



نخستین از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (سال یازدهم / شماره سوم) پاییز ۱۳۹۹

نمایه شده در سایت: پایگاه استنادی علوم جهان اسلام، جهاد دانشگاهی، مگ ایران، نورمگز، سیولیکا، گوگل اسکولار
آدرس وب سایت: <http://girs.iaubushehr.ac.ir>



مقاله پژوهشی

ارزیابی مدل‌های رقومی ارتفاع جهت تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از مدل مکسنت و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سمیرم، جنوب استان اصفهان)

رضا ذاکری نژاد

دریافت: ۱۰ شهریور ۱۳۹۸ / پذیرش: ۲۷ خرداد ۱۳۹۹

دسترسی اینترنتی: ۳ شهریور ۱۳۹۹

چکیده

معیار توپوگرافی منطقه از پارامترهای مهم در ایجاد فرسایش آبی از جمله فرسایش آبکندی محسوب می‌گردد، که در هر منطقه با توجه به ویژگی‌های فیزیکی منطقه منحصر به فرد عمل می‌کند. این پارامتر همچنین در واقع به صورت غیرمستقیم بر دیگر شاخص‌ها و یا معیارها تأثیرگذار است (مانند تأثیر آن بر پوشش گیاهی، اقلیم یا خاک منطقه). اگرچه تحقیقات زیادی در زمینه فرسایش خندقی صورت گرفته است، ولی مطالعات کمی در زمینه کاربرد مدل‌های آماری تصادفی انجام گرفته است. این مطالعه اولین تحقیق در زمینه کاربرد مدل آماری حداکثر آنتروپی مکسنت در مناطق مرکزی ایران با تأکید بر اهمیت شاخص‌های توپوگرافی مستخرج از مدل‌های رقومی رایگان است. و به‌عنوان یک روش جدید جهت تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی در حوزه آبخیز سمیرم در جنوب استان اصفهان است. این حوزه آبخیز توسط تحت تأثیر فرسایش‌های شدید آبی از جمله خندقی، شیباری و لغزشی است. همچنین این مطالعه ارزیابی نتایج در مدل رقومی ارتفاعی SRTM و ASTER با قدرت تفکیک ۳۰ متر در تهیه نقشه خطر فرسایش خندقی است که داده‌های فوق از سایت زمین‌شناسی آمریکا (USGS) تهیه گردید. تأکید اصلی در این تحقیق بر روی شاخص‌های توپوگرافی بود زیرا که این شاخص‌ها به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر روی ویژگی‌ها خاک، پوشش گیاهی و اقلیم نیز تأثیرگذار می‌باشند.

پیشینه و هدف فرسایش خندقی به‌عنوان یک نوع فرسایش آبی در اقلیم‌های متفاوتی از مناطق خشک تا مرطوب گسترش یافته است. این نوع از هدر رفت خاک با تجمع رواناب‌ها، موجب جابجایی و تخریب افق‌های سطحی خاک می‌گردد. در مناطق وسیعی از ایران در شمال، مرکزی و جنوب با این نوع هدر رفت خاک مواجه می‌باشند. در واقع فرسایش خندقی به دلایل توپوگرافی متنوع، فرسایش‌پذیری خاک، عدم مدیریت صحیح خاک و کاربری نامناسب اراضی در بسیاری از این مناطق رخ می‌دهد. بنابراین برای حفاظت خاک در این مناطق لازم است که نقشه حساسیت به فرسایش خندقی در دسترس مدیران و برنامه ریزان قرار داشته باشد. پارامترهای زیادی در ایجاد فرسایش خندقی تأثیر دارند از جمله خاک، زمین‌شناسی منطقه، تکتونیک، هیدرولوژی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و توپوگرافی، که در مطالعات مختلف در سراسر جهان به آن اشاره شده است.

رضا ذاکری نژاد (✉)

استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان،

اصفهان، ایران

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir

ASTER و SRTM به ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۷۲ و برای نمونه‌های آزمایشی ۰/۶۸ و ۰/۷۳ است. این نتایج بیانگر آن است که مدل ارتفاعی SRTM دارای دقت بالاتری نسبت به ASTER است، و نقشه پتانسیل فرسایش خندقی با اجرا کردن شاخص‌های مستخرج از مدل ارتفاعی SRTM آورده شده است به نظر می‌رسد یکی از دلایل پایین بودن دقت مدل ASTER به دلیل تأثیر پوشش گیاهی باشد که باعث ایجاد خطاهای تراس مانند شده است در حالی که در نقشه رقومی ارتفاعی SRTM به دلیل ماهیت راداری امواج این خطا کاهش یافته و نقشه دقیق‌تری از این مدل، تهیه شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص‌های قدرت فرساینده‌گی جریان آب با ۴۰/۳۰ درصد، ارتفاع با ۲۲/۷ درصد و شاخص همگرایی با ۱۸ درصد دارای بیشترین تأثیر بر میزان فرسایش خندقی منطقه مطالعاتی می‌باشند. در این مطالعه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش خندقی در حوزه آبخیز سمیرم نشان می‌دهد، که مناطق با پتانسیل بالای فرسایشی بیشتر در نواحی جنوبی و جنوب غربی حوزه مورد مطالعه است.

نتیجه‌گیری این مطالعه با استفاده از مدل مکسنت به منظور تهیه نقشه حساسیت به فرسایش خندق در حوزه آبریز سمیرم در جنوب استان اصفهان و با استفاده از شاخص‌های توپوگرافی مؤثر و با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی جهت شناسایی مناطق حساس فرسایش خندقی و همچنین شاخص‌های تأثیرگذار اقدام گردید. از نتایج این مطالعه می‌توان برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی و مدیریت مناطق دارای فرسایش خندق در جهت توسعه پایدار استفاده کرد. اگرچه نتایج این تحقیق نقش بارز شاخص‌های توپوگرافی را در تهیه نقشه پتانسیل خندقی نشان داده ولی جهت افزایش دقت نتایج مدل‌سازی می‌توان با توجه به قابلیت اطلاعات در دسترس در منطقه مورد از دیگر معیارهای تأثیرگذار در فرسایش خندقی از قبیل کاربری اراضی، پوشش گیاهی و خاک و غیره برای پهنه‌بندی مناطق به حساسیت فرسایش خندقی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: فرسایش خندقی، مدل رقومی ارتفاع، مدل مکسنت، سیستم اطلاعات جغرافیایی

مواد و روش‌ها در این تحقیق برای پیش‌بینی مناطق حساس که در نتیجه فرسایش خندقی می‌باشند شامل مراحل ذیل است. در مرحله اول، با استفاده از تصاویر گوگل ارث و عکس‌های هوایی و همچنین عملیات میدانی اقدام به دیجیتایز کردن تعدادی از مناطق فرسایش خندقی به صورت پلی گون انجام گردید که در ادامه کار تبدیل به نقاط گردیدند. در مرحله دوم اقدام به تهیه مهم‌ترین شاخص‌های توپوگرافی مؤثر به‌عنوان لایه‌های محیطی مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی گردید. شاخص‌های توپوگرافی شامل شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص انحنای، شاخص انحنای پروفایل، شاخص شیب، شاخص جهت، شاخص قدرت فرساینده‌گی جریان، شاخص طول جریان، شاخص حوزه یا تمرکز جریان، شاخص همگرایی، شاخص ارتفاع و شاخص LS این شاخص‌ها از دو مدل رقومی ارتفاعی ASTER و SRTM با دقت ۳۰ متر در محیط نرم‌افزار ساگا جی‌ای اس (SAGAGIS) تهیه گردید که در نهایت تبدیل به فرمت ASCII جهت اجرای مدل گردید. قبل از استخراج این شاخص‌های توپوگرافی، پیش پردازش‌های لازم شامل فیلترگذاری و حذف خطاهای هیدرولوژیک و در محیط نرم‌افزار ArcGIS و ساگا و با استفاده از الگوریتم داربکس و پلانچون اقدام گردید. مدل مکسنت مدل حداکثر آنتروپی یک روش کلی برای پیش‌بینی یا استنباط از اطلاعات ناکامل است. این مدل برنامه‌های کاربردی در مناطق مختلف مانند نجوم، بازسازی تصویر، فیزیک آماری و پردازش سیگنال را مورد بررسی قرار می‌دهد. ایده مدل مکسنت تخمین احتمال رخداد هدف مورد مطالعه است. در واقع این مدل تنها نیاز به داده‌های رخداد فرسایش خندقی نیاز دارد (داده‌های موجود) از دیگر مزایای این مدل موارد زیر را شامل می‌شود؛ تنها به اطلاعات مربوط به وجود فرسایش، همراه با اطلاعات زیست‌محیطی برای کل منطقه مورد مطالعه نیاز دارد. این مدل می‌تواند از هر دو نوع داده‌های پیوسته و یا گسسته جهت متغیرهای مستقل در مدل بکار برده شود.

نتایج و بحث با به کار بردن مدل مکسنت در حوزه سمیرم، ۷۰ درصد نقاط خندقی به‌عنوان نقاط تعلیمی به مدل و ۳۰ درصد آن به‌عنوان نقاط آزمایشی جهت تعیین صحت ارزیابی نقشه نهایی تعیین گردید. اعتبار مدل مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از سطح زیر نمودار راک یا سطح زیر منحنی AUC مورد ارزیابی قرار گرفت.

نمودارهای راک به‌صورت اتوماتیک با اجرای این مدل برای دو نوع داده تعلیمی و آزمایشی تهیه می‌گردد. میزان AUC جهت پهنه‌بندی فرسایش خندقی برای داده‌های تعلیمی نقشه‌های رقومی ارتفاع

مقدمه

در بیشتر آن‌ها به اندازه گیری میزان گسترش فرسایش خندقی پرداخته شده است (۱۳ و ۲۵). تحقیق کارایی مدل دمپستر- شافر در پتانسیل‌یابی مناطق مستعد فرسایش سطحی حوزه آبخیز کاکا رضا در استان لرستان مورد بررسی قرار گرفت، که نتایج این پژوهش نشان داد که نقشه دارای میزان اعتبار ۲۱ درصد بوده که بیانگر قابلیت ضعیف این مدل در پتانسیل‌یابی مناطق حساس به فرسایش خاک هست (۸). انتظاری و همکاران (۷) در مطالعه‌ای به بررسی شاخص قدرت آبراهه (SPI) و مدل رقومی جهت بررسی مناطق مستعد فرسایش خندقی در حوزه رودخانه دیره پرداخته شد، نتایج نشان داد که پنج عامل شیب، انحنای افقی شیب، کاربری اراضی، فاصله از جاده و سنگ‌شناسی از عوامل مؤثر در ایجاد خندق می‌باشند. پارکنر و همکاران (۱۸) در نیوزیلند به بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر آستانه توپوگرافی خندق‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که در جنگل، آستانه توپوگرافی تشکیل خندق بسیار بالاست و با تغییر کاربری به مرتع این آستانه کاهش یافته است و در مقابل، با جنگل‌کاری مجدد این آستانه دوباره افزایش یافته است. آنجلری و همکاران (۲) در سیسیلی ایتالیا اقدام به تهیه نقشه حساسیت فرسایش آبی برای اشکال خندقی، شیاری و بین شیاری کردند که نتایج آن‌ها نشان داد که شاخص‌های ارتفاع، قدرت فرساینده‌گی آبراهه و شاخص انحنا و همچنین شاخص رطوبت خاک از مهم‌ترین شاخص‌ها به‌عنوان متغیر مستقل برای پهنه‌بندی نقشه فرسایش خندقی می‌باشند. ذاکری نژاد و همکاران (۲۸) با استفاده از ارائه مدل ارتفاعی با دقت ۵ متر و استفاده از شاخص قدرت فرساینده‌گی آبراهه (SPI) و تلفیق این شاخص در مدل USPED به ارائه نقشه شدت فرسایش آبی در حوزه مزایجان در جنوب غربی استان فارس پرداختند که نتایج این تحقیق نشان داد که فرسایش خندقی به‌شدت تحت تأثیر شاخص‌های توپوگرافی است و خطر آن در مناطق با شیب کمتر از ۱۰ درصد بیشتر است.

باتراگو و مارتینز (۴) با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع از داده‌های الوس پالاسار (ASTER و SRTM (ALOS PALSAR

فرسایش خاک به‌عنوان یکی از عوامل اصلی بیابان‌زایی در گستره وسیعی از سطح کره زمین به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌گردد. فرسایش آبی به‌عنوان نوع غالب فرسایش و تخریب اراضی، بسیاری از مناطق کشور ایران را تهدید می‌کند (۱۵، ۲۹ و ۳۰). فرسایش خندقی (آبکندی) به‌عنوان یکی از انواع فرسایش آبی، اگرچه مساحت کمتری را نسبت به دیگر اشکال فرسایش آبی در برمی‌گیرد، ولی یکی از عوامل اصلی فرساینده خاک در بسیاری از حوزه‌های آبریز محسوب می‌گردد (۱۴، ۲۱ و ۲۷). لذا لزوم مطالعات جامع و کامل در مناطقی که دارای پتانسیل فرسایش‌پذیری می‌باشند، امری اجتناب‌ناپذیر تلقی می‌شود.

داده‌های حاصل از سنجش از دور می‌تواند با فراهم آوردن داده‌های مکانی در ابعاد وسیع در ارزیابی فرسایش نقش اساسی داشته باشد. زیرا اکثر حوزه‌های کشور فاقد ایستگاه اندازه‌گیری بوده و به‌این ترتیب دست‌یابی به مدل‌هایی مبتنی بر شرایط ویژه در حوزه‌های آبخیز ضروری است. تاکنون مطالعات زیادی درباره فرسایش صورت گرفته است اما بیشتر مطالعات در زمینه فرسایش سطحی یا شیاری و آبراهه‌ای بود و فرسایش خندقی کمتر مورد توجه قرار گرفته است (۲۵ و ۲۸). بیشتر این مطالعات، فرسایش خندقی را از نظر کیفی مورد بررسی قرار داده و عوامل متفاوتی را مؤثر بر فرسایش خندقی دانسته‌اند. پارامترهای زیادی در ایجاد فرسایش خندقی تأثیر دارند از جمله خاک، زمین‌شناسی منطقه، تکتونیک، هیدرولوژی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و توپوگرافی، که در مطالعات مختلف در سراسر جهان به آن اشاره شده است (۶، ۱۲، ۲۱ و ۲۵).

معیار توپوگرافی منطقه از پارامترهای مهم در ایجاد فرسایش آبی از جمله فرسایش آبکندی محسوب می‌گردد، که در هر منطقه با توجه به ویژگی‌های فیزیکی منطقه منحصر به فرد عمل می‌کند. این پارامتر در واقع به‌صورت غیرمستقیم بر دیگر شاخص‌ها و یا معیارها تأثیرگذار است (۱۶، ۲۸ و ۳۰). در رابطه با بررسی فرسایش خندقی توسط مدل رقومی ارتفاع مطالعات محدودی صورت گرفته است که

تحقیق با استفاده از تلفیق مدل آماری حداکثر آنتروپی (مدل مکسنت) و سیستم اطلاعات جغرافیایی به شناسایی اراضی مساعد فرسایش خندقی در جنوب استان اصفهان پرداخته شده است. همه مسائلی که با تشخیص مدل احتمال سروکار دارند، با روش ماکزیمم آنتروپی قابل حل می‌باشند. به همین دلیل در این پژوهش، اقدام به اجرای مدل حداکثر آنتروپی گردید. از دیگر اهداف تحقیق شناسایی مناطق دارای پتانسیل فرسایش آبی از نوع فرسایش خندقی با استفاده از داده‌های نقشه‌های رقومی ارتفاعی SRTM و ASTER با مدل حداکثر آنتروپی به دلیل هزینه کمتر و در دسترس بودن این داده‌ها برای بسیاری از مناطق از جمله حوزه موردمطالعه است که از مناطق شدید فرسایشی محسوب می‌شود. آنتروپی اندازه‌ای از عدم قطعیت در مجموعه اطلاعات است. در واقع استفاده از این مدل و استفاده از داده‌های نقشه‌های رقومی ارتفاعی رایگان و موجود جهت پهنه‌بندی مناطق حساس فرسایش خندقی از اهداف عمده این تحقیق محسوب می‌گردد. به‌طورکلی، در راستای اهداف این پژوهش اقدام به شناسایی و رقومی کردن مناطق خندقی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی و همچنین تهیه نقشه‌های رقومی ارتفاعی با دقت ۳۰ متر از داده‌های جهانی مدل ارتفاعی ASTER GDEM و SRTM گردید. تهیه شاخص‌های مختلف توپوگرافی از نقشه‌های رقومی ارتفاع و انتخاب بهترین شاخص و بهترین مدل جهت پهنه‌بندی فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی از دیگر اهداف این تحقیق است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

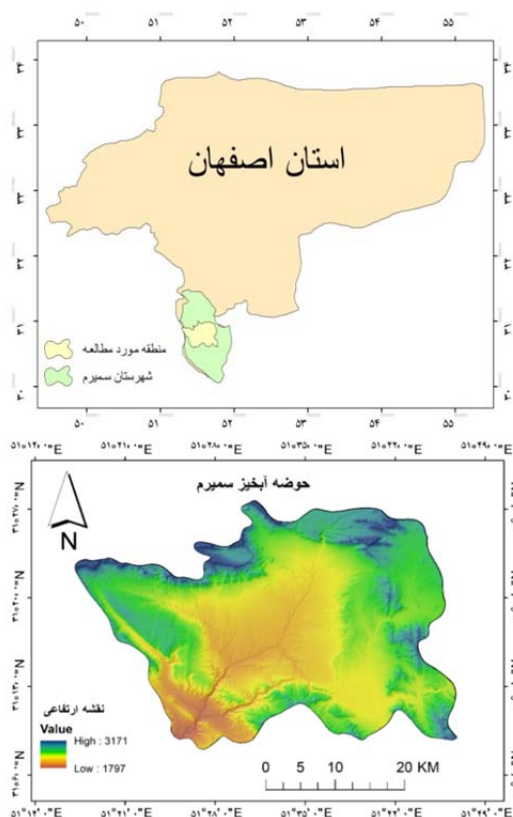
حوزه آبخیز سمیرم در محدوده سیاسی شهرستان سمیرم در جنوب استان اصفهان واقع شده است. منطقه مورد مطالعه در ۵۱/۷۷۴ درجه طول شرقی و ۳۱/۱۴۸ درجه عرض شمالی واقع شده است و مساحتی معادل ۱۰۸۵۸۵ هکتار در جنوب شهرستان سمیرم واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع آن از سطح دریا بین ۱۷۹۱ تا ۳۱۷۶ متر و متوسط ارتفاع حوزه مورد مطالعه

و همچنین از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ به بررسی ریسک فرسایش خاک در منطقه بویاکا کشور کلمبیا پرداختند. نتایج این تحقیق با استفاده از شاخص‌های تهیه‌شده نشان داد که نقشه‌های رقومی ارتفاع ابزاری مفید، آسان و بدون هزینه جهت تهیه نقشه‌های کمی خطر فرسایش خاک محسوب می‌گردند. کادری و همکاران (۹) نشان دادند که کاربرد مدل SRTM در استخراج پارامترهای حوزه آبخیز در منطقه‌ای از هند دقت بیشتری دارد، نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که دقت نقشه رقومی ارتفاعی SRTM دقت بالاتری نسبت به نقشه رقومی ASTER جهت تهیه نقشه پتانسیل فرسایش آبی دارد. ذاکری نژاد و همکاران (۳۰) با استفاده از شاخص‌های لیتولوژی و همچنین مدل‌های رگرسیونی و با استفاده از تصاویر ASTER به ارزیابی شدت فرسایش خندقی در منطقه جنوب زاگرس در استان فارس و با استفاده از شاخص‌های نسب گیری طیفی پرداختند، که نتایج این تحقیق نشان داد که شدت فرسایش خندقی در رسوبات کوارترنری و سازندهای میشان بیشتر از سایر سازندهای زمین است. عرب امیری و همکاران (۳) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و شاخص‌های تأثیرگذار در فرسایش خندقی به مقایسه دو مدل IoE (Index-Of-Entropy) و WoE (Weight-Of-evidence) در حوزه بستم استان سمنان پرداختند، که نتایج این تحقیق نشان داد ترکیب این دو مدل دقت بالاتری جهت شناسایی مناطق حساس به فرسایش خندقی دارد.

ضرورت انجام این پژوهش پهنه‌بندی مناطق حساس به فرسایش خندقی است، زیرا اولویت‌بندی مناطق حساس به فرسایش خندقی برای برنامه ریزان حفاظت خاک و آبخیزداری دارای اهمیت ویژه‌ای است. در بسیاری از مطالعات انجام شده قبلی در ایران کمتر به استفاده از مدل‌های آماری احتمالی و داده‌های فیزیوگرافی حوزه پرداخته شده است (۱۷، ۲۲، ۲۸ و ۲۹). در این مطالعه هدف استفاده از داده‌های مدل رقومی رایگان و در دسترس و کاربرد مدل آماری مکسنت جهت تهیه نقشه فرسایش خندقی است. با توجه به مطالعات محدودی که در پهنه‌بندی مناطق فرسایش خندقی در ایران انجام شده در این

فلات، دشت دامنه‌ای، آبرفتی، دشت واریزه‌ای، دشت مخروط افکنه، دشت نواحی پست و دشت سیلابی تقسیم شده که هر یک ویژگی‌های خاصی دارند که به نحوی به‌عنوان پتانسیل و محدودکننده آب زیرزمینی و آب سطحی محسوب می‌شوند. بخش مرکزی حوزه آبریز سمیرم را اراضی پست تشکیل داده که دارای بافت خاک ریزتری بوده و همچنین بیشترین گسترش و پراکنش خندق‌های فرسایشی در این قسمت از منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. گسل‌های اصلی منطقه تأثیر راندگی زاگرس است. مهم‌ترین گسل موجود در حوزه سمیرم که در محدوده جنوب آن قرار دارد گسل سمیرم است. این حوزه دارای فرسایشی آبی شدید از جمله نوع فرسایش‌های لغزشی، شیاری و خندقی است. ابعاد خندق در منطقه مورد مطالعه تقریباً بین ۱۰ تا ۱۵ متر طول و عمقی بین ۱ تا ۳ متر نیز مشاهده شد.

۲۱۸۵ متر است و در مجموعه ناهمواری‌های سیستم چین‌خورده زاگرس محسوب می‌شود. توپوگرافی این اراضی به شکل اراضی مسطح و کوهستانی است. حالت ناهمواری این منطقه متأثر از چین‌شناسی این سازند است که تناوبی از مارن و ماسه‌سنگ است. کوه‌های اطراف منطقه مورد مطالعه به‌عنوان نقاط برف‌گیر اصلی بوده که به‌عنوان سرمایه اصلی آب در تغذیه آبرفت‌های منطقه عمدتاً در فصول زراعی و فصول خشک بسیار مؤثرند. تپه‌ها با شیب ۱۲-۲۵ در صد همانند کوه‌ها در حاشیه حوزه مورد مطالعه قرار گرفته و عمدتاً در حدفاصل بین دشت و کوه قرار دارند. جنس آن‌ها در حاشیه شمالی و شرقی آهک شیلی با تناوبی از مارن و آهک است. وضعیت پتانسیل آبی تپه‌ها نسبت به ارتفاعات محدودتر است. دشت‌ها نیز بیشتر در قسمت بخش مرکزی حوزه آبریز سمیرم را دشت‌ها تشکیل داده‌اند که شیب آن‌ها بین صفر تا ۱۲ در صد متغیر است. دشت‌ها از نظر ژئومورفولوژی به واحدهای مختلف



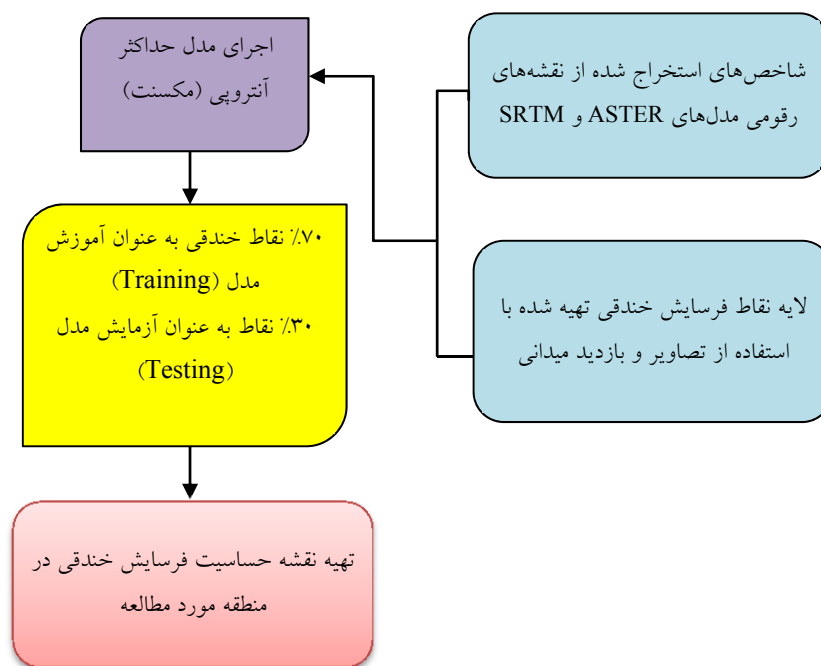
شکل ۱. موقعیت حوزه آبریز مورد مطالعه در جنوب استان اصفهان

Fig. 1. The study area in the south of Isfahan province

روش تحقیق

مدل) با استفاده از نقشه های رقومی ارتفاعی می باشند. شاخص های توپوگرافی مورداستفاده در این پژوهش (جدول ۱) با استفاده از مدل ارتفاعی SRTM | قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و همچنین مدل ارتفاعی ASTER با قدرت تفکیک ۳۰ متر از سایت USGS تهیه شده است. پس از تهیه نقشه رقومی ارتفاعی ASTER و SRTM، جهت رفع خطاهای حفره از مدل پلانچون و داربکس (۱۱، ۲۰، ۲۹ و ۳۱) استفاده گردید. در واقع یکی از اهداف اصلی این تحقیق اجرای مدل با تمامی شاخص های یکسان از هر دو مدل ارتفاعی مذکور است بوده که در نهایت با استفاده از شاخص ارزیابی صحت، نقشه ارتفاعی رقومی که دقت بالاتری در مدل سازی دارد، جهت تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خندقی انتخاب شود.

فلوچارت مربوط به روش تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده و در ادامه مراحل انجام تحقیق آورده شده است. تهیه مدل های رقومی ارتفاع (DEM) که با استفاده از تصاویر ماهواره ای مختلف و یا به شیوه فتوگرامتری از عکس های هوایی تهیه می گردد، نمایش رقومی قسمتی از سطح زمین به صورت لایه رستری است که می تواند در مدیریت و ارزیابی مدل های کمی در زمینه های مختلف از جمله فرسایش خاک مورداستفاده قرار گیرد (۵، ۹ و ۲۶). در این پژوهش ابتدا اقدام به تهیه داده های ورودی به مدل گردید. داده های ورودی شامل نقاط نمونه برداری از مناطق فرسایش خندقی (متغیر وابسته مدل) و تهیه نقشه های شاخص توپوگرافی (متغیرهای مستقل



شکل ۲. فلوچارت روش تحقیق در حوزه مورد مطالعه

Fig. 2. The flowchart of the methodology

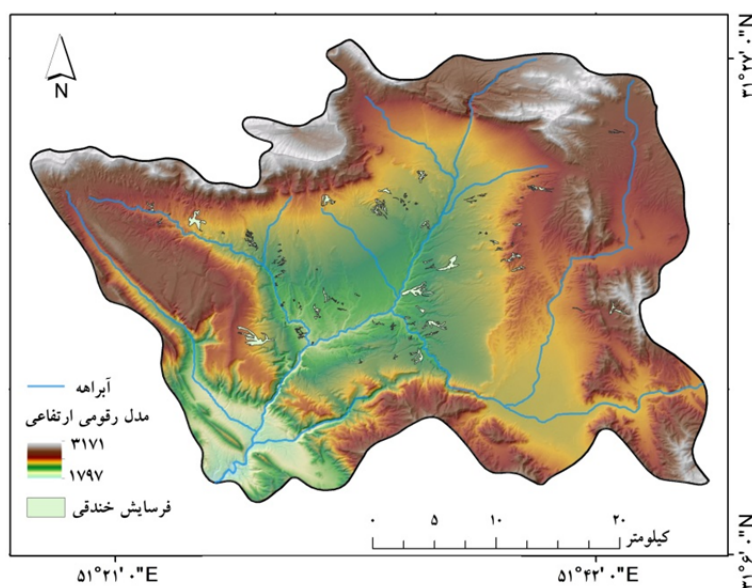
جدول ۱. شاخص‌های توپوگرافی استخراج شده از مدل رقومی ارتفاعی در حوزه آبخیز مورد مطالعه

Table 1. The applied topography indices in our study area

شاخص‌های توپوگرافی	روش مورد استفاده
شاخص رطوبت توپوگرافی	الیا و کنارد (۲۰)
شاخص قدرت فرسایشی جریان	الیا و کنارد (۲۰)
شاخص شیب	زوربرگن و تورن (۳۲)
شاخص LS	الیا و کنارد (۲۰)
شاخص انحنا پروفایل	الیا و کنارد (۲۰)
شاخص طول جریان	زوربرگن و تورن (۳۲)
شاخص حوزه یا تمرکز جریان	الیا و کنارد (۲۰)
شاخص انحنا	زوربرگن و تورن (۳۲)
شاخص همگرایی	کوته و لحمیر (۱۰)
شاخص جهت	زوربرگن و تورن (۳۲)
شاخص ارتفاع	تهیه شده در نرم افزار ArcGIS

ماهواره‌ای نرم فرار گوگل ارث (Google Earth) اقدام به رقومی کردن مناطق فرسایش خندقی گردید. شکل ۳ نمونه‌های رقومی شده در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. خندق‌ها بیشتر در مناطق مرکزی حوزه آبخیز سمیرم و در شیب‌های کمتر از ۱۰ درصد واقع شده‌اند.

تهیه نقشه پراکنش مناطق خندقی در این پژوهش نیاز به نقاط معرفی شده خندقی به‌عنوان شاخص متغیر به مدل است. بدین منظور از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۲۰۱۸، عکس‌های هوایی و نمونه‌برداری‌های میدانی از موقعیت مکانی ۳۲ خندق استفاده شده است. در این مرحله با استفاده از تصاویر



شکل ۳. نقشه فرسایش خندقی رقومی شده منطقه مورد مطالعه

Fig. 3. The digitized of gullies in the study area

جهت بیان نرخ مثبت صحیح (TPR) در برابر نرخ مثبت غلط (FNR) به کار می رود. محور عمودی این منحنی حساسیت (Sensitivity) و محور افقی آن همان (ویژگی-1) است.

$$TPR = TP/P \quad [۲]$$

$$FPR = FP/N = 1 - \text{specificity} \quad (\text{ویژگی})$$

مقدار عددی زیر منحنی (AUC) به عنوان یک شاخص جهت بررسی صحت مدل های بکار گرفته استفاده می شود که در واقع این مقدار عددی یک جنبه از کارایی را موردسنجش قرار می دهد (۱، ۱۹ و ۲۹). میزان مقدار عددی زیر منحنی برابر با ۰/۵ بیانگر پیش بینی تصادفی است. مقادیر بین ۰ تا ۰/۵، بیانگر کارایی پائین، ۰/۵ تا ۰/۷ بیانگر مدل خوب و بیش تر از ۰/۷ نشان دهنده عالی ترین کارایی نرم افزار در پیش بینی مدل است (۱ و ۲۳). میزان دقت نقشه های تولیدی پتانسیل خندقی با استفاده از دو مدل رقومی ارتفاعی حاصل از ASTER و SRTM با یکدیگر مقایسه و بهترین مدل جهت پهنه بندی خطر فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی انتخاب گردید.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل مسکنت با استفاده از نقشه های مدل ارتفاعی ASTER و SRTM اعتبار مدل مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از سطح زیر نمودار راک مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۴ نمودار مربوط به اعتبار سنجی برای هر دو نوع داده را نشان می دهد. میزان راک جهت پهنه بندی فرسایش خندقی برای داده های تعلیمی نقشه های رقومی ارتفاعی ASTER و SRTM به ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۷۲ و برای نمونه های آزمایشی ۰/۶۵ و ۰/۷۳ است. این نتایج بیانگر آن است که مدل ارتفاعی SRTM دارای دقت بالاتری نسبت به ASTER است. یکی از دلایل پایین بودن دقت مدل SRTM که در بسیاری از پژوهش های پیشین به آن نیز اشاره شده به دلیل تأثیر پوشش گیاهی باشد که باعث ایجاد خطاهای تراس مانند شده است، در حالی که در نقشه رقومی ارتفاعی ASTER به دلیل ماهیت

اجرای مدل حداکثر آنتروپی یا مکسنت تعریف شانون از آنتروپی از یک متغیر تصادفی X با p(x) به عنوان احتمال وقوع عبارت است از:

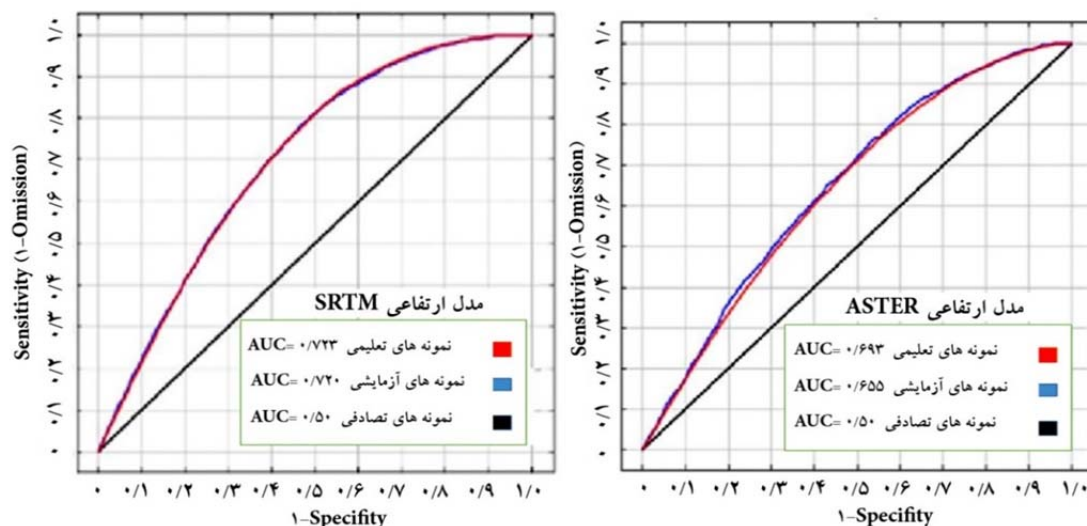
$$H(x) = H(p) = - \sum_x p(x) \log p(x) = E[\log \left\{ \frac{1}{p(x)} \right\}] \quad [۱]$$

در این رابطه؛ که $H_a(x)$ ، آنتروپی X است برای زمانی که لگاریتم بر اساس پایه داده شده a، مشخص شده است (۱۹ و ۲۳). در اجرای این مدل، تمامی شاخص های توپوگرافی عنوان شده در قسمت های قبلی مقاله، به عنوان ورودی به مدل با سیستم مختصات یکسان جغرافیایی و اندازه پیکسل ۳۰ متر به فرمت ASCII جهت ورودی به مدل تهیه گردید. شایان ذکر است که این مدل در نرم افزار R اجرا شده است. برای اجرای این مدل، ۷۰ درصد داده ها برای مدل سازی و پهنه بندی و ۳۰ درصد آن ها جهت ارزیابی و اعتبار سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. پس از اجرا کردن مدل، نقشه پهنه بندی به صورت فایل رستری تهیه گردید. نقشه های تولید شده دارای ارزش بین ۰ تا ۱ می باشند. در این نقشه ها، پیکسل هایی که ارزش نزدیک به صفر دارند دارای احتمال ضعیف فرسایش خندقی بوده در حالی که نقاط دارای ارزش نزدیک به ۱ بیانگر فرسایش شدید خندقی در منطقه می باشند. در این تحقیق مدل مکسنت دو بار به صورت جداگانه برای شاخص های توپوگرافی تهیه شده از نقشه های رقومی ارتفاعی ASTER و SRTM اجرا شد.

منحنی مشخصه عملکرد سیستم (Receiver operating characteristic) یکی از مشهورترین روش های ارزیابی مدل، استفاده از منحنی راک (ROC) است که برای مقایسه دو روش دسته بندی به کار می رود. این منحنی دربرگیرنده داده های آموزشی و آزمون است که با اجرا کردن مدل مکسنت در اختیار کاربر قرار می گیرد (۱). که در این تحقیق سطح مثبت صحیح (True Positive)، به عنوان نمونه خندقی، به درستی خندق تشخیص داده شود. مثبت غلط (False Positive)، به عنوان نمونه خندقی، به اشتباه فاقد خندق تشخیص داده شود.

شاخص‌های مستخرج از مدل ارتفاعی SRTM آورده شده است.

راداری امواج این خطا کاهش یافته و نقشه دقیق‌تری از این مدل، تهیه شده است (۱۰، ۲۹ و ۳۰). که در این تحقیق در ادامه نتایج نهایی نقشه پتانسیل فرسایش خندقی با اجرا کردن

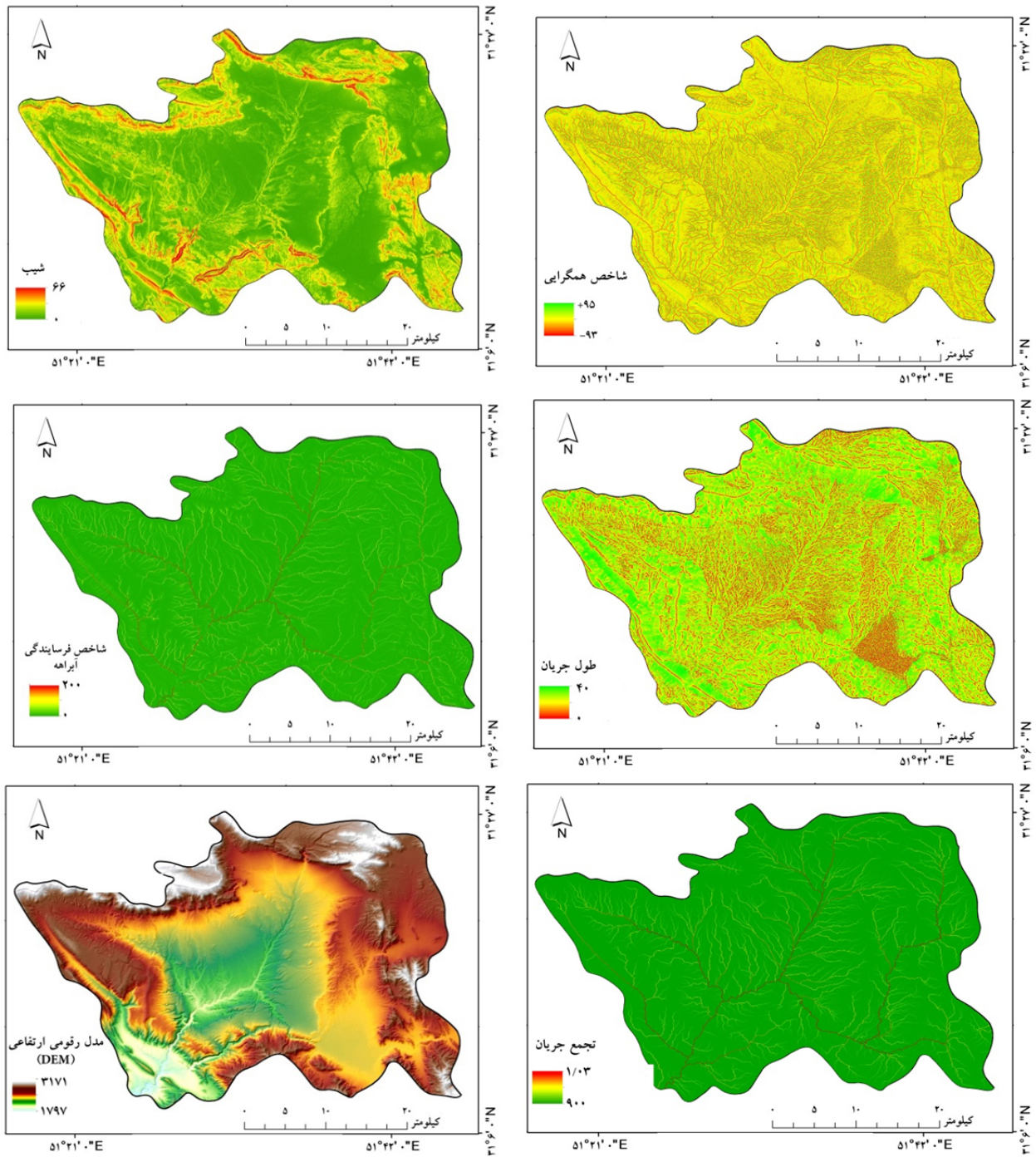


شکل ۴. نمودار AUC برای نمونه‌های تعلیمی و آزمایشی دو مدل ارتفاعی SRTM و ASTER

Fig. 4. The AUC graphs for both training and testing of ASTER GDEM and SRTM

را به‌عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر بر فرسایش خندقی معرفی کرده‌اند، همخوانی دارد (۲، ۷، ۱۰ و ۲۹). شاخص قدرت جریان با توجه شرایط فیزیکی شبکه آبراهه و گسترش تراکم بالایی انشعابات باعث شده است نسب به دیگر شاخص‌ها در ایجاد فرسایش خندقی اهمیت بیشتری در این منطقه داشته باشد. با توجه به نقشه شاخص قدرت جریان حوزه مورد مطالعه، آبراهه اصلی حوزه دارای بیشترین مقدار قدرت جریان است و آبراهه مناطق شیب‌دار در دسته دوم قرار دارند و انشعابات و آبراهه فرعی در پایین‌ترین سطح شاخص قدرت جریان قرار دارند (۲۸ و ۲۹).

آنالیز شاخص‌های توپوگرافی زمین با استفاده از مدل مکسنت و نقشه‌های تهیه شده از مدل رقومی ارتفاعی SRTM اهمیت هر یک از شاخص‌ها به‌عنوان متغیرهای مستقل در ایجاد فرسایش خندقی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. شکل ۵ و جدول ۲ مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار تهیه شده از مدل رقومی ارتفاع SRTM را که به دلیل دقت بالاتر انتخاب شده است را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲، بیشترین سهم مشارکت در مدل مکسنت مربوط به ترتیب مربوط به شاخص قدرت فرساینده‌گی (۴۰/۳٪)، شاخص ارتفاع (۲۲/۷٪) و شاخص همگرایی (۱۸٪) است. که این نتایج با سایر مطالعات انجام شده که شاخص قدرت فرساینده‌گی و شاخص همگرایی



شکل ۵. شاخص های دارای بیشترین تأثیر در تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از مدل ارتفاعی SRTM
 Fig. 5. The most important indices in gully erosion susceptibility with using the SRTM DEM

جدول ۲. تأثیر هر یک از شاخص‌های مهم در ایجاد فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه

Table 2. The effect of the most important indices on gully erosion in the study area

شاخص‌ها	درصد مشارکت
شاخص فرساینده‌گی آبراهه	۴۰/۳
ارتفاع	۲۲/۷
شاخص همگرایی	۱۸
شاخص طول دامنه	۶/۸
شاخص طول جریان	۴/۹
شاخص شیب	۳/۷

توجه به نقشه شاخص همگرایی، مناطق با مقدار مثبت به صورت محدب و مناطق با مقدار عددی منفی حالت مقعر خواهند داشت. با توجه به نقشه این شاخص بیشتر خندق‌های به وجود آمده دارای ارزش منفی در مناطق مقعر تشکیل شده‌اند. وجود مناطق پست به عنوان چاله‌ها که حالت مقعر دارند باعث نفوذ رواناب شده و شرایط لازم را برای انحلال فراهم می‌شود که با نتایج دیگر محققین همخوانی دارد (۲، ۱۴، ۲۲ و ۲۹).

شاخص طول جریان (LS) با شیب رابطه مستقیم دارد، به طوری که بیشتر تأثیر این شاخص برای مناطق با شیب زیاد است. جهت شیب نیز بسیار اهمیت دارد و در صورتی که فرسایش خندقی با شیب رابطه معکوس و جهت شیب نیز از اهمیت بالای برخوردار نیست (۲۸ و ۲۹). به طور کلی در مناطق کم شیب در حوزه آبخیز مورد مطالعه و در شیب‌های کمتر از ۱۵ بیش از ۹۰ درصد مناطق خندقی مشاهده می‌گردد که درصد قرار دارند. در واقع تغییر شیب ناگهانی در مناطق مرتفع زمانی که به واحد دشت سر می‌رسد عامل اصلی به وجود آمدن خندق‌های بزرگ در منطقه است. فرم کلی شیب در حوزه آبخیز به گونه‌ای است که بیشترین شیب مربوط به مناطق بالادست حوزه است و هرچه به سمت خروجی حرکت کنیم شیب کاهش می‌یابد.

این تغییرات شیب، خود یک عامل برای افزایش سرعت رواناب در بالادست و پایین آمدن زمان تمرکز است و باعث انتقال بیشترین مقدار رواناب به سمت خروجی حوزه می‌شود.

مناطقی که دارای مقادیر بالای قدرت جریان هستند دارای توان و پتانسیل فرساینده‌گی بیشتری می‌باشند، لذا با توجه به ارزش بالای این شاخص، بیشتر خندق‌ها در مناطقی که امکان و شرایط لازم برای نفوذ آب را داشته‌اند تشکیل شده‌اند. در حوزه مورد مطالعه الگوی تراکم آبراهه از مناطق مرتفع به سمت خروجی کاهش می‌یابد و در نهایت با کاهش تراکم قدرت جریان افزایش که در نهایت باعث افزایش جریان می‌شود. در این رابطه، پژوهشی که اخیراً توسط محققین ارائه شد به دلیل تأثیر بسیار بالای این شاخص در شناسایی قدرت فرساینده‌گی رودخانه، از آن به عنوان نقشه پایه مناطق خندقی استفاده گردید که به همراه مدل یو اس ای پی دی ام (USPED) در پهنه‌بندی فرسایش آبی استفاده شد (۲۰، ۲۱ و ۲۹).

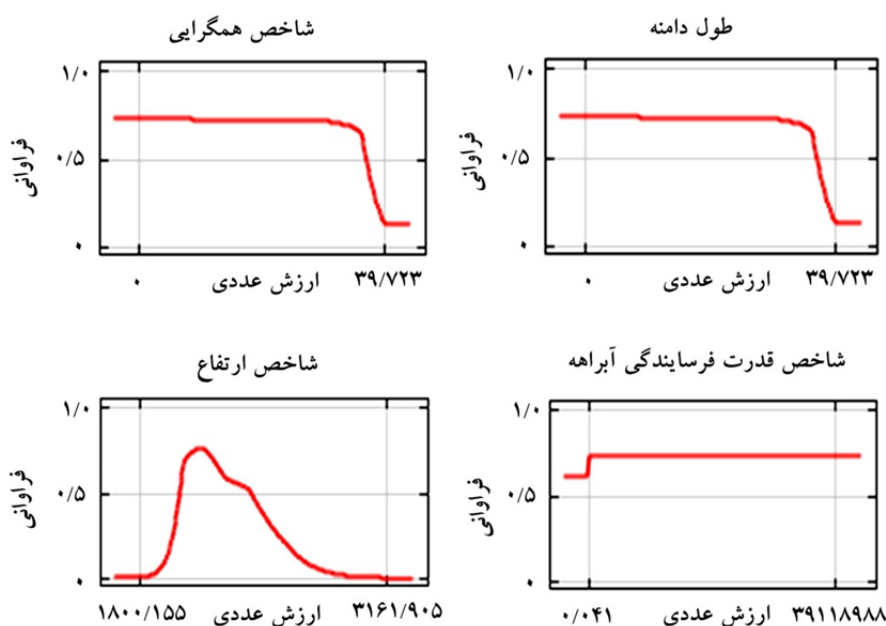
نتایج این تحقیق نشان داد که میان ارتفاع و مناطق مستعد فرسایش آب‌کندی (از نظر کمی) رابطه معکوس برقرار است به طوری که بیشتر مناطق با پتانسیل فرسایش آب‌کندی در ارتفاعی کمتر از ۱۹۵۰ متر می‌باشند. شاید علت این امر را می‌توان کاهش عمق خاک در بالادست دانست به طوری که با افزایش طول خندق‌ها در مناطق مرتفع، عمق خندق‌ها کاهش می‌یابد و از طرفی در مناطق مرتفع، حوزه بالادست وجود ندارد که تحت تأثیر جریان رواناب آن‌ها قرار گیرد که با نتایج سایر پژوهشگران (۲۴، ۲۹ و ۳۰) همخوانی دارد.

شاخص همگرایی یکی دیگر از شاخص‌های توپوگرافی است که ساختار منطقه را به صورت پهنه‌های همگرایی (کانال‌ها) و پهنه‌های واگرایی (خط الراس‌ها) نشان می‌دهد. با

کمترین تأثیر بوده و ارزش های بزرگتر از این آستانه تأثیر بیشتری در فرسایش خندقی را نشان می دهند. شاخص ارتفاع نیز با ۲۲/۷ درصد دومین شاخص تأثیرگذار بوده که ارتفاع های محدوده ۱۸۰۰ متر تا ۲۲۰۰ متر به صورت افزایشی بوده و در ارتفاع های بالاتر گراف روند نزولی را دارد که نمایانگر تأثیر کمتر ارتفاع بر پهنه بندی نقشه پتانسیل فرسایش خندقی است. سومین شاخص مهم تأثیرگذار، شاخص همگرایی با ضریب تأثیر ۱۸ درصد است که ارزش های کمتر از صفر (ارزش های منفی) دارای تأثیر بیشتر و ارزش های بالاتر از صفر (ارزش ای مثبت) تأثیر کمتر را نشان می دهند. ارزش های ۰ تا ۱۰ در شاخص طول دامنه دارای بیشترین تأثیر در پهنه بندی پتانسیل مناطق فرسایش خندقی می باشند.

تراکم آبراهه ها با کاهش شیب کاهش می یابد و باعث متمرکز شدن رواناب و تجمع جریان در اراضی پست و کم شیب می شود. لازم به ذکر است که سایر شاخص ها به دلیل اهمیت کمتر و درصد پایین تر از ۱ درصد آورده نشده اند.

حدود آستانه شاخص های مهم در پهنه بندی فرسایش خندقی با توجه به نتایج جدول ۲ چهار شاخص مهم جهت پهنه بندی فرسایش خندقی شامل شاخص فرساینده گی آبراهه، شاخص ارتفاع، شاخص همگرایی و شاخص طول دامنه می باشند. این شاخص ها در مجموع بیش از ۸۵ درصد اهمیت را نشان می دهند که در شکل ۶ آستانه فرسایش هر یک از شاخص های فوق الذکر آورده شده است. با توجه به شکل ۶، شاخص قدرت فرساینده گی دارای بیشترین سهم (۰/۴۰۳) است که با توجه به گراف مربوطه، ارزش های کمتر از ۰/۰۴۱ دارای



شکل ۶. نواحی آستانه مهم ترین شاخص های مؤثر بر فرسایش خندقی در حوزه آبخیز مورد مطالعه

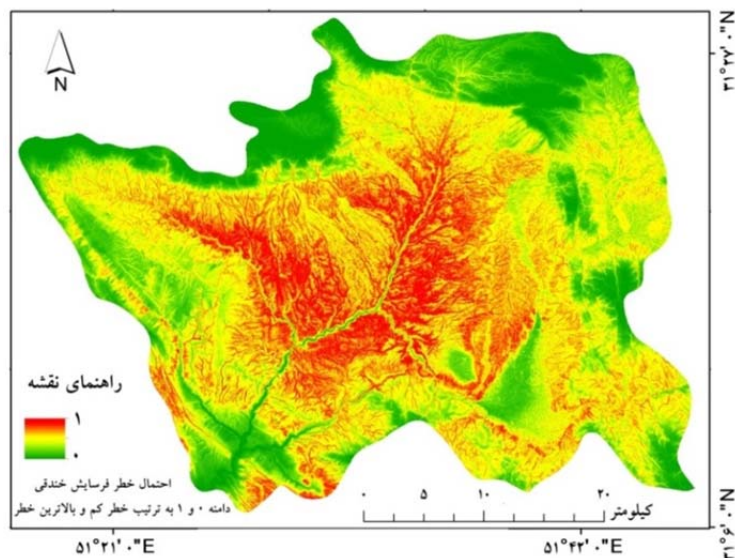
Fig. 6. The threshold values of the most important indices on gully erosion event in the study area

تهیه گردید (شکل ۷). در نقشه مذکور ارزش های پایین و نزدیک به صفر نشان دهنده مناطق با پتانسیل و یا خطر فرسایشی کمتر نسبت به فرسایش خندقی است که بیشتر در مناطق شمالی محدوده مورد مطالعه قابل مشاهده می باشند،

نقشه نهایی پهنه بندی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی با توجه به شاخص های مورد استفاده شده و استفاده از مدل آماری مکسنت در نهایت این نقشه رستری که دارای ارزش های عددی بین ۰ و ۱ است

آسیب‌پذیری بسیار بالایی نسبت به فرسایش آب‌کندی می‌باشند (شکل ۷).

درحالی‌که مناطق بارزش عددی ۱ و نزدیک به ۱ دارای بیشترین خطر نسبت به رخداد فرسایش آب‌کندی می‌باشند. به‌طورکلی مناطق مرکزی حوزه مورد مطالعه دارای خطر



شکل ۷. نقشه احتمال پهنه‌بندی فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از شاخص‌های استخراج‌شده از نقشه رقمی SRTM
 Fig. 7. The probability of gully erosion in the study area with applying the SRTM DEM

شده که از پتانسیل بالایی فرسایش‌پذیری بالایی برخوردار باشد. با کسب مهارت و تخصص کارشناسان حفاظت آب‌وخاک و شناسایی مهم‌ترین معیارها و شاخص‌ها و همچنین میزان دسترسی به آمار و اطلاعات از منطقه مورد مطالعه می‌توان نقشه پهنه‌بندی مناسبی از منطقه مورد مطالعه را تهیه نمود که کلاس‌های شدت فرسایشی را در آن مشخص نمود و در جهت حفاظت از خاک اقدام به طرح‌های حفاظتی در مناطقی با شدت خطر بالا اقدام نمود. نقش فرسایش خندقی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب سرزمین و بیابان‌زایی در مناطق وسیعی از ایران لزوم توجه بیشتر به این نوع از فرسایش آبی را چندید برابر می‌نماید. در مطالعه حاضر نقشه پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش خندقی در حوزه آبخیز سمیرم نشان می‌دهد که مساحتی بیش از ۵۰ درصد درحوزه آبخیز مورد مطالعه در کلاس خطر فرسایش خندقی قرار دارد که بیشتر در نواحی جنوبی و جنوب غربی حوزه مورد مطالعه است. در این تحقیق

به‌طورکلی، عامل توپوگرافی تأثیر بسزایی بر دیگر عوامل مانند خاک، اقلیم و پوشش گیاهی دارد. به‌طوری‌که با افزایش ارتفاع، میزان بارندگی افزایش می‌یابد و در نتیجه نوع پوشش نیز تغییر می‌کند. بنابراین ارزیابی این عامل به‌عنوان تحلیل سرزمین می‌تواند در مدل‌سازی فرسایش خندقی مفید باشد (۱۰، ۲۸ و ۲۹). همان‌طور که در نقشه نهایی پهنه‌بندی فرسایش خندقی مشاهده گردید بیش از ۶۰ درصد منطقه مورد مطالعه در پتانسیل بالاتر از ۵۰ درصد (احتمال ۰/۵) قرار دارند، لذا فرسایش خندقی بیشتر در مناطق مرکزی و جنوبی با شیب کم قرار گرفته‌اند. نقش بسیار بالای شاخص‌های توپوگرافی شدید به‌ویژه شاخص قدرت جریان آب نیز از دیگر عوامل اثرگذار در شدت بالایی رواناب و قدرت فرساینده‌گی شدید آن در اراضی مسطح است. در واقع وجود اراضی مارنی، کاهش ارتفاع، شیب کم، بالابودن رطوبت توپوگرافی در قسمت مرکزی و خروجی درحوزه آبخیز مورد مطالعه موجب

References

1. Anderson RP, Elith J, H. Graham C, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans RJ, Huettmann F, Leathwick JR, Lehmann A. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2): 129-151. doi:https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x.
2. Angileri SE, Conoscenti C, Hochschild V, Märker M, Rotigliano E, Agnesi V. 2016. Water erosion susceptibility mapping by applying Stochastic Gradient Treeboost to the Imera Meridionale River Basin (Sicily, Italy). *Geomorphology*, 262: 61-76. doi:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.018.
3. Arabameri A, Cerda A, Tiefenbacher JP. 2019. Spatial pattern analysis and prediction of gully erosion using novel hybrid model of entropy-weight of evidence. *Water*, 11(6): 1129. doi:https://doi.org/10.3390/w11061129.
4. Buitrago JY, Martínez LJ. 2016. Digital elevation models (DEM) used to assess soil erosion risks: a case study in Boyaca, Colombia. *Agronomía Colombiana*, 34(2): 239-249. doi:https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n2.56145.
5. Burrough PA, McDonnell R, McDonnell RA, Lloyd CD. 2015. Principles of geographical information systems. Oxford university press, 330 p.
6. Conoscenti C, Agnesi V, Cama M, Caraballo-Arias NA, Rotigliano E. 2018. Assessment of gully erosion susceptibility using multivariate adaptive regression splines and accounting for terrain connectivity. *Land degradation & development*, 29(3): 724-736. doi:https://doi.org/10.1002/ldr.2772.
7. Entezari M, Maleki A, Moradi K, Olfati S. 2015. The study of Gully Erosion in Dyreh Catchment Using the Method of Weightal Modulation and Stream Power Index. *Geographical Researches*, 30(3): 297-312. (In Persian)
8. Ghorbani N, Zeinivand H, Haghizadeh A, Tahmasebi N. 2018. Performance evaluation of Dempster-Shafer model for erosion potential mapping in Kakareza watershed, Lorestan province. *Journal of RS and GIS for Natural Resources (Journal of Applied RS and GIS Techniques in Natural Resource Science)*, 9(3): 100-114. (In Persian)
9. Kedari Tushar B, Balasubramani K, Gomathi M. 2017. Comparative Analysis of CARTOSAT, ASTER and SRTM Digital Elevation Models of Different Terrains for Extraction of Watershed Parameters. *The Konkan Geographer*, 17: 143-152.
10. Kheir RB, Wilson J, Deng Y. 2007. Use of terrain variables for mapping gully erosion susceptibility in Lebanon. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological*

با انتخاب ۳۰ درصد نقاط آزمایشی به مدل مکسنت، نمودارهای راک به صورت اتوماتیک با اجرای این مدل برای دو نوع داده تعلیمی و آزمایشی تهیه می‌گردد. مقدار ارزش عددی سطح زیر منحنی برای هر دو نوع داده‌های رقومی ارتفاعی ASTER و SRTM بالاتر از ۰/۶۰ است که نشان‌دهنده دقت نسبتاً بالای دو مدل ارتفاعی در پهنه‌بندی مناطق پتانسیل فرسایش خندقی است. از نتایج مهم دیگر این تحقیق شناسایی عوامل تأثیرگذار بر پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش خندقی است که شامل شاخص فرساینده آبراهه، شاخص ارتفاع، شاخص همگرایی و شاخص طول دامنه است. از مزیت عمده مدل آماری مکسنت نسبت به دیگر مدل‌های آماری عدم نیاز به ورود داده‌های عدم رخداد فرسایش خندقی است. با در اختیار داشتن نقاط و یا نواحی دارای فرسایش خندقی و در دسترس بودن نقشه‌های رقومی ارتفاع می‌توان به پهنه‌بندی مناطق دارای خطر فرسایش خندقی اقدام نمود. از دیگر مزیت مدل مکسنت دیگر آن ارزیابی صحت و اعتبار مدل بوده که به صورت تصادفی از نقاط نمونه‌برداری اقدام به صحت سنجی مدل برای نمونه‌های فرسایش خندقی می‌نماید. قدرت تفکیک مکانی داده‌های نقشه رقومی ارتفاع جهت پهنه‌بندی نقشه فرسایش خندقی دارای اهمیت ویژه است و با افزایش قدرت تفکیک مکانی می‌توان نتایج مناسب‌تری استخراج نمود، ولی مقیاس و هدف نیز از دیگر عوامل تأثیرگذار است. به عبارت دیگر جهت پهنه‌بندی در مقیاس‌های متوسط دقت ۳۰ متر نقشه‌های رقومی ارتفاعی مناسب است در حالی که در مطالعات در مقیاس مزرعه‌ای نیاز به تهیه نقشه‌های رقومی با قدرت تفکیک بالاتری است. اگرچه نتایج این تحقیق نقش بارز شاخص‌های توپوگرافی را در تهیه نقشه پتانسیل خندقی نشان داده ولی جهت افزایش دقت نتایج مدل‌سازی می‌توان با توجه به قابلیت اطلاعات در دسترس در منطقه مورد از دیگر معیارهای تأثیرگذار در فرسایش خندقی از قبیل کاربری اراضی، پوشش گیاهی و خاک و غیره برای پهنه‌بندی مناطق به حساسیت فرسایش خندقی استفاده نمود.

- Research Group, 32(12): 1770-1782. doi:<https://doi.org/10.1002/esp.1501>.
11. Köthe R, Lehmeier F. 1993. SAGA - Ein Programmsystem zur Automatischen Relief-Analyse. *Zeitschrift für Angewandte Geographie*, 4/1993: 11-21.
 12. Le Houérou HN. 1996. Climate change, drought and desertification. *Journal of Arid Environments*, 34(2): 133-185. doi:<https://doi.org/10.1006/jare.1996.0099>.
 13. Maerker M, Quénehervé G, Bachofer F, Mori S. 2015. A simple DEM assessment procedure for gully system analysis in the Lake Manyara area, northern Tanzania. *Natural Hazards*, 79(1): 235-253. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-015-1855-y>.
 14. Martínez-Casasnovas JA. 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *CATENA*, 50(2): 293-308. doi:[https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00134-0](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00134-0).
 15. Masoudi M, Zakerinejad R. 2011. A new model for assessment of erosion using desertification model of IMDPA in Mazayjan plain, Fars province, Iran. *Ecology, Environment and Conservation*, 17(3): 489-594.
 16. Nazari Samani A, Ahmadi H, Jafari M, Boggs G, Ghoddousi J, Malekian A. 2009. Geomorphic threshold conditions for gully erosion in Southwestern Iran (Boushehr-Samal watershed). *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(2): 180-189. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.02.004>.
 17. Olaya V, Conrad O. 2009. Chapter 12 Geomorphometry in SAGA. In: Hengl T, Reuter HI (eds) *Developments in Soil Science*, vol 33. Elsevier, pp 293-308. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(1008\)00012-00013](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(1008)00012-00013).
 18. Parkner T, Page M, Marden M, Marutani T. 2007. Gully systems under undisturbed indigenous forest, East Coast Region, New Zealand. *Geomorphology*, 84(3): 241-253. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.042>.
 19. Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3): 231-259. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>.
 20. Planchon O, Darboux F. 2002. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *Catena*, 46(2): 159-176. doi:[https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00164-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00164-3).
 21. Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, Valentin C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *CATENA*, 50(2): 91-133. doi:[https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1).
 22. Rahmati O, Haghizadeh A, Pourghasemi HR, Noormohamadi F. 2016. Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Natural Hazards*, 82(2): 1231-1258. doi:[10.1007/s11069-016-2239-7](https://doi.org/10.1007/s11069-016-2239-7).
 23. Reddy Y, Sebastin A. 2006. Parameters for estimation of entropy to study price manipulation in stock market. In: 10th Capital Markets Conference, Indian Institute of Capital Markets Paper, Research publication university of Dehli. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.962329>.
 24. Shit PK, Paira R, Bhunia G, Maiti R. 2015. Modeling of potential gully erosion hazard using geo-spatial technology at Garbhetta block, West Bengal in India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1(1-2): 2. doi:<https://doi.org/10.1007/s40808-015-0001-x>.
 25. Soufi M. 2004. Morpho-climatic classification of gullies in Fars province, southwest of IR Iran. In: ISCO 2004 - 13th International Soil Conservation Organisation Conference – Brisbane, July 2004, *Conserving Soil and Water for Society: Sharing Solutions*, 4 p.
 26. Vadon H. 2003. 3D Navigation over merged Panchromatic-Multispectral high resolution SPOT5 images. The international archives of the photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(5): W10.
 27. Valentin C, Poesen J, Li Y. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *CATENA*, 63(2): 132-153. doi:<https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>.
 28. Zakerinejad R, Maerker M. 2015. An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Natural Hazards*, 79(1): 25-50. doi:[10.1007/s11069-015-1700-3](https://doi.org/10.1007/s11069-015-1700-3).
 29. Zakerinejad R, Märker M. 2014. Prediction of Gully erosion susceptibilities using detailed terrain analysis and maximum entropy modeling: a case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 37(1): 67-76. doi:<https://doi.org/10.4461/GFDQ.2014.37.7>.
 30. Zakerinejad R, Omran A, Hochschild V, Maerker M. 2018. Assessment of gully erosion in relation to lithology in the Southwestern Zagros Mountains, Iran using ASTER data, GIS and stochastic modeling. *Geografia Fisica Edinamica Quaternaria*, 41(2): 95-104. doi:<https://doi.org/10.4461/GFDQ.2018.41.15>.
 31. Zevenbergen LW, Thorne CR. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(1): 47-56. doi:<https://doi.org/10.1002/esp.3290120107>.



Original
paper

Evaluation of DEMs to the modeling of the potential of gully erosion using Maxent model (Case study: Semirom catchment in the south of Isfahan Province, Iran)

Reza Zakerinejad

Received: 1 September 2019 / Accepted: 16 June 2020
Available online 24 August 2020

Abstract

Background and Objective Gully erosion is a type of water erosion that occurs in many climate areas, from arid to humid areas. This type of soil loss causes the displacement and destruction of soil surface horizons by the accumulation of runoff. In many parts of Iran, in the north, south and central faced with this type of soil loss. In fact, gully erosion occurs in this area due to the complex topography, erodible soils, mismanagement of soil and land use/land cover. Therefore, in order to protect the soil in these areas, it is necessary that a susceptible map should be available to the managers and policymakers. Many parameters affect the occurrence of gully erosion, including soil, geology, tectonics, hydrology, land use, vegetation and topography, that have been mentioned in various studies around the world. The topographic indices are the most important parameters in the event of gully erosion, which operates differently in each region according to the physical characteristics of the areas. This parameter also indirectly affects the other indicators or criteria (for example, its impact on the vegetation, climate and soil of the area).

R. Zakerinejad (✉)

Assistant Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran
e-mail: r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir

Even there are many researches on the gully erosion, but there are only a few studies on the modelling with applying the stochastic approaches. This study is the first attempt to the modelling of gully erosion in the central of Iran with applying the maximum Entropy model and topographic indices that have been applied with using the free of charge of digital elevation model. This study uses a new approach to preparing the susceptibility map of gully erosion in the Semirom catchment in the South of Isfahan province. This area is affected by different types of water erosion, same as; gully, rill and landslide. Also, the purpose of this research is to compare the accuracy of two digital elevation model, ASTER and SRTM with 30 m resolution, (DEM) from USGS website, for the modelling of gully erosion in the study area. The emphasis of this research was on the topography indices because it has most important on the event of gully erosion.

Materials and Methods In this research for the prediction of the susceptible areas in the result of the main type of gully erosion, the following steps have been applied; In the first step the locations of some sampled gullies, have been digitized randomly with using the Google Earth (GE) images, aerial photos and fieldwork in polygon shapes for each gully.

Subsequently, we converted the polygons and into equally spaced points. In the second step, we determine the most important criteria as the environment layers for the modeling. These topography indices including, wetness Index (TWI),

curvature, profile curvature, slope, aspect, catchment area, flow length, elevation, slope, LS factor, Stream Power Index (SPI). The topographic indices have been extracted in SAGA GIS from the SRTM DEM with 30m spatial resolution and were then converted to the ASCII format to run in the model. Before applying the indices, the DEM was preprocessed with low pass filtering to extract artefacts and errors, like local noise and with using ArcGIS. Subsequently, the DEM was hydrologically corrected eliminating sinks using the algorithm proposed by Planchon & Darboux. The Maximum Entropy Model is a general-purpose method for making predictions or inferences from incomplete information. MEM explores applications in diverse areas such as astronomy, portfolio optimization, image reconstruction, statistical physics and signal processing. The idea of Maxent is to estimate a target probability. In fact, this model needs only the gullies feature (present data). The advantages of this model include the following; It requires only presence data together with environmental information for the whole study area. It can utilize both continuous and categorical data and can incorporate interactions between different variables.

Results and Discussion With applying the Maxent model in the Semirom catchment, it was trained using 70% of the mapped points of gully features as the target or dependent variable and 30% of the mapped gully as testing samples. The raster type of environmental layers (topographic indices) as the independent variable. The validity of the model used in this study was assessed using the level below ROC or Area Under Curve (AUC). The ROC curve was automatically generated by running this model for both training and testing data. The AUC for training data for SRTM and ASTER is 0.64 and 0.72

respectively and also for testing is 0.68 and 0.72 respectively. These results indicate that the SRTM elevation model has higher accuracy than the ASTER DEM. One of the reasons for the low accuracy of the ASTER DEM can be due to the impact of vegetation, which has caused terrace-like errors, while in the SRTM DEM, due to the radar nature of the waves, this error is reduced and a more accurate map of this model has been prepared. Our results show that SPI index with 40.3% contribution, elevation with 22.7% and convergence with 18% are the most important factors for the zoning of the susceptible areas. Regarding the predicted map of the potential of gully erosion, the area in the central and south of the study area are in the high probability.

Conclusion This study applied the Maxent model to map the susceptibility of gully erosion in the Semirom catchment in the Isfahan Province, using various topographic effective factors and the Maxent model. Stochastic approaches like statistical mechanics provide a powerful tool to study the relations between locations of gully erosion features and corresponding environmental characteristics. The result of this study can be used for land-use planning and management of the areas with gully erosion for sustainable development in the prone areas. Although the results of this study show the prominent role of the topographic indicators for the prediction of the potential gully map, to increase the accuracy of the modeling results, in the future researches the other criteria such as land use, vegetation and used soil, etc according to the availability of information to can be applied.

Keywords: Gully erosion, DEM, Maximum Entropy, Geographic information system (GIS)