

پهنه‌بندی و ارزیابی نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از روش‌های آماری و احتمالاتی

کوروش شیرانی^{*۱}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۷)

چکیده

شناسایی مناطق حساس و مستعد فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های آماری و همچنین استفاده حداکثری از داده‌ها و اطلاعات موجود با صرف هزینه و زمان کم‌تر و دسترسی به‌دقت بیش‌تر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. هدف این پژوهش تعیین مناطق حساس به فرسایش خندقی و تهیه نقشه حساسیت نسبت به آن با استفاده از داده‌کاوی روش‌های آماری دو متغیره دمپسترشفر و چندمتغیره خطی و تلفیق آن‌ها به منظور ارتقاء قابلیت‌ها و مرتفع نمودن معایب آن‌ها در حوزه آبخیز سمیرم در جنوب استان اصفهان می‌باشد. بدین منظور با استفاده از نقشه پراکنش مکانی ۱۵۶ خندق و ۱۴ پارامتر موثر در رخداد خندق، مقادیر شاخص ضریب تحمل (TOL) و فاکتور تورم واریانس (VIF) آزمون هم‌خطی چندگانه (Multicollinearity) عوامل موثر تعیین شدند. مدل‌سازی و اعتبارسنجی به‌ترتیب با استفاده از نسبت ۷۰ و ۳۰ درصد خندق‌های شناسایی شده انجام شد. نقشه‌های حساسیت تهیه شده به ۵ طبقه حساسیت خیلی کم تا خیلی زیاد تقسیم شدند. شاخص سطح سلول هسته (SCAI) و سطح زیر منحنی ویژگی عملگر گیرنده (AUC-ROC) به‌ترتیب به‌منظور تعیین آستانه‌های طبقات و اعتبارسنجی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج روش رگرسیون چند متغیره نشان داد که پارامترهای کاربری اراضی، شیب و فاصله از آبراه بیش‌ترین تأثیر را در رخداد خندق داشته‌اند. مدل تلفیقی با AUC-ROC معادل ۰/۹۴۲، نسبت به مدل‌های نظریه شواهد دمپسترشفر (۰/۹۲۴) و رگرسیون چند متغیره (۰/۸۶۴) از دقت بیش‌تری برخوردار می‌باشد. همچنین مقدار SCAI در مدل تلفیقی از رده‌های حساسیت خیلی کم به خیلی زیاد دارای روند نزولی می‌باشد که بیانگر تفکیک مناسب رده‌بندی حساسیت در این مدل می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، حساسیت، حوضه پایاب سمیرم، خندق، رگرسیون چندمتغیره، دمپسترشفر، عدم قطعیت

۱. بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

*. مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: K.Shirani@areeo.ac.ir

مقدمه

فرسایش خاک به عنوان عامل تخریب سرزمین یکی از معضلات مهم زیست محیطی و عامل اصلی تهدید امنیت غذایی بشر در مناطق وسیعی از جهان به خصوص مناطق خشک و نیمه خشک است (۳۲). فرسایش آبی سهم عمده‌ای از فرسایش خاک را تشکیل می‌دهد و در بین انواع آن، فرسایش خندقی بیشترین عامل فرسایش و تولید کننده رسوب در حوضه‌ها است (۱۸ و ۲۱). اگرچه فرسایش خندقی کمتر از ۵ درصد حوضه‌های آبریز را تحت تأثیر قرار می‌دهد ولی با توجه به شرایط مختلف، می‌تواند از ۱۰ تا ۹۴ درصد کل فرسایش یک حوضه را شامل شود (۲۱). به عبارت دیگر فرسایش خندقی شدیدترین نوع فرسایش آبی است که از عوامل اصلی تخریب سرزمین محسوب می‌شود (۲۱). عوامل محیطی کنترل کننده شرایط بحرانی برای گسترش فرسایش خندقی عبارتند از خاک، زمین‌شناسی منطقه (۲۸ و ۳۶)، پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیکی از جمله شدت و مدت بارش و... همچنین پارامتر کاربری اراضی، پوشش گیاهی و شاخص‌های توپوگرافی (۳، ۴ و ۲۸) و غیره هستند که در مطالعات مختلف در سراسر جهان به آن اشاره شده است (۲۱ و ۳۶). فرسایش خندقی یا خندقی مشکلی عمده به منظور مدیریت منابع طبیعی است که منجر به تخریب زمین و خسارت اقتصادی در سرتاسر جهان می‌شود (۲۱ و ۳۶). این پدیده باعث آسیب رساندن به زیر ساخت‌ها مانند جاده، خطوط انتقال گاز و برق، منابع طبیعی و کشاورزی می‌شود (۱۱). بنابراین مدیریت خاک به منظور بهره‌برداری مطلوب و کاهش تخریب آن ضروری است. آگاهی از میزان حساسیت نسبت به فرسایش خاک در آبخیزها، امکان شناسایی نواحی بحرانی و اولویت بندی برنامه‌های مدیریتی و حفاظتی را فراهم می‌سازد. با توجه به جنبه‌های مختلف فرسایش خندقی و پیامدهای رو به گسترش زیست محیطی آن، پژوهش پیرامون ابعاد مختلف فرسایش خندقی یک ضرورت اجتناب ناپذیر است (۱۳ و ۲۱). در ارتباط با این موضوع، بر اساس آخرین پژوهش‌های انجام شده میزان فرسایش ویژه

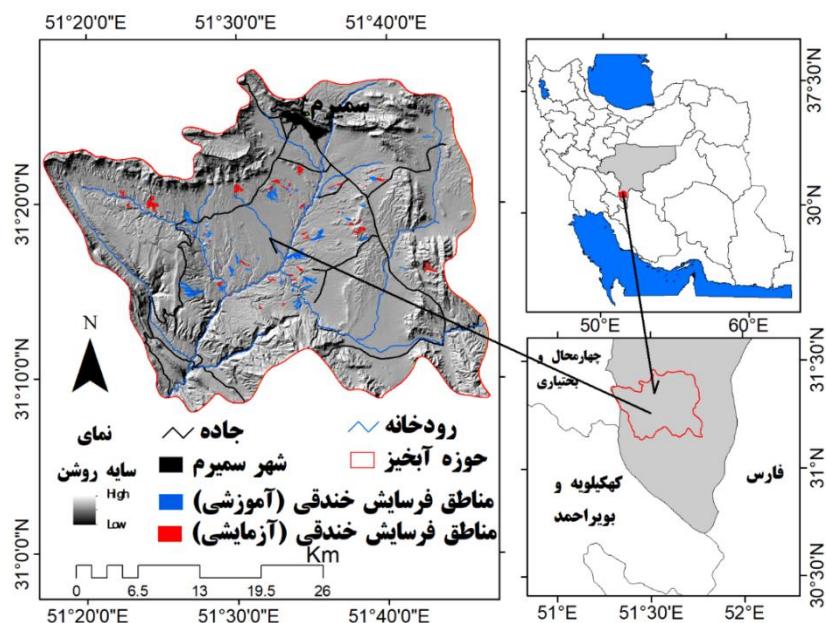
سالانه خاک در ایران، حدود ۱۶/۷ تن در هکتار است (۱۹) که با این روند، رسوب‌دهی حوضه‌های آبخیز کشور ۴۱۱ میلیون تن در سال (۳/۲۹ تن در هکتار) برآورد می‌شود (۱۹). بر اساس مرکز اطلاعات بین‌المللی سازمان ملل متحد ۱۲۵ میلیون هکتار از اراضی ایران به دلیل فرسایش آبی ناپایدار است (۹). بیش از ۵۶ میلیون هکتار از این اراضی در معرض خسارت ناشی از فرسایش آبی بالاتر از ۱۰ تن در هکتار در سال بوده‌اند (۹) و بیش از ۷۵ درصد این مقدار سهم فرسایش خندقی است (۲۵). به منظور اندازه‌گیری فرسایش خندقی روش‌های تجربی و ریاضی متعددی ارائه شده است که از جمله آنها مدل‌های دینامیک و استاتیک هستند (۱۸، ۲۰ و ۲۲). بیشتر این مدل‌ها به داده‌های دقیق زیاد و متعددی نیازمند هستند و فرایندی پرهزینه و زمان‌بر هستند. در ضمن این مدل‌ها پراکنش مکانی خندق‌ها را که ابزار ضروری برای ارزیابی تأثیر تغییرات محیطی بر روی رخداد خندق‌ها و برنامه‌ریزی فعالیت‌های کنترل فرسایش است را پیش‌بینی نمی‌کند. در مناطقی وسیع که به دلایل مختلف، اطلاعات و داده‌های مورد نیاز وجود ندارند، ترکیب استفاده از داده‌های سنجش از دور، سامانه‌های اطلاعات مکانی و مدل‌های ساده‌ای که خود به داده‌های ورودی متنوع زیادی نیاز ندارند، می‌توانند داده‌های لازم را فراهم و مدل مورد نظر را اجرا کنند (۳۱ و ۳۷). از آنجایی که ارزیابی و برآورد میزان فرسایش خاک به دلیل تأمین آمار و اطلاعات ورودی متعدد و مفصل در مناطق بسیار وسیع مانند حوضه‌های آبخیز، فرایندی پرهزینه و زمان‌بر است (۲۸). لذا در سال‌های اخیر در زمینه پهنه‌بندی فرسایش خندقی مدل‌های متعددی از قبیل مدل‌های آماری دومتغیره و چندمتغیره مشتمل بر ارزش اطلاعات، نسبت فراوانی، وزن شاهد، رگرسیون لجستیک، شاخص آنتروپی، حداکثر آنتروپی، تحلیل شرطی، فاکتور اطمینان، مدل‌های داده‌مبنا مشتمل بر رگرسیون تطبیقی چندگانه، جنگل تصادفی، ماشین پشتیبان بردار، درخت‌های رگرسیونی و طبقه‌بندی، شبکه‌های عصبی، درخت رگرسیون تقویت شده و مدل‌های دانش‌مبنا مشتمل بر فرایند سلسله مراتبی به‌وسیله

روش رگرسیون چندمتغیره امکان محاسبه رابطه بین یک متغیر وابسته و مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل و میزان تأثیر متغیرهای مستقل روی متغیرهای وابسته است. همچنین این روش می‌تواند میزان تأثیر پارامترها را در رخداد یک واقعه مشخص کند. در مقابل مهم‌ترین نقطه ضعف آن عدم توانایی در محاسبه وزن طبقات و مشخص کردن میزان دخالت آنها در رخداد یک پدیده است (۲۸). بنابراین به‌کارگیری این دو روش با همدیگر می‌تواند نقاط ضعف یکدیگر را رفع و واقعیت را بهتر مدل کند. حوضه پایاب سمیرم واقع در جنوب استان اصفهان به دلیل ویژگی‌های اقلیمی، توپوگرافیک و سنگ‌شناسی حساسیت بالایی نسبت به فرسایش خندقی دارا است. در این منطقه فرسایش خندقی فعال بوده و گاهی طول خندق‌ها به بیش از ۵۰ متر می‌رسد. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه از نظر ساختاری در منطقه زمین‌شناسی زاگرس مرتفع با مورفولوژی خاص قرار دارد. لذا ویژگی‌ها یا شاخص‌های توپوگرافیک ناشی از ساختار زمین‌شناسی در کنار سایر فاکتورهای ذاتی از قبیل سنگ‌شناسی، پوشش گیاهی و اقلیم نقش مؤثری در رخداد فرسایش خندقی دارد. همچنین با توجه به حساسیت بالای لایه‌های سطحی خاک و در بعضی بخش‌ها لایه‌های سطحی و عمقی خاک، رواناب باعث ایجاد شیار و در مرحله بعد خندق در منطقه مورد مطالعه می‌شود. از آنجایی که تأثیر فرسایش خندقی در تخریب زمین در منطقه مورد مطالعه نسبت به انواع دیگر فرسایش آبی چندین برابر است، لذا با توجه به مطالب اشاره شده هدف این پژوهش: (۱) تعیین مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر فرسایش خندقی با استفاده از روش‌های آماری داده مبنای (۲) اجرای مدل‌های رگرسیون چندمتغیره، دمپسترشفر و مدل تلفیقی حاصل از این دو روش به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی فرسایش خندقی، (۳) ارزیابی و اعتبارسنجی نقشه‌های پیش‌بینی حساسیت نسبت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های دو متغیره دمپسترشفر و چندمتغیره خطی و تلفیق آنها به منظور افزایش صحت نقشه‌های پیش‌بینی نسبت به فرسایش خندقی است.

داده‌های زمین محیطی قابل دسترس توسعه یافته‌اند (۲، ۳، ۴، ۶، ۱۲، ۱۵، ۲۴ و ۳۸).

در زمینه به‌کارگیری روش‌های دو متغیره و چندمتغیره به منظور پهنه‌بندی فرسایش خندقی در ایران پژوهش‌های متعددی انجام شده است که کارایی آنها در پهنه‌بندی فرسایش خندقی به صورت مجزا و غیرتلفیقی در نظر گرفته شده است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به جعفری گرزین و کاویان (۱۳) در حوضه آبخیز سرخ‌آباد مازندران با روش شاخص وزنی، راهی و همکاران (۲۳) در استان بوشهر با روش‌های آماری مختلف، مقصودی و همکاران (۱۶) در منطقه زاریان قم با روش شاخص همپوشانی، فرج‌زاده و همکاران (۱۰) در کیاسر مازندران با روش رگرسیون چندمتغیره، رحمتی و همکاران (۲۴) در حوضه آبخیز کشکان پلدختر لرستان با روش احتمال شرطی و شیرانی (۲۸) در حوضه آبخیز حنای سمیرم استان اصفهان با استفاده از روش حداکثر آنتروپی اشاره کرد. در تمام پژوهش‌های گفته شده به استفاده و به‌کارگیری روش‌های آماری دو متغیره و چندمتغیره به صورت مجزا بسنده شده است و هیچ تلاشی برای استفاده تلفیقی از مدل‌های مذکور برای افزایش اعتبار و صحت نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به فرسایش خندقی نشده است.

در روش‌های دو متغیره با استفاده از روابط آماری بین طبقات فاکتورهای مؤثر در رخداد یک پدیده و توزیع فضایی آن پدیده، ارزش وزنی هر یک از طبقات محاسبه می‌شود. در مقابل در روش‌های چندمتغیره وزن مربوط به هر پارامتر و میزان دخالت آن فاکتور و اثرات متقابل پارامترهای مختلف در رخداد یک پدیده محاسبه می‌شود (۲۹ و ۳۰). مهم‌ترین مزایای روش دمپستر شفر عدم نیاز به داده‌های زیاد، قابلیت استفاده در مقیاس‌های جغرافیایی مختلف، انعطاف‌پذیری و سهولت درک خروجی مدل در مقایسه با مدل‌های تجربی و فیزیکی است، در مقابل مهم‌ترین ضعف این روش عدم محاسبه وزن معیارها و ناتوانی در تعیین میزان تأثیر هر یک از معیارها در رخداد یک پدیده است (۲۸). مهم‌ترین مزیت



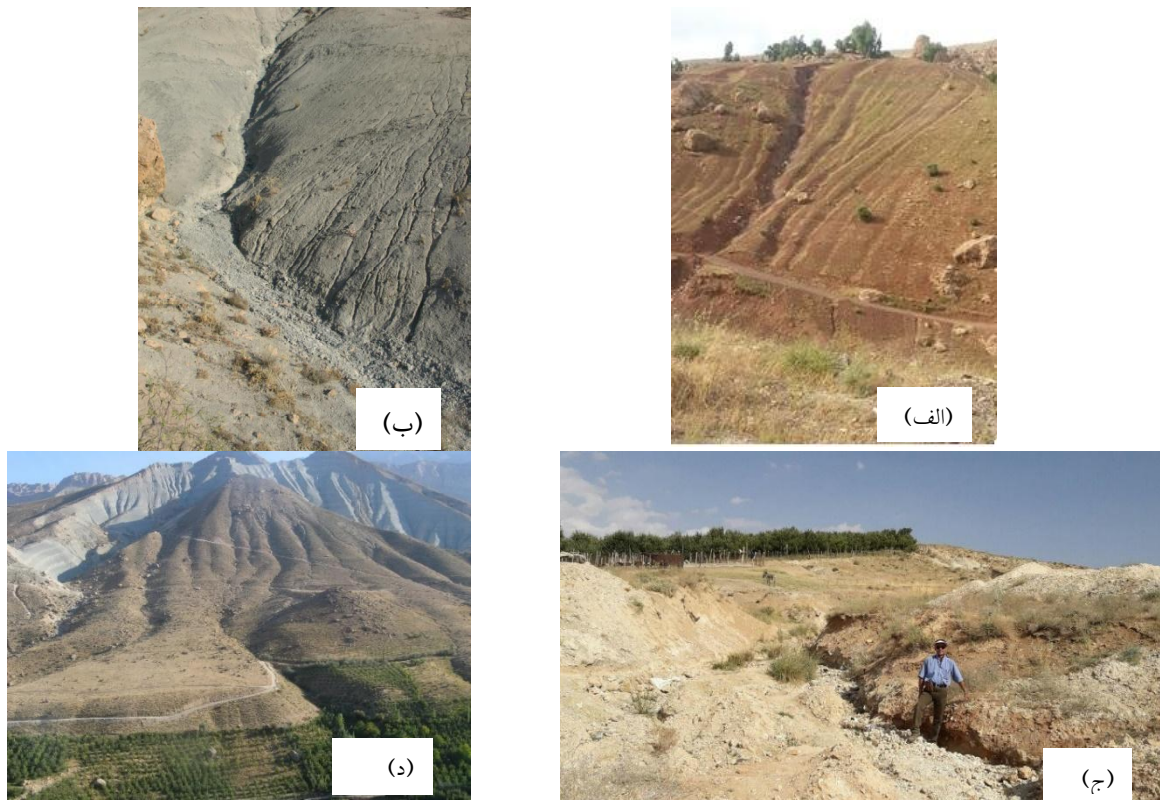
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه پایاب سمیرم به همراه پراکنش خندق‌های منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه پایاب سمیرم با کد ۲۳۱۵ بر اساس نامگذاری تحقیقات و مطالعات منابع آب ایران، در جنوب استان اصفهان با مساحتی بالغ بر ۱۰۹۸ کیلومتر مربع در محدوده ۵۱ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع حوضه از سطح دریا بین ۱۷۶۲ تا ۳۱۸۴ متر در نوسان و متوسط ارتفاع حوضه مورد مطالعه ۲۱۸۵ متر است. از مهم‌ترین مناطق مسکونی حوضه مورد مطالعه، به شهر سمیرم واقع در شمال آن می‌توان اشاره کرد. متوسط بارندگی سالیانه منطقه مورد مطالعه (۳۵۰ میلی‌متر) است که بارندگی مؤثر از آذر ماه ادامه دارد (۲۸). همچنین پرباران‌ترین ماه سال بهمن با ۶/۶۰۸ میلی‌متر است و مرداد بدون بارندگی (خشک‌ترین ماه سال) است. متوسط حداقل درجه حرارت سالانه ۰/۸۳- و حداقل مطلق ۲۱/۵۵- درجه سانتی‌گراد ثبت شده است (۲۸). حداکثر مطلق دمای هوا در ایستگاه سمیرم ۳۴/۷۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین دمای سالیانه بین ۲/۶۹- تا ۲۴/۰۴ درجه سانتی‌گراد

به‌ترتیب در زمستان و تابستان است (۲۸). از دیدگاه اقلیمی فصل‌های گرم و فصل‌های بارشی در این حوضه همزمان نیستند (۲۸). از نظر اقلیمی در ایران دو طبقه‌بندی اقلیمی خشک و نیمه‌خشک با توجه به میزان بارش به‌ترتیب کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر و ۴۰۰-۱۰۰ میلی‌متر تعریف شده است (۲۸). لذا با توجه به این تعریف منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه‌خشک است (۲۸). این حوضه از نظر تکتونیکی فعال و پرتکاپو است و در مرز دو منطقه زاگرس چین‌خورده و رورانده قرار می‌گیرد. توپوگرافی این اراضی به‌شکل اراضی مسطح و کوهستانی است (۲۸). ناهمواری‌های این منطقه متأثر از چینه‌شناسی سازندهای زمین‌شناسی رخنمون یافته بیشتر با تناوبی از مارن و ماسه‌سنگ هستند. حوضه از نظر جنس خاک بیشتر در طبقه Typic Calcixercept با ماده آلی کمتر از چهار درصد و بافت خاک معمولاً سبک و شنی در مناطق شیب‌دار و کوهستانی و بافت سبک و سیلتی در مناطق مسطح و مرکزی به‌ویژه در مجاورت مناطق خندقی قرار می‌گیرد. پوشش گیاهی و کاربری اراضی منطقه بیشتر شامل اراضی مرتعی، جنگلی و اراضی کشاورزی است.



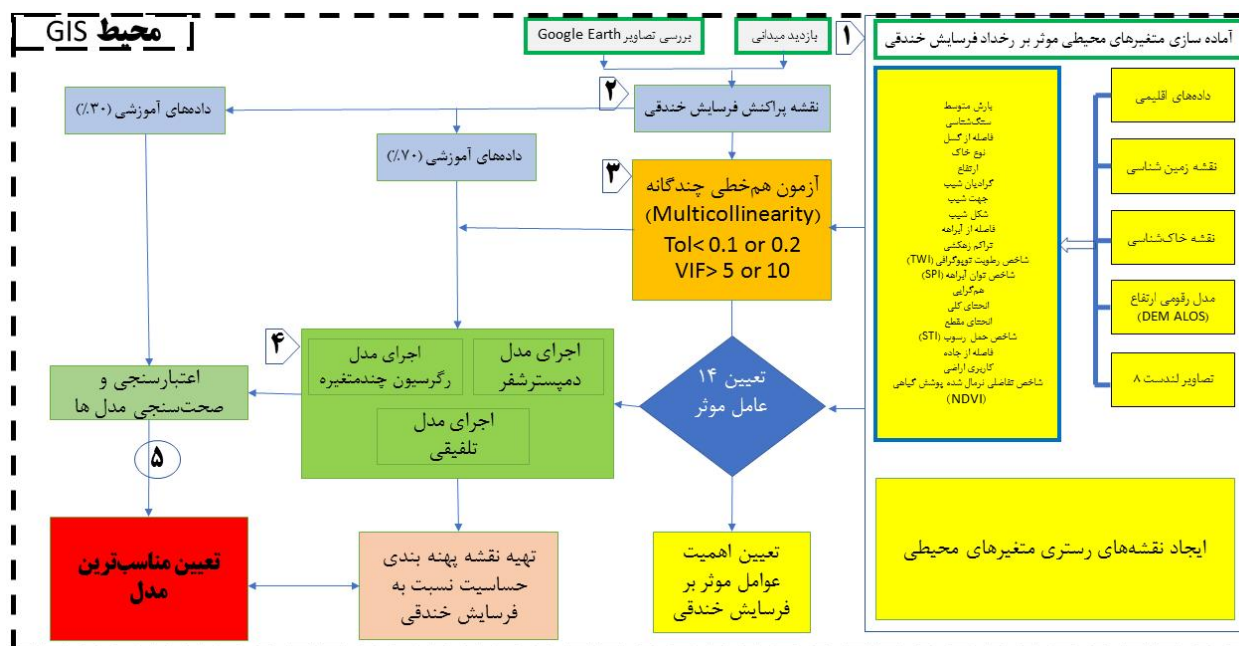
شکل ۲. نمونه‌ای از خندق‌ها در منطقه مورد مطالعه: الف) خندق‌های موازی و قائم در سازند پابده (PeEpd)، ب) خندق مستقیم در سازند مارنی شیلی گورپی (Kgu)، ج) خندق U شکل با عرض زیاد در سازند کنگلومرای سست دانه ماسه ای مارنی بختیاری (Pibk) و د) خندق V شکل در رسوبات تراسی کوهپایه‌ای بلند

پراکنش مناطق فرسایش خندقی

در این پژوهش از نقشه پراکنش فرسایش خندقی به صورت کمی برای تحلیل ارتباط بین خندق‌ها و عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی، آنالیزهای کمی آزمون هم‌خطی چندگانه (Multicollinearity) بین عوامل مؤثر و پهنه‌بندی، پیش‌بینی و اعتبارسنجی حساسیت نسبت به فرسایش خندقی استفاده شد. بدین منظور در منطقه مورد مطالعه ۱۵۶ خندق به صورت تصادفی بر اساس بازدید میدانی با استفاده از GPS، تفسیر تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث و عکس‌های هوایی برداشت شد. هنگام برداشت موقعیت خندق‌ها سعی شد انتخاب انواع خندق در اندازه‌های متفاوت در حوضه مورد توجه با پوشش سراسری مدنظر قرار گیرد. با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری مانند متر و شاخص اقدام به اندازه‌گیری بعضی ویژگی‌های

(عمق و عرض) خندق‌ها در منطقه شد. عمق و طول خندق‌ها بسیار متنوع بوده به طوری که در بعضی مناطق به ۳/۵ متر نیز می‌رسد، پیشانی خندق که بخش قابل پیش‌رو و گسترش خندق محسوب می‌شود در بسیاری از مناطق به صورت فعال بوده و در حال گسترش است (شکل ۲- الف تا ۲- د). خندق‌ها بیشتر در مناطق مرکزی و جنوبی حوضه آبخیز سمیرم و در شیب‌های تا زیر ۱۰ درصد قرار گرفته‌اند. بستر خندق‌ها دارای خاک عمیق و نیمه‌عمیق، سنگریزه‌دار و دارای بافت سبک تا متوسط است. اکثر مناطق خندقی با اراضی کشاورزی، متروکه و با شیب ملایم منطبق هستند.

مطالعات و اندازه‌گیری‌ها در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقطع عرضی خندق‌ها بیشتر به صورت U شکل هستند. این خندق‌ها بیشتر در سازندهای پابده (PeEpd) و



شکل ۳. نمودار گردش مراحل اجرای پژوهش

شناسایی شده در منطقه مطالعاتی، به طور تصادفی ۷۰ درصد (۱۰۹ خندق) برای مدل سازی و ۳۰ درصد (۴۷ خندق) برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. به منظور انتخاب پارامترهای مؤثر در فرسایش خندقی از منابع مختلفی مانند بررسی پژوهش های پیشین، ویژگی های محیطی منطقه، و آزمون هم خطی چندگانه (Multicollinearity) استفاده و در نهایت ۱۴ پارامتر به منظور مدل سازی انتخاب شدند. این ۱۴ پارامتر شامل ارتفاع، شیب، شکل شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص توان جریان آبراهه (SPI)، شاخص حمل رسوب (STI)، شاخص همگرایی جریان، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، کاربری اراضی، شاخص نرمال شده تفاضلی پوشش گیاهی (NDVI)، سنگ شناسی، نوع خاک، و فاصله از جاده است (شکل ۴).

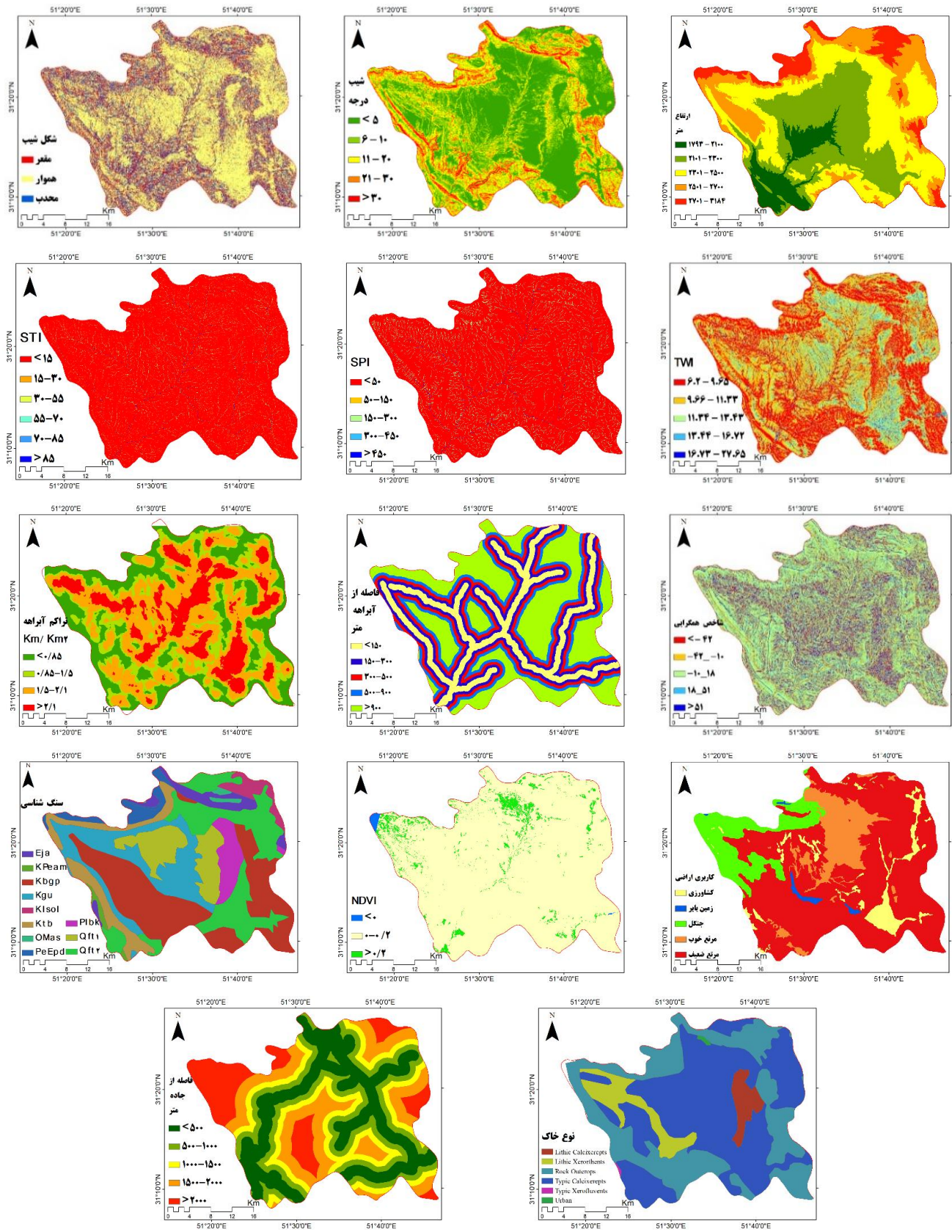
به منظور تهیه مدل رقومی ارتفاعی از داده های فرکانس پایین راداری PALSAR در باند L مربوط به ماهواره ژاپنی ALOS استفاده و مدل رقومی با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر تهیه شد. پارامترهای توپوگرافی و ژئومورفومتریک منطقه مطالعاتی مانند ارتفاع، شیب، جهت شیب، شکل شیب، طول شیب، شاخص های رطوبت توپوگرافی، توان جریان آبراهه، حمل

گوری (Kgu) که ضخامت رسوبات ریزدانه از بالا به پایین یکسان است، ایجاد شده اند. خندق ها در منطقه مورد مطالعه با عمق حداکثر ۴/۲ و عرض ۳۸ متر ایجاد شده اند و بیشتر دارای اشکال هدکت انگشتی هستند. نمونه ای از خندق های منطقه مطالعاتی در شکل ۲ نشان داده شده است.

روش تحقیق

همان طور که در شکل ۳ آمده است، این پژوهش طی پنج مرحله اصلی (۱) آماده سازی ۱۹ لایه اطلاعاتی عوامل مؤثر بر فرسایش توده ای به عنوان متغیر مستقل، (۲) تهیه نقشه پراکنش رخداد فرسایش خندقی، (۳) آزمون هم خطی چندگانه به منظور بررسی هم پوشانی اطلاعاتی عوامل مؤثر، (۴) اجرای سه مدل دمپستر سفر، چندمتغیره خطی و تبقی و (۵) اعتبارسنجی مدل ها به اجرا در آمده است (شکل ۳).

در این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره ای Google Earth و عملیات میدانی گسترده با استفاده از GPS، نقشه پراکنش خندق ها در منطقه مورد مطالعه با مساحتی بالغ بر ۱۰۹۸ کیلومتر مربع تهیه شد. در مجموع از تعداد ۱۵۶ خندق



شکل ۴. پارامترهای مؤثر در فرسایش خندقی

نقشه سنگ‌شناسی منطقه مطالعاتی با استفاده از نقشه زمین‌شناسی مربوط به سازمان زمین‌شناسی کشور در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ رقومی شد. اطلاعات مربوط به واحدهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. لایه نوع خاک از بخش حفاظت خاک مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان تهیه شد و به ۵ رده Typic Calcixerepts, Lithic Xerorthents, Lithic Calcixerepts, Typic Xerofluvents و Rock Outcrops طبقه‌بندی شد. برای محاسبه لایه فاصله از جاده ابتدا با استفاده از نقشه توپوگرافی به مقیاس ۱:۵۰۰۰۰۰ و تصاویر Google Earth لایه جاده‌های منطقه مطالعاتی استخراج شد. در گام بعد در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.5 و با استفاده از ابزار Distance لایه فاصله از جاده تهیه شد.

به منظور تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی با روش نظریه شواهد دمپسترشفر از روابط ۵ تا ۹ استفاده شد (۵، ۱۷ و ۲۷).

$$m(\theta)_{Eij} = 1 - m(S_p)_{Eij} - m(\bar{S}_p)_{Eij} \quad (5)$$

$$m(S_p)_{Eij} = \frac{\lambda(S_p)_{Eij}}{\sum_j \lambda(S_p)_{Eij}} \quad (6)$$

$$m(\bar{S}_p)_{Eij} = \frac{\lambda(\bar{S}_p)_{Eij}}{\sum_j \lambda(\bar{S}_p)_{Eij}} \quad (7)$$

$$\lambda(S_p)_{Eij} = \frac{N(L \cap E_{ij}) / N(L)}{N(E_{ij}) - N(L \cap E_{ij}) / N(A) - N(L)} \quad (8)$$

$$\lambda(\bar{S}_p)_{Eij} = \frac{N(L) - N(L \cap E_{ij}) / N(L)}{N(A) - N(L) - N(E_{ij}) + N(L \cap E_{ij}) / N(A) - N(L)} \quad (9)$$

که در آن $m(\theta)_{Eij}$ بیانگر عدم قطعیت و وزن نهایی مدل است و هر چه مقادیر این تابع در طبقه‌ها کمتر باشد بیانگر حساسیت بیشتر آن طبقه است، $m(S_p)_{Eij}$ بیانگر احتمال رخداد فرسایش خندقی در منطقه (تابع باور)، $m(\bar{S}_p)_{Eij}$ بیانگر احتمال عدم رخداد فرسایش خندقی (تابع ناباوری)، $N(L)$ مساحت کل خندق‌های رخ داده در منطقه، $N(L \cap E_{ij})$

رسوب، و شاخص همگرایی، در محیط نرم‌افزارهای ArcGIS10.5 و SAGA GIS6.2.0 از مدل رقومی ارتفاعی تهیه شدند. برای محاسبه شاخص‌های ژئومورفومتریکی حمل رسوب، رطوبت توپوگرافی، و توان جریان آبراهه به ترتیب از روابط ۱ تا ۳ استفاده شد (۲۸ و ۲۹).

$$STI = \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^{0.6} \times \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^{1.3} \quad (1)$$

$$TWI = \ln(A_s / \tan \beta) \quad (2)$$

$$SPI = A_s \times \tan \beta \quad (3)$$

که در آن A_s مساحت ویژه حوضه (M^2/M) و β گرادیان شیب برحسب درجه است.

برای محاسبه فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه ابتدا شبکه آبراهه از مدل رقومی PALSAR در محیط نرم‌افزار Arc Hydro استخراج شد. بدین منظور برای استخراج شبکه آبراهه آستانه سلولی ۱۰۰ در نظر گرفته شد. پس از استخراج شبکه آبراهه، در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.5 فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه با استفاده از ابزارهای Distance و Density محاسبه شدند. برای تهیه نقشه کاربری اراضی از تصاویر لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۱۸ و سین ۳۹-۱۳۸ پس از اعمال تصحیحات رادیومتریکی، اتمسفری و هندسی با استفاده از روش نظارت شده و الگوریتم حداکثر شباهت، نقشه کاربری اراضی در محیط نرم‌افزار ENVI 4.8 تهیه شد. برای صحت سنجی نقشه تهیه شده از ۲۹۷ نقطه کنترل زمینی (GCP) استفاده شد و مقدار ضریب کاپا برای نقشه تهیه شده ۰/۹۷۶ به دست آمد که بیانگر دقت بالای نقشه تهیه شده است. برای محاسبه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) از باندهای ۴ (باند قرمز) و ۵ (باند مادون قرمز) تصویر لندست ۸ تصحیح شده در محیط نرم‌افزارهای ArcGIS10.5 استفاده شد و با استفاده از رابطه ۴ نقشه NDVI محاسبه شد:

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (4)$$

که در آن IR بخش مادون قرمز طیف الکترومغناطیس و R بخش قرمز طیف الکترومغناطیس است.

جدول ۱. ویژگی‌های سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

علامت سنگ‌شناسی	سازند زمین‌شناسی	توصیف سنگ‌شناسی	مساحت به کیلومتر مربع
Eja	جهرم	دولومیت با میان لایه‌های آهکی، آهک دولومیتی	۵۳/۸۹
Kbgp	گروه فارس	آهک و شیل گروه فارس	۳۴۴/۰۹
Kgu	گورپی	مارن و شیل با میان لایه‌های آهک رسی	۲۰۰/۰۳
Klsol	کژدمی	آهک اریتولین‌دار ضخیم لایه	۳۵/۴۰
KPeam	امیران	سنگ سیلتی و ماسه‌سنگی به همراه آهک و کنگلومرای چرتی	۹/۴۸
Ktb	تاربور	آهک شیلی و انیدریتی	۹۷/۳۰
OMas	آسماری	آهک با اینترکاله‌های شیلی	۸/۵۴
PeEpd	پابده	شیل و مارن با بین لایه‌های آهک رسی	۴۳/۸۸
Plbk	بختیاری	کنگلومرای سست‌دانه همرا با ماسه و مارن	۶۱/۲۶
Qft1	تراس‌های کوهپایه‌ای بلند	تراس‌های آبرفتی کوهپایه‌ای مرتفع	۱۳۱/۱۵
Qft2	تراس‌های کوهپایه‌ای پست	تراس‌های آبرفتی کوهپایه‌ای پست	۱۱۲/۹۲

اساس شاخص نسبت فراوانی حاصل از نسبت سطح یا تعداد رخداد خندق به مساحت هر رده از هر یک از عوامل مؤثر، داده‌های کمی مکانی یا مقادیر نقشه‌های وزنی طبقه‌های هر عامل از ۱۴ عامل محاسبه و تعیین شد. در مرحله بعد به تعداد نقاط حضور یا رخداد خندق (۱۵۶ رخداد)، نقاط عدم حضور یا عدم رخداد خندق (۱۵۶ عدم رخداد) به صورت تصادفی با استفاده از الگوریتم Create random Points در محیط ArcGIS10.5 ایجاد می‌شود. سپس برای هر ۳۱۲ نقشه حضور و عدم حضور (به‌عنوان متغیر وابسته) مقادیر اوزان تمام ۱۴ لایه وزنی (متغیرهای مستقل) با استفاده از دستور Extract value to point استخراج می‌شود. جدول مقادیر متغیر وابسته و ۱۴ عامل مؤثر به محیط نرم‌افزار اکسل منتقل می‌شود. فایل تکمیل شده اکسل به محیط نرم‌افزار SPSS ۲۴ برای اجرای روش رگرسیون خطی چندمتغیره وارد می‌شود. در محیط SPSS روش رگرسیون خطی چندمتغیره با مقادیر ستون حضور و عدم حضور خندق به‌عنوان متغیر وابسته و مقادیر ستون‌های ۱۴ عامل مؤثر به‌عنوان متغیر مستقل در قالب ۳۱۲ داده آموزشی با روش ورود تمام داده‌ها (ENTER) در سطح اطمینان ۹۵ درصد اجرا شد. پس از تعیین ضرایب رگرسیونی عوامل مؤثر

مساحت خندق‌ها در زیرطبقه Z از پارامتر i است، $N(A)$ برابر با تعداد کل پیکسل‌ها در منطقه مطالعاتی، $N(E_{ij})$ تعداد پیکسل‌ها در زیرطبقه Z از پارامتر i است. پس از به‌دست آوردن وزن نهایی (مقادیر عدم قطعیت) هر یک از زیرطبقه‌ها، این وزن‌ها به لایه‌های اطلاعاتی اضافه و در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.5 و با استفاده از ابزار Weighted Sum نقشه‌های وزنی با هم جمع شده و نقشه نهایی به‌دست می‌آید. در نقشه نهایی هر چه مقدار وزن‌های به‌دست آمده در یک طبقه کمتر باشد بیانگر حساسیت بالاتر آن طبقه نسبت به فرسایش است.

همچنین در این پژوهش به‌منظور اجرا و تهیه مدل رگرسیون خطی چندمتغیره با استفاده از رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به فرسایش خندقی برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + e \quad (10)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + e \quad (11)$$

که در آن Y متغیر وابسته، $X_1 \dots X_n$ متغیرهای مستقل، و $\beta_0 \dots \beta_n$ پارامترهای مدل هستند.

به‌منظور آماده‌سازی هر یک از ۱۴ عامل مؤثر در فرسایش خندقی برای ورود به تحلیل آماری رگرسیون چندمتغیره بر

اعتبارسنجی مدل‌ها و منحنی ویژگی عملگر گیرنده (ROC) ارزیابی یک گام اساسی در توسعه و تعیین کیفیت نقشه یا مدل پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد خندق است. در این پژوهش برای ارزیابی و مقایسه دقت بین پهنه‌ها یا رده‌های حساسیت نسبت به رخداد خندق، از نسبت فراوانی (FR) و شاخص سطح سلول هسته (SCAI) استفاده شد. با استفاده از نسبت فراوانی (FR) و شاخص سطح سلول هسته (SCAI) دقت تفکیک طبقه‌بندی هر مدل تعیین می‌شود (۲۹). بنابراین لازم است برای برآورد بهتر دقت تفکیک‌پذیری رده‌های مدل‌ها از نمودار هر دو شاخص استفاده شود. بر اساس رابطه منطقی و نسبی موجود بین سطح خندق و پهنه‌های حساسیت، به ترتیب برای پهنه‌های با حساسیت خیلی کم تا خیلی زیاد مقدار FR افزایش و شاخص SCAI به صورت قرینه معکوس کاهش می‌یابد. همچنین با استفاده از منحنی ویژگی عملگر گیرنده (ROC) صحت نقشه‌های تهیه شده مورد ارزیابی قرار گرفت. این منحنی از کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیات تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (۲۸ و ۲۹). منحنی ROC و محاسبه سطح زیرمنحنی (AUC) یکی از روش‌های استاندارد اعتبارسنجی به منظور مقایسه عمل کرد پیش‌بینی انواع مدل‌ها است (۲۴، ۲۸ و ۲۹). در این منحنی، در محور X مقدار خطای مثبت و روی محور Y مقدار خطای منفی نمایش داده می‌شود. این منحنی، یکی از کارآمدترین روش‌ها برای نمایش کیفیت مدل است. مقدار AUC بین ۰/۵-۱ متغیر است (۲۸). سطح زیر منحنی ROC که AUC نامیده می‌شود، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (رخداد فرسایش خندقی) و عدم وقوع رخ داده (عدم رخداد فرسایش خندقی) است (۲۴). ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد. نرخ پیش‌بینی منحنی ROC بیانگر ارزیابی مدل و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده خندق است.

برای ۳۱۲ داده آموزشی، این ضرایب به کل سلول‌های نقشه منطقه مورد مطالعه تعمیم داده شد و نقشه پهنه‌بندی بر اساس روش رگرسیون خطی چندمتغیره حاصل می‌شود.

آزمون هم‌خطی چندگانه به منظور بررسی همپوشانی اطلاعاتی عوامل مؤثر

قبل از به‌کارگیری عوامل مؤثر و تلفیق آنها بر اساس مدل مورد استفاده در تهیه نقشه حساسیت نسبت به فرسایش خندقی، لازم است آزمون هم‌خطی چندگانه بین داده‌های مورد استفاده آزمون یا بررسی شود. در صورتی که داده‌ها فاقد همبستگی یا دارای استقلال باشند می‌توانند در مدل مورد نظر استفاده شوند. بدین منظور آزمون‌های آماری مختلفی برای تحلیل همبستگی بین فاکتورهای مؤثر بر رخداد خندق به خدمت گرفته می‌شوند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی، مقایسه زوجی یا جفتی، و رگرسیون لجستیک از جمله این آزمون‌ها هستند (۲۴، ۲۸ و ۲۹). تحلیل هم‌خطی چندگانه (Multicollinearity) همبستگی میان متغیرهای مستقل را برآورد می‌کند (۷ و ۳۳). بدین منظور از دو شاخص مهم ضریب تحمل (TOL) و فاکتور تورم واریانس (Variance inflation factor) یا VIF برای تحلیل و تعیین همپوشانی اطلاعاتی عوامل مؤثر استفاده می‌شود (۲۹ و ۳۴). این دو شاخص در حین اجرای مدل‌های خطی تعمیم‌یافته برای تحلیل ارتباط میان متغیرهای مستقل یا آزمون هم‌خطی چندگانه به کار می‌رود (۱۷ و ۳۴). اگرچه تا کنون هیچ قانون مشخصی برای تعیین آستانه‌های دو مقدار VIF و TOL در تحلیل و تخمین هم‌خطی چندگانه عوامل مؤثر بر رخداد خندق وجود ندارد (۲۹ و ۳۴). اما بر اساس سابقه تحقیقی که در این زمینه انجام شده است، اگر عدد VIF کمتر از ۵ یا ۱۰ و TOL بزرگ‌تر از ۰/۱ یا ۰/۲ باشد در آن صورت مشکل همپوشانی بین عوامل مؤثر وجود ندارد. به عبارت دیگر بین داده‌ها یا متغیرهای مستقل هیچ همبستگی (collinearity) وجود نخواهد داشت (۳۴).

جدول ۲. آزمون هم‌خطی چندگانه بین پارامترها

آزمون هم‌خطی چندگانه		پارامترها	آزمون هم‌خطی چندگانه		پارامترها
فاکتور تورم واریانس	ضریب تحمل		فاکتور تورم واریانس	ضریب تحمل	
(VIF)	(TOL)		(VIF)	(TOL)	
۲/۹۹	۰/۳۴۵	شکل شیب	-	-	مقدار ثابت
۱۱/۴	۰/۰۱۱	انحنای مقطع	۱/۵۱	۰/۵۹۱	نوع خاک
۱۲/۴۵	۰/۰۴۱	بارندگی	۱/۴۱	۰/۵۶۰	کاربری اراضی
۳/۳۸	۰/۴۴۱	فاصله از جاده	۲/۰۹	۰/۴۷۵	سنگ‌شناسی
۴/۲۸	۰/۳۴۲	شیب	۱۲/۱۴	۰/۰۹۱	جهت شیب
۲/۳۱	۰/۸۸۱	SPI	۱۴/۰۶	۰/۰۴۱	انحنای کلی
۱/۴۱	۰/۶۹۹	STI	۳/۱۱	۰/۳۵۱	تراکم آبراهه
۱/۲۳	۰/۹۹۴	TWI	۲/۱۲	۰/۶۵۴	فاصله از آبراهه
۱/۴۸	۰/۶۵۸	شاخص همگرایی	۱۳/۷۳	۰/۰۶۰۲	فاصله از گسل
۱/۴۶	۰/۸۴۵	ارتفاع	۱/۶۴	۰/۴۱۸	NDVI

نتایج و بحث

نتایج آزمون هم‌خطی چندگانه

در این پژوهش قبل از اجرای روش‌های نظریه شواهد دمپسترشفر، رگرسیون چندمتغیره خطی و روش ترکیبی، تحلیل هم‌خطی چندگانه به منظور اجتناب از هم‌پوشانی اطلاعاتی بین عوامل مؤثر انجام و شاخص‌های ضریب تحمل (TOL) و فاکتور تورم واریانس (VIF) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون هم‌خطی چندگانه بین پارامترها در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد پارامترهایی که ضریب تحمل کمتر از ۰/۱ و فاکتور تورم واریانس بیشتر از ۱۰ داشتند به دلیل وجود هم‌پوشانی بین پارامترها از فرایند مدل‌سازی کنار گذاشته شدند (۲۴) و (۲۹). طبق نتایج از بین ۱۹ پارامتر اولیه، پارامترهای جهت شیب، انحنای کلی، فاصله از گسل، انحنای مقطع، و بارندگی دارای هم‌خطی یا هم‌پوشانی اطلاعاتی بوده و در نتیجه از فرایند مدل‌سازی حذف و مدل‌سازی با ۱۴ پارامتر انجام گرفت.

نتایج حاصل از روش چندمتغیره خطی

با توجه به نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل رگرسیون چندمتغیره، برای تمامی عوامل ضریب معنی‌داری بالاتر از ۹۵ درصد به‌دست آمد که نشان‌دهنده آن است که از نظر آماری رابطه قوی با رخداد خندق در منطقه مورد مطالعه داشته‌اند. جدول ۳ نتیجه نهایی حاصل از تجزیه و تحلیل آماری به‌دست آمده با R^2 معادل ۰/۸۳ در سطح اطمینان ۹۹ درصد را نشان می‌دهد.

همچنین ضرایب یا به‌عبارت دیگر اوزان هر متغیر مستقل در قالب جدول ۴ مشخص شد. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است سطح اطمینان تمام عوامل مؤثر بالاتر از ۹۵ درصد است. طبق نتایج حاصل از جدول ۴ پارامترهای کاربری اراضی، شیب و فاصله از آبراهه با کسب امتیازات (۰/۷۴۲، ۰/۱۶۵ و ۰/۱۳۹) بیشترین تأثیر را در رخداد فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی داشته‌اند که با نتایج تحقیقات داب و همکاران (۸)، صابری و همکاران (۲۶)، شیرانی (۲۸) و رحمتی و همکاران (۲۴) مطابقت دارد. پارامترهای شکل شیب، جنس خاک، شاخص همگرایی، SPI،

جدول ۳. ضریب همبستگی مدل آماری رگرسیون چندمتغیره

Change Statistics					Model
Sig. F Change	df2	df1	F Change	R Square Change	
۰/۰۰۰	۳۹۸	۱۵	۱۳/۸۳	۰/۸۳۳	رگرسیون چندمتغیره

جدول ۴. نتایج تجزیه تحلیل آماری رگرسیون چندمتغیره

معنی داری	ضرایب	علامت	پارامتر	معنی داری	ضرایب	علامت	پارامتر
۰/۰۵	۰/۰۱۹	Xspi	SPI	۰/۰۰۰	-۰/۱۴۸	Xrod	فاصله از جاده
۰/۰۵	۰/۰۳۱	Xconvergen	شاخص همگرایی	۰/۰۰	-۰/۱۱۲	Xhypso	طبقات ارتفاعی
۰/۰۰۵	۰/۰۴۱	Xsoil	جنس خاک	۰/۰۵۰	-۰/۰۷۹	Xlith	سنگ‌شناسی
۰/۰۵	۰/۰۷۵	XPlncurv	شکل شیب	۰/۰۰	-۰/۰۲۸	XNDVI	NDVI
۰/۰۰	۰/۱۳۹	Xdrn	فاصله از آبراهه	۰/۰۵	-۰/۰۱۸	Xtwi	TWI
۰/۰۰	۰/۱۶۵	Xslp	شیب	۰/۰۵	-۰/۰۱۵	Xsti	STI
۰/۰۰	۰/۷۴۲	Xlus	کاربری اراضی	۰/۰۵	-۰/۰۰۴	Xdrndens	تراکم آبراهه

نقاط شکست طبیعی (Natural break) فراوانی پیکسل‌ها (توزیع آماری فراوانی پیکسل‌ها نرمال است) تقسیم‌بندی شد (شکل ۵- الف).

نتایج حاصل از روش دومتغیره نظریه شواهد دمپسترشفر

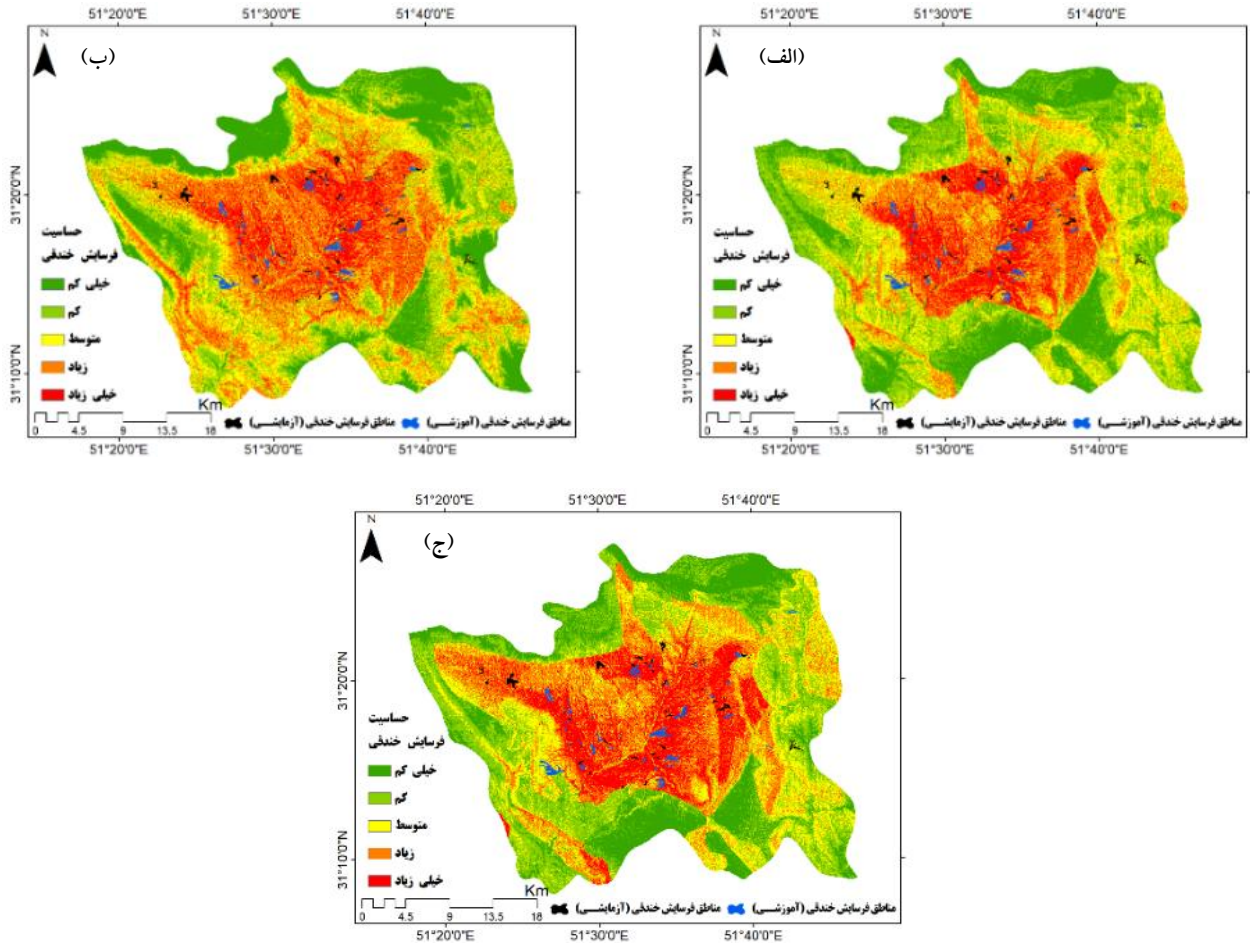
نتایج حاصل از رابطه آماری بین پارامترهای مؤثر در فرسایش خندقی و خندق‌های رخ داده با استفاده از روش نظریه شواهد دمپسترشفر منطقه مطالعاتی در جدول ۵ نشان داده شده است. هرچه مقدار عدم قطعیت در طبقات کمتر باشد بیانگر اهمیت بیشتر آن در رخداد فرسایش خندقی است. طبق نتایج جدول ۵، بر اساس پارامتر طبقات ارتفاعی، طبقه ۲۵۰۰-۲۳۰۰ متر بیشترین ارتباط را با رخداد فرسایش خندقی داشته‌اند و در مقابل طبقات ارتفاعی بالاتر از ۲۷۰۰ متر با بیشترین مقدار عدم قطعیت (۰/۸۳۸) کمترین تأثیر را در رخداد فرسایش خندقی داشته است که با نتایج پژوهش‌های کاردل و تجری (۱۴)، رحمتی و همکاران (۲۴) و شیرانی (۲۸) مطابقت دارد. بر اساس پارامتر گرادیان شیب، مناطق با شیب‌های ۵ تا ۱۰ درجه بیشترین پتانسیل

تراکم آبراهه، شاخص حمل رسوب، شاخص رطوبت توپوگرافی، NDVI، سنگ‌شناسی، طبقات ارتفاعی و فاصله از جاده در رتبه‌های ۴ تا ۱۴ قرار گرفته‌اند.

بدین ترتیب با توجه به ضرایب جدول ۴ رابطه ۱۲ برای محاسبه شاخص حساسیت نسبت به فرسایش خندقی تعیین شد:

$$Y_{gully} = (-0.148 \times Xrod) + (-0.112 \times Xhypso) + (-0.079 \times Xlith) + (-0.028 \times XNDVI) + (-0.018 \times Xtwi) + (-0.015 \times Xsti) + (-0.004 \times Xdrndens) + (0.019 \times Xspi) + (0.031 \times Xconvergence) + (0.041 \times Xsoil) + (0.075 \times XPlncurv) + (0.139 \times Xdrn) + (0.165 \times Xslp) + (0.742 \times Xlus) \quad (12)$$

که در آن Y_{gully} عامل متغیر وابسته حساسیت نسبت به فرسایش خندقی و ۱۴ متغیر مستقل (X) عوامل مؤثر مطابق با جدول ۴ هستند. بعد از به‌دست آمدن رابطه ۱۲، این رابطه در محیط ArcGIS10.5 روی ۱۴ عامل مؤثر اعمال شد و سپس نقشه به‌دست آمده از نظر حساسیت به فرسایش خندقی به پنج طبقه از خطر بسیار کم تا بسیار زیاد بر اساس



شکل ۵. نقشه حساسیت فرسایش خندقی به روش‌های: الف) مدل روش چندمتغیره، ب) روش دمپسترشفر و ج) مدل روش تلفیقی

جدول ۵. وزن پارامترهای مؤثر در فرسایش خندقی با استفاده از روش دمپسترشفر

عوامل مؤثر	طبقات عامل مؤثر	مساحت طبقه (کیلومتر مربع)	مساحت خندق (کیلومتر مربع)	تابع ناباوری	تابع باور	عدم قطعیت
ارتفاع (متر)	< ۲۱۰۰	۳۸۲/۸۸۱	۴/۸۶۹	۰/۲۷۱	۰/۱۹۴	۰/۵۳۴
	۲۱۰۰-۲۳۰۰	۲۸۶/۴۰۸	۳/۱۵۵	۰/۲۳۴	۰/۲۰۹	۰/۵۵۷
	۲۳۰۰-۲۵۰۰	۲۵۰/۵۴۴	۳/۶۵۹	۰/۳۱۲	۰/۱۸۹	۰/۴۹۸
	۲۵۰۰-۲۷۰۰	۱۲۴/۵۷۵	۱/۰۷۶	۰/۱۸۳	۰/۲۱۲	۰/۶۰۵
	> ۲۷۰۰	۵۳/۵۹۱	۰	۰	۰/۱۶۲	۰/۸۳۸
گرادیان شیب (درجه)	۵	۸۴۳/۸۱۰	۱۰/۰۶۲	۰/۲۹۹	۰/۱۸۵	۰/۵۱۶
	۵-۱۰	۱۱۱/۱۰۳	۱/۸۵۷	۰/۴۲۳	۰/۱۹۳	۰/۳۸۵
	۱۰-۲۰	۸۰/۷۴۰	۰/۷۶۹	۰/۲۳۸	۰/۲۰۶	۰/۵۵۷
	۲۰-۳۰	۴۳/۱۹۲	۰/۰۷۲	۰/۰۴۱	۰/۲۱۰	۰/۷۴۹

ادامه جدول ۵.

عوامل مؤثر	طبقات عامل مؤثر	مساحت طبقه (کیلومتر مربع)	مساحت خندق (کیلومتر مربع)	تابع ناباوری	تابع باور	عدم قطعیت
	>۳۰	۱۹/۱۵۴	۰	۰	۰/۲۰۷	۰/۷۹۳
	مقعر	۳۸۵/۵۵۱	۴/۸۲۶	۰/۳۶۱	۰/۳۱۹	۰/۳۲۰
شکل شیب	هموار	۴۹۷/۲۳۷	۵/۵۴۹	۰/۳۲۱	۰/۳۴۴	۰/۳۳۵
	محدب	۲۱۵/۲۱۲	۲/۳۸۴	۰/۳۱۸	۰/۳۳۷	۰/۳۴۵
شاخص رطوبت	۶/۲-۹۹۸	۲۶۱/۲۴۹	۲/۵۷۰	۰/۱۷۸	۰/۲۵۹	۰/۵۶۳
توپوگرافی	۹/۹۸-۱۲/۱۷	۵۳۰/۶۰۶	۵/۶۶۸	۰/۱۹۳	۰/۲۶۷	۰/۵۴۰
TWI	۱۲/۱۷-۱۵/۶۴	۲۱۵/۳۵۸	۲/۴۵۹	۰/۲۰۷	۰/۲۴۸	۰/۵۴۵
	۱۵/۶۴-۲۷/۶۵	۹۰/۷۸۶	۲/۰۶۳	۰/۴۲۲	۰/۲۲۶	۰/۳۵۳
	<۵۰	۴۸۷/۲۶۲	۵/۴۱۰	۰/۱۷۷	۰/۲۰۷	۰/۶۱۶
شاخص توان	۵۰-۱۵۰	۱۶۰/۵۲۵	۱/۶۱۶	۰/۱۶۰	۰/۲۰۴	۰/۶۳۶
جریان آبراهه	۱۵۰-۳۰۰	۲۲۳/۳۸۲	۲/۸۴۳	۰/۲۰۴	۰/۱۹۴	۰/۶۰۱
SPI	۳۰۰-۴۵۰	۱۵۸/۵۰۴	۱/۶۵۵	۰/۱۶۶	۰/۲۰۳	۰/۶۳۱
	<۴۲	۱۳۰/۲۳۱	۱/۷۷۵	۰/۲۳۱	۰/۱۹۵	۰/۵۷۴
	-۴۲- -۱۰	۲۷۷/۳۲۵	۳/۴۵۴	۰/۲۱۱	۰/۱۹۵	۰/۵۹۵
شاخص همگرایی	-۱۰-۱۸	۳۹۶/۰۵۴	۴/۲۷۳	۰/۱۸۲	۰/۲۰۸	۰/۶۱۰
	۱۸-۵۱	۲۲۳/۹۱۲	۲/۴۶۳	۰/۱۸۶	۰/۲۰۲	۰/۶۱۲
	>۵۱	۷۰/۴۷۸	۰/۷۹۶	۰/۱۹۱	۰/۲۰۰	۰/۶۰۹
	<۰/۸۵	۳۵۱/۷۲۵	۵/۳۷۸	۰/۳۶۱	۰/۲۱۴	۰/۴۲۵
تراکم آبراهه	۰/۸۵-۱/۵	۳۴۶/۵۰۳	۵/۰۹۸	۰/۳۴۶	۰/۲۲۱	۰/۴۳۲
	۱/۵-۲/۱	۱۶۵/۶۴۴	۱/۶۱۶	۰/۲۲۷	۰/۲۱۲	۰/۵۶۱
	>۲/۱	۲۳۴/۰۸۰	۰/۶۶۸	۰/۰۶۶	۰/۳۰۵	۰/۶۲۹
	<۱۵۰	۴۶۹/۸۹۸	۹/۰۴۲	۰/۵۳۳	۰/۱۰۳	۰/۳۶۴
	۱۵۰-۳۰۰	۳۲۲/۸۹۲	۲/۲۲۵	۰/۱۸۶	۰/۲۴۱	۰/۵۷۳
فاصله از آبراهه (متر)	۳۰۰-۵۰۰	۱۸۶/۳۱۵	۱/۰۷۰	۰/۱۵۵	۰/۲۲۷	۰/۶۱۸
	۵۰۰-۹۰۰	۸۹/۵۴۲	۰/۴۲۲	۰/۱۲۷	۰/۲۱۷	۰/۶۵۷
	>۹۰۰	۲۹/۳۰۶	۰	۰	۰/۲۱۱	۰/۷۸۹

ادامه جدول ۵.

عوامل مؤثر	طبقات عامل مؤثر	مساحت طبقه (کیلومتر مربع)	مساحت خندق (کیلومتر مربع)	تابع ناباوری	تابع باور	عدم قطعیت
	جنگل	۶۶/۷۳۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۲۲۴	۰/۷۷۶
	زمین بایر	۹/۷۸۱	۰/۲۳۶	۰/۴۴۸	۰/۲۰۸	۰/۳۴۴
کاربری اراضی	مرتع خوب	۱۴۱/۶۱۵	۰/۱۸۹	۰/۰۲۴	۰/۲۳۶	۰/۷۳۸
	کشاورزی	۱۴۲/۴۱۸	۲/۱۶۴	۰/۲۷۷	۰/۲۰۰	۰/۵۲۲
	مرتع ضعیف	۷۳۷/۴۵۴	۱۰/۱۷۰	۰/۲۵۱	۰/۱۲۹	۰/۶۲۰
شاخص تفاضلی	<۰	۴/۵۴۸	۰	۰	۰/۴۸۵	۰/۵۱۵
نرمال پوشش	۰-۰/۲	۱۰۳۴/۲۰۳	۱۲/۷۵۴	۰/۹۹۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴
گیاهی NDVI	>۰/۲	۵۹/۲۴۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۰/۰۹۶	۰/۸۹۶
	OMas	۸/۵۳۶	۰/۲۶۶	۰/۱۸۲	۰/۰۹۰	۰/۷۲۹
	KPeam	۹/۴۸۱	۰/۳۳۷	۰/۲۱۰	۰/۰۸۹	۰/۷۰۱
	Klsol	۳۵/۴۰۱	۰/۱۵۷	۰/۰۲۴	۰/۰۹۳	۰/۸۸۳
	PeEpd	۴۳/۸۷۹	۰/۱۸۷	۰/۰۲۴	۰/۰۹۳	۰/۸۸۳
	Eja	۵۳/۸۸۵	۰/۳۳۶	۰/۰۳۵	۰/۰۹۳	۰/۸۷۲
سنگ شناسی	Plbk	۶۱/۲۶۴	۲/۷۸۴	۰/۲۷۴	۰/۰۷۵	۰/۶۵۲
	Ktb	۹۷/۳۰۱	۰/۰۴۱	۰/۰۰۲	۰/۰۱۰	۰/۸۹۸
	Qft2	۱۱۲/۹۱۹	۱/۰۷۸	۰/۰۵۳	۰/۰۹۳	۰/۸۵۴
	Qft1	۱۳۱/۱۴۷	۱/۷۸۳	۰/۰۷۷	۰/۰۹۰	۰/۸۳۵
	Kgu	۲۰۰/۰۳۳	۲/۲۴۶	۰/۰۶۳	۰/۰۹۱	۰/۸۴۶
	Kbgp	۳۴۴/۰۹۱	۳/۵۴۴	۰/۰۵۸	۰/۰۹۶	۰/۸۴۷
	Lithic Xerothents	۶۲/۴۲۶	۰	۰	۰/۲۲۱	۰/۷۷۹
	Typic Calcixerepts	۶۳۸/۶۱۵	۹/۵۶۳	۰/۵۴۱	۰/۱۲۴	۰/۳۳۶
نوع خاک	Rock Outcrop	۳۲۹/۲۴۹	۲/۹۳۰	۰/۳۱۷	۰/۲۳۰	۰/۴۵۳
	Typic Xerofluvents	۱/۱۳۲	۰	۰	۰/۲۰۸	۰/۷۹۲
	Lithic Calcixerepts	۶۶/۵۱۶	۰/۲۶۷	۰/۱۴۲	۰/۲۱۷	۰/۶۴۱
فاصله از جاده (متر)	<۵۰۰	۷۲/۹۴۷	۱/۳۰۹	۰/۲۷۵	۰/۱۸۸	۰/۵۳۷
	۵۰۰-۱۰۰۰	۹۸/۵۸۱	۱/۴۱۶	۰/۲۱۸	۰/۱۹۱	۰/۵۹۱
	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۹۲/۶۳۹	۱/۰۷۰	۰/۱۷۵	۰/۱۹۵	۰/۶۳۰
	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۷۶/۷۳۸	۰/۸۶۴	۰/۱۷۰	۰/۱۹۶	۰/۶۳۴
	>۲۰۰۰	۷۵۷/۰۳۲	۸/۱۰۲	۰/۱۶۲	۰/۲۳۱	۰/۶۰۸

کاهش می‌یابد. همچنین بر اساس پارامتر فاصله از آبراهه هر چه فاصله از آبراهه بیشتر می‌شود مقدار عدم قطعیت نیز افزایش و رخدادهای فرسایش خندقی کاهش پیدا می‌کند، به عبارت دیگر رابطه پارامترهای فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه با احتمال رخدادهای فرسایش خندقی معکوس است که با نتایج پژوهش‌های کنستانتینی و همکاران (۳ و ۴) مطابقت دارد. طبق نتایج حاصل از کاربری اراضی، زمین بایر و کشاورزی به ترتیب با کمترین مقدار عدم قطعیت (۰/۳۴۴ و ۰/۵۲۲) بیشترین پتانسیل برای ایجاد خندق را دارا است و در مقابل مراتع با پوشش گیاهی خوب و زمین‌های جنگلی و به ترتیب با بیشترین میزان عدم قطعیت (۰/۷۳۸ و ۰/۷۷۶) در مقایسه با دیگر طبقه‌ها در مقابل ایجاد فرسایش خندقی مقاوم‌تر هستند که این موضوع بیانگر نقش پوشش گیاهی در حفاظت از خاک در مقابل فرسایش آبی است. نتایج عدم قطعیت حاصل از پارامتر تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی نشان داد که با افزایش مقادیر NDVI، مقادیر عدم قطعیت نیز افزایش پیدا می‌کند به گونه‌ای که در طبقه بیشتر از ۰/۲، با بیشترین مقدار NDVI، دارای بیشترین مقدار عدم قطعیت (۰/۸۷۰) است که این موضوع بیانگر نقش پوشش گیاهی در کاهش احتمال فرسایش خندقی است که با نتایج تحقیقات اگنسی و همکاران (۱) مطابقت دارد. لازم به ذکر است که مقادیر NDVI کمتر از صفر نماینده محیط‌های آبی که مقدار عدم قطعیت بالاترین مقدار و مقادیر بین ۰/۲-۰ نماینده زمین‌های فاقد پوشش گیاهی که نماینده کمترین مقدار عدم قطعیت (۰/۰۰۴) و بالطبع بیشترین مقدار احتمال رخدادهای فرسایش خندقی است. بر اساس پارامتر سنگ‌شناسی، واحد سنگی Plbk (کنگلومرای سست دانه همراه با ماسه و مارن سازند بختیاری) با کمترین میزان عدم قطعیت (۰/۶۵۲) بیشترین ارتباط را با رخدادهای خندق در منطقه مطالعاتی داشته است. ارتباط آماری بین نوع خاک و رخدادهای فرسایش خندق نشان داد که مناطق با خاک‌های از نوع Typic Calcixerepts دارای حساسیت بالایی نسبت به فرسایش هستند به گونه‌ای که دارای کمترین مقدار عدم قطعیت (۰/۳۳۶) نسبت به دیگر رده‌های خاک در منطقه است.

برای رخدادهای فرسایش خندقی را داشته‌اند و در مقابل با افزایش مقدار شیب، مقادیر عدم قطعیت نیز افزایش پیدا کرده است به گونه‌ای که مناطق با شیب‌های بیشتر از ۳۰ درجه دارای بیشترین مقدار عدم قطعیت (۰/۷۹۳) بوده و در نتیجه احتمال رخدادهای خندق در این مناطق از بقیه مناطق کمتر است. این نتایج با نتایج تحقیقات کاردل و تجری (۱۴) مطابقت دارد. بر اساس پارامتر شکل شیب، سطوح مقعر با کمترین مقدار عدم قطعیت (۰/۳۲۰) دارای بیشترین حساسیت نسبت به فرسایش خندقی هستند و سطوح هموار با عدم قطعیت (۰/۳۳۵) در رتبه دوم قرار دارد که این نتایج با نتایج تحقیقات داب و همکاران (۸)، شیرانی (۲۸) و رحمتی و همکاران (۲۴) مطابقت دارد. بر اساس پارامتر شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، طبقه (۲۷/۶۵-۱۵/۶۴) با عدم قطعیت کمتر نسبت به بقیه طبقه‌ها (۰/۳۵۳) دارای احتمال بیشتر فرسایش خندقی نسبت به بقیه طبقه‌ها است. بر اساس نتایج پارامتر تراکم آبراهه، طبقه کمتر از ۰/۸۵ کیلومتر بر کیلومتر مربع، با کمترین مقدار تراکم آبراهه دارای بیشترین مقدار عدم قطعیت (۰/۸۳۰) بوده و در نتیجه کمترین تأثیر را در رخدادهای فرسایش خندقی داشته است که با نتایج رحمتی و همکاران (۲۴) مطابقت دارد. نتایج مدل نظریه شواهد دمپسترشفر نشان داد که بر اساس پارامتر شاخص توان جریان آبراهه (SPI)، طبقه بیشتر از ۴۵۰ با کمترین مقدار عدم قطعیت (۰/۵۱۶) بیشترین ارتباط را با خندق‌های منطقه مطالعاتی داشته است. بر اساس نتایج پارامتر شاخص حمل رسوب (STI)، با افزایش میزان شاخص حمل رسوب میزان عدم قطعیت افزایش و در نتیجه احتمال رخدادهای فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. بر اساس پارامتر شاخص همگرایی، طبقه کمتر از ۴۲- با کمترین مقدار عدم قطعیت (۰/۵۷۴) دارای بیشترین تأثیر روی رخدادهای فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی بوده است. به‌طور کلی با افزایش شاخص همگرایی مقدار عدم قطعیت افزایش و در نتیجه رخدادهای فرسایش خندقی کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار پارامتر تراکم آبراهه از طبقه کمتر از ۰/۸۵ تا بیشتر از ۲/۱، به ترتیب میزان عدم قطعیت افزایش (۰/۴۲۵ تا ۰/۶۲۹) و نتیجه آن رخدادهای فرسایش خندقی

$$\begin{aligned}
 \text{GESM} = & (-0.152 \times \text{distance to road}_{m(\theta)}) + \\
 & (-0.102 \times \text{elevation}_{m(\theta)}) + \\
 & (-0.082 \times \text{lithology}_{m(\theta)}) + \\
 & (-0.019 \times \text{NDVI}_{m(\theta)}) + (-0.015 \times \text{TWI}_{m(\theta)}) + \\
 & (-0.013 \times \text{STI}_{m(\theta)}) + \\
 & (-0.02 \times \text{drainage density}_{m(\theta)}) + \\
 & (0.018 \times \text{SPI}_{m(\theta)}) + \\
 & (0.029 \times \text{convergence index}_{m(\theta)}) + \\
 & (0.035 \times \text{soil type}_{m(\theta)}) + \\
 & (0.056 \times \text{plan curvature}_{m(\theta)}) + \\
 & (0.124 \times \text{distance to stream}_{m(\theta)}) + \\
 & (0.141 \times \text{slope degree}_{m(\theta)}) + \\
 & (0.488 \times \text{land use}_{m(\theta)})
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

نتایج شاخص SCAI نیز نشان داد که مدل تلفیقی نسبت به مدل‌های انفرادی دارای نتایج بهتری بوده و با دقت بالاتری به تفکیک بین طبقات پرداخته است به گونه‌ای که مقادیر SCAI در طبقه‌های حساسیت خیلی کم و کم، زیاد و در طبقه‌های حساسیت زیاد و خیلی زیاد، کم است و دارای روند صعودی از طبقه حساسیت خیلی زیاد به سمت طبقه خیلی کم است (شکل ۶).

بر اساس نتایج مقادیر مساحت کل و مساحت خندق‌ها در هر یک از طبقه‌ها حاصل از مدل تلفیقی، ۶/۵۶ درصد از مساحت منطقه در طبقه حساسیت خیلی کم و ۱۴/۲۶ درصد در طبقه حساسیت کم قرار گرفته است و در مقابل ۱۳/۶۵ درصد در طبقه حساسیت خیلی زیاد، ۵۳/۱۷ درصد در طبقه حساسیت زیاد و ۱۲/۳۳ درصد در طبقه حساسیت متوسط قرار گرفته است (شکل ۶). این مقادیر بر اساس روش نظریه شواهد و در روش رگرسیون چندمتغیره به ترتیب (۱۴/۱۶، ۷/۰۴، ۱۵/۸۴، ۵۰/۶۳ و ۱۲/۳۱ درصد) و (۱۱/۰۴، ۱۰، ۴۰/۰۵، ۲۷/۴۵ و ۱۱/۴۴ درصد) برای طبقه‌های حساسیت خیلی کم تا خیلی زیاد است (شکل ۷). بر اساس شکل ۷، در روش تلفیقی از کل مساحت خندق‌های مدل‌سازی، ۳۰/۷۷ درصد در طبقه حساسیت خیلی زیاد، و ۵۴/۳۹ درصد در طبقه حساسیت زیاد قرار گرفته است و در مقابل ۰/۲۰۵ درصد در طبقه حساسیت

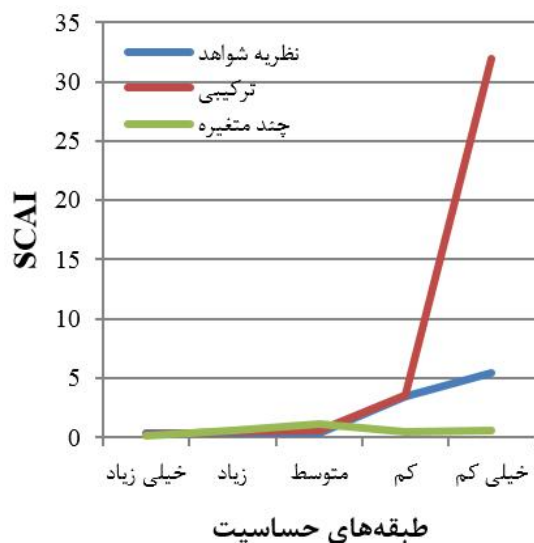
طبق نتایج پارامتر فاصله از جاده، طبقه ۵۰۰ متر با کمترین مقدار عدم قطعیت (۰/۵۳۷) بیشترین مقدار همبستگی را با رخداد فرسایش خندقی نسبت به بقیه طبقه‌ها داشته‌اند و در مقابل طبقات ۱۵۰۰-۱۰۰۰، ۲۰۰۰-۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ متر به ترتیب با بیشترین مقادیر عدم قطعیت (۰/۶۳۰، ۰/۶۳۴ و ۰/۶۰۸) کمترین تأثیر را در رخداد خندق داشته‌اند. به عبارت دیگر با افزایش فاصله از جاده رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد.

پس از تعیین ارتباط بین پارامترهای مؤثر و خندق‌های رخ داده در منطقه مطالعاتی، وزن‌های هر یک از طبقه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.5 به نقشه‌ها اضافه شد و با استفاده از رابطه ۱۳ و ابزار Weighted Sum نقشه حساسیت فرسایش خندقی با روش نظریه شواهد دمپسترشفر حاصل شد و بر اساس شکست‌های طبیعی منحنی فراوانی پیکسل‌ها به ۵ طبقه شامل حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی شد (شکل ۵-ب).

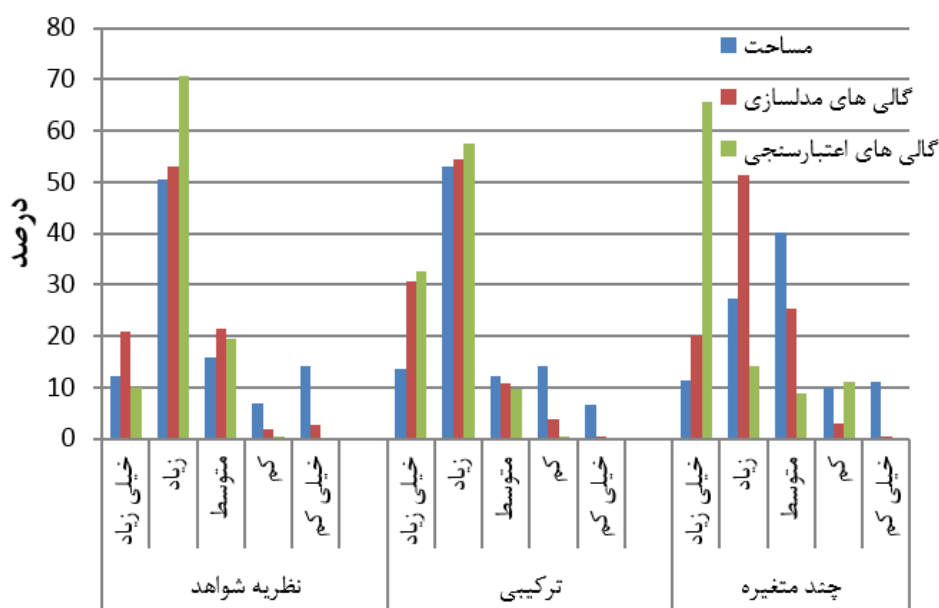
$$\begin{aligned}
 \text{SESM} = & (\text{elevation}_{m(\theta)}) + (\text{lithology}_{m(\theta)}) + \\
 & (\text{slope degree}_{m(\theta)}) + (\text{plan curvature}_{m(\theta)}) + \\
 & (\text{distance to stream}_{m(\theta)}) + (\text{NDVI}_{m(\theta)}) + \\
 & (\text{SPI}_{m(\theta)}) + (\text{TWI}_{m(\theta)}) + (\text{STI}_{m(\theta)}) + \\
 & (\text{soil type}_{m(\theta)}) + (\text{drainage density}_{m(\theta)}) + \\
 & (\text{convergence index}_{m(\theta)}) + (\text{land use}_{m(\theta)}) + \\
 & (\text{distance to road}_{m(\theta)})
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

مدل تلفیقی حاصل از روش دومتغیره نظریه شواهد دمپسترشفر و چندمتغیره خطی

پس از تعیین وزن معیارها با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره و وزن طبقه‌های عوامل با روش نظریه شواهد دمپسترشفر، به منظور افزایش کارایی مدل‌ها و برطرف کردن معایب آنها اقدام به ترکیب آنها شد و با استفاده از رابطه ۱۴ نقشه حساسیت فرسایش خندقی با رویکرد تلفیقی حاصل شد. بر اساس شکست‌های طبیعی منحنی فراوانی پیکسل‌ها به ۵ طبقه شامل حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی شد (شکل ۵-ج).



شکل ۶. مقادیر شاخص SCAI

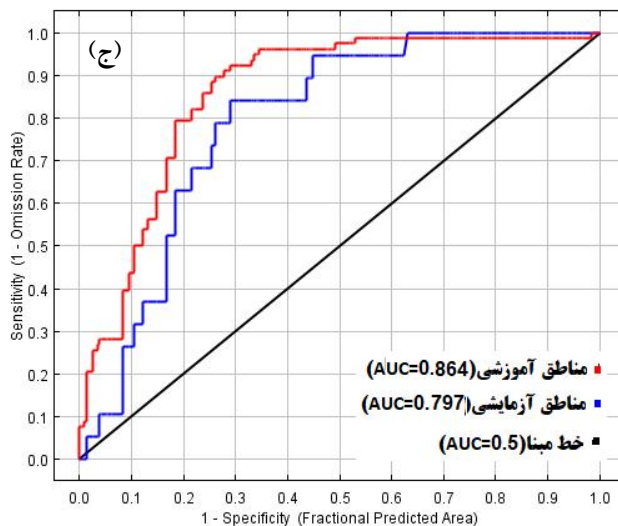
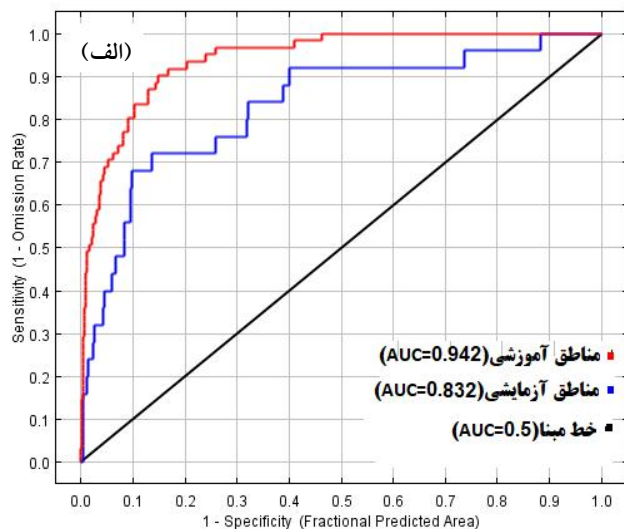
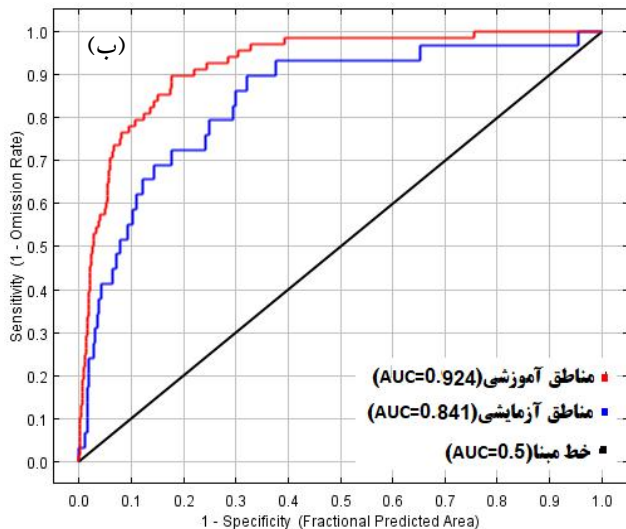


شکل ۷. مقادیر مساحت کل و مساحت خندق‌ها در هر یک از طبقه‌ها

اعتبارسنجی، ۹۰/۱۷ درصد در طبقه حساسیت خیلی زیاد و زیاد قرار گرفته‌اند که این مقدار در روش نظریه شواهد دمپسترشفر ۸۰/۵۴ و در روش رگرسیون چندمتغیره ۸۰/۰۴ است (شکل ۷).

از آنجایی که در اعتبارسنجی مدل‌ها نمی‌توان از خندق‌هایی استفاده کرد که در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی استفاده

خیلی کم و ۳/۷۵ درصد در طبقه حساسیت کم قرار گرفته است، به عبارت دیگر ۸۵/۱۷ درصد از مساحت خندق‌های مدل‌سازی در طبقه حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است که این مقدار برای روش نظریه شواهد دمپسترشفر و رگرسیون چندمتغیره به ترتیب ۷۳ و ۷۱/۴۴ درصد است. طبق شکل ۷ در روش تلفیقی از کل مساحت خندق‌های



شکل ۸. منحنی ROC و سطح زیر منحنی نقشه حساسیت فرسایش خندقی به روش‌های: الف) مدل روش تلفیقی، ب) روش دمپسترشفر و ج) چندمتغیره

دمپستر-شفر (۰/۹۲۴) و رگرسیون چندمتغیره (۰/۸۶۴) است. این موضوع بیانگر قدرت پیش‌بینی بالاتر مدل تلفیقی نسبت به مدل‌های انفرادی مذکور است که با نتایج تحقیقات آمر و همکاران (۳۵) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ۱۹ پارامتر مؤثر در رخداد فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی انتخاب شدند. با انجام آزمون هم‌راستایی از بین آنها ۱۴ پارامتر شامل ارتفاع، گرادیان شیب، شکل شیب،

شده است، از بین کل پهنه‌های خندقی در منطقه مطالعاتی ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد و با استفاده از آن داده‌ها اعتبارسنجی شد (۲، ۲۴ و ۲۶). توانایی پیش‌بینی مدل‌ها با استفاده از منحنی عملگر گیرنده (ROC) و سطح زیر منحنی آن (AUC) و قدرت تفکیک بین طبقات در هر مدل با استفاده از شاخص سطح سلول هسته (SCAI) مورد ارزیابی قرار گرفت (۲۸، ۲۹ و ۳۰). بر اساس شکل ۸، مدل تلفیقی دمپسترشفر و رگرسیون چندمتغیره با مقدار مساحت زیر منحنی ۰/۹۴۲ دارای دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به مدل‌های انفرادی روش

دشت سر می‌رسد عامل اصلی به‌وجود آمدن خندق‌های بزرگ در منطقه است. فرم کلی شیب منطقه به‌گونه‌ای است که بیشترین شیب، مربوط به مناطق بالادست حوضه است و هرچه به‌سمت خروجی حوضه حرکت کنیم شیب کاهش می‌یابد. این تغییرات شیب، خود یک عامل برای افزایش سرعت رواناب در بالادست و پایین آمدن زمان تمرکز است. لذا باعث انتقال بیشترین مقدار رواناب به‌سمت خروجی و رودخانه اصلی می‌شود. تراکم آبراهه با کاهش شیب کاهش یافته و باعث متمرکز شدن رواناب و تجمع جریان در اراضی پست و کم شیب می‌شود. چون این اراضی بیشتر از جنس مارن و رس هستند، لذا انحلال یافته و باعث تشدید فرسایش خندقی می‌شود. از دیگر شواهد رخداد کمتر فرسایش خندقی در مناطق مرتفع آن است که در ارتفاعات جنس لایه‌های زمین‌شناسی بیشتر از سنگ‌های آهکی است و همچنین شیب به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و بنابراین رواناب زمان لازم برای نفوذ و انحلال را ندارد و سریع از منطقه خارج می‌شود. اعتبارسنجی نقشه‌های حساسیت حاصل از روش‌های نظریه شواهد دمپسترشفر، رگرسیون چندمتغیره و روش تلفیقی با روش‌های AUC و SCAI نشان داد که روش تلفیقی دارای دقت پیش‌بینی عالی بوده و نسبت به روش‌های انفرادی دارای توانایی بالاتری در شناسایی مناطق حساس به فرسایش خندقی است. طبق نقشه حاصل از روش تلفیقی، قسمت‌های مرکزی منطقه مطالعاتی به‌دلیل داشتن شیب ملایم، تراکم بالای آبراهه، فقدان پوشش گیاهی، و داشتن رسوبات مارنی و آهکی دارای حساسیت خیلی زیاد نسبت به فرسایش خندقی است. پهنه‌بندی نقشه حساسیت نسبت به فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه نشان داد بیشتر مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد در مناطق مرکزی و شمالی منطقه مورد مطالعه متمرکز بوده، درحالی که مناطق با حساسیت فرسایش خندقی کم در مناطق پرشیب و مرتفع شمالی و جنوبی گسترش دارند. درنهایت نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی در حوضه پایاب سمیرم نشان می‌دهد، محور مرکزی شبکه زهکشی حوضه

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص توان جریان آبراهه (SPI)، شاخص حمل رسوب (STI)، شاخص همگرایی جریان، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، کاربری اراضی، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)، سنگ‌شناسی، نوع خاک، و فاصله از جاده برای مدل‌سازی مناسب تشخیص داده شدند. بنابراین پارامترهای جهت شیب، انحنا کلی، فاصله از گسل، انحنا مقطعی و بارندگی به‌دلیل هم‌پوشانی اطلاعاتی و اثرات غیر مستقیم روی متغیر وابسته رخداد فرسایش خندقی از فرایند مدل‌سازی حذف شدند. نتایج حاصل از تعیین وزن پارامترها با روش رگرسیون چندمتغیره خطی نشان داد که پارامترهای کاربری اراضی، شیب و فاصله از آبراهه بیشترین تأثیر را در ایجاد فرسایش خندقی داشته‌اند. همچنین نتایج نشان داد که نوع لیتولوژی در ایجاد خندق‌های خطی در منطقه مورد مطالعه تأثیر بسزایی دارد و به‌عبارت دیگر تأثیر معنی‌داری در ایجاد و پهنه‌بندی مناطق خندقی داشته است. رخنمون واحد سنگی شیلی و مارنی در مناطق جنوبی و مرکزی حوضه مورد مطالعه بیشترین اثرگذاری را در ایجاد فرسایش خندقی از خود نشان داده است. علت این امر را می‌توان در حساسیت بسیار بالای این سازند و این نوع واحد سنگی به فرایند فرسایش خاک به‌خصوص فرسایش انحلالی دانست. به‌طوری که این اراضی به‌دلیل ضخامت لایه و ریزدانه بودن سازندهای مارنی پابده و گورپی، شرایط را برای ایجاد و توسعه خندق‌های خطی در منطقه مورد مطالعه فراهم کرده است. در واقع انحلال‌پذیری زیاد سازندهای مارنی که از نظر زمین‌شناسی از رس و آهک تشکیل یافته‌اند، نقش بسزایی در ایجاد و گسترش فرسایش خندقی دارند. خندق‌های عمیق که بیشتر در مناطق مرکزی حوضه مورد مطالعه مشاهده می‌شوند در اثر توان جریان آبراهه و شیب منطقه موجب کف‌کنی و افزایش عمق برای رسیدن به سطح پایدار هستند. مناطق مرکزی حوضه به‌دلیل نزدیکی به رودخانه در اصل مسیر رودخانه و یا شبکه آبراهه است. مقدار این شاخص در مناطق شمالی و جنوبی دارای ارزش بیشتر است. تغییر ناگهانی شیب در مناطق مرتفع، زمانی که به واحد

اجرای مدل، استفاده برنامه‌ریزان و مدیران اجرایی حفاظت خاک از نقشه‌های پهنه‌بندی موجود در امر کنترل فرسایش و حفاظت خاک، اقدامات لازم برای توسعه پوشش مرتعی و جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی به‌ویژه در مناطق با پهنه‌های حساسیت زیاد و خیلی زیاد نسبت به فرسایش خندقی و ایجاد برنامه‌های توجیهی برای آبخیزنشینان منطقه مورد مطالعه به‌منظور آشنایی بهتر با روش‌های حفاظت خاک و حفظ پوشش گیاهی منطقه با در نظر گرفتن سطح مقیاس منطقه‌ای این پژوهش مدنظر قرار گیرد.

سپاسگزاری

این پژوهش بخشی از نتایج طرح تحقیقاتی "تعیین آستانه‌های مهم‌ترین عوامل مؤثر و ارزیابی مدل‌سازی حساسیت‌پذیری فرسایش خندقی در حوضه آبخیز سمیرم جنوب استان اصفهان" با کد ۰۲۵-۹۹-۲۹-۳۸-۰ است که در بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان انجام شده است. نویسنده مراتب تشکر و قدردانی را از این مرکز و همچنین پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور به‌خاطر فراهم آوردن زمینه این پژوهش ابراز می‌کند.

رودخانه حنا، در سمت شرقی بیشترین حساسیت به فرسایش خندقی را نشان می‌دهد، در این بخش کاوش محور اصلی رودخانه شرایط توسعه خندق‌ها از پایین به بالا را فراهم می‌آورد. رسوبات و سازندهای مارنی که بیشتر این بخش را پوشش داده، بستر مستعد توسعه خندق‌ها را ایجاد کرده و شرایط توپوگرافیکی در جهت تشدید متغیرهای دیگر عمل می‌کند. شرایط یخبندان‌های بلندمدت زمستانه و ذوب و انجماد یخ در این حوضه با ترکیب با پدیده پیپ کراک به توسعه فرسایش خندقی در این بخش کمک کرده و شرایط انسانی، شامل تخریب و دستکاری از طریق کشاورزی و چرای دام، شرایطی حاد در این مناطق ایجاد کرده است. با توجه به قرار گرفتن مناطق مسکونی و تأسیسات زیربنایی مانند جاده و خطوط انتقال برق در این منطقه پیشنهاد می‌شود، استفاده از DEM با قدرت تفکیک مکانی بیشتر و همچنین مقایسه نتایج خروجی با دقت‌های متفاوت برای ارزیابی پارامترهای توپوگرافی، ایجاد ترانس‌بندی و بانک‌بندی در مناطق حساس و فرسایش‌پذیر حوضه، احداث سدهای خشکه‌چین و بندهای کوچک در آبراهه بخش مرکزی حوضه منطبق با پهنه‌های با حساسیت زیاد و خیلی زیاد، ارزیابی و تهیه دیگر شکل‌های فرسایش آبی موجود در منطقه از جمله فرسایش لغزشی، استفاده و به‌کارگیری سایر شاخص‌ها و پارامترهای تأثیرگذار بر اساس نوع منطقه شامل خط گسل و نقشهٔ تکتونیک منطقه برای

منابع مورد استفاده

1. Agnesi, V., S. Angileri, C. Cappadonia, C. Conoscenti and E. Rotigliano. 2011. Multi-parametric GIS analysis to assess gully erosion susceptibility: a test in southern Sicily, Italy. *Landform Analysis* 7: 15-20.
2. Azareh, A., O. Rahmati, E. Rafiei-Sardooi, J. B. Sankey, S. Lee, H. Shahabi and B. Bin Ahmad. 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.
3. Conoscenti, C., S. Angileri, C. Cappadonia, E. Rotigliano, V. Agnesi and M. Maerker. 2014. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: a case of Sicily (Italy). *Geomorphology* 204: 399-411.
4. Conoscenti, C., V. Agnesi, M. Cama, N. A. Caraballo-Arias and E. Rotigliano. 2018. Assessment of gully erosion susceptibility using multivariate adaptive regression splines and ac-counting for terrain connectivity. *Land Degradation Development* 29(3): 724-736.
5. Dempster, A. P. 1967. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *Annals of Mathematical Statistics* 38: 325-339.
6. Dewitte, O., M. Daoudi, C. Bosco and M. Eeckhaut. 2015. Predicting the susceptibility to gully initiation in data-

- poor regions. *Geomorphology* 228: 101-115.
7. Dormann, C. F., J. Elith, S. Bacher, C. Buchmann, G. Carl, G. Carré, J. R. G. Marquéz, B. Gruber, B. Lafourcade, P. J. Leitão, T. Münkemüller, C. Mc Clean, P. E. Osborne, B. Reineking, B. Schröder, A. K. Skidmore, D. Zurell and S. Lautenbach. 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36: 27-46.
 8. Dube, F., I. Nhapi, A. Murwira, W. Gumindoga, J. Goldin and D. A. Mashauri. 2014. Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District-Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth* 67: 145-152.
 9. FAO. 1994. Land degradation in South Asia: its severity causes and effects upon the people. FAO, UNDP and UNEP Report, Rome.
 10. Farajzadeh, M., A. Afzali, Y. Khalili and E. Ghelichi. 2012. Gully erosion susceptibility assessment using multivariate regression model, case study: the southern Mazandaran province, Kiasar. *Environmental Erosion Research Journal* 2(2): 42-57. (In Farsi).
 11. Gomez-Gutierrez, A., C. Conoscenti, S. E. Angileri, E. Rotigliano and S. Schnabel. 2015. Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two mediterranean basins: advantages and limitations. *Natural Hazards* 79: 291-314.
 12. Guo-liang D., Z. Yong-shuang, I. Javed and Y. Xin. 2017. Landslide susceptibility mapping using an integrated model of information value method and logistic regression in the Bailongjiang watershed, Gansu Province, China. *Journal of Mountain Science* 14(2): 249-268.
 13. Jafari Gorzin, B. and A. Kavian. 2009. Assessment of gully erosion occurrence in Sorkh-Abad watershed using remote sensing and geographical information system. *Iran Watershed Management Science & Engineering* 3(7): 55-58. (In Farsi).
 14. Kardel, F. and A. Tajari. 2015. Influence of gully erosion on soil moisture of abandoned farming dry land and rangeland in loess land (Case study: Kale-Shour watershed, Golestan Province). *Soil Management and Sustainable Production* 5(2): 181-195. (In Farsi).
 15. Kuhnert, P. M., A. K. Henderson, R. Bartley and A. Herr. 2010. Incorporating uncertainty in gully erosion calculations using the random forests modelling approach. *Environmetrics* 21: 493-509.
 16. Maghsoudi, M., S. Shadfar and M. Abbassi. 2012. Gully erosion susceptibility zonation in Zavarian watershed Qom Province. *Quantitative Geomorphological Research* 2: 35-52. (In Farsi).
 17. Milaghardan, A. H., M. Delavar and A. Chehregan. 2016. Uncertainty in landslide occurrence prediction using Dempster-Shafer theory. *Modelling of Earth System Environments* 2: 188.
 18. Morgan, R. P. C., J. N. Quinton, R. E. Smith, G. Govers, J. W. A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D. Torri and M. E., Styczen. 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes Land* 23: 527-544.
 19. Nikkani, D., M. Shabani and H. Ahmadi. 2009. Land use scenarios and optimization in a watershed. *Journal of Applied Sciences* 9(2): 287-295.
 20. Pham, T. G., J. Degener and M. Kappas. 2018. Integrated universal soil loss equation (USLE) and geographical information system (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil Water Conservation Research* 6: 99-110.
 21. Poesen, J., J. Nachtergale and G. Verstrac. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91-133.
 22. Pournader, M., H. Ahmadi, S. Feiznia, H. Karimi and H. R. Peirovan. 2018. Spatial prediction of soil erosion susceptibility: An evaluation of the maximum entropy model. *Earth Science. Information* 11: 389-401.
 23. Rahi, Gh. R., A. A. Nazari Samani and J. Ghoddousi. 2011. Validation of the predicting model for land vulnerability to gully erosion in arid watersheds (Case study: Boushehr province). *Journal of Range and Watershed Management Iranian Journal of Natural Resources* 64(3): 281-294. (In Farsi).
 24. Rahmati, O., N. Tahmasebipour, A. Haghizadeh, H. R. Pourghasemi and B. Feizizadeh. 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.
 25. Refahi, H. 1996. Water Erosion and Control, Tehran: Tehran University Press.
 26. Saberi Chenari, K., A. Bahremand, V. Berdi Sheikh and C. Biram Komaki. 2016. Gully erosion hazard zoning using of Dempster-Shafer model in the Gharnaveh watershed, Golestan province. *EcoHydrology* 3(2): 219-231. (In Farsi).
 27. Shafer, G. 1976. A Mathematical Theory of Evidence. Princeton University Press, Priceton.
 28. Shirani, K. 2019. Gully erosion susceptibility zonation using Stochastic Maxent model (case study: the south of Isfahan Province). Final Report, Areeo, Jihad and Keshavarzi Ministry. (In Farsi).
 29. Shirani K., M. Pasandi and A. Arabameri. 2018. Landslide susceptibility assessment by Dempster-Shafer and Index of Entropy models, Sarkhoun basin, southwestern Iran. *Natural Hazards* 93(3): 1379-1418.

30. Shirani, K. 2017. Modelling of landslide susceptibility zonation using Shannon's Entropy Index and Weight of Evidence model (Case study: Sarkhoon's Karoon). *Journal of Water and Soil Science* 21(1): 51-68. (In Farsi).
31. Sinha, D. and V. Joshi. 2012. Application of universal soil loss equation (USLE) to recently reclaimed badlands along the Adula and Mahalungi Rivers, Pravara basin, Maharashtra. *Journal Geology Society India* 80: 341-350.
32. Swarnkar, S., A. Malini, S. Tripathi and R. Sinha. 2018. Assessment of uncertainties in soil erosion and sediment yield estimates at ungauged basins: an application to the Garra River basin, India. *Hydrology and Earth System Sciences* 22: 2471-2485. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2471-2018>.
33. Tien Bui, D., B. Pradhan, I. Revhaug, D. B. Nguyen, H. V. Pham and Q. N. Bui. 2015. A novel hybrid evidential belief function-based fuzzy logic model in spatial prediction of rainfall-induced shallow landslides in the Lang Son city area (Vietnam) Geomatics. *Natural Hazards Risk* 6: 243-271.
34. Tsangaratos, P., I. Ilia, H. Hong, W. Chen and C. Xu. 2017. Applying information theory and GIS-based quantitative methods to produce landslide susceptibility maps in Nancheng County, China. *Landslides* 14: 1091-1111.
35. Umar, Z., B. Pradhan and A. Ahmad, M. Neamah Jebur and M. S. Tehrani. 2014. Earthquake induced landslide susceptibility mapping using an integrated ensemble frequency ratio and logistic regression models in West Sumatera Province, Indonesia. *Catena* 118: 124-135.
36. Valentin, C., J. Poesen and L. Yong. 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena* 63: 132-153.
37. Yuksel, A., A. E. Akay, R. Gundogan, M. Reis and M. Cetiner. 2008. Application of GeoWEPP for determining sediment yield and runoff in the Orcan Creek watershed in Kahramanmaras, Turkey. *Sensors* 8: 1222-1236.
38. Zabihi, M., F. Mirchooli, A. Motevalli, A. K. Darvishan, H. R. Pourghasemi, M. A. Zakeri and F. Sadighi. 2018. Spatial modelling of gully erosion in Mazandaran Province, northern Iran. *Catena* 161: 1-13.

Gully Erosion Mapping and Susceptibility Assessment Using Statistical and Probabilistic Methods

K. Shirani^{1*}

(Received: May 23-2020; Accepted: October 28-2020)

Abstract

Delineation of gully erosion susceptible areas by using statistical models, as well as optimum usage of existing data and information with the least time and cost and more precision, is important. The main objective of this study is to determine the areas accuracy to gully erosion and susceptibility mapping by using data mining of the bivariate Dempster-Shafer, linear multivariate statistical methods and their integration in Semirom watershed, southern Isfahan province. First, the geographical location of a total of 156 randomly gullies were mapped using preliminary reports, satellite imagery interpretation and field survey. In the next step, 14 conditioning parameters of the gullies in the study area were selected including the topographic, geomorphometric, environmental, and hydrologic parameters using the regional environmental characteristics and the multicollinearity test for modeling. Then, the Dempster-Shafer statistical, linear regression, and ensemble methods were developed using 70% of the identified gullies and 14 effective parameters as dependent and independent variables, respectively. The remaining 30% of the gully distribution dataset were used for validation. The results of the multivariate regression model showed that land use, slope and distance to drainage network parameters have the most significant relation to gully occurrence. The gully erosion susceptibility maps were prepared by individual and ensemble methods and they were divided to 5 classes of very low to very high rate. The area under the curve (AUC) of the receiver operating characteristic (ROC) curve was used to validate gully erosion susceptibility maps. The verification results showed that the AUC of ensemble method (0.948) is higher than Dempster-Shafer (0.924) and Multivariate regression (0.864) methods. Also, the the seed core area index (SCAI) value of the ensemble model from very low to very high susceptible classes have a decreasing trend that indicating a proper separation of susceptible classes by this model.

Keywords: Zonation, Susceptibility, Semirom riffle, Gully, Multivariate regression, Dempster-Shafer, Uncertainty

1. Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources, Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran.
Corresponding author, Email: K.Shirani@areeo.ac.ir