

## مدل سازی مکانی فرسایش خندقی حوزه آبخیز مهارلو با استفاده از سناریوهای مختلف و الگوریتم وزن واقعه

مهديس اميري<sup>۱</sup>، حميدرضا پورقاسمي<sup>۲\*</sup>، غلامعباس قنبريان<sup>۳</sup> و سيد فخرالدين افصلي<sup>۴</sup>  
<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز و <sup>۲،۳،۴</sup> استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۰۳

### چکیده

فرسایش خندقی یکی از اشکال پیشرفته فرسایش آبی می باشد که شناسایی عوامل موثر و پهنه بندی آن یکی از ابزارهای مهم برای کنترل این پدیده می باشد. هدف اصلی پژوهش حاضر، مدل سازی مکانی و ارزیابی فرسایش خندقی با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه و سناریوهای مختلف در انتخاب محل رخداد خندق های شناسایی شده در حوزه آبخیز مهارلو در استان فارس می باشد. بدین منظور، ابتدا با استفاده از بازدیدهای میدانی گسترده نقاط راس خندق، انتهای خندق و همچنین مرز خندق ها (پلی گون های خندقی) شناسایی و نقشه پراکنش خندق های منطقه مورد مطالعه تهیه شد. سپس، لایه های اطلاعاتی درصد شیب، جهت شیب، انحنای سطح، طبقات ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی، متوسط بارندگی سالانه، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده، کاربری اراضی، واحدهای سنگ شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، تراکم زهکشی و مشخصات خاک (درصد سیلت، درصد رس، هدایت الکتریکی و pH) به عنوان عوامل موثر بر وقوع خندق ها شناسایی و در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی نقشه های آن ها تهیه و طبقه بندی شد. با استفاده از الگوریتم وزن واقعه ارتباط هر یک از عوامل و سه سناریو مختلف در انتخاب محل وقوع خندق ها (راس خندق، انتهای خندق و همچنین، پلی گون های خندقی) تعیین و وزن طبقه های هر عامل مشخص شد. نتایج وزن دهی لایه ها با استفاده از مدل وزن واقعه، نشان داد که افزایش بارندگی، تراکم زهکشی بالا، درصد سیلت زیاد، طبقات ارتفاعی کم، جهت های جنوبی، فاصله های کم از جاده و آبراهه، سازندهای زمین شناسی آسماری، آغا جاری، رازک، گچساران، میشان و ساچون و همچنین، اراضی لخت نقش موثری در وقوع فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه داشته است. نهایتاً، در محیط نرم افزار ArcGIS، نقشه های پهنه بندی حساسیت فرسایش خندقی تهیه شد. ارزیابی سه نقشه پهنه بندی فرسایش خندقی با استفاده از منحنی ROC و ۳۰ درصد از خندق های استفاده نشده در فرایند مدل سازی حاکی از آن بود که دقت مدل های تهیه شده بر اساس سه سناریو راس خندق، انتهای خندق و پلی گون خندق ها به ترتیب ۰/۸۴۷، ۰/۸۶۱ و ۰/۷۹۲ می باشد. به منظور کنترل و جلوگیری از این نوع فرسایش آبی در حوزه آبخیز مهارلو، اقدامات حفاظتی و آبخیزداری را در قالب فعالیت های بیولوژیکی در مراحل اولیه و به ویژه در ابتدای خندق به منظور پیش روی از گسترش آن می توان انجام داد.

**واژه های کلیدی:** استان فارس، راس و انتهای خندق، عوامل موثر، فرسایش آبی، منحنی ROC

**مقدمه**  
آشکار از فرسایش خاک می باشد. به طور کلی، خاکی که از ناحیه خندق دچار فرسایش می شود، می تواند موجب تشکیل گل و لای در حصارها، راه های آبی،

اشکال مختلفی از فرسایش آبی شناخته شده است که در این میان فرسایش خندقی یک شکل بسیار

(۲۰۱۱) در تحقیقی اقدام به پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوزه آبخیز طرود فیروزکوه در البرز مرکزی با استفاده از مدل وزن‌دهی چند طبقه به عوامل کردند. نتایج نشان داد که ۸۸ درصد از محدوده خندقی در پهنه خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. Esfandiari Darabad و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی قابلیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل منطق فازی در حوضه سد گلستان رودخانه قرناوه پرداختند. برای اجرای مدل از عوامل مختلف مانند شیب زمین، خاکشناسی، واحدهای سنگ‌شناسی، شدت فرسایش، کاربری زمین، ارتفاع، جهت شیب، فاصله از شبکه زهکشی، شبکه ارتباطی و بارش استفاده شده است. برای پهنه‌بندی از عملگرهای مختلف گامای فازی استفاده شد. نتایج نشان داد که گامای ۰/۸ بیشترین قابلیت را نسبت به دو عملگر ۰/۷ و ۰/۹ داشته، نقشه نهایی به‌دست آمده ۳۸ درصد از منطقه مورد مطالعه را در طبقات حساسیت زیاد و خیلی زیاد نشان داده است. Entezari و همکاران (۲۰۱۴)، به‌منظور پهنه بندی فرسایش خندقی از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP<sup>1</sup>) استفاده کردند. نتایج نشان داد که ۳۶ درصد از حوزه آبخیز دیره در استان کرمانشاه، در پهنه خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. Habibi (۲۰۱۷)، به‌منظور شناسایی مناطق در معرض خطر به فرسایش خندقی در حوزه آبخیز گرگر شوشتر در استان خوزستان، از مدل فازی استفاده کرد. نتایج نشان داد که مناطق بسیار پرخطر و پرخطر به‌ترتیب با مساحت‌های ۴۰۰ و ۷۳۲ کیلومتر مربع در مجموع ۶۶ درصد از سطح حوضه را شامل شده است. Sharivar و همکاران (۲۰۱۷)، به‌منظور پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوزه آبخیز آبگندی در استان کهگیلویه و بویر احمد، به این نتیجه رسیدند که مدل گامای فازی (۰/۸) مناسب‌ترین روش پهنه‌بندی فرسایش خندقی در مقایسه با دیگر اپراتورهای فازی می‌باشد. همچنین، مدل‌سازی فرسایش خندقی در حوزه آبخیز امبولوزی در کشور سوئیس با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS نشان داد که عامل سنگ‌شناسی به‌عنوان مهمترین عامل در ایجاد این فرسایش در حوضه

آب‌گذر جاده‌ها، سدها و آبگیرها شود (Sharivar و همکاران، ۲۰۱۷). فرسایش خندقی یکی از انواع فرسایش سطحی است، با کناره‌های دارای شیب تند و پیشانی فرسایشی پرشیب و فعال که به‌وسیله فرسایش ناشی از جریان سطحی متناوب (معمولاً در زمان و یا پس از وقوع باران‌های شدید) ایجاد می‌شود (Poesen، ۱۹۸۹). به‌طور کلی، خندق‌ها کانال‌های عمیقی در جهت شیب هستند که معمولاً به‌وسیله رواناب ایجاد شده و اغلب جریان دائمی ندارند (Kirkby، ۱۹۹۲). خندق‌ها را با توجه به مورفولوژی و شکل ظاهری آن‌ها می‌توان به سه دسته تقسیم کرد (de Ploey، ۱۹۸۹). دسته اول، خندق‌های خطی است که دارای یک پیشانی منفرد هستند. دسته دوم، خندق‌های پنجه‌ای است که دارای چند پیشانی مجزا بوده و دسته سوم، خندق‌های جبهه‌ای که به‌طور معمول در حاشیه رودخانه‌ها و یا به‌صورت شاخه‌های عمودی فرعی از آبراهه‌ها و یا خندق‌های اصلی دیده می‌شوند. تنوع و تغییر تعداد و میزان تأثیر عوامل مختلف از نقطه‌ای به نقطه دیگر و متفاوت بودن سهم عوامل شناسایی شده، در شکل‌گیری و گسترش خندق‌ها در پیروی از شرایط محیطی ایجاب می‌کند که تحقیقات بیشتری برای شناسایی بهتر عوامل موثر در رخداد فرسایش خندقی انجام شود (Arabghashghaei و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین، در بررسی ویژگی‌های مورفوکلیماتیک خندق‌های استان فارس علل عمده ایجاد خندق‌ها، تخریب پوشش گیاهی، تغییر کاربری اراضی، احداث جاده، آبیاری غیر اصولی و تخریب کانال‌های انتقال آب، وقوع سیل و شیب معرفی شده است (Arabghashghaei و همکاران، ۲۰۱۱). بنابراین، از آنجایی که شناسایی عوامل موثر بر وقوع این نوع فرسایش و پهنه‌بندی آن یکی از ابزارهای مهم کنترل این پدیده می‌باشد (Entezari و همکاران، ۲۰۱۴). در پژوهش حاضر، ضمن معرفی عوامل موثر بر وقوع فرسایش خندقی به مدل‌سازی مکانی و تهیه نقشه پهنه‌بندی آن در حوزه آبخیز مهارلو در استان فارس پرداخته شده است. به‌طور کلی، در زمینه فرسایش خندقی و مدل‌سازی آن تحقیقات گسترده‌ای در سطح ایران و جهان انجام شده که به تفصیل در زیر به آن پرداخته می‌شود. Arabghashghaei و همکاران

<sup>1</sup> Analytical Hierarchy Process (AHP)

استان گلستان در طبقه بسیار حساس قرار گرفته است، در حالی که نتایج مدل ترکیبی ANN-SVM<sup>۴</sup> نشان داد که ۳۴ درصد از منطقه مورد مطالعه در طبقه بسیار حساس قرار گرفته است. همچنین، نتایج ارزیابی مدل‌ها بیانگر دقت بالای مدل ترکیبی ANN-SVM با مقدار سطح زیرمنحنی ۰/۸۹ بوده است. از طرفی، نتایج اهمیت عوامل موثر نشان داد که فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی و تناسب اراضی بیشترین تاثیر را در وقوع فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه داشته‌اند. Li و همکاران (۲۰۱۷)، در پژوهشی به ارزیابی مدل فرسایش خندقی برای لس‌های فلات چین بر اساس تغییرات در طول و مساحت خندق پرداختند. نتایج نشان داد که حجم خندق‌ها به‌طور معنی‌داری با طول خندق‌ها رابطه مستقیم دارد. بر این اساس، مهمترین نوآوری پژوهش حاضر در مقایسه با دیگر تحقیقات انجام شده، استفاده از سناریوهای مختلف بررسی فرسایش خندقی از جمله مدل‌سازی مکانی نقاط راس خندق، انتهای خندق و همچنین، مرز خندق‌ها (پلی‌گون‌های خندقی) در حوزه آبخیز مهارلو با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه است.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد پژوهش:** حوزه آبخیز مهارلو در استان فارس با متوسط ارتفاع ۱۵۰۰ متر از سطح دریا در ناحیه جنوب غربی ایران و در میان رشته‌کوه‌های زاگرس واقع شده است. منطقه مورد مطالعه در عرض‌های جغرافیایی ۲۹° ۱' تا ۲۹° ۵۸' شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۳° ۱۲' تا ۵۳° ۲۸' شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). وسعت حوزه آبخیز مهارلو ۴۲۷۴ کیلومتر مربع، که از این سطح، ۲۰۵۶ کیلومتر مربع دشت و مابقی آن را ارتفاعات تشکیل می‌دهند (Khaksar و همکاران، ۲۰۰۵).

در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل وزن واقعه با سه سناریو (راس خندق، انتهای خندق و پلی‌گون‌های خندق) و انتخاب ۱۶ عامل موثر، اقدام به مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی در حوزه آبخیز مهارلو شد و نهایتاً نتایج مدل‌ها بر اساس روش ROC مقایسه و

مذکور می‌باشد (Sidrochuk, ۲۰۰۳). Conoscenti و همکاران (۲۰۱۴)، به‌منظور تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی از مدل رگرسیون لجستیک و GIS استفاده کردند. برای این منظور، پس از تهیه نقشه پراکنش خندق‌های ایتالیا (Sicily) اثر عوامل مختلف لیتولوژیکی، توپوگرافی و اداکیکی موثر بر فرسایش خندقی با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک بررسی شد و نتایج نشان داد، اعتبارسنجی مدل‌های یک متغیر می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب برای انتخاب عوامل موثر مورد استفاده قرار گیرد. کاربرد مدل وزن واقعه در پهنه‌بندی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی در زیمباوه مورد ارزیابی قرار گرفت (Dube و همکاران، ۲۰۱۴). عوامل موثر در وقوع فرسایش خندقی در پژوهش فوق به‌ترتیب عبارت از نوع خاک، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، شاخص توان آبراهه و شاخص رطوبت توپوگرافی بود. نتایج ارزیابی پویایی فرسایش خاک با تأکید بر فرسایش خندقی در جنوب غربی ایران نشان داد که علاوه بر شاخص SPI<sup>۱</sup> که برای مدل‌سازی خندق‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل USPED<sup>۲</sup> نیز روش مناسبی برای ارزیابی کمیت و کیفیت فرایند فرسایش آبی است. این مدل‌ها برای پیش‌بینی فرسایش خاک در حوزه آبخیز مزبجان در استان فارس نتایج مناسبی ارائه می‌کنند که می‌تواند به مدیریت منابع آب و خاک در جنوب غربی ایران کمک کند (Maerker و Zakerinejad, ۲۰۱۵). همچنین، Rahmati و همکاران (۲۰۱۶) به‌منظور تهیه نقشه خطر فرسایش خندقی بخش شمالی استان ایلام، حوزه آبخیز چاوار در ایران از مدل‌های نسبت فراوانی (FR) و وزن واقعه استفاده کرده‌اند. نتایج، بیانگر دقت مناسب مدل‌های مذکور (نسبت فراوانی ۷۸/۱۱ درصد و وزن واقعه ۷۰/۰۷ درصد) بوده است. نتایج Pourghasemi و همکاران (۲۰۱۷) در ارزیابی عملکرد تکنیک‌های داده‌کاوی به‌منظور مدل‌سازی فرسایش خندق نشان داد که با استفاده از مدل بیشینه انتروپی (ME<sup>۳</sup>)، ۴۵ درصد از منطقه آق‌امام در

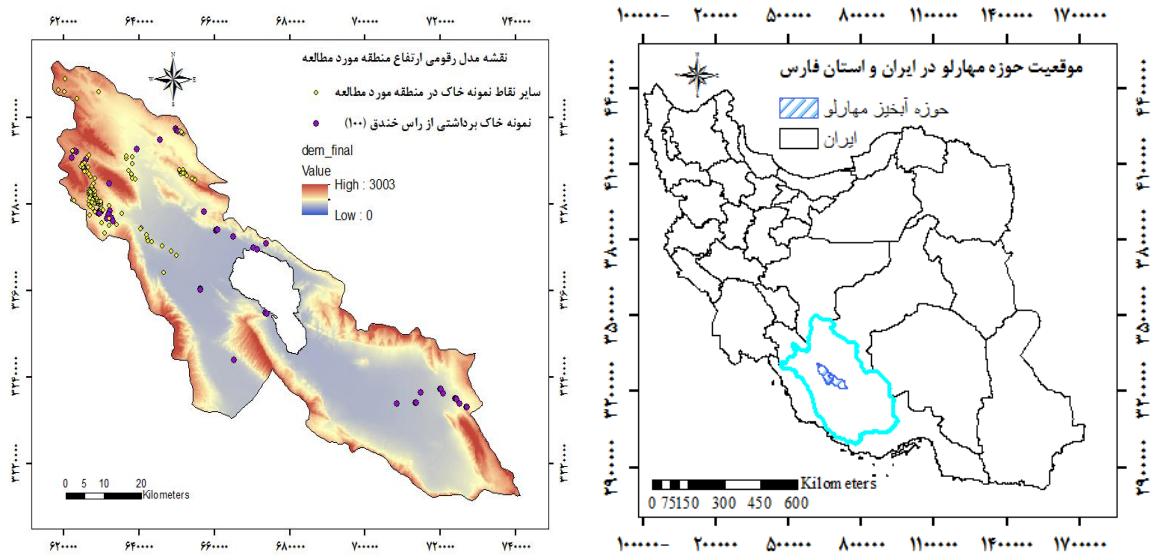
<sup>۱</sup> Stream Power Index (SPI)

<sup>۲</sup> Unit Stream Power-based Erosion Deposition model (USPED)

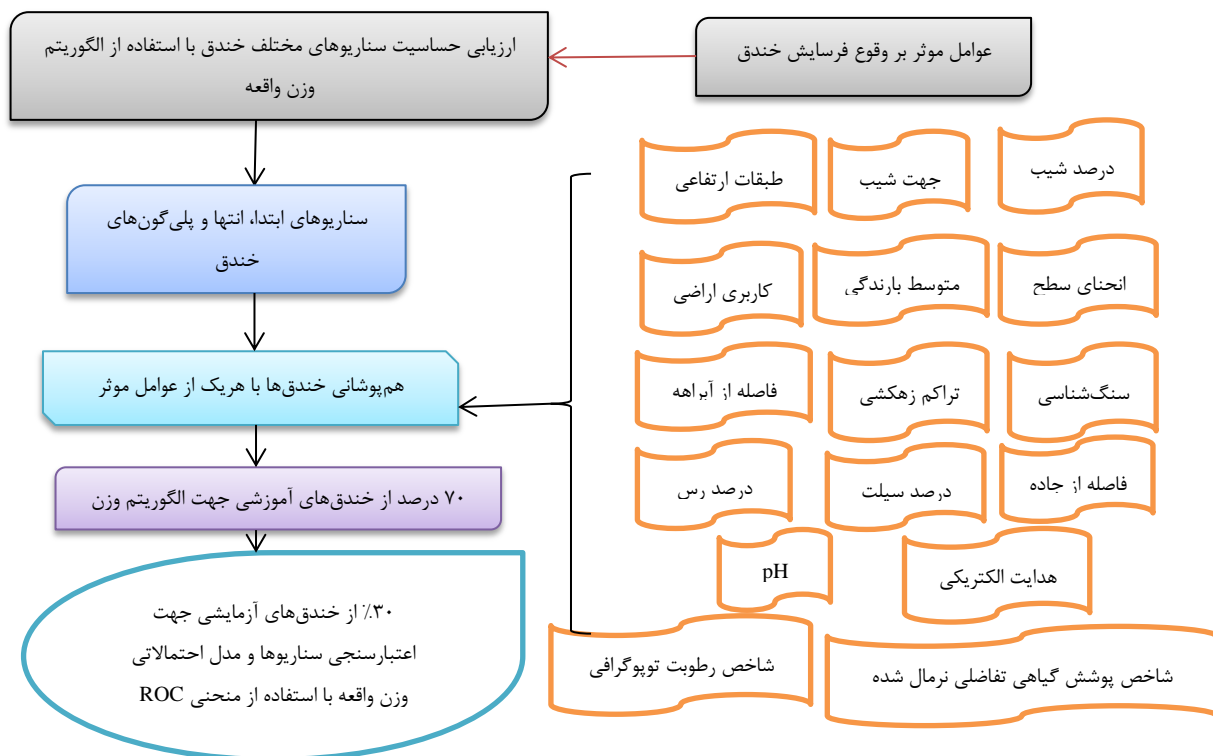
<sup>۳</sup> Maximum Entropy (ME)

<sup>۴</sup> Artificial Neural Network-Support Vector Machine (ANN-SVM)

سناریو برتر معرفی شد. نمودار جریان جریانی مراحل انجام پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز مهارلو در ایران و استان فارس



شکل ۲- نمودار جریان جریانی ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی در حوزه آبخیز مهارلو

تهیه نقشه پراکنش خندق‌ها: برای مدلسازی مکانی فرسایش خندقی، نقشه پراکنش خندق‌های منطقه مورد مطالعه ضروری می‌باشد، به همین منظور، در پژوهش حاضر با استفاده از بازدیدهای گسترده میدانی، پهنه‌های

حساس به فرسایش خندقی با سامانه موقعیت‌یابی جهانی (GPS)<sup>۱</sup> ثبت، وارد نرم‌افزار ArcGIS شده و نقشه پراکنش خندق‌ها تهیه شد. در مجموع ۱۰۰ خندق در منطقه ثبت

<sup>۱</sup> Global Positioning System (GPS)

نرمال شده<sup>۵</sup> (NDVI) پس از دانلود تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ از سایت USGS<sup>۶</sup> و بر اساس رابطه (۲) در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.2.2 تهیه شد. همچنین، نقشه واحدهای سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه و استخراج شد. از طرف دیگر، نقشه‌های فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی و فاصله از جاده نیز از نقشه‌های توپوگرافی حوزه آبخیز مهارلو تهیه شد. در پژوهش حاضر، متوسط بارش سالانه حوزه آبخیز مهارلو، بر اساس آمار بارندگی استخراج شده از سازمان آب منطقه‌ای استان فارس، با استفاده از ۱۳ ایستگاه باران‌سنجی و دوره آماری ۱۳۹۶-۱۳۸۰ آماده و نقشه آن بر اساس روش وزن معکوس فاصله (IDW)<sup>۷</sup> (رابطه ۳) میان‌یابی شد (Mahdian, Taghizade و همکاران، ۲۰۰۸). نهایتاً نقشه‌های مشخصات خاک (درصد سیلت، درصد رس، هدایت الکتریکی و pH) با جمع‌آوری ۲۲۷ نمونه خاک از منطقه مورد مطالعه و اندازه‌گیری درصد رس و سیلت به روش هیدرومتری تعیین شد. پس از خرد کردن کلوخه‌ها و عبور آن‌ها از الک شماره ۱۰ (قطر دو میلی‌متر) مقدار ۵۰ گرم از خاک عبور داده شده از الک را در بشرهای پلاستیکی ریخته و به آن ۱۰۰ سی‌سی محلول پنج درصد کالگون اضافه و به هم زده شد. پس از ۲۴ ساعت محتویات در ظرف مخصوص ریخته و به مدت پنج دقیقه با همزن برقی به هم زده شد. پس از آن که محتویات ظرف به استوانه‌های یک لیتری و حجم نمونه با اضافه کردن آب مقطر به یک لیتر رسانده شد، با استفاده از هم‌زن دستی محلول به خوبی هم‌زده شد و در زمان‌های ۴۰ دقیقه، یک و دو ساعت قرائت هیدرومتر و دما صورت گرفت. پس از اعمال تصحیحات مربوط به دما و قرائت هیدرومتر، درصد سیلت و رس مشخص شد. همچنین، اسیدیته خاک با pH متر (پتانسیومتر) و با روش تهیه عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شد. همچنین، برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی پس از تهیه عصاره اشباع خاک به منظور تعیین شوری از دستگاه EC سنج استفاده شد. نقشه عوامل مذکور بر اساس روش IDW در محیط ArcGIS تهیه شد. نهایتاً به منظور بررسی ارتباط عوامل موثر بر وقوع

شد. از این تعداد، ۷۰ درصد خندق‌ها به صورت تصادفی به‌عنوان داده‌های آموزشی انتخاب و ۳۰ درصد دیگر، به‌منظور اعتبارسنجی (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۶؛ Saberchenari و همکاران، ۲۰۱۶) مدل‌های ساخته شده بر اساس سه سناریو شرح داده شده در بخش فوق با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه در نظر گرفته شد.

**عوامل موثر در رخداد فرسایش خندقی:** به‌طور کلی، انتخاب نوع عوامل موثر بر وقوع پدیده‌هایی از جمله فرسایش خندقی، زمین‌لغزش، سیل و غیره با توجه به شرایط مختلف منطقه مورد مطالعه متفاوت می‌باشد. بر این اساس، محققان مجموعه‌ای از عوامل مختلف توپوگرافی، هیدرولوژیکی و لیتولوژیکی را در مطالعات پهنه‌بندی فرسایش خندقی در نظر گرفته‌اند (Saberchenari و همکاران، ۲۰۱۶؛ Conoscenti و همکاران، ۲۰۱۴). بر این اساس، در پژوهش حاضر، ۱۶ لایه اطلاعاتی درصد شیب، جهت شیب، انحنای سطح<sup>۱</sup>، طبقات ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی، متوسط بارندگی سالانه، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده، کاربری اراضی، واحدهای سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، تراکم زهکشی و مشخصات خاک (درصد سیلت، درصد رس، هدایت الکتریکی<sup>۲</sup> و pH) به‌عنوان عوامل تاثیرگذار در وقوع خندق در نظر گرفته شده‌اند (Entezari و همکاران، ۲۰۱۴؛ Rahmati و همکاران، ۲۰۱۶؛ Saberchenari و همکاران، ۲۰۱۶؛ Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۷). بدین منظور، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه مدل رقمی ارتفاع<sup>۳</sup> با تفکیک مکانی ۱۰×۱۰ متر تهیه و پارامترهای مورفومتریکی از جمله درصد شیب، جهت شیب، انحنای سطح و طبقات ارتفاعی در سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS 10.2.2) و شاخص رطوبت توپوگرافی<sup>۴</sup> در نرم‌افزار SAGA (رابطه ۱) از نقشه DEM به‌دست آمد. لایه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه از اداره کل منابع طبیعی استان فارس تهیه، پس از به‌روزرسانی با استفاده از تصاویر Google Earth مورد استفاده قرار گرفت. نقشه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی

<sup>1</sup> Plan curvature

<sup>2</sup> Electrical Conductivity (EC)

<sup>3</sup> Digital Elevation Model (DEM)

<sup>4</sup> Topographic Wetness Index (TWI)

<sup>5</sup> Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

<sup>6</sup> United States Geological Survey (USGS)

<sup>7</sup> Inverse Distance Weight (IDW)

$$W_i^- = \log_e \left[ \frac{P(\bar{B}_i | S)}{P(\bar{B}_i | \bar{S})} \right] \quad (6)$$

که در آن، علائم  $W_i^+$  وزن واقعه عامل در وقوع خندق در صورت حضور عامل موثر (شرطی)،  $W_i^-$  وزن واقعه عامل در وقوع خندق در صورت عدم حضور عامل موثر (شرطی)،  $\log_e$  لگاریتم طبیعی،  $P$  احتمال،  $B_i$  وجود سطح عامل موثر (شرطی) در وقوع خندق بالقوه و  $\bar{S}$  عدم وجود سطح خندق می‌باشد.

روابط فوق در محیط ArcGIS بر اساس جدول ۱ و به‌صورت رابطه‌های (۷ تا ۱۱) ارائه می‌شود (Yesilnagar, ۲۰۰۵) و نهایتاً وزن نهایی بر اساس روابط (۱۲ و ۱۳) برای هر عامل به‌منظور پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی مورد استفاده قرار گرفت (Roering, ۲۰۰۵).

جدول ۱- حالت‌های مختلف پتانسیل ایجاد فرسایش خندق (Van Westen, ۲۰۰۲)

عوامل ایجاد فرسایش خندق		
عدم حضور	حضور	فرسایش خندقی
N	M	حضور
P	H	عدم حضور

$$W_i^+ = \log_e \left[ \frac{(M/(M+N)) / (H/(H+P))}{(N/(M+N)) / (M/(H+P))} \right] \quad (7)$$

$$W_i^- = \log_e \left[ \frac{(N/(M+N)) / (M/(H+P))}{(M/(M+N)) / (H/(H+P))} \right] \quad (8)$$

$$N = R - M \quad (9)$$

$$H = Y - M \quad (10)$$

$$P = T - R \quad (11)$$

که در آن،  $M$  تعداد پیکسل‌های خندق در یک طبقه،  $N$  (تعداد کل پیکسل‌های خندق در یک نقشه) - (تعداد پیکسل‌های خندق در یک طبقه)،  $H$  (تعداد پیکسل‌های یک طبقه) - (تعداد پیکسل‌های خندق در یک طبقه)،  $P$  (تعداد کل پیکسل‌های یک نقشه) - (تعداد کل پیکسل‌های خندق در یک نقشه) - (تعداد کل پیکسل‌های یک طبقه) + (تعداد پیکسل‌های خندق در یک طبقه)،  $Y$  تعداد پیکسل‌های یک طبقه،  $T$  تعداد کل پیکسل‌های یک نقشه و  $R$  تعداد کل پیکسل‌های فرسایش خندقی می‌باشد.

$$C = [(W^+) - (W^-)] \quad (12)$$

$$W_{Final} = C / S_c \quad (13)$$

که در آن،  $C$  تفاضل وزن‌های مثبت ( $W^+$ ) و منفی ( $W^-$ ) می‌باشد،  $W_{Final}$  وزن نهایی استاندارد شده،  $S_c$

فرسایش خندقی در حوزه آبخیز مهارلو و خندق‌های رخ داده، نقشه هر یک از عوامل موثر با نقشه پراکنش خندق‌ها در محیط ArcGIS هم‌پوشانی و وزن هر طبقه از عوامل موثر بر فرسایش خندقی با استفاده از روش احتمالی وزن واقعه به‌دست آمد.

$$TWI = \ln(A/Tg\beta) \quad (1)$$

$$NDVI = NIR - Red / NIR + Red \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-\alpha}} \quad (3)$$

که در آن،  $A$  مساحت حوزه آبخیز،  $\beta$  گرادیان شیب (درجه)،  $TWI$  شاخص رطوبت توپوگرافی،  $NIR$  و  $Red$  به‌ترتیب باند مادون قرمز نزدیک و قرمز طیف الکترومغناطیسی،  $NDVI$  شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده،  $\lambda_i$  وزن نقطه‌ای نام،  $D_i$  فاصله نقطه نام تا نقطه مجهول و  $\alpha$  معادل توان وزن‌دهی می‌باشد.

**مدل احتمالاتی وزن واقعه (WofE):** مدل احتمالاتی

وزن واقعه بر اساس تئوری بیزین استوار بوده که به‌منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری بلابای طبیعی و انسانی نظیر زمین‌لغزش، سیل‌گیری و فرسایش خندقی (Mohammady و همکاران، ۲۰۱۲؛ Shafapour Tehrani و همکاران، ۲۰۱۴؛ Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۳) مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه‌های بیزین به‌نام شبکه‌های تصمیم<sup>۱</sup>، شبکه‌های تصادفی<sup>۲</sup> و نمودارهای تأثیر<sup>۳</sup> نیز شناخته می‌شود (Shahabi و Sadoddin, ۲۰۰۹). به‌طور کلی تئوری بیزین را می‌توان به‌صورت رابطه (۴) نوشت (Van Westen, ۲۰۰۲).

$$(C|D) = P(D|C) \times P(C) / P(D) \quad (4)$$

که در آن،  $P(D)$  احتمال وقوع پیش‌آمد،  $P(C)$  احتمال وقوع پیش‌آمد  $C$ ،  $P(C|D)$  احتمال وقوع پیش‌آمد  $C$  به شرطی که پیش‌آمد  $a$  اتفاق افتاده باشد و  $P(D|C)$  احتمال وقوع پیش‌آمد  $D$ ، به شرطی که پیش‌آمد  $C$  اتفاق افتاده باشد. سپس بر مبنای محاسبات احتمالات وابسته (تئوری بیزین) و رابطه‌های (۵) و (۶) وزن‌های محتمل هر عامل محاسبه می‌شود (Bonham-Carter, ۱۹۹۴؛ Van Westen, ۲۰۰۲).

$$W_i^+ = \log_e \left[ \frac{P(B_i | S)}{P(B_i | \bar{S})} \right] \quad (5)$$

<sup>1</sup> Belief networks

<sup>2</sup> Casual networks

<sup>3</sup> Influence diagrams

تئوری احتمالاتی وزن واقعه در حوزه آبخیز مهارلو در جدول ۲ و همچنین، توصیفات مربوط به واحدهای سنگ‌شناسی در جدول ۳ ارائه شده است.

با اعمال رابطه‌های تئوری وزن واقعه (رابطه‌های ۴ الی ۱۳)، نتایج حاصل از ارتباط بین خندق‌ها، عوامل مؤثر و میزان اثر طبقه‌های هر یک از عوامل به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از تئوری بی‌زین در جدول ۲ ارائه شده است.

نتایج بررسی عامل بارندگی نشان داد که بیشتر خندق‌های منطقه در راس و مرز خندق‌ها (۲/۵۷ و ۹/۳۰) و در طبقه ۳۶۴/۷-۳۲۰/۰۶ میلی‌متر و انتهای خندق‌ها در طبقه ۴۱۰/۱۲-۳۶۴/۷ میلی‌متر بیشترین وزن (۲/۳۳) را به خود اختصاص داد. بررسی عامل بارش در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشتر خندق‌های منطقه زمانی اتفاق می‌افتد که بارندگی در منطقه شدت بالایی داشته باشد که بیانگر حساسیت زیاد منطقه به بارش می‌باشد، به طوری که مقدار بارندگی سالانه در شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی یکی از موثرترین عوامل به شمار می‌رود. در ارتباط با عامل NDVI طبقه ۰/۵-۰/۱ بیشترین وزن و متعاقب آن بیشترین تاثیر را بر وقوع خندق‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه را داشته است. اساساً عامل بارندگی در میزان تراکم پوشش گیاهی و در نتیجه حجم، شدت و انرژی جنبشی رواناب‌های سطحی مؤثر می‌باشد. به عبارت دیگر، این عامل به‌طور غیر مستقیم بر رخداد و گسترش فرسایش خندقی از طریق تاثیر بر پوشش گیاهی، نفوذپذیری خاک و در نتیجه حجم و شدت رواناب‌های سطحی که عامل اصلی در شکل‌گیری فرسایش خندقی و گسترش آن هستند، مؤثر می‌باشد (Servati و همکاران، ۲۰۰۸). یافته‌های مذکور با نتایج حاصل از پژوهش‌های Morgan (۲۰۰۳) و Sayadi (۲۰۰۶) مطابقت دارد. شایان ذکر است که پوشش گیاهی نیز می‌تواند عامل تشدید شونده در رخداد فرسایش خندقی باشد، زیرا افزایش پوشش گیاهی باعث کاهش شدت و حجم رواناب‌های سطحی در اثر افزایش نفوذپذیری و ضریب زبری در سطح زمین شده و در نتیجه، کاهش تنش برشی رواناب‌های سطحی را در پی دارد (Servati و همکاران، ۲۰۰۸).

انحراف استاندارد که جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی است (Altural و Ozdemir، ۲۰۱۳؛ Regmi و همکاران، ۲۰۱۰؛ Van Westen، ۲۰۰۲).

**ارزیابی مدل‌سازی مکانی و پهنه‌بندی فرسایش خندقی:** از کل خندق‌های شناسایی شده از بازدید میدانی، ۷۰ درصد برای مدل‌سازی و ۳۰ درصد آن نیز برای ارزیابی مدل احتمالاتی وزن واقعه استفاده شد (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۶) سپس با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC)<sup>۱</sup> و سطح زیرمنحنی آن (AUC)<sup>۲</sup> دقت نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده برآورد شد. سطح زیرمنحنی بیانگر دقت مدل است، ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیرمنحنی را دارد و مقادیر (AUC) از ۰/۵ تا یک متغیر است (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۶). چنان‌چه مدلی نتواند رخداد خندقی را بهتر از دیدگاه احتمالی تخمین زند، مقدار AUC آن ۰/۵ است و زمانی که سطح زیرمنحنی ROC برابر با یک داشته باشد، بهترین دقت را از نقشه پهنه‌بندی نشان می‌دهد (Yesilnacar، ۲۰۰۵؛ Fawcett، ۲۰۰۶). به‌طور کلی، تقسیم‌بندی ۰/۹-۰/۱، عالی، ۰/۸-۰/۹، بسیار خوب، ۰/۸-۰/۷، خوب، ۰/۶-۰/۷، متوسط و ۰/۵-۰/۶، ضعیف، را برای همبستگی کیفی و کمی سطح زیرمنحنی و ارزیابی تخمین ارائه کرده‌اند (Yesilnacar، ۲۰۰۵).

## نتایج و بحث

نتایج به‌دست آمده از ارتباط هر یک از ۱۶ عامل مؤثر و طبقه‌بندی آن‌ها درصد شیب (Ghollami و همکاران، ۲۰۱۷)، جهت شیب، انحنای سطح (Bou Kheir و همکاران، ۲۰۰۷)، طبقات ارتفاعی (شکستگی‌های طبیعی)، شاخص رطوبت توپوگرافی، متوسط بارندگی (شکستگی‌های طبیعی)، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۴)، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده (شکستگی‌های طبیعی)، تراکم زهکشی (شکستگی‌های طبیعی) و مشخصات خاک (درصد سیلت، درصد رس، هدایت الکتریکی و pH) (شکستگی‌های طبیعی) بر وقوع سناریوهای مختلف رخداد فرسایش خندق با استفاده از

<sup>1</sup> Receiver Operating Characteristic (ROC)

<sup>2</sup> Area Under Curve (AUC)

جدول ۲- ارتباط بین هر یک از عوامل موثر بر رخداد فرسایش خندقی با استفاده از مدل احتمالی وزن واقعه در حوزه آبخیز مهارلو

C/S(C) پلی‌گون	C/S(C) انتهای خندق	C/S(C) راس خندق	طبقه‌بندی عوامل	عوامل موثر بر رخداد خندق	روش طبقه‌بندی و منبع
-۴/۴۰	-۲/۳۴	-۲/۱۱	۲۱۰/۴۳ - ۲۶۷/۶	بارندگی سالانه (میلی‌متر)	روش شکستگی‌های طبیعی
-۳/۹۵	-۱/۱۲	-۱/۴۱	۲۶۷/۶ - ۳۲۰/۰۶		
۹/۳۰	۱/۷۹	۲/۵۷	۳۲۰/۰۶ - ۳۶۴/۷		
-۲/۰۰	۲/۳۳	۱/۳۰	۳۶۴/۷ - ۴۱۰/۱۲		
.	.	.	≤۰		Pourghasemi و همکاران (۲۰۱۴)
۰/۵۸	۰/۴۷	۰/۴۷	۰-۰/۰۵	شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده	
-۴/۷۹	-۰/۵۷	-۰/۸۱	۰/۰۵ - ۰/۱		
۴/۷۸	۰/۵۴	۰/۷۸	۰/۱ - ۰/۵		
.	.	.	>۰/۵		
-۲/۶۴	۴/۸۰	۴/۰۰	۰ - ۱۸۶/۰۱	فاصله از آبراهه (متر)	-
-۵/۶۳	-۲/۴۸	-۱/۷۶	۱۸۶/۰۱ - ۴۰۵/۲۲		
۱۱/۲۶	-۲/۰۵	-۲/۰۵	۴۰۵/۲۲ - ۷۰۴/۵۶		
.	.	-۱/۵۱	۷۰۴/۵۶ - ۱۷۴۰/۴۶		
-۶/۷۸	۰/۳۹	۰/۱۵	۰ - ۵	درصد شیب	Gholami و همکاران (۲۰۱۷)
۲/۴۷	۳/۴۲	۲/۷۶	۵ - ۱۰		
۰/۰۰	۰/۱۵	۱/۴۳	۱۰ - ۲۰		
۶/۶۹	-۲/۲۲	-۲/۲۸	۲۰ - ۳۰		
۱/۷۳	-۱/۸۹	-۱/۸۹	> ۳۰		
-۶/۷۲	-۱/۱۰	-۱/۱۰	۰ - ۱۶۳۲	طبقات ارتفاعی (متر)	شکستگی‌های طبیعی
۲/۲۶	۲/۲۴	۳/۶۰	۱۶۳۲ - ۱۸۴۴		
-۳/۰۲	۰/۸۹	-۰/۳۶	۱۸۴۴ - ۲۰۶۹		
-۳/۱۲	-۱/۰۵	-۱/۰۵	۲۰۶۹ - ۲۳۴۸		
۱۶/۴۱	-۱/۴۵	.	۲۳۴۸ - ۳۰۰۳		
-۵/۰۴	-۱/۷۷	-۰/۹۸	هموار		
-۱/۸۲	۱/۷۵	۰/۴۸	شمال		
-۰/۳۴	۰/۲۴	۰/۹۸	شمال شرق		
-۰/۳۹	۱/۳۲	-۰/۳۸	شمال غرب		
-۲/۰۲	-۱/۱۶	-۰/۳۱	شرق		
۷/۷۲	۲/۹۷	۲/۲۰	جنوب	جهت شیب	-
۱/۵۸	-۰/۱۷	۰/۹۱	جنوب شرق		
۵/۰۲	-۱/۱۳	-۱/۵۱	جنوب غرب		
-۱/۹۴	-۱/۳۱	-۱/۳۱	غرب		
۳/۳۱	-۰/۴۲	-۰/۱۹	مقعر	انحنای سطح	Bou Kheir و همکاران (۲۰۰۷)
-۲/۶۹	۰/۶۸	-۰/۱۵	هموار		
۰/۵۴	-۱/۰۱	۰/۴۴	محدب		
-۲/۶۸	۴/۵۵	۴/۵۵	۰ - ۴۸۷/۹۹	فاصله از جاده (متر)	شکستگی‌های طبیعی
-۴/۷۴	-۳/۳۸	-۳/۴۰	۴۸۷/۹۹ - ۱۲۸۴/۱۸		
۱۲/۱۵	-۲/۱۵	.	۱۲۸۴/۱۸ - ۲۵۴۲/۶۸		
.	.	.	۲۵۴۲/۶۸ - ۶۵۴۹/۳۳		



ادامه جدول ۲- ارتباط بین هر یک از عوامل موثر و سناریوهای رخداد فرسایش خندقی با استفاده از مدل احتمالی وزن واقعه در حوزه آبخیز مهارلو

۴/۰۰	-۱/۷	-۱/۹۷	۰/۰۸ - ۲/۰۳	تراکم زهکشی (کیلومتر بر کیلومتر مربع)	شکستگی‌های طبیعی
-۱/۳۶	۱/۱۴	۱/۱۴	۲/۰۳ - ۳/۶۳		
-۳/۴۱	۰/۸۴	۱/۱۵	۳/۶۳ - ۷/۳۵		
۵/۹۲	-۰/۹۲	-۱/۶۳	۰ - ۸	شاخص رطوبت	-
-۴/۷۹	-۰/۸۵	۰/۴۳	۸ - ۱۲	توپوگرافی	
-۲/۲۱	۲/۴۲	۱/۷۶	۱۲ - ۲۴/۵۲		
۸/۰۸	۹/۰۷	۹/۲۷	گروه ۱		
-۸/۰۰	-۴/۳۸	-۴/۵۶	گروه ۲		-
۱۰/۹۸	۰/۸۱	۰/۸۱	گروه ۳		
.	.	.	گروه ۴	واحدهای سنگ‌شناسی	
.	.	.	گروه ۵		
.	.	.	گروه ۶		
.	.	.	گروه ۷		
-۵/۱۹	-۰/۳۷	-۰/۳۷	کشاورزی		-
.	.	.	جنگل		
۵/۸۷	۱/۰۱	۱/۰۱	مرتع		
.	.	.	شهری	کاربری اراضی	
.	.	.	تالاب		
.	.	.	مناطق صخره‌ای		
۳/۸۳	۲/۷۸	۲/۷۸	اراضی لخت		
.	.	.	اراضی شور		
-۲/۹۶	۲/۳۴	۲/۸۹	۰/۱ - ۰/۱۸۶		
۱۱/۳۸	۲/۶۷	۱/۰۴	۰/۱۸۶ - ۱/۱۸	هدایت الکتریکی (میلی زیمنس بر سانتی‌متر)	شکستگی‌های طبیعی
-۴/۶۶	-۱/۷۶	-۰/۷۴	۱/۸ - ۳/۳۲		
-۴/۶۶	-۲/۹۰	-۲/۹۰	> ۳/۳۲		
-۲/۵۶	-۰/۲۴	-۱/۱۱	۵/۹۸ - ۷/۶۴		
-۳/۴۹	-۱/۶۵	-۲/۲۱	۷/۶۴ - ۸/۱۲	pH	شکستگی‌های طبیعی
-۲/۹۳	۰/۹۸	۱/۹۲	۸/۱۲ - ۸/۷۳		
۶/۱۴	۰/۵۸	۰/۸۳	۸/۷۳ - ۹/۶۴		
-۱/۵۵	۱/۴۸	۳/۱۳	۵/۶ - ۲۲/۲۶		
-۴/۰۹	۳/۲۴	۱/۲۱	۲۲/۲۶ - ۳۴/۶۴	درص رس	شکستگی‌های طبیعی
۱۱/۶۳	-۲/۰۱	-۱/۷۱	۳۴/۶۴ - ۴۵/۴۴		
-۳/۴۴	.	.	۴۵/۴۴ - ۶۳		
-۴/۸۰	-۳/۳۴	-۳/۲۴	۱ - ۱۴/۶۸		
-۱/۳۷	۰/۶۹	۰/۴۲	۱۴/۶۸ - ۲۷/۰۲	درصد سیلت	شکستگی‌های طبیعی
۶/۰۱	۲/۰۲	۲/۴۸	۲۷/۰۲ - ۴۲/۰۴		
۱/۳۷	۵/۵۱	۲/۱۰	۴۲/۰۲ - ۶۹/۳۹		

با رخداد فرسایش خندقی می‌باشد، به طوری که با افزایش فاصله از آبراهه، احتمال وقوع خندق کمتر است، زیرا با آب‌شویی و فرسایش کناری، تعادل دامنه به هم می‌خورد و حساسیت به فرسایش خندقی در کناره آبراهه‌ها افزایش می‌یابد (Entezari، ۲۰۱۴؛ Dube، ۲۰۱۴). به طور کلی،

ارتباط فرسایش خندقی و عامل فاصله از آبراهه نشان داده که بیشتر خندق‌های رخ داده در فاصله از آبراهه ۰-۱۸۶/۰۱ متر (طبقه اول) رخ داده است که با نتایج Gholami و همکاران (۲۰۱۷) در تطابق می‌باشد. همچنین، نتایج نشان دهنده همبستگی زیاد شبکه آبراهه

عامل شیب، سرعت فرسایش و شکل زمین را از طریق خصوصیات مرفولوژیکی تحت تأثیر قرار می‌دهد (Shadfar, ۲۰۱۱). نتایج ارتباط فرسایش خندقی و درصد شیب نشان داده که بیشتر نقاط راس و انتهای خندق‌ها در شیب‌های کمتر از ۱۰ درصد مشاهده شد که با نتایج مطالعات Maghsoodi و همکاران (۲۰۱۲) و Shadfar (۲۰۱۵) کاملاً مطابقت دارد. به‌طور کلی، رواناب در شیب‌های پایین فرصت تمرکز و نفوذ بیشتری دارد، بنابراین احتمال ایجاد حفره و تبدیل شدن به فرسایش خندقی هم افزایش می‌یابد (Saberchenari و همکاران، ۲۰۱۶). ارتباط عامل ارتفاع و فرسایش خندقی نشان داد که ارتفاع ۱۸۴۴-۱۶۳۲ متر از راس و انتهای فرسایش خندقی، بیشترین وزن (۳/۶۰ و ۲/۲۴) را به خود اختصاص داده است. همچنین، نتایج جهت شیب نشان داد که بیشترین فراوانی و بیشترین وزن هر سه سناریو به ترتیب ۲/۲۰، ۲/۹۷ و ۷/۷۲ است که مختص به جهت‌های جنوب حوزه آبخیز مهارلو می‌باشد که با نتایج Shokati و Esmaili (۲۰۱۵) مطابقت دارد. جهت شیب اثر غیر مستقیمی در آبدوی و فرسایش دارد.

جدول ۳- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

گروه	واحدهای سنگ‌شناسی	توضیحات	سازند	سن
۱	OMas	سنگ هوازده کرم مایل به قهوه‌ای، سنگ آهک ترکیبی با شیل	آسماری	میوسن
	OMr	مارن‌های قرمز، خاکستری و سبز آهک‌های سیلتی با اندکی ماسه‌سنگ	رازک	
	MuPlaj	سنگ قهوه‌ای مایل به خاکستری، آهکی، با ویژگی‌های ماسه‌سنگ و گچ و دارای مارن قرمز و ماسه‌سنگ	آغاجاری	
	MPlfgp	سازندهای گروه فارس	گچساران، میشان و آغاجاری	
۲	Qft2	نهشته‌های مخروط افکنه‌ای و تراس‌های آبرفتی در سطح محدود	-	کواترنر
	Qft1	نهشته‌های مخروط افکنه‌ای و تراس‌های آبرفتی در سطح گسترده	-	
۳	Eja	دولومیت توده‌ای به رنگ خاکستری و قهوه‌ای	-	ائوسن
	PeEsa	مارن قرمز کم رنگ، سنگ آهک، گچ و دولومیت	ساچون	
	E	سنگ‌های پیوسته ائوسن	-	
	Lake	-	-	
۴	Plbk	سنگ‌های مخروطی شکل و توده‌ای تشکیل شده از کنگلومرا و ماسه‌سنگ با هوازگی کم و تخلخل پایین	بختیاری	پلیوسن
۵	EOas-ja	ترکیب سازند آسماری و چهارم صرف‌نظر از عدم انطباق آن‌ها	-	پالئوسن
۶	Ktb	سنگ آهک توده‌ای، شفاف، پوسته پوسته و انیدریتی	تاربور	کرتاسه
	Kgu	مارن و شیل خاکستری مایل به آبی، وابسته به طبقه ضعیفی از رس و آهک	گورپی	
	Kbgb	از گروه بنگستان، عمدتاً سنگ آهک و شیل	سورق، سروک، کژدمی و ایلام	
۷	pC-Ch	سنگ نمک، گچ، همراه با ناهموارهای توده‌ای و متخلخل از مواد رسوبی مانند سیاه با بوی زننده، دولومیت قهوه‌ای تیره، ماسه‌سنگ قرمز و شیل و سنگ‌های آذرین مانند دیاباز، بازالت، ریولیت و تراکیت	-	پرکامبرین

شیب‌های هم درجه ولی با جهات متفاوت یک منطقه معمولاً به‌طور یکسان با خطر فرسایش روبه‌رو نیستند. اثر عمده جهت شیب در میزان آبدوی و فرسایش به‌علت اختلاف میکروکلیمای موجود در شیب‌های مختلف است. به‌طور کلی، شیب‌های آفتاب‌گیر (شیب‌های جنوبی) معمولاً نسبت به شیب‌های سایه‌گیر فرسایش بیشتری

ایجاد می‌کنند، زیرا این شیب‌ها گرم‌تر بوده، بنابراین، ذخیره آب خاک کم شده، رشد پوشش گیاهی کمتر است. علاوه بر این، در این شیب‌ها خورشید با تجزیه مواد آلی، هوموس خاک را از بین می‌برد و در نتیجه خاک چسبندگی خود را از دست داده و مستعد فرسایش می‌شود (Ghahroodi, ۲۰۰۳). انحنای سطح توصیف

طرف دیگر، نتایج شاخص رطوبت توپوگرافی حاکی از آن است که بیشترین وزن سناریو مرز فرسایش خندقی (۵/۹۲) مربوط به طبقه کمتر از هشت، سپس ابتدا و انتهای خندق با بیشترین وزن (۱/۷۶ و ۲/۴۲) در طبقه پایانی ۱۲-۲۴/۵۲ قرار گرفته است. بنابراین در رطوبت‌های کمتر توپوگرافی، احتمال وقوع مرز خندق و در رطوبت‌های بیشتر احتمال راس و انتهای خندق‌ها بیشتر است. همچنین، از نظر شاخص رطوبت توپوگرافی، می‌توان دریافت که بیشترین میزان چگالی آبراهه‌ای مربوط به مقادیر بالای رطوبت توپوگرافی می‌باشد و به دلیل ارتباط مستقیم بین مقادیر رطوبت توپوگرافیک و میزان رواناب حاصل از بارندگی، هر بخش از یک عارضه توپوگرافیک که دارای بیشترین مقدار رطوبت توپوگرافیک باشد، میزان رواناب آن نیز بیشتر بوده (Farajzadeh و همکاران، ۲۰۱۱)، می‌توان در چنین شرایطی شاهد توسعه بیشتر راس و انتهای خندق‌ها در حوزه آبخیز بود. بررسی نتایج حاصل از لایه سنگ‌شناسی منطقه مطالعه شده نشان می‌دهد بیشترین وزن در راس و انتهای (۹/۲۷ و ۹/۰۷) خندق‌های رخ داده در واحد سنگ‌شناسی ۱ (OMr, OMas, MuPlaj, MPIlfgp) همچنین، مرز خندق‌ها در واحد سنگ‌شناسی ۳ (E, Lake, PeEsa, Eja) بیشترین وزن (۱۰/۹۸) را به خود اختصاص داد و در دوره میوسن و ائوسن می‌باشد. همچنین، وجود لایه‌های مارنی و گچی در سازندهای میشان و آجاجاری، رسوبات ریزدانه کواترنری متشکل از ذرات سیلت و رس پایداری کم خاک، ساختمان ضعیف خاکدانه‌ها و کمبود مواد آلی، وجود املاح گچ و آهک از عوامل تاثیر گذار در بروز فرسایش خندقی هستند (Tabatabaei, ۲۰۰۰).

نتایج عامل کاربری اراضی نشان داد که راس و انتهای خندق‌ها در اراضی بدون پوشش با وزن ۲/۷۸ رخ داده، اساساً بیشترین وقوع خندق مختص اراضی لخت و در سناریو پلی‌گون، مرتع می‌باشد که با نتایج Maghsoodi و همکاران (۲۰۱۱) هم‌خوانی دارد. به‌طور کلی، فرسایش خندقی در اراضی لخت و بدون پوشش نسبت به اراضی دارای پوشش به وفور دیده می‌شود (Dai و همکاران، ۲۰۰۱). این پدیده در کوهستان‌ها در پی تخریب جنگل به وضوح خود را نشان می‌دهد (Mahmoodi, ۲۰۰۷). از طرفی بیشترین وزن مرز خندق‌ها (۵/۸۷) در اراضی مرتعی دیده شده است. نتایج حاصل از مطالعات انجام

کننده سطح افقی توپوگرافی و نشان‌دهنده وضعیت پستی و بلندی منطقه است (Bou Kheir و همکاران، ۲۰۰۷). به‌طور کلی، منطقه مورد مطالعه در سه طبقه کمتر از ۰/۰۱ - (مقعر)، ۰/۰۱ - ۰/۰۱ - (هموار) و بزرگ‌تر از ۰/۰۱ (محدب) قرار گرفت. تجزیه و تحلیل به‌دست آمده از تئوری وزن واقعه حاکی از آن است که بیشتر وزن‌های پلی‌گون خندق‌ها (۳/۳۱)، انتهای خندق (۰/۶۸) و ابتدای خندق (۰/۴۴) به ترتیب در دامنه‌های مقعر، مسطح و محدب قرار گرفتند. خندق‌ها به‌طور معمول در مکان‌های دارای جریان آب و رطوبت متمرکز هستند، ویژگی چنین مکان‌هایی مورفولوژی مقعر و کم و بیش هموار است (Miladi و Maleki, ۲۰۱۱). دامنه‌های مقعر با تمرکز جریان آب و رطوبت می‌تواند مناطق مستعد برای ایجاد این نوع از فرسایش آبی باشد (Miladi و Maleki, ۲۰۱۱). همچنین، نتایج مرز خندق با نتایج تحقیق Entezari و همکاران (۲۰۱۴) و نتایج رأس و انتهای خندق با نتایج Maleki و Miladi (۲۰۱۱) هم‌خوانی دارد.

بررسی نتایج فاصله از جاده در ایجاد فرسایش خندق نشان داد که بیشترین وزن خندق‌های رخ داده در فاصله کمتر از ۴۸۷/۹۹ متر از جاده رخ داده و مشاهده شد که با افزایش فاصله از جاده، وقوع فرسایش خندقی کاهش می‌یابد که با تحقیق Moghimi و Salami (۲۰۱۱) در یک راستا می‌باشد. علل پیدایش سریع خندق‌ها در کنار جاده‌ها وجود ضخامت زیاد خاک‌های ریزبافت، سازندهای مارنی بسیار و شیب بسیار ملایم دشت می‌باشد و شکل‌گیری خندق در اراضی کم شیب و هموار ۶/۱ برابر اراضی نسبتاً شیب‌دار است (Ahmadi, ۱۹۹۹).

نتایج تراکم زهکشی در منطقه مورد مطالعه نشان داد که بیشترین وزن راس خندق (۱/۱۵) مربوط به طبقه تراکم ۳/۶۳ - ۷/۳۵ کیلومتر و بیشترین وزن انتهای خندق (۱/۱۴) در طبقه ۲/۰۳ - ۳/۶۳ کیلومتر است. همچنین، تراکم زهکشی کمتر از ۲/۰۳ کیلومتر در سناریو مرز خندق مشاهده شد. نتایج تراکم زهکشی نشان می‌دهد که هرچه تراکم در راس و انتهای خندق بیشتر باشد، احتمال وقوع فرسایش خندقی در حوضه مهارلو بیشتر است، اما در مرز خندق هرچه تراکم زهکشی کمتر احتمال وقوع فرسایش خندقی بیشتر است. شاخص رطوبت توپوگرافی تعیین‌کننده تأثیر توپوگرافی بر روی میزان سطوح اشباع، برای تولید رواناب است (Lucà و همکاران، ۲۰۱۱). از

(Rangavar, ۲۰۰۹). مقاومت ذرات سیلت در برابر فرسایش هم از نظر اندازه و هم از نظر چسبندگی کم است خاک‌های سیلتی معمولاً خوب دانه‌بندی می‌شوند، ولی در اثر رطوبت، خاک‌دانه‌ها به راحتی شکسته و ذرات سیلت جدا و منتقل می‌شود. همچنین، هرچه خاک بافت ریزی داشته باشد، ظرفیت نگهداشت آب در خاک افزایش یافته که این پدیده منجر به انبساط رس‌ها و بسته شدن منافذ خاک شده و در نتیجه نفوذ آب به داخل خاک کاهش یافته و رواناب آب‌های سطحی ایجاد می‌شود، این رواناب‌ها به تدریج بستر خود را کنده و عمیق می‌کنند و آبراهه‌هایی ایجاد می‌شود که با افزایش آن‌ها فرسایش خندقی به وقوع می‌پیوندد (Istanbuloglu, ۲۰۰۵). پس از بررسی وزن‌های حاصل از مدل احتمالاتی وزن واقعه و جمع جبری آن‌ها نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی برای سناریوهای راس خندق، انتهای خندق و همچنین، مرز خندق‌ها تهیه و بر اساس شکستگی‌های طبیعی<sup>۱</sup> (Kamac, ۲۰۰۶) به چهار طبقه خطر کم، متوسط، زیاد و خطر خیلی زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ۳). همچنین، تعداد خندق‌های رخ داده در طبقات خطر منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه با توجه به هر سه سناریو در جدول ۴ نشان داده می‌شود.

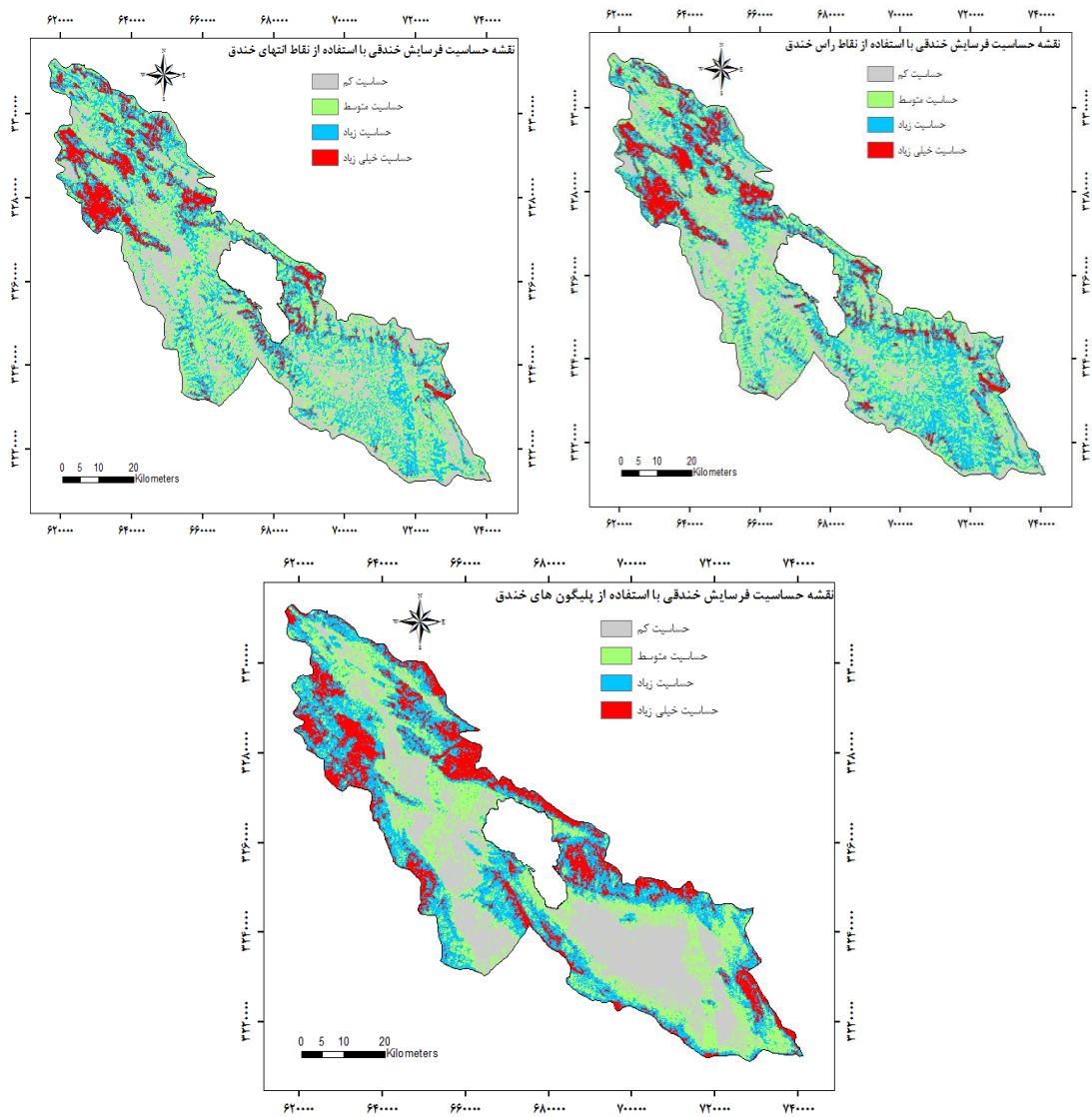
نتایج طبقه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی، نشان داد که در راس خندق‌ها در طبقات خطر متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب هفت، ۱۲ و ۵۱ خندق رخ داده است. در نقطه مقابل در ارتباط با انتهای خندق‌ها، طبقات خطر کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب یک، هفت، ۱۵ و ۴۷ خندق را به خود اختصاص داده‌اند و همچنین، تعداد خندق‌های شناسایی شده در طبقات خطر کم تا خیلی زیاد در سناریو سوم (پلی‌گون‌های خندقی) به ترتیب شش، ۱۲، ۳۲ و ۹۶ است.

در نهایت، نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی منطقه مورد مطالعه با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی و سطح زیر منحنی آن ارزیابی شد (شکل ۴ و جدول ۵).

شده درباره عوامل مؤثر در رخداد فرسایش نشانگر این است که در بیشتر حوزه‌های آبخیز نوع استفاده از اراضی نقش مهمی در رخداد و تشدید فرسایش و تولید رسوب دارد (Ghoddousi و همکاران، ۲۰۰۶). نتایج عامل هدایت الکتریکی بر وقوع خندق نشان داد، بیشترین خندق‌های انتها و پلی‌گون در طبقه ۱/۸-۰/۸۶ و راس خندق در طبقه ۰/۸۶-۰/۱ با وزن ۲/۸۹ قرار گرفته، از نظر مستعد بودن فرسایش خندق هدایت الکتریکی ۰/۱ حد آستانه برای فرسایش خطی (پای‌پینگ، شیاری و خندق) هستند (Abedini, ۲۰۰۹). خاک‌های با pH ۸/۲-۹/۶۴ بیشترین تاثیر را در وقوع فرسایش خندقی در هر سه سناریو داشته‌اند که با نتایج Ahmadi و Zamanzade (۲۰۱۳) هم‌سو است. از نظر خاک‌های منطقه هرچه خاک بازی باشد، احتمال وقوع خندق در هر سه سناریو هم بیشتر خواهد بود. در صورت قلیایی بودن خاک، به دلیل پدیده پراکندگی خاکدانه‌ها، ذرات خاک همراه با آب باران و رواناب ناشی از آن قابل حمل می‌باشد (Zamanzade و Ahmadi, ۲۰۱۳). نتایج الگوریتم وزن واقعه برای عامل درصد رس نشان داد که بیشترین وزن راس خندق‌ها (۳/۱۳) دارای ۲۲/۲۶-۵/۶ درصد رس طبقات پایین (دانه‌ریز) و نقاط انتهایی خندق‌ها تا ۳۴/۶۴ درصد رس مشاهده شده و بیشترین وزن مرز خندق‌ها (۱۱/۶۳) عمدتاً در خاک‌هایی با ۴۵/۴۴-۳۴/۶۴ درصد رس رخ داده است. باید توجه داشت که ریزدانه بودن خاک‌ها از عوامل اصلی گسترش فرسایش خندقی می‌باشد و با افزایش ذرات خاک، تراکم خندق‌ها و در نتیجه احتمال رخداد فرسایش خندقی کاهش می‌یابد (Ghodos و Davarirad, ۲۰۱۱).

از طرف دیگر، نتایج درصد سیلت نشان داد که بیشترین وزن خندق‌های رخ داده در سناریو راس و مرز خندق‌ها در طبقات ۴۲/۰۴-۲۷/۰۲ و در انتهای خندق ۴۲/۰۲-۶۹/۳۹ درصد سیلت مشاهده شده که با نتایج تحقیق Asghari Sareskanrod (۲۰۱۷) مطابقت دارد. سیلت در فرسایش خندقی غالب و یکی از عوامل پیشرفت طولی و عرضی خندق‌ها است. همچنین، با افزایش میزان سیلت فرسایش‌پذیری خاک‌ها به دلیل مستعد بودن ذرات رسی (دو تا پنج میکرون) به فرسایش به شدت بالا می‌رود

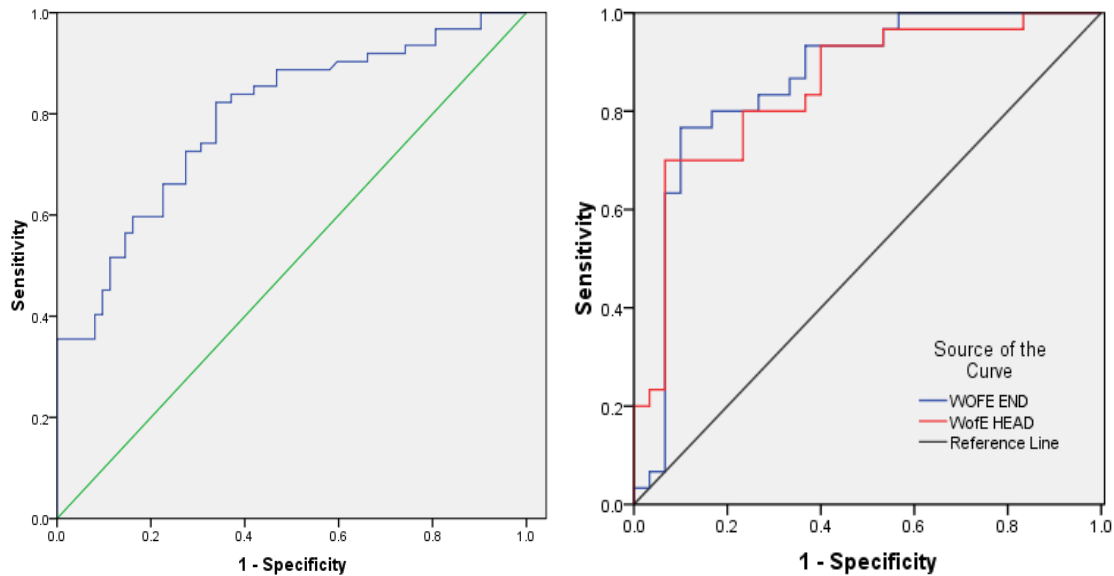
<sup>1</sup> Natural Break (NB)



شکل ۴- پهنه‌بندی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از الگوریتم وزن واقعه در حوزه آبخیز مهارلو

جدول ۴- تعداد رخداد راس خندق، انتهای خندق و مرز خندق‌ها فرسایش خندق در حوزه آبخیز مهارلو با تئوری وزن واقعه

پلی‌گون	انتهای خندق	راس خندق	طبقات خطر
۶	۱	۰	کم
(۴/۱۰ درصد)	(۱/۴۲ درصد)		
۱۲	۷	۷	متوسط
(۸/۲۱ درصد)	(۱۰ درصد)	(۱۰ درصد)	
۳۲	۱۵	۱۲	زیاد
(۲۱/۹۱ درصد)	(۲۱/۴۲ درصد)	(۱۷/۱۴ درصد)	
۹۶	۴۷	۵۱	خیلی زیاد
(۶۵/۷۵ درصد)	(۶۷/۱۴ درصد)	(۷۲/۸۵ درصد)	
۱۴۶	۷۰	۷۰	مجموع خندق‌ها



شکل ۴- منحنی ROC مدل WofE مدل‌سازی حساسیت فرسایش خندقی حوزه مهارلو

جدول ۵- مقایسه مقادیر خروجی آزمون ROC

سطح اطمینان ۹۵ درصد		معنی‌داری	خطای اشتباه استاندارد	مساحت زیرمنحنی	الگوریتم وزن واقعه و سناریوهای مختلف خندقی
باند بالا	باند پایین				
۰/۹۴۷	۰/۷۴۶	*	۰/۰۵۱	۰/۸۴۷	راس خندقی
۰/۹۶۱	۰/۷۶۱	*	۰/۰۵۱	۰/۸۶۱	انتهای خندقی
۰/۸۷۱	۰/۷۱۴	*	۰/۰۴۰	۰/۷۹۲	پلی‌گون خندقی

که در هنگام اجرای آن بایستی آن‌ها را در نظر گرفت، از جمله: (۱) تنها زمانی که عوامل (متغیرها) دارای رتبه‌بندی استاندارد شده باشند، نتایج قابل قبول و قابل تعمیم به مناطق دیگر را خواهند داشت. (۲) به‌کارگیری این روش در حالتی که انواع فرسایش به‌کار گرفته می‌شود، مناسب نیست. (۳) اجرای این روش نیازمند اطلاعات دقیق و قابل اعتماد رخداد فرسایش خندقی گذشته در منطقه مورد بررسی هست و (۴) این روش برای مناطق بسیار محدود و کوچک مناسب نیست، زیرا وزن‌دهی عوامل را بر اساس فرسایش خندقی‌های ثبت شده، بالاتر یا پایین‌تر از مقدار واقعی تخمین می‌زند.

#### نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از سناریوهای مختلف در حوزه آبخیز مهارلو با استفاده از الگوریتم وزن واقعه است. نقشه‌های

نتایج ارزیابی مدل بیانگر مساحت‌های زیرمنحنی ۰/۸۴۷، ۰/۸۶۱ و ۰/۷۹۲ برای مدل‌سازی راس، انتها و پلی‌گون خندقی و با خطای اشتباه استاندارد (۰/۰۵۱، ۰/۰۵۱ و ۰/۰۴۰) می‌باشد که کارایی مدل‌سازی انتهای خندقی‌ها در مدل WofE در حوزه آبخیز مهارلو بالاتر بوده، در حالی‌که وقتی مدل‌سازی مکانی با پلی‌گون‌های خندقی انجام شده، دقت کمتری نسبت به دو سناریو دیگر داشته است. بنابراین، دقت مدل پهنه‌بندی ابتدا و انتهای فرسایش خندقی در طبقه خیلی خوب و پلی‌گون در طبقه خوب قرار دارد. به‌طور کلی یکی از مزایای مدل وزن واقعه از تئوری بی‌زین، به‌کارگیری عوامل مؤثر با در نظر گرفتن استقلال داده‌های مکانی است که اثر هر عامل (متغیر) پیش‌بینی‌کننده را بر روی فرسایش خندقی به‌طور جداگانه بررسی می‌کند و لذا نتایج وزن‌دهی عوامل، به راحتی قابل تفسیر می‌باشد (Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۲). اما معایبی نیز در به‌کارگیری این روش وجود دارد

۱ (PeEsa, Eja) و ۳ (MPlfgp, MuPlaj, OMr, OMas) E, Lake)، همچنین، در اراضی لخت به‌وفور دیده شده - است. اساساً در بیشتر حالات با مدیریت صحیح اراضی یعنی حفظ ظرفیت نفوذپذیری خاک، پوشش گیاهی و ساختمان خاک و جلوگیری از تمرکز بیش از حد رواناب، از تشکیل خندق‌ها جلوگیری می‌کنند. تفاوت پژوهش حاضر با دیگر تحقیقات انجام شده، در نظر گرفتن سناریوهای مختلف در مدل‌سازی فرسایش خندقی برای اولین بار می‌باشد که می‌تواند به پژوهشگران در انتخاب موقعیت مکانی مناسب به‌منظور مدل‌سازی فرسایش خندقی در آینده کمک کند و همچنین، در پژوهش حاضر تلاش شد، به بررسی عوامل مختلف موثر که امکان تهیه نقشه‌های مکانی آن‌ها در منطقه است، پرداخته شود. بنابراین، از آنجایی که فرسایش خندقی دارای مکانیزم پیچیده و گسترده می‌باشد، لازم است تا به‌منظور کنترل و جلوگیری از این نوع فرسایش آبی اقدامات حفاظتی و آبخیزداری را در مراحل اولیه انجام داد. بر این اساس، جلوگیری از تمرکز رواناب‌های سطحی از طریق انحراف سیلاب‌های بلندمدت و یا احداث بندهای تاخیری در بالادست منطقه ضروری و حائز اهمیت می‌باشد.

حاصل از روش مذکور با استفاده از رابطه بین مکانی خندق‌های موجود و ۱۶ عامل موثر شامل درصد شیب، جهت شیب، انحنای سطح، طبقات ارتفاعی، شاخص رطوبت، توپوگرافی، متوسط بارندگی، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، تراکم زهکشی و مشخصات خاک (درصد سیلت، درصد رس، هدایت الکتریکی و pH) تهیه شد. از کل پهنه‌های خندقی، هر سه سناریو ۷۰ درصد برای مدل‌سازی وزن واقعه و ۳۰ درصد برای ارزیابی مدل با استفاده از منحنی عملکرد نسبی و سطح زیرمنحنی آن در حوضه مهارلو ارزیابی شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که مدل پهنه‌بندی با سطح زیرمنحنی ۰/۸۴۷، ۰/۸۶۱ و ۰/۷۹۲ ابتدا، انتها و پلی‌گون خندق‌ها در طبقه خوب و خیلی خوب قرار دارند. همچنین، ۱۹۴ خندق در طبقه خطر خیلی زیاد قرار دارند، در نهایت نتایج وزن‌دهی لایه‌ها با استفاده از مدل وزن واقعه نشان داد که وقوع بیشتر خندق‌ها به‌طور کلی عواملی از جمله: بارندگی شدید، تراکم زهکشی بالا و درصد سیلت زیاد دخیل می‌باشد، از طرف دیگر، این نوع فرسایش بیشتر در طبقات ارتفاعی کم و در جهت جنوب و با فاصله کم از جاده و آبراهه، در واحدهای سنگ‌شناسی

#### منابع مورد استفاده

1. Abedini, M. 2009. Survey for gully erosion happened in west south elevations Hadishahr in west north of Eastern Azerbaijan by new methods and techniques. *Geography and Development*, 3(6): 113-133 (in Persian).
2. Ahmadi, H. 1999. Applied geomorphology (water erosion). Tehran University Press, 680 pages (in Persian).
3. Arabghashghaei, Z., D. Nikkami. S. Shadfar and A. Moeini. 2011. Gully erosion zonation in Tarod Firoozkooch Watershed. *Town and Country Planning*, 31(8): 107-119 (in Persian).
4. Asghari Saeskanrod, S. 2017. Analysis of effective factors in the formation and expansion of gully erosion. *Journal of Research Geographic Space*, 58(17): 285-301 (in Persian).
5. Bonham-Carter, G.F. 1994. *Geographic information systems for geoscientists modeling with GIS*. Pergamon, Oxford, 416 pages.
6. Bou Kheir, R., J. Wilson and Y. Deng. 2007. Use of terrain variables for mapping gully erosion susceptibility in Lebanon. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(12): 1770-1782.
7. Conoscenti, C., S. Angileri, C. Cappadonia, E. Rotigliano, V. Agnesi and M. Märker. 2014. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression, a case of Sicily Italy. *Geomorphology*, 204: 399-411.
8. Dai, F.C., C.F. Lee and Z.W. Xu. 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*, 40(3): 381-391.
9. De ploey, J. 1989. A model for headcut retreat in rills and gullies. *Catena Supplement*, 14: 81-86.
10. 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.
11. Entezari, M., A. Maleki, Kh. Moradi and S. Olfati. 2014. Zoning of gully erosion in catchment of dyreh by Analytical Hierarchy Process (AHP). *Journal of Spatial Planning*, 17(4): 63-86 (in Persian).

12. Esmaeili, R. and R. Shokati. 2015. Evaluation of hydrologic erosion sensitivity using logistic regression in Salavat Abad area of Kurdistan Province. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 20(5): 114-190 (in Persian).
13. Farajzadeh, M., A.A. Afzali, Y. Khalili and A. Gholichi. 2011. Estimation of the sensitivity to gully erosion with using a multivariate regression model, case study: Southeast of Mazandaran Province, Kyasar. *Environmental Erosion Research Journal*, Hormozgan University, 2(2): 1-17 (in Persian).
14. Fawcett, T. 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8): 861-874.
15. Ghahroodi, M. 2003. Hazard zoning model of gully erosion using RS and GIS in the Abkand Kloche Bijar Watershed. *Research Projects of Ministry of Energy*, 52-53 (in Persian).
16. Ghoddousi, J., S. Feiznia, H. Ahmadi, M. Shabani and A. Sarreshtehdari. 2006. Relationship between land use change and amount of erosion and sediment production in Taleghan Watershed. *Pajouhesh and Sazandegi*, 73: 123-130 (in Persian).
17. Ghodosi, J. and A.A. Davarirad. 2011. The effect of soil physical and chemical properties on gully erosion and gully morphology. *Proceedings of the Second Conference on Erosion and Sedimentation*, Tehran, 1-8 (in Persian).
18. Gholami, M., M. Ahmadi and M. Mahmoodi. 2017. Analysis of geomorphologic constraints in urban physical development with emphasis on ghost erosion, case study: Mohr City, south Fars Province. *Journal of Natural Environment Hazard*, 12(6): 105-125 (in Persian).
19. Habibi, A.R. 2017. Gully erosion zoning to identify the villages at risk, from the Fuzzy Model in Gorgorshoshtar Watershed. *Territory*, 53(14): 37-52 (in Persian).
20. Istanbuloglu, E., L. Rafael and H. Flores-Cervantes. 2005. Implicaion of bank failures and fluvial erosion for gully development field observation and modeling. *Journal of Geophysical Research*, 110: 1014-1029.
21. Khaksar, K., M. Godarzi, M.R. Gharibreza and M. Rahmati. 2005. Determination of sensitivity of geological formations of Maharlo Watershed to erosion. *Scientific Quarterly Journal Geosciences*, 62(16): 281-294 (in Persian).
22. Kirkby, M.J. 1992. Thresholds and instability in stream head hollows: a model of magnitude and frequency for wash processes. *Process Models and Theoretical Geomorphology*, 295-315 pages.
23. Komac, M.A. 2006. Landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Sloveni. *Geomorfology*, 74: 17-28.
24. Li, Zh., Y. Zhang, Q. Zhu, S. Yang, H. Li and H. Ma. 2017. A gully erosion assessment model for the Chinese loess plateau based on changes in gully length and area. *Catena*, 148(2): 195-203.
25. Lucà, F., M. Conforti and G. Robustelli. 2011. Comparison of GIS based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134: 297-308.
26. Maghsoodi, M., S. Shadfar and M. Abbasi. 2012. Gully erosion susceptibility zoning in the Zavian Watershed, Qum Province. *Journal of Quantitative Geomorphological Researches*, 1(2): 35-52 (in Persian).
27. Maleki, A. and B. Miladi. 2011. Simulation of susceptible areas of ditching using SPI the method in the area of the river of death. *Quantitative Geomorphological Researches*, 3: 23-38 (in Persian).
28. Mohammady, M., H.R. Pourghasemi and B. Pradhan. 2012. Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran. A Comparison between Frequency Ratio, Dempster-Shafer and Weights-of-Evidence Models. *Asian Earth Sciences*, 61: 221-236.
29. Morgan, R.P.C. and D. Morgan Zulu. 2003. Treshold condations for initiation of valley-side gullies in the Midle Wees of Switzerland. *Catena*, 50: 401-411.
30. Ozdemir, A. and T. Altural. 2013. A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping, Sultan Mountains, south-west Turkey. *Journal Asian Earth Science*, 64(5): 180-197.
31. Poesen, J. 1989. Conditions for gully formation in the Belgian loam belt and some ways to control them. *Soil Technology Series*, 1: 39-52.
32. Pourghasemi, H.R., B. Pradhan, C. Gokceoglu and K. Deylami Moezzi. 2012. A comparative assessment of prediction capabilities of Dempster-Shafer and Weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. doi:10.1080/19475705.2012.662915.
33. Pourghasemi, H.R., B. Pradhan, C. Gokceoglu and K. Deylami Moezzi. 2013. A comparative assessment of prediction capabilities of Dempster-Shafer and Weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 4(2): 93-118.
34. Pourghasemi, H.R., S. Yousefi, A. Kornejady and A. Cerdà. 2017. Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. *Science of the Total Environment*, 609: 767-775.
35. Rahmati, O., A. Haghizadeh, H.R. Pourghasemi and F. Noormohamadi. 2016. Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Natural Hazards*, 82(2): 1231-1258.



36. Rangavar, A.S. 2009. Study of some characteristics of gully soil in Khorasan Province. Proceedings of the Eleventh Iranian Soil Science Congress, 1776-1880 (in Persian).
37. Regmi, N.R., J.R. Giardino and J.D Vitek. 2010. Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach, western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115: 172-187.
38. Roering, J.J., J.W. Kirchner and W.E. Dietrich. 2005. Characterizing structural and lithologic controls on deep-seated landsliding: Implications for topographic relief and landscape evolution in the Oregon Coast Range, USA. *Geological Society of America Bulletin*, 17: 654-668.
39. Saberchenari, K., A.R. Bahremand, V. Bordisheikh and Ch. Bairamkomaki. 2016. Gully erosion risk zoning using Dempster-Shafer model in the Gharnewa Watershed, Golestan Province. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 3(2): 219-231 (in Persian).
40. Servati, M.R., J. Ghodosi and M. Dadkhah. 2008. Effective factors in the formation and expansion of gully erosion in Loes. *Journal of Pajouhesh and Sazandegi*, 78: 20-23 (in Persian).
41. Shadfar, S. 2015. Application of fuzzy logic operators for investigation of gully erosion using GIS, case study: Troud Watershed. *Geography Information Journal*, 23(92): 35-42 (in Persian).
42. Shadfar, S. 2011. Investigation of gully erosion by using the analytical hierarchy process model, case study: Roudbar, Gilan Province. *Environmental Erosion Research Journal*, 1(3): 16-30 (in Persian).
43. Shafapourtehrany, M.S., B. Pradhan and M.N. Jebur. 2014. Flood susceptibility mapping using novel ensemble weights of evidence and support vector machine models in GIS. *Hydrology*, 512: 332-343.
44. Shahabi, M. and A. Sadoddin. 2009. Bayesian decision network approach for predicting impacts of drought management actions in dry land wheat areas of Golestan Province. 5th National Conference of Watershed Management, Iran, 3140-3149.
45. Sharivar, A., S. Shadfar and B. Adeli. 2017. Assessment of gully erosion zoning methods, case study: Abgandi Watershed. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4(1): 119-132 (in Persian).
46. Sidrochuk, A. 2003. Gully erosion modeling and landscape response in Mbuluzi River Catchment of Swaziland. *Catena*, 50: 507-522.
47. Tabatabaei, M.R. 2000. Study of gully erosion change in Khuzestan Province using processing satellite imagery and geographic information system. The Second National Conference on Erosion and Sediment, 63-77 (in Persian).
48. Taghizade, R., M. Zareian, S.H. Mahmoodi, A. Heidari and F. Sarmadi. 2008. Spatial interpolation methods to determine the spatial variability of water quality of groundwater in Rafsanjan. *Iranian Watershed Management Science and Engineering*, 5: 70-63 (in Persian).
49. Van Western, C.J. 2002. Use of weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping. *International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC)*, 1-21.
50. Yesilnacar, E.K. 2005. The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey. PhD Thesis, Department of Geomatics the University of Melbourne, 423 pages.
51. Zakerinead, R. and M. Maerker. 2015. An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan Basin, southwestern Iran. *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-015-1700-3: 25-50.
52. Zamanzade, M. and M. Ahmadi. 2013. The effects of physical and chemical properties of soil on the formation and expansion of gully erosion, case study: Fars, Kahor Lamard plain area. *Quantitative Geomorphological Researches*, 2(2): 135-156 (in Persian).