	B			
ضریب ثابت	۱۰/۵	۲/۱۲	-	۴/۹۸	۰/۰۰۰	-
شاخص همگرایی	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۳۹	۰/۳۳۵	۰/۷۴۳	۰/۴۶۴
لیتولوژی	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	-۰/۰۶۳	-۰/۶۳۵	۰/۵۳۶	۰/۶۴۴
NDVI	۰/۸۴۶	۳/۲۰	۰/۰۳۰	۰/۲۶۴	۰/۷۹۵	۰/۴۸۹
شکل شیب	-۱۷۳/۲	۹۸/۶۲	-۰/۱۹۴	-۱/۷۵	۰/۱۰۱	۰/۵۱۸
کاربری اراضی/پوشش سطحی	۱۲۸	۶۴/۰۰۴	۰/۲۰۰	۲	۰/۰۶۵	۰/۶۳۳
SPI	۲/۵	۰/۰۰۰	۰/۰۳۹	۰/۲۶۰	۰/۷۹۹	۰/۲۸۳
TWI	-۰/۰۲۹	۰/۰۲۶	-۰/۱۹۰	-۱/۰۹	۰/۲۹۴	۰/۲۰۹
بارندگی	-۰/۱۲۵	۰/۰۳۳	-۱/۳۶	-۳/۸۰	۰/۰۰۲	۰/۰۴۹
شیب	۰/۰۲۶	۰/۰۴۴	۰/۰۹۰	۰/۵۹۶	۰/۵۶۱	۰/۲۷۴
تراکم آبراهه	۰/۱۳۹	۰/۲۳۳	-۰/۰۸۰	-۰/۵۹۶	۰/۵۶۱	۰/۳۳۷
فاصله از آبراهه	۳/۳۶	۰/۰۰۰	۰/۱۷۹	۰/۸۵۸	۰/۴۰۵	۰/۱۴۵
ارتفاع	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۹۸	۰/۹۹۱	۰/۳۳۹	۰/۶۵۱
طول شیب	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۱۹۰	۰/۷۵۱	۰/۴۶۵	۰/۰۹۹
جهت شیب	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۶۵	۰/۶۴۶	۰/۵۲۹	۰/۶۱۴
درصد سیلت و رس	-۰/۰۳۴	۰/۰۲۸	-۲/۳۴	-۴/۴۵	۰/۰۰۱	۰/۰۳۵
فاصله از گسل	-۰/۰۱۲	۰/۰۸۷	-۱/۹۸	-۲/۷۶	۰/۰۰۹	۰/۰۲۳
فاصله از جاده	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۴۵	۰/۹۳۲	۰/۲۵۶	۰/۴۵۶
انحنای سطح	-۰/۰۷۶	۰/۰۱۱	-۳/۳۵	-۵/۵۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵

روش شواهد وزن قطعی رابطه فضایی بین متغیرهای مؤثر و فرسایش‌های خندقی تعیین گردید. نتایج حاصل از مدل شواهد وزن قطعی در جدول ۳ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از تست هم‌خطی نشان داد که متغیرهای بارندگی، طول شیب، بافت خاک، فاصله از گسل و انحنا، سطح به علت همبستگی بالا از جریان مدل‌سازی حذف و بقیه متغیرها در جریان مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. پس از انتخاب متغیرهای مناسب، با استفاده از

جدول ۳. رابطه آماری متغیرهای مؤثر در فرسایش خندقی و فرسایش خندقی با روش شواهد وزن قطعی

متغیر	کلاس	تعداد کل پیکسل‌ها	تعداد پیکسل‌های فرسایش خندقی	مدل شواهد وزن قطعی			
				BEL	DIS	UNC	PLS
طبقات ارتفاعی	<۸۵۰	۹۳۶۱۳	۴۵۵	۰/۸۳۱	۰/۰۴۲	۰/۱۲۶	۰/۹۵۷
	۸۵۰ - ۹۵۰	۹۲۸۸۷	۹۲	۰/۱۶۸	۰/۲۰۸	۰/۶۲۳	۰/۷۹۱
	۹۵۰ - ۱۰۵۰	۹۲۹۷۱	۰	۰	۰/۲۵۰	۰/۷۴۹	۰/۷۴۹
	۱۰۵۰ - ۱۱۵۰	۹۲۹۵۳	۰	۰	۰/۲۵۰	۰/۷۴۹	۰/۷۴۹
	>۱۱۵۰	۹۱۶۲۱	۰	۰	۰/۲۴۹	۰/۷۵۰	۰/۷۵۰
شیب	<۵	۳۶۶۲۲۲	۵۴۴	۰/۹۶۸	۰/۰۰۴	۰/۰۲۶	۰/۹۹۵
	۵ - ۱۰	۶۲۶۳۱	۳	۰/۰۳۱	۰/۲۱۸	۰/۷۴۹	۰/۷۸۱
	۱۰ - ۱۵	۱۵۱۱۳	۰	۰	۰/۱۹۶	۰/۸۰۳	۰/۸۰۳
	۱۵ - ۲۰	۷۶۸۲	۰	۰	۰/۱۹۳	۰/۸۰۶	۰/۸۰۶
	۲۰ - ۳۰	۸۱۱۱	۰	۰	۰/۱۹۳	۰/۸۰۶	۰/۸۰۶
	>۳۰	۴۲۸۶	۰	۰	۰/۱۹۲	۰/۸۰۷	۰/۸۰۷
جهت شیب	هموار	۲۰۶۹۱	۷۵	۰/۳۴۹	۰/۱۱۳	۰/۵۳۷	۰/۸۸۶
	شمال	۳۶۳۷۸	۴۰	۰/۱۰۵	۰/۱۲۶	۰/۷۶۸	۰/۸۷۳
	شمال شرق	۷۱۵۰۴	۹۹	۰/۱۳۳	۰/۱۲۱	۰/۷۴۵	۰/۸۷۸
	شرق	۷۹۸۴۱	۱۳۳	۰/۱۶۰	۰/۱۱۴	۰/۷۲۵	۰/۸۸۵
	جنوب شرق	۸۶۴۰۱	۱۲۵	۰/۱۳۸	۰/۱۱۹	۰/۷۴۱	۰/۸۸۰
	جنوب	۷۷۲۴۰	۵۳	۰/۰۶۵	۰/۱۳۶	۰/۷۹۸	۰/۸۶۳
	جنوب غرب	۴۵۲۴۲	۱۰	۰/۰۲۱	۰/۱۳۶	۰/۸۴۲	۰/۸۶۳
	غرب	۲۹۲۹۸	۸	۰/۰۲۶	۰/۱۳۲	۰/۸۴۱	۰/۸۶۷
	شمال غرب	۱۷۴۵۰	۴	۰/۰۱	۰/۱۲۶	۰/۸۳۹	۰/۸۷۲
شکل شیب	محدب	۱۱۷۹۴۰	۱۱۸	۰/۳۱۸	۰/۳۶۴	۰/۳۱۷	۰/۶۳۵
	مستقیم	۲۳۳۳۶۵	۳۶۴	۰/۴۹۷	۰/۲۳۲	۰/۲۶۹	۰/۷۶۷
	مقعر	۴۶۴۰۴۵	۶۵	۰/۱۸۳	۰/۴۰۳	۰/۴۱۳	۰/۵۹۶
فاصله از آبراهه	۰-۱۰۰	۱۸۶۲۵۰	۲۶۲	۰/۲۸۸	۰/۱۷۵	۰/۵۳۶	۰/۸۲۴
	۱۰۰ - ۲۰۰	۱۳۴۲۱۶	۱۴۹	۰/۲۲۷	۰/۲۰۶	۰/۵۶۶	۰/۷۹۳
	۲۰۰ - ۳۰۰	۸۹۲۵۹	۱۰۱	۰/۲۳۱	۰/۲۰۳	۰/۵۶۴	۰/۷۹۶
	۳۰۰ - ۴۰۰	۲۹۹۵۴	۲۷	۰/۱۸۴	۰/۲۰۴	۰/۶۱۰	۰/۷۹۵
	>۴۰۰	۲۴۳۶۲	۸	۰/۰۶۷	۰/۲۰۹	۰/۷۲۳	۰/۷۹۰

ادامه جدول ۳

متغیر	کلاس	تعداد کل پیکسل‌ها	تعداد پیکسل‌های فرسایش خندقی	مدل شواهد وزن قطعی			
				BEL	DIS	UNC	PLS
تراکم آبراهه	۰/۶ - ۱/۷	۱۱۵۶۳۳	۰	۰	۰/۳۳۳	۰/۶۶۶	۰/۶۶۶
	۱/۷ - ۲/۱۲	۱۱۵۵۸۸	۳۳	۰/۰۶۰	۰/۳۱۲	۰/۶۲۶	۰/۶۸۷
	۲/۱۲ - ۲/۴	۱۱۸۰۹۵	۲۳۳	۰/۴۱۹	۰/۱۹۲	۰/۳۸۸	۰/۸۰۷
	>۲/۴	۱۱۴۷۲۵	۲۸۱	۰/۵۲۰	۰/۱۶۱	۰/۳۱۸	۰/۸۳۸
فاصله از جاده	۰ - ۳۰۰	۲۳۲۳۳	۲۰۴	۰/۵۱۰	۰/۰۹۱	۰/۳۹۷	۰/۹۰۸
	۳۰۰ - ۶۰۰	۲۲۹۶۹	۶۷	۰/۱۶۸	۰/۱۲۷	۰/۷۰۳	۰/۸۷۲
	۶۰۰ - ۹۰۰	۲۰۵۷۳	۷۳	۰/۲۰۵	۰/۱۲۵	۰/۶۶۸	۰/۸۷۴
	۹۰۰ - ۱۲۰۰	۱۷۶۹۶	۲۷	۰/۰۸۸	۰/۱۳۶	۰/۷۷۴	۰/۸۶۳
	>۱۲۰۰	۳۷۹۵۷۰	۱۷۶	۰/۰۲۶	۰/۵۱۸	۰/۴۵۵	۰/۴۸۱
لیتولوژی	نمک و ماسه سنگ	۲۱۳۴۳	۰	۰	۰/۱۵۱	۰/۸۴۸	۰/۸۴۸
	کنگومرای پلی ژنیک	۳۶۸۲۷	۱۲۲	۰/۱۳۷	۰/۱۲۱	۰/۷۴۱	۰/۸۷۸
	شیل	۴۲۰۹	۰	۰	۰/۱۴۵	۰/۸۵۴	۰/۸۵۴
	پادگانه و مخروط افکنه‌های قدیمی	۷۳۲۳	۱۵۰	۰/۸۶۲	۰/۱۰۶	۰/۰۳۰	۰/۸۹۳
	سنگ‌های کرتاسه	۲۰۴۳۵	۰	۰	۰/۱۵۰	۰/۸۴۹	۰/۸۴۹
	ماسه سنگ	۸۳۱۱۲	۰	۰	۰/۱۷۵	۰/۸۲۴	۰/۸۲۴
	کنگومرای قرمز و ماسه سنگ	۱۲۷۷۳	۰	۰	۰/۱۴۸	۰/۸۵۱	۰/۸۵۱
	پادگانه و مخروط افکنه‌های جدید	۲۱۶۳۳۴	۲۴۸	۰/۰۴۷	۰/۱۴۸	۰/۸۰۴	۰/۸۵۱
	کنگومرا	۱۲۰۹۸	۰	۰	۰/۱۴۸	۰/۸۵۱	۰/۸۵۱
	گدازه‌های آندزیتی	۳۷۲۳۲	۰	۰	۰/۱۵۶	۰/۸۴۳	۰/۸۴۳
	مارن، با میان لایه‌های ماسه سنگ	۳۱۰۰	۱۲	۰/۱۷۳	۰/۱۴۱	۰/۶۸۴	۰/۸۵۸
	مارن	۷۷۱۵	۱۵	۰/۰۸۰	۰/۱۴۲	۰/۷۷۶	۰/۸۵۷
TWI	<۶	۱۱۷۲۲۲	۱۷۲	۰/۳۰۴	۰/۲۲۸	۰/۴۶۶	۰/۷۷۱
	۶ - ۱۰	۱۱۲۹۸۹	۱۰۰	۰/۱۸۳	۰/۲۶۹	۰/۵۴۶	۰/۷۳۰
	۱۰ - ۱۳	۱۱۱۶۶۶	۲۷۵	۰/۵۱۱	۰/۱۶۳	۰/۳۲۵	۰/۸۳۶
	۱۳ >	۱۲۲۱۶۷	۰	۰	۰/۳۳۸	۰/۶۶۱	۰/۶۶۱
SPI	<۳۰۰	۴۳۰۸۷۹	۵۱۱	۰/۴۵۸	۰/۱۸۶	۰/۳۵۵	۰/۸۱۳
	۳۰۰ - ۹۰۰	۲۵۶۶۲	۳۶	۰/۵۴۱	۰/۲۰۰	۰/۲۵۷	۰/۷۹۹
	۹۰۰ - ۱۲۰۰	۵۳۰۲	۰	۰	۰/۲۰۵	۰/۷۹۴	۰/۷۹۴
	۱۲۰۰ - ۱۵۰۰	۱۲۶۸	۰	۰	۰/۲۰۳	۰/۷۹۶	۰/۷۹۶
	۱۵۰۰ >	۹۳۴	۰	۰	۰/۲۰۳	۰/۷۹۶	۰/۷۹۶

## ادامه جدول ۳

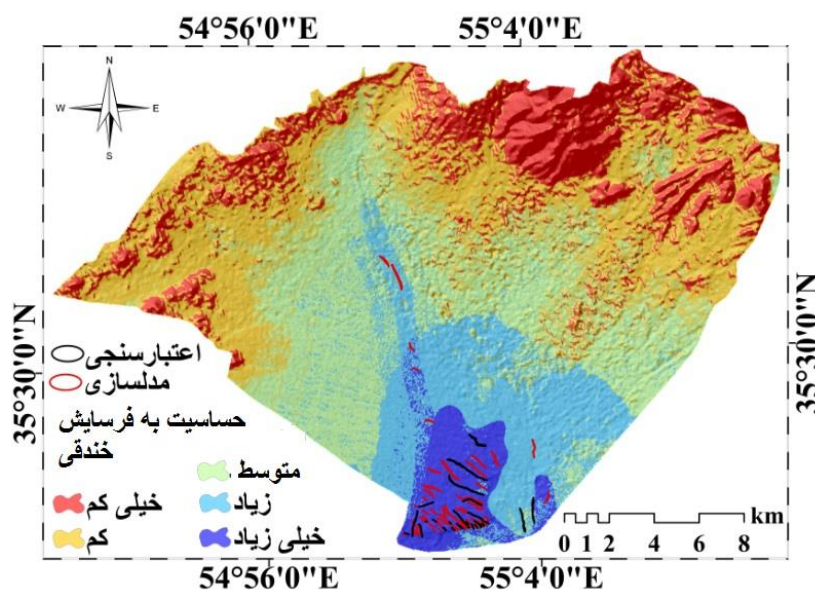
متغیر	کلاس	تعداد کل پیکسل‌ها	تعداد پیکسل‌های فرسایش خندقی	مدل شواهد وزن قطعی			
				BEL	DIS	UNC	PLS
کاربری اراضی/ پوشش سطحی	کشاورزی	۱۵۵۳	۰	۰	۰/۲۱۲	۰/۷۸۷	۰/۷۸۷
	کوبر	۲۳۰۷۷	۴۱۹	۰/۹۷۵	۰/۰۵۲	-۰/۰۲	۰/۹۴۷
	مرتع	۲۸۱۰۲۳	۱۲۸	۰/۰۲۴	۰/۴۱۳	۰/۵۶۲	۰/۵۸۶
	صخره	۱۵۶۸۴۸	۰	۰	۰/۳۲۱	۰/۶۷۸	۰/۶۷۸
NDVI	< -۰/۰۳۹	۲۴۸۸۵۴	۱۱۸	۰/۰۰۴	۰/۵۲۹	۰/۴۶۵	۰/۴۷۰
	-۰/۰۳۹ - ۰/۱۳	۲۱۴۴۴۲	۳۶۴	۰/۰۱۷	۰/۱۹۴	۰/۷۸۸	۰/۸۰۵
	> ۰/۰۱۳	۷۴۹	۶۵	۰/۹۷۷	۰/۲۷۶	-۰/۲۵	۰/۷۲۳
شاخص همگرایی	< -۰/۱۶	۹۰۲۲۷	۱۶۷	۰/۳۱۰	۰/۱۷۲	۰/۵۱۶	۰/۸۲۷
	-۰/۱۶ - -۴	۹۲۴۳۱	۹۱	۰/۱۶۵	۰/۲۰۸	۰/۶۲۶	۰/۷۹۱
	-۴ - ۴	۹۸۱۲۹	۶۳	۰/۱۰۷	۰/۲۲۴	۰/۶۶۸	۰/۷۷۵
	۴ - ۱۶	۹۴۰۲۶	۸۸	۰/۱۵۶	۰/۲۱۰	۰/۶۳۲	۰/۷۸۹
	> ۱۶	۸۹۲۳۲	۱۳۸	۰/۲۵۹	۰/۱۸۴	۰/۵۵۵	۰/۸۱۵

خندقی در این کلاس بالا است که با نتایج تحقیقات [۲۶] مطابقت دارد. در متغیر فاصله از آبراهه، کلاس کمتر از ۱۰۰ متر با بیشترین مقدار قطعیت (۰/۲۸۸) و کمترین مقدار عدم قطعیت (۰/۱۷۵) دارای بیشترین احتمال رخداد فرسایش خندقی است که با نتایج تحقیقات [۲] و [۶] که بیان داشتند فاصله کم از آبراهه رابطه مثبت با فرسایش خندقی دارد، مطابقت دارد. بر اساس متغیر تراکم آبراهه، کلاس بیش از ۲/۴ کیلومتر در کیلومتر مربع، که دارای بیشترین مقدار تراکم آبراهه است، دارای بیشترین مقدار قطعیت (۰/۵۲۰) و در مقابل کلاس ۰/۶ تا ۱/۷ که دارای کمترین مقدار تراکم آبراهه است دارای کمترین مقدار قطعیت (۰) است، این موضوع بیانگر این است که بین متغیر تراکم آبراهه و فرسایش خندقی رابطه مستقیم وجود دارد و با افزایش تراکم آبراهه احتمال رخداد فرسایش خندقی نیز افزایش پیدا می‌کند که با نتایج [۲۶] مطابقت دارد. طبق نتایج متغیر فاصله از جاده رابطه مستقیم با احتمال ایجاد فرسایش خندقی دارد و با افزایش فاصله از جاده احتمال ایجاد آن نیز کاهش می‌-

رابطه فضایی بین رخداد فرسایش خندقی و طبقات ارتفاعی نشان داد که کلاس ارتفاعی کمتر از ۸۵۰ متر بیشترین مقدار تابع قطعیت (۰/۸۳۱) را دارا است. این موضوع بیانگر این است که احتمال ایجاد فرسایش خندقی در این کلاس نسبت به کلاس‌های دیگر بیشتر است. در رابطه با متغیر شیب، بیشترین مقدار تابع قطعیت (۰/۹۶۸) مربوط به کلاس کمتر از ۵ درجه است و کمترین مقدار آن (۰) در کلاس‌های بالاتر از ۱۰ درجه است که با نتایج تحقیقات [۳۳] که بیان داشتند در شیب‌های پایین به دلیل تجمع بالای رواناب سطحی احتمال رخداد فرسایش خندقی افزایش پیدا می‌کند، مطابقت دارد. برای متغیر جهت شیب، نتایج نشان داد که جهت شیب هموار با بیشترین مقدار تابع قطعیت (۰/۳۴۹) دارای رابطه فضایی مثبت با فرسایش خندقی است که با نتایج [۲۷] مطابقت دارد. طبق نتایج حاصل از متغیر شکل شیب بیشترین مقدار تابع قطعیت (۰/۴۹۷) و کمترین مقدار تابع عدم قطعیت (۰/۲۳۲) مربوط به کلاس مستقیم است، در نتیجه احتمال رخداد فرسایش

قطعیت (۰/۹۷۵) و کمترین مقدار عدم قطعیت (۰/۰۵۲) همبستگی قوی با رخداد خندق داشته است که از مهم‌ترین دلایل آن می‌توان به عدم وجود پوشش گیاهی و سازندهای حساس به فرسایش در این کاربری اشاره کرد که با نتایج تحقیقات [۳۹] که بیان داشتند پوشش گیاهی احتمال رخداد فرسایش خندقی را کاهش داده و مناطق بایر دارای پتانسیل بالایی نسبت به فرسایش خندقی هستند، همخوانی دارد. بر اساس متغیر شاخص پوشش گیاهی، کلاس بیشتر از ۰/۰۱۳ دارای بیشترین میزان قطعیت (۰/۹۷۷) و بیشترین همبستگی با ایجاد فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی می‌باشد. در نهایت بر اساس متغیر شاخص همگرایی، کلاس ۰/۱۶- با بیشترین مقدار قطعیت (۰/۳۱۰) و کمترین مقدار عدم قطعیت (۰/۱۷۲) دارای بیشترین حساسیت نسبت به فرسایش خندقی می‌باشد. پس از محاسبه مقادیر عدم قطعیت برای هر یک از زیرکلاس‌ها، در ابتدا اوزان به دست آمده در مقادیر هر یک از شاخص‌ها ضرب و از تجمیع آن‌ها، نقشه حساسیت فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی حاصل گردید و بر اساس طرح طبقه‌بندی شکست‌های طبیعی به ۵ کلاس حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم‌بندی گردید (شکل ۴).

یابد به گونه‌ای که کلاس کمتر از ۳۰۰ متر دارای بیشترین میزان قطعیت (۰/۵۱۰) است که با نتایج [۲۴] مطابقت دارد. طبق نتایج حاصل از متغیر لیتولوژی، پادگانه‌ها و مخروط افکنه‌های قدیمی بیشترین ارتباط را با ایجاد فرسایش خندقی دارند و دارای بیشترین میزان قطعیت (۰/۸۶۲) می‌باشند که از مهم‌ترین علل آن می‌توان به وجود املاح گچی و نمکی در آن، وجود رسوبات ریزدانه کواترنر متشکل از ذرات ریزدانه ماسه، سیلت و رس، پایداری کم خاک، ساختمان ضعیف خاکدانه و همچنین کمبود مواد آلی در آن اشاره کرد. بر اساس متغیر شاخص خیزی توپوگرافی، کلاس ۱۰-۱۳ با بیشترین مقدار تابع قطعیت (۰/۵۱۱) وزن زیادتری برای رخداد خندق از خود نشان داده است. در ارتباط با متغیر شاخص توان حمل رسوب، کلاس ۳۰۰ تا ۹۰۰ که دارای توان حمل جریان پایینی می‌باشد با بیشترین مقدار قطعیت (۰/۵۴۱) بیشترین حساسیت را نسبت به فرسایش خندقی داشته است که دلیل آن تجمع بیشتر جریان‌های سطحی در شیب‌های پایین که دارای توان حمل پایین می‌باشند، است که با نتایج تحقیقات [۲] [مطابقت دارد. طبق نتایج از میان انواع کاربری‌ها و پوشش‌های سطحی مختلف، کویر با بیشترین مقدار



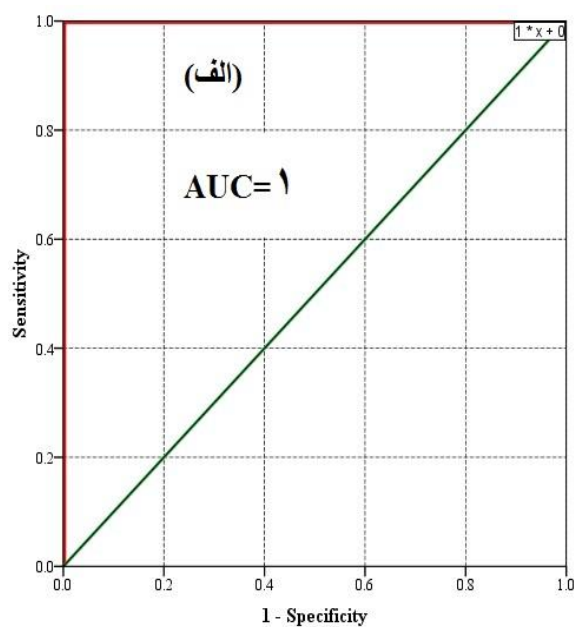
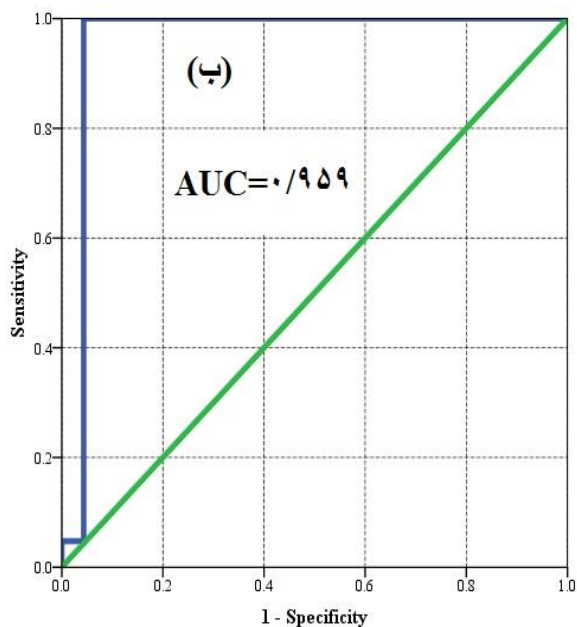
شکل ۴. نقشه حساسیت فرسایش خندقی با روش شواهد وزن قطعی

خندقی بوده است که با نتایج تحقیقات [۷، ۲۵، ۳۸] که مدل وزن شواهد قطعی را دارای قابلیت و کارایی بالا در مدیریت منابع طبیعی و مخاطرات طبیعی معرفی کرده‌اند، همخوانی دارد.

نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل در جدول ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است. طبق نتایج مدل شواهد وزن قطعی با نرخ پیش‌بینی ۱ و نرخ موفقیت ۰/۹۵۹ دارای دقت عالی در شناسایی مناطق حساس به فرسایش

جدول ۳. مساحت هر یک از کلاس‌های حساسیت فرسایش خندقی به همراه اعتبارسنجی مدل

مدل	کلاس	کلاس‌های حساسیت		مساحت خندقی در هر کلاس		مساحت فاقد خندقی	نرخ موفقیت	نرخ پیش‌بینی
		مساحت	%	مساحت	%			
شواهد وزن قطعی EBF	خیلی کم	۷۸/۵۳	۱۸/۸۴	۰	۰	۷۸/۵۳	۰/۹۵۹	۱
	کم	۱۳۱/۲۹	۳۱/۴۹	۰	۰	۱۳۱/۲۹		
	متوسط	۱۱۶/۱۴	۲۷/۸۶	۰/۰۱۲	۲/۵۵	۱۱۶/۱۲		
	زیاد	۶۷/۷۱	۱۶/۲۴	۰/۱۱۷	۲۳/۹۴	۶۷/۵۹		
	خیلی زیاد	۲۳/۱۳	۵/۵۵	۰/۳۶۱	۷۳/۴۹	۲۳/۷۷		
	جمع	۴۱۶/۸۲	۱۰۰	۰/۴۹۲	۱۰۰	۴۱۶/۳۳		



شکل ۴. مقادیر AUC. الف. نرخ پیش‌بینی، ب. نرخ موفقیت

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

به دلیل ویژگی‌های مخاطره‌آمیز فرسایش خندقی، پژوهشگران و مدیران منابع طبیعی در سراسر جهان بر روی ارزیابی خطرات فرسایش خندقی و تهیه نقشه حساسیت آن تمرکز کرده‌اند [۲۶]. در این پژوهش به منظور ارزیابی تأثیر متغیرهای محیطی مؤثر در فرسایش خندقی و همچنین شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی از مدل شواهد وزن قطعی استفاده گردید. بدین منظور ۱۳ متغیر مورد ارزیابی قرار گرفت. روش‌شناسی پیشنهاد شده به منظور ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی بر اساس روش آماری دو متغیره با استفاده از داده‌های آموزشی اجرا گردید و به منظور ارزیابی نتایج از داده‌های اعتبارسنجی و آموزشی استفاده گردید، به گونه‌ای که برای محاسبه نرخ پیش‌بینی از داده‌های اعتبارسنجی و برای محاسبه نرخ موفقیت از داده‌های آموزشی استفاده گردید. نتایج بیانگر دقت و کیفیت عالی نقشه تهیه شده و انطباق بین نقشه حساسیت و موقعیت خندق‌ها است به گونه‌ای که کلاس‌های حساسیت زیاد و خیلی زیاد با وجود این که تنها ۲۱/۷۹ درصد از سطح منطقه مطالعاتی را شامل می‌شود، ۹۷/۴۳ درصد از مساحت خندق‌ها در این کلاس‌ها قرار گرفته است و در کلاس‌های حساسیت خیلی کم و کم مساحت خندق‌ها صفر می‌باشد و هیچ خندقی در این کلاس‌ها وجود ندارد. طبق نتایج حاصل از نقشه حساسیت فرسایش خندقی از کل منطقه به مساحت ۴۱۶/۸۲ کیلومتر مربع، ۱۸/۸۴ درصد (۷۸/۵۳ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت خیلی کم، ۳۱/۴۹ درصد (۱۳۱/۲۹ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت کم، ۲۷/۸۶ درصد (۱۱۶/۱۴ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت متوسط، ۱۶/۲۴ درصد (۶۷/۷۱ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت زیاد و در نهایت ۵/۵۵ درصد (۲۳/۱۳ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت خیلی زیاد

قرار گرفته است. با توجه به این که اکثر خندق‌ها در قسمت جنوبی منطقه مطالعاتی و در نزدیکی روستای طرود ایجاد شده‌اند پیشنهاد می‌گردد اقدامات حفاظتی در این قسمت‌ها افزایش یافته و از گسترش روستا به سمت مناطق فرسایش خندقی جلوگیری گردد. استفاده از روش شواهد وزن قطعی در مناطق مطالعاتی دیگر با شرایط زمین‌شناختی و توپوگرافی مشابه باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه به منظور تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی می‌گردد. مهم‌ترین مزیت تئوری داده محور شواهد دمپستر شفر این است که این مدل مجموعه‌ای از توابع شامل قطعیت، عدم قطعیت، عدم اطمینان و احتمال را حمایت می‌کند، بنابراین نتایج می‌تواند به خوبی رابطه کمی بین وقایع طبیعی (فرسایش خندقی) و چندین لایه اطلاعاتی را با استفاده از مدل کردن درجات عدم قطعیت نشان دهد، بنابراین به منظور تعمیم این مدل، اجرای آن در مناطق مطالعاتی و حوزه‌های تحقیقاتی دیگر لازم می‌باشد. به عنوان یک دستاورد علمی، چهارچوب روش‌شناسی مورد استفاده در این پژوهش نشان داد که انتخاب مناسب متغیرهای مؤثر در فرسایش خندقی به همراه استفاده از روش‌های آماری دو متغیره و تکنیک سیستم اطلاعات جغرافیایی و داده‌های سنجش از دور قادر هستند تا با موفقیت مناطق حساس به فرسایش خندقی را شناسایی کنند. نقشه حساسیت تهیه شده با استفاده از این روش‌شناسی، ابزار مناسبی برای برنامه‌ریزی پایدار به منظور حفاظت از زمین در مقابل فرایندهای فرسایش خندقی می‌باشد، بنابراین، این روش‌شناسی می‌تواند به منظور ارزیابی فرسایش خندقی در بقیه مناطق مشابه به‌ویژه مناطق دارای آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

## References

- [1] Buttafuoco, G., Conforti, M., Aucelli, P.P.C., Robustelli, G. and Scarciglia, F. (2012). Assessing spatial uncertainty in mapping soil erodibility factor using geostatistical stochastic simulation, *Environ Earth Sci*, 66 (4), 1111–1125.
- [2] Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V. and Ma'rker, M. (2014). Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: a case of Sicily (Italy), *Geomorphology*, 204(1), 399–411.
- [3] Conforti, M., Aucelli, P.P., Robustelli, G. and Scarciglia, F. (2011). Geomorphology and GIS analysis formapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy), *Nat. Hazards*, 56 (3), 881–898.
- [4] Chen, Z., Chen, W., Li, C., Pu, Y. and Sun, H. (2016). Effects of polyacrylamide on soil erosion and nutrient losses from substrate material in steep rocky slope stabilization projects, *Sci Total Environ*, 554, 26–33.
- [5] Chen, W., Pourghasemi, H.R. and Naghibi, S.A. (2017). Prioritization of landslide conditioning factors and its spatial modeling in Shangnan County, China using GIS-based data mining algorithms, *Bull Eng Geol Environ*, DOI 10.1007/s10064-017-1004-9.
- [6] Dube, F., Nhapi, I., Murwira, A., Gumindoga, W., Goldin, J. and Mashauri, D.A. (2014). Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District—Zimbabwe, *Phys Chem Earth*, 67, 145–152
- [7] Ghorbani Nejad, S., Falah, F., Daneshfar, M., Haghizadeh, A. and Rahmati, O. (2016). Delineation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS-based data-driven models, *Geocarto Int*,
- [8] Gómez-Gutiérrez, A., Conoscenti, C., Angileri, S.E., Rotigliano, E. and Schnabel, S. (2015). Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two mediterranean basins: advantages and limitations, *Nat Hazards*,
- [9] Ghorbani Nejad, S., Falah, F., Daneshfar, M., Haghizadeh, A. and Rahmati, O. (2017). Delineation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS-based data-driven models, *Geocarto International*, 32(2), 167–187
- [10] Hussin, H.Y., Zumpano, V., Reichenbach, P., Sterlacchini, S., Micu, M., van Westen, C. and Bălăceanu, D. (2016). Different landslide sampling strategies in a grid-based bivariate statistical susceptibility model, *Geomorphology*, 253, 508–523.
- [11] Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H.R., Rezaeian, J. and Sattarian, A. (2014). GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran, *Int J Environ Sci Technol*,
- [12] Kuhnert, P.M., Henderson, A.K., Bartley, R. and Herr, A. (2010). Incorporating uncertainty in gully erosion calculations using the random forests modelling approach, *Environmetrics*, 21 (5), 493–509.
- [13] Kornejady, A., Heidari, K. and Nakhavali, M. (2015). Assessment of landslide susceptibility, semi-quantitative risk and management in the Ilam dam basin, Ilam, Iran, *Environ. Resour. Res*, 3 (1), 85–109.
- [14] Kornejady, A., Ownegh, M. and Bahreman, A. (2017). Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods, *Catena*, 152, 144–162.
- [15] Lee, S., Hwang, J. and Park, I. (2013). Application of data-driven evidential belief functions to landslide susceptibility mapping in Jinbu, Korea, *Catena*, 100, 15–30.
- [16] Martínez-Casasnovas, J.A. (2003). A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion, *Catena*, 50, 293–308.
- [17] Manap, M.A., Nampak, H., Pradhan, B., Lee, S., Sulaiman, W.N.A. and Ramli, M.F. (2014). Application of probabilistic based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS, *Arab J Geosci*, 7(2), 711–724.



- [18] Mekonnen, M., Keesstra, S.D., Baartman, J.E., Stroosnijder, L. and Maroulis, J. (2017). Reducing Sediment Connectivity Throughman-Made and Natural Sediment Sinks in the Minizr Catchment, Northwest Ethiopia, *Land Degrad. Dev*, 28 (2), 708–717.
- [19] Momm, H., Wells, R.R. and Bingner, R.L. (2015). GIS technology for spatiotemporal measurements of gully channel width evolution, *Nat. Hazards*, 79 (1), 97–112.
- [20] Mogaji, K.A., Lim, H.S. and Abdullah, K. (2014). Regional prediction of groundwater potential mapping in a multifaceted geology terrain using GIS-based Dempster–Shafer model. *Arab. J. Geosci.*
- [21] McCloskey, G.L., Wasson, R.J., Boggs, G.S. and Douglas, M. (2016). Timing and causes of gully erosion in the riparian zone of the semi-arid tropical Victoria River, Australia: management implications, *Geomorphology*, 266, 96–104.
- [22] Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi, Z.S. and Rezaei, A. (2014). Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon’s entropy models in the Moghan watershed, Iran, *Earth Sci Inform*, doi:10.1007/s12145-014-0145-7.
- [23] Pourghasemi, H.R. and Kerle, N. (2016). Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran, *Environ Earth Sci*, doi:10.1007/s12665-015-4950-1.
- [24] Pourghasemi, H.R., Yousefi, S., Kornejady, A. and Cerdà, A. (2017). Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling, *Science of the Total Environment*, 609, 764–775.
- [25] Park, I., Kim, Y. and Lee, S. (2014). Groundwater Productivity Potential Mapping Using Evidential Belief Function, *groundwater*, 52, 201-207.
- [26] Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R. and Noormohamadi, F. (2016). Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison, *Nat. Hazards*, 82 (2), 1231–1258.
- [27] Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R. 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.
- [28] Shafer, G. (1976). A mathematical theory of evidence, vol 1. Princeton University, Princeton
- [29] Svoray, T., Michailov, E., Cohen, A., Rokah, L. and Sturm, A. (2012). Predicting gully initiation: comparing data mining techniques, analytical hierarchy processes and the topographic threshold, *Earth Surf Process Landf*, 37, 607–619.
- [30] Shit, P.K., Paira, R., Bhunia, G. and Maiti, R. (2015). Modeling of potential gully erosion hazard using geo-spatial technology at Garbgheta block, West Bengal in India. Model, *Earth Sys. Environ*, 1 (1–2), 1–16.
- [31] Tahmassebpour, N., Rahmati, O., Noormohamadi, F. and Lee, S. (2016). Spatial analysis of groundwater potential using weights-of-evidence and evidential belief function models and remote sensing, *Arab J Geosci*. doi:10.1007/s12517-015-2166-z.
- [32] Tehrany, M.S., Pradhan, B. and Jebur, M.N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weightsof-evidence and support vector machine models in GIS, *J Hydrol*, 512,332–343.
- [33] Wang, L., Wei, S., Horton, R. and Shao, M. (2011). Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the Loess Plateau of China, *Catena*, 87(1), 90–100.
- [34] Youssef, A.M., Al-Kathery, M. and Pradhan, B. (2015). Landslide susceptibility mapping at Al- Hasher area, Jizan (Saudi Arabia) using GIS-based frequency ratio and index of entropy models, *Geosci. J*, 19 (1), 113–134.
- [35] Yesilnacar, E.K. (2005). The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey, Ph.D Thesis Department of Geomatics the University of Melbourne, p 423
- [36] Zakerinejad, R. and Ma`rker, M. (2014). Prediction of Gully erosion susceptibilities using detailed terrain analysis and maximum entropy modeling: a case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran, *Geogr Fis Din Quat*, 37(1), 67–76.

- [37] Zakerinejad, 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.
- [38] Zeinivand, H. and Ghorbani Nejad, S. (2017). Application of GIS-based data-driven models for groundwater potential mapping in Kuhdasht, region of Iran, *Geocarto International*.
- [39] Zheng, F. (2006). Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau, *Pedosphere*, 16(4), 420–427.