

ارزیابی روش‌های آماری و داده کاوی مکانی در پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در اراضی لسی استان گلستان

- ❖ سمیه موحدی نسب؛ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس.
- ❖ ابوالحسن فتح آبادی*؛ استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس.
- ❖ سید مرتضی سیدیان؛ استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس.
- ❖ علی حشمت پور؛ استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس.

چکیده

در این تحقیق اقدام به پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی، شاخص آماری، رگرسیون لجستیک و جنگل تصادفی در منطقه‌ای تمر استان گلستان شد. پس از تهیه نقشه پراکنش خندق‌ها، نقشه ۱۳ عامل مؤثر بر فرآیند خندقی شدن شامل: زمین‌شناسی، فاصله از گسل، تراکم گسل، ارتفاع، طول شیب، درصد شیب، جهت شیب، انحنای صفحه، انحنای پروفیل، فاصله از جاده، کاربری اراضی، شاخص قدرت جریان و شاخص رطوبت توپوگرافیک تهیه شدند. خندق‌های مشاهداتی به دو دسته آموزش و اعتبارسنجی تقسیم و با مقایسه نقشه پراکنش خندق‌ها با نقشه هر یک از ۱۳ فاکتور مستقل، وزن‌های روش‌های دومتغیره و پارامترهای روش‌های چند متغیره برآورد گردید. نتایج نشان داد مقدار مساحت زیر منحنی ROC داده‌های اعتبارسنجی برای روش‌های جنگل تصادفی (۰/۹۴)، رگرسیون لجستیک (۰/۸۶)، نسبت فراوانی (۰/۷۴) و شاخص آماری (۰/۷۸)، به‌دست آمد. همچنین کمترین مساحت طبقه با حساسیت خیلی بالا به ترتیب برای روش‌های جنگل تصادفی، نسبت فراوانی و رگرسیون لجستیک به‌دست آمد. در مجموع در این تحقیق روش جنگل تصادفی بهترین عملکرد را داشت و پس از این مدل، روش‌های رگرسیون لجستیک و شاخص آماری عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشته‌اند.

کلید واژگان: چند متغیره، دومتغیره، فرسایش خندقی، منحنی ROC

۱. مقدمه

افزایش جمعیت و به تبع آن افزایش نیازهای انسان منجر به تخریب منابع طبیعی شده است. تخریب زمین را می‌توان به عنوان هرگونه کاهش یا نابودی قابلیت‌های بیولوژیکی و تولیدی خاک که در نتیجه اقدامات انسانی یا در نتیجه برخی فرآیندهای طبیعی تشدید شونده به وجود می‌آید، دانست [۳۶]. بررسی‌ها نشان می‌دهد درصد زمین‌هایی که به شدت تخریب شده‌اند از ۱۵ درصد در سال ۱۹۹۱ به ۲۵ درصد در سال ۲۰۱۱ افزایش یافته است [۳۷]. یکی از فرآیندهای مهم در تخریب سرزمین، فرسایش خاک است [۳۸]. فرسایش خاک به عنوان جدایی و جابه‌جایی ذرات خاک در نتیجه یک عامل فرساینده از قبیل آب، باد و ثقل تعریف شده است. فرسایش آبی به شکل‌های فرسایش بارانی، ورقه‌ای، شیاری و خندقی باعث جدایی و جابه‌جایی ذرات خاک می‌شوند. در این بین فرسایش خندقی به عنوان فرسایشی تعریف می‌شود که در آن رواناب سطحی در کانال‌های کم عرض متمرکز شده و در یک زمان کوتاه مقدار زیادی خاک را تا عمق زیاد فرسایش می‌دهد [۲۸]. در اراضی کشاورزی خندق‌ها به عنوان کانال‌هایی تعریف می‌شوند که با استفاده از وسایل کشت و زرع معمولی از بین نمی‌روند و مساحت سطح مقطعی بزرگتر از یک فوت مربع (برابر با ۹۲۹ سانتی متر مربع) دارند [۲۷]. در مقایسه با کانال‌های پایدار رودخانه که شیب ملایمی دارند خندق‌ها دارای هدکت بوده، شیب بستر آن‌ها بالا می‌باشد و دارای پروفیل پله‌مانند هستند. همچنین در مقایسه با رودخانه‌ها، خندق‌ها دارای عمق بیشتر و عرض بستر کمتری هستند و معمولاً رسوب بیشتری توسط آن‌ها حمل می‌شود و رابطه بین رسوب حمل شده و رواناب در آن‌ها خیلی ضعیف است [۱۱]. این فرسایش، ارتباطی بین اراضی بالادست و شبکه کانال‌ها برقرار کرده و باعث انتقال هم‌جران سطحی و هم رسوب به مناطق پایین دست می‌شود و به‌طور متوسط در حدود ۱۰ تا ۹۴ درصد کل رسوب خروجی حوضه در نتیجه فرسایش خندقی است [۲۸].

شروع و رشد خندق فرآیند بسیار پیچیده است [۱۵]. بر اساس مشاهدات زمینی تشکیل و پیشروی هدکت خندق پس از شروع اولیه آن بسیار سریع است [۳۳، ۲۴، ۱۴]. بنابراین جهت کنترل این نوع فرسایش بهتر است اقدامات حفاظتی قبل از شروع این نوع فرسایش آغاز گردد. تشکیل و شروع فرآیند خندقی شدن تحت تأثیر عوامل محیطی فراوانی است و در واقع زمانی که آستانه‌های ژئومورفولوژیکی در نتیجه افزایش قدرت فرساینده‌گی آب یا رسوب از حد مجاز آن تجاوز کند فرسایش خندقی به وقوع می‌پیوندد [۶]. به منظور طراحی و اجرای تصمیمات و استراتژی‌های حفاظت خاک نیاز است تا مناطقی که حساس به فرسایش خندقی هستند و احتمال شروع فرسایش خندقی در آن‌ها زیاد است شناسایی و در هر منطقه متناسب با حساسیت آن نقطه اقدامات حفاظتی صورت گیرد. حساسیت به عنوان احتمال وقوع یک فرآیند بر اساس ارتباط بین توزیع فرآیند در گذشته و حال و فاکتورهای تأثیرگذار و مستقل تعریف شده است [۱۸]. در گذشته تلاش می‌شد با استفاده از آستانه‌های توپوگرافیکی مناطق حساس به فرسایش خندقی شناسایی شوند و نقشه حساسیت به فرسایش خندقی تولید گردد. این در حالی است که معمولاً فرسایش خندقی در نتیجه تأثیر متقابل عوامل مختلفی به وقوع می‌پیوندد و با استفاده از مدل‌هایی که فقط از آستانه‌های توپوگرافیک استفاده می‌کنند نمی‌توان مکان‌های حساس به فرسایش خندقی را شناسایی کرد [۱۴]. روش‌های متعدد برای تهیه نقشه‌های حساسیت به فرسایش خندقی را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد: نقشه‌برداری مستقیم و تکنیک‌های نقشه‌برداری غیر مستقیم که هر کدام مزایا و مشکلات مربوط به خود را دارند. روش‌های مستقیم بستگی به دانش فرد در مورد پدیده مورد بررسی و شناخت او از منطقه مورد مطالعه دارد. از سوی دیگر روش‌های غیر مستقیم که شامل روش‌های تعیینی و آماری هستند بر اساس ارتباط بین فاکتورهای محیطی و توزیع فرآیند مورد بررسی، تمرکز کرده‌اند [۴۰]. روش‌های تعیینی بر اساس مدل‌های فیزیکی و پارامترهای ژئوتکنیکی پایه‌گذاری شده‌اند و با استفاده از

خندق‌ها می‌شود صورت نگرفته است. بنابراین در این تحقیق سعی گردید عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی مورد ارزیابی قرار گیرد و در نهایت خطر وقوع فرسایش خندقی پهنه‌بندی گردد. همچنین در این تحقیق کارایی روش جنگل تصادفی در پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی نسبت به سایر مدل‌های دو متغیره نسبت فراوانی و شاخص آماری و چند متغیره رگرسیون لجستیک بررسی گردید.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. معرفی منطقه مورد بررسی

حوضه آبی‌تیر از توابع شهرستان مراوه‌تپه (۴۵ کیلومتری غرب مراوه‌تپه) در شمال استان گلستان واقع شده است (شکل ۱). این حوضه با مساحتی حدود ۵۰۷۷۱/۵۹ هکتار در محدوده عرض جغرافیایی $12^{\circ} 43' 37''$ تا $24^{\circ} 56' 56''$ شمالی و طول $48^{\circ} 16' 55''$ تا $36^{\circ} 55'$ شرقی قرار گرفته است. اغلب کاربری‌های منطقه شامل اراضی دیم و مرتعی می‌باشد. بیشتر زمین‌های کشاورزی در قسمت‌های میانی حوضه واقع شده‌اند. اراضی مرتعی بیشتر در قسمت‌های کوهستانی و جنوبی حوضه واقع شده‌اند و به دلیل چرای بیش از حد اغلب مراتع منطقه تخریب یافته‌اند. جهت رودخانه‌های منطقه به صورت جنوبی شمالی بوده و اغلب ارتفاعات حوضه در قسمت جنوبی آن استقرار دارند و از قسمت جنوب به شمال حوضه به تدریج از مقدار ارتفاع و شیب حوضه کاسته می‌شود.

۲.۲. روش تحقیق

۱.۲.۲. تهیه نقشه پراکنش خندق‌ها و فاکتورهای مؤثر در ایجاد خندق

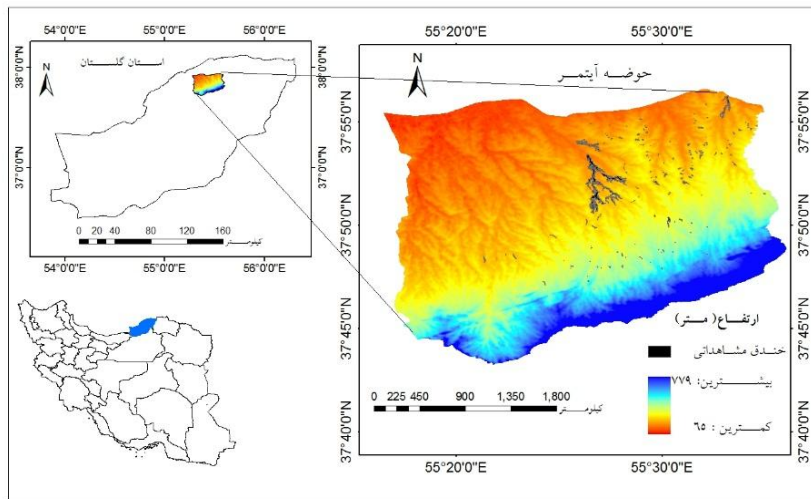
به منظور تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی در ابتدا نیاز است تا نقشه پراکنش خندق‌ها تهیه گردد. در اثر تغییرات کاربری و اقلیم، در طی دهه‌های اخیر شاهد افزایش خندقی شدن اراضی در استان گلستان بوده‌ایم. در منطقه

این روش‌ها می‌توان آستانه عوامل محرک را تعیین کرد. از نقاط ضعف این مدل‌ها استفاده از تعداد معدودی پارامتر و نیاز به داده‌های ورودی با جزئیات بالا می‌باشد [۱۸]. از روش‌های آماری و چند متغیره برای بررسی و تهیه نقشه‌های حساسیت، می‌توان به روش‌های مدل‌های تعمیم یافته خطی، رگرسیون لجستیک، شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون درختی و غیره اشاره کرد. از مزایای این روش‌ها ساده بودن فهم آن‌ها، عدم نیاز به داده برداری‌های زمینی خیلی دقیق، کار با دامنه گسترده‌ای از متغیرهای مستقل و غیره اشاره کرد [۷]. برای پهنه بندی هیچ روش جامعی که در تمام مناطق بهترین عملکرد را داشته باشد وجود نداشته و نیاز است تا در هر منطقه با توجه به شرایط و داده‌های در دسترس، روش مناسب را برای تهیه نقشه‌های حساسیت تعیین کرد [۱۴]. اولین تحقیقات در ارتباط با تعیین نقاط شروع فرسایش خندقی توسط [۸، ۲۱، ۲۲، ۲۶، ۳۲] صورت گرفت. آن‌ها با استفاده از آستانه شیب و مساحت حوضه بالا دست اقدام به آستانه‌های شروع فرسایش خندقی کردند. [۲۰] با استفاده از روش رگرسیون لجستیک اقدام به تهیه نقشه حساسیت به فرسایش خندقی در مقیاس مزرعه کردند. در تحقیقات [۱۸ و ۱۹] به ترتیب از روش‌های آماری دو متغیره، روش شاخص آماری و وزن شاهد در پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی استفاده کردند. به تدریج با معرفی روش‌های داده کاوی، استفاده از این روش‌ها در پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی بیشتر گردید. با استفاده از این روش‌ها می‌توان مسائل پیچیده چند متغیره را حل کرده و یک مدل پیش‌بینی برای حجم زیادی از داده ارائه کرد. در تحقیقات [۱۴ و ۱۶] از روش‌های داده کاوی رگرسیون چند متغیره اسپیلاین و رگرسیون درختی برای پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی استفاده شده است.

در منطقه مورد مطالعه، به رغم گسترش زیاد خندق‌ها و حساسیت منطقه نسبت به این فرسایش و همچنین تغییراتی کاربری که در بخش‌های مختلف این منطقه پدید آمده است، تاکنون هیچ تحقیقی برای تعیین پتانسیل فرسایش خندقی و عواملی که موجب تشکیل و توسعه

تعیین و با انتقال این نقاط به نرم‌افزارهای Google Earth و ARCGIS 9.3 موقعیت و مرز مربوط به هر خندق ترسیم گردید. علاوه بر بازدید زمینی از پایگاه Google Earth نیز برای شناسایی خندق‌های احتمالی استفاده گردید.

آی‌تمر نیز وجود خندق‌های بزرگ باعث ایجاد مشکلات عدیده‌ای برای مردم شده است. در طی بازدید از منطقه مورد مطالعه مناطقی که در آن‌ها فرسایش خندقی اتفاق افتاده بود شناسایی شدند. پس از تعیین موقعیت هر خندق با استفاده از GPS چند نقطه بر روی مرز آن



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

شوند. مقدار شیب آستانه بسته به شرایط محیط و متغیرهایی مانند مساحت حوضه بالادست، طول شیب، شدت بارش و زبری سطح متفاوت است. بین عوامل فوق مقدار مساحت حوضه بالادست یکی از مهم‌ترین فاکتورها است که به راحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشد [۲۵]. از سوی دیگر شیب و طول شیب تعیین‌کننده زمان و مقدار آبی است که تحت تأثیر نیروی ثقل متمرکز می‌شوند و بر روی سرعت جریان نیز مؤثر هستند. بر این اساس در این تحقیق پارامترهایی که به نوعی در ارتباط با شیب، طول شیب و مساحت حوضه بالادست هستند، یعنی پارامترهای مقدار شیب، عامل طول شیب (رابطه ۱)، انحنای صحفه، انحنای پروفیل، ارتفاع، شاخص‌های SPI (رابطه ۲) و TWI (رابطه ۳) در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند و نقشه‌های این فاکتورها با استفاده از نقشه DEM منطقه تهیه گردید. مقاومت برشی خاک که نشان‌دهنده مقاومت

پس از تهیه نقشه پراکنش خندق‌ها در منطقه مورد مطالعه اقدام به تهیه نقشه فاکتورهای مؤثر بر شروع فرسایش خندقی گردید. خندق‌ها در شرایط مختلف تشکیل می‌شوند در نتیجه متغیرهای مختلفی در تشکیل انواع خندق‌ها و توسعه آن‌ها مؤثر هستند. متغیرهای مؤثر را می‌توان به دو دسته عوامل مربوط به نیروی آب و عوامل مربوط به مقاومت خاک در جدایش ذرات، تقسیم‌بندی کرد. در عمل انتظار می‌رود با افزایش شدت بارندگی، درجه شیب و طول شیب، نیروی فرساینده‌ای که به عنوان عامل فرساینده شناخته می‌شوند، افزایش یابد. در یک منطقه با اقلیم و کاربری مشخص یک آستانه شیب و مساحت وجود دارد که در آن رواناب کافی جهت شروع فرسایش خندقی تجمع پیدا می‌کند [۲۳]. در شیب آستانه تنش برشی ایجاد شده توسط جریان متمرکز بیشتر از مقاومت برشی بستر است و در نتیجه در این شیب کانال‌ها تشکیل می

$$X_{ij}/S_{ij}$$

$$W_{ij} = \ln\left(\frac{f_{ij}}{f}\right) = \ln\left(\frac{x_{ij}}{X/S}\right) \quad (4)$$

در این رابطه W_{ij} وزن نسبت داده شده به طبقه i از پارامتر f ، تراکم خندق‌ها در طبقه i از پارامتر f ، تراکم خندق‌ها در کل نقشه، X_{ij} تعداد سلول‌های دارای خندق در طبقه i از پارامتر f ، S_{ij} تعداد کل سلول‌های طبقه i از پارامتر f ، X تعداد کل سلول‌های دارای خندق در منطقه و S تعداد کل سلول‌های منطقه هستند. از این روش در تحقیق لوکا و همکاران [۱۸] برای پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی استفاده شده است.

نسبت فراوانی (FR)^۲: در این روش نسبت فراوانی از تقسیم نسبت مساحت فرسایش خندقی در یک طبقه مشخص به نسبت کل مساحت همان طبقه حساب می‌شود که می‌تواند توسط رابطه (۵) بیان گردد [۳].

$$FR = \frac{X_{ij}/X}{S_{ij}/S} \quad (5)$$

$$GSI = \sum FR \quad (6)$$

در این روابط GSI شاخص حساسیت فرسایش خندقی برای فاکتور مورد نظر و FR نسبت فراوانی است. وزن‌های روش‌های شاخص آماری و نسبت فراوانی تمام لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در این مطالعه در اکسل محاسبه شد. با انتقال وزن‌های محاسباتی به نرم‌افزار ARCGIS وزن‌های لایه‌های مختلف برای هر سلول جمع و در نهایت نقشه نهایی حساسیت به فرسایش خندقی به دست آمد.

۲.۲.۲.۲ روش‌های چند متغیره

رگرسیون لجستیک^۳: رگرسیون لجستیک یک مدل‌سازی ریاضی است که برای توصیف روابط بین

خاک در برابر جدایش ذرات است، تحت تأثیر خصوصیات خاک، سازند و مقدار و نوع پوشش گیاهی منطقه می‌باشد. بر این اساس فاکتورهای نوع کاربری، فاصله از جاده، سازندها، فاصله از گسل نیز در مدل‌سازی استفاده گردید. برای تهیه نقشه این فاکتورها از نقشه‌های زمین‌شناسی و کاربری منطقه استفاده گردید. قابل ذکر است برای به‌دست آوردن نقشه‌های فوق از نقشه‌های پایه از نرم افزار 9.3 ARCGIS و توابع این نرم افزار استفاده گردید و در تمام نقشه‌ها اندازه سلول‌ها ۲۸*۲۸ متر در نظر گرفته شد.

$$LS = (a_s/22.13)^{0.4} \times (\sin(\beta)/0.0896)^{1.3} \quad (1)$$

$$SPI = a_s \times \tan(\beta) \quad (2)$$

$$TWI = \ln\left(\frac{a}{\tan(\beta)}\right) \quad (3)$$

در این روابط a_s مساحت ویژه حوضه آبریز بالادست a ، $\left(\frac{m^2}{m}\right)$ مساحت جریان تجمعی بالادست هر سلول، β مقدار شیب به درجه است.

۲.۲.۲.۲ اجرای روش‌های مختلف

۱.۲.۲.۲ روش‌های دو متغیره

شاخص آماری (SI)^۱: این مدل توسط فن وستن [۳۹] برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی ارائه شد. در این روش ارزش وزنی هر طبقه از پارامترها با لگاریتم‌گیری از نسبت تراکم فرسایش خندقی در طبقه مورد نظر بر تراکم فرسایش خندقی در کل نقشه به دست می‌آید (رابطه ۴). چنانچه در یک طبقه تعداد خندق‌ها کمتر از حد نرمال منطقه باشد وزن آن کمتر از صفر و چنانچه تعداد خندق‌های طبقه مورد نظر بیشتر از مقدار نرمال آن در منطقه باشد، وزن طبقه مورد نظر بزرگتر از صفر به دست می‌آید [۳۹]:

¹ Statistical Index

² Frequency Ratio

³ Logistic regression

استفاده از اعداد تصادفی تولید شده توسط مربع لاتین به همان تعداد که سلول‌های دارای خندق در داده‌های آموزشی و اعتبار سنجی وجود داشت سلول فاقد خندق نیز به طور تصادفی انتخاب شدند. در گام بعد برای سلول‌های دارای خندق و فاقد خندق مقادیر سایر متغیرهای مستقل نیز به دست آمد. قبل از ورود داده‌ها به نرم‌افزار SPSS در ستون مربوط به متغیر وابسته در سلول‌هایی که خندق وجود داشت عدد ۱ و در سلول‌های فاقد خندق عدد صفر قرار داده شد. سپس در نرم‌افزار SPSS برای اجرای مدل رگرسیون لجستیک و تعیین مهم‌ترین پارامترها از روش پیش رو LR استفاده گردید. پس از محاسبه وزن‌های مدل رگرسیون لجستیک این وزن‌ها به نرم‌افزار ARCGIS انتقال داده و مدل برای کل منطقه اجرا گردید.

جنگل تصادفی^۱: در مدل‌هایی مانند رگرسیون درختی که مقدار واریانس خروجی زیاد است و مقدار آریبی آن کم است متوسط‌گیری باعث کاهش نوسانات برآورد می‌شود. چنانچه متغیرها دارای هم‌بستگی باشند اثرات متوسط‌گیری کمتر مشهود است. جنگل تصادفی [۴] بر این اساس پایه‌گذاری شده است که با کاهش هم‌بستگی بین متغیرها تأثیر میانگین‌گیری بر کاهش واریانس خروجی مدل بیشتر شود. این امر با رشد دادن درختان مختلف در حالتی که متغیرهای انتخاب شده برای هر درخت متفاوت است و به‌صورت تصادفی انتخاب شده است امکان پذیر می‌باشد. در این شرایط در حالتی که هر درخت بر روی نمونه‌های باز نمونه‌گیری شده بوت استریپی رشد می‌کند قبل از هر تقسیم از بین p متغیر m (که $m \leq P$ است) پارامتر به‌صورت تصادفی برای تقسیم انتخاب می‌شود. در حالتی که جنگل تصادفی برای طبقه‌بندی استفاده گردد هر درخت برای هر بردار ورودی یک طبقه را انتخاب می‌کند در نهایت طبقه‌ای که بیشترین فراوانی را دارد به عنوان طبقه نهایی آن بردار انتخاب می‌شود، در حالتی که دو طبقه حضور و عدم

چندین متغیر مستقل و متغیر وابسته گسسته استفاده شود [۱۲]. متغیرهای وابسته مدل رگرسیون لجستیک می‌توانند متغیرهای دو طبقه یا طبقه‌های مختلف باشند و متغیرهای مستقل ترکیبی از متغیرهای پیوسته، گسسته یا متغیرهای دو طبقه باشند. در تحقیقات فرسایش خندقی، رگرسیون لجستیک یک رابطه بین کدهای دو حالت مکان‌های فرسایش خندقی (برای مثال وجود خندق کد ۱ و عدم وجود خندق کد ۰) و عوامل مختلف که در توسعه فرسایش خندقی نقش داشته‌اند، ایجاد می‌کنند. در مدل رگرسیون لجستیک پس از تبدیل متغیر وابسته به متغیر لوجیت (لگاریتم نپرین بخت وقوع) روش درست نمایی حداکثر برای برآورد پارامترها اجرا می‌شود. در این حالت با استفاده از رگرسیون لجستیک احتمال وقوع خندق برآورد می‌شود. در مدل رگرسیون لجستیک یک رابطه غیر خطی بین متغیرهای مستقل و وقوع و عدم وقوع خندق ایجاد می‌شود (رابطه ۷).

$$P = \frac{\exp(\sum BiXi)}{1 + \exp(\sum BiXi)} \quad (7)$$

در این رابطه P نشان‌دهنده احتمال وقوع، X_i نشان‌دهنده مقادیر هر یک از متغیرهای مستقل و B_i نشان‌دهنده ضرایب معادله می‌باشند که باید با استفاده از داده‌های آموزش مقادیر آن‌ها برآورد گردد.

برای اجرای مدل رگرسیون لجستیک در ابتدا نیاز است تا پارامترهای ثابت مدل برآورد شوند. بدین منظور تمام خندق مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه با استفاده روش تصادفی مبتنی بر اعداد تولید شده توسط مربع لاتین به دو دسته آموزش (۸۰ درصد خندق‌ها شامل ۱۲۴ خندق که در برگیرنده ۳۵۵۶ سلول بود) و اعتبار سنجی (۲۰ درصد خندق‌های مشاهداتی که شامل ۳۱ خندق و در برگیرنده ۷۱۲ سلول بود) تقسیم‌بندی شدند. در برآورد پارامترهای مدل رگرسیون لجستیک نیاز است به همان تعداد که سلول‌های دارای خندق در داده‌های آموزشی وجود دارد سلول‌های فاقد خندق نیز در داده‌های آموزشی وجود داشته باشند. بدین منظور در منطقه مورد مطالعه با

¹ Random forest

هر گره کدام متغیر تقسیم شود از شاخص ناخالصی جینی (رابطه ۸) استفاده می‌شود.

$$G = \sum_{k=1}^K \hat{P}_{mk}(1 - \hat{P}_{mk}) \quad (۸)$$

در این رابطه \hat{P}_{mk} احتمال درستی کلاسه‌بندی را نشان می‌دهد. در واقع این شاخص از حاصل ضرب درستی در نادرستی کلاسه‌بندی به دست می‌آید. با توجه به این رابطه مشاهده می‌شود زمانی که مقدار \hat{P}_{mk} به صفر یا یک نزدیک است این شاخص کمترین مقدار خود را دارد. با جمع مقادیر کاهش شاخص ناخالصی جینی متغیر X_j برای تمام گره‌های هر درخت اهمیت متغیر X_j برای آن درخت به دست می‌آید. چنانچه از مقادیر اهمیت متغیر X_j برای تمام درخت‌ها میانگین‌گیری شود شاخص اهمیت جینی برای متغیر X_j به دست می‌آید.

شاخص اهمیت جایگشتی: به منظور تعیین شاخص اهمیت جایگشتی برای متغیرهای مختلف در ابتدا درخت‌های تصمیم با نمونه‌های آموزشی ساخته می‌شود و عملکرد هر درخت برای داده‌های خارج از کیسه مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس متغیر مستقل X_j به صورت تصادفی جا به جا شده و تأثیر این جابه‌جایی در صحت عملکرد مدل برای داده‌های خارج از کیسه ارزیابی می‌گردد. در هر درخت اختلاف عملکرد مدل در حالت ساختار اولیه با حالتی که متغیر X_j جابه‌جا شده است نشان دهنده اهمیت متغیر X_j است و میانگین آن‌ها نشان دهنده شاخص اهمیت جایگشتی متغیر X_j است [۱۰].

۳. نتایج

پس از بازدید از عرصه مناطقی که در آن‌ها فرسایش خندقی وجود داشت ثبت و با انتقال آن‌ها به نرم‌افزار ARCGIS نقشه پراکنش خندق‌های منطقه تهیه گردید. در کل در منطقه مورد مطالعه تعداد ۱۵۵ خندق شناسایی گردید. بیشترین تراکم خندق‌ها در قسمت شرقی حوضه و بزرگترین خندق‌های در قسمت‌های

حضور وجود داشته باشد با شمارش فراوانی حالت حضور نسبت به عدم حضور، احتمال حضور و وقوع فرآیند مورد نظر محاسبه می‌شود. در حالت طبقه‌بندی مقدار m برابر است با \sqrt{P} و حداقل تعداد برگ در هر شاخه برابر با یک است و در حالت رگرسیون مقدار m برابر با $P/3$ و حداقل تعداد برگ در هر شاخه برابر ۵ می‌باشد. یکی از ویژگی‌های روش جنگل تصادفی نمونه‌های خارج از کیسه (Out of bag(OOB)) است. برای هر درخت از تمام بردارهای مشاهداتی، تعدادی از بردارها توسط نمونه‌برداری بوت استریپی انتخاب نشدند و در ساخت درخت از آن‌ها استفاده نمی‌شود و این بردارهای انتخاب نشده به عنوان نمونه‌های OOB شناخته می‌شوند. به نوعی نمونه‌های OOB را می‌توان به عنوان حالتی از اعتبارسنجی متقابل در نظر گرفت. از سوی دیگر ممکن است برای هر درخت برخی بردارها چندین مرتبه نمونه‌برداری شوند [۱۰]. در این روش یک پارامتر مهم حداقل تعداد برگ‌ها در هر شاخه است که به صورت سعی خطا تعیین گردید. برای اجرای روش جنگل تصادفی از پکیج Random Forest نرم‌افزار R استفاده گردید. در این قسمت از داده‌های آموزش و آزمون مربوط به روش رگرسیون لجستیک استفاده گردید. با در نظر گرفتن تعداد ۲۵۰۰ درخت تصمیم، تعداد حداقل برگ‌ها در هر شاخه بین ۵ تا ۵۰۰ تغییر داده شد و در نهایت با استفاده از مساحت زیر منحنی ROC حداقل تعداد برگ در هر شاخه تعیین شد.

یکی از ویژگی‌های مهم جنگل تصادفی قابلیت آن در تعیین اهمیت هر یک از متغیرها می‌باشد. بدین منظور از تابع Importance پکیج Random Forest استفاده می‌شود. در این تابع از دو شاخص اهمیت جینی^۱ و شاخص اهمیت جایگشتی^۲ استفاده می‌شود. در روش جنگل تصادفی در ساخت هر درخت به منظور تعیین این که در

^۱ Gini importance index

^۲ Permutation importance index

متر مربع به دست آمد. خندق‌های کوچک به صورت خطی بوده و دارای مقطع V شکل بودند در حالی که خندق‌های بزرگتر هدکت آن‌ها به صورت شاخه‌ای (پنجه‌ای) بوده و در قسمت پایین دست به صورت U شکل بودند در عکس‌های شکل ۲ نمای تعدادی از خندق‌های منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل ۲. نمای تعدادی از خندق‌های منطقه مورد مطالعه

فرسایش خندقی است و چنانچه این وزن کمتر از ۱ باشد نشان‌دهنده هم‌بستگی ضعیف بین فاکتور مورد نظر و احتمال وقوع فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه است [۲۹]. با توجه به جدول (۱) دیده می‌شود که در منطقه مورد مطالعه در همه طبقه‌های شیب، فرسایش خندقی مشاهده شده است. بیشترین تعداد خندق در شیب‌های ۰-۲ درصد و ۴-۲ درصد رخ داده است، در نتیجه بزرگترین وزن‌های نسبت فروانی مربوط به این طبقه‌های شیب است. همچنین ملاحظه می‌شود با افزایش شیب از تعداد خندق‌ها مشاهداتی و وزن‌های نسبت

مرکزی حوضه نرسیده به روستای آی‌تمر مشاهده گردید. از جنوب به شمال که شیب حوضه کاهش می‌یابد اندازه خندق‌های مشاهداتی بزرگتر شدند. خندق‌های قسمت شرقی که در شیب‌های بزرگتری تشکیل شده‌اند دارای ابعاد کوچکتری بودند. بزرگ‌ترین خندق در این منطقه دارای مساحت ۱۷۳/۳۴۸ هکتار بود. همچنین میانگین مساحت کل خندق‌های مورد بررسی برابر با ۲۱۳۶۲/۱۰

پس از تهیه نقشه پراکنش خندق‌ها و فاکتورهای مؤثر اقدام به اجرای روش‌های دو متغیره و محاسبه وزن‌ها گردید که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است. در روش نسبت فروانی، کمترین مقدار وزن به دست آمده برابر با صفر است که مربوط به طبقه‌هایی است که در آن‌ها هیچ خندقی مشاهده نشده است و با افزایش تعداد خندق‌های مشاهداتی در هر طبقه مقدار وزن‌های محاسباتی بیشتر می‌شود. در این حالت چنانچه وزن به دست آمده برای طبقه مشخصی از یک فاکتور بزرگتر از یک باشد نشان‌دهنده هم‌بستگی قوی بین فاکتور مورد نظر و وقوع

مقاوم به فرسایش قرار گرفته و از نظر توپوگرافی نیز شرایط برای ایجاد فرسایش خندقی مناسب نمی‌باشد. با توجه به توزیع مقادیر وزن‌های محاسباتی در طبقه‌های مختلف ارتفاع می‌توان بیان داشت عامل ارتفاع عامل مهمی در وقوع فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه است.

بررسی نقشه زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه نشان داد که فقط در سازندهای Ks (سازند شورپیچه: ماسه سنگ)، Kad (سازند آب دراز: سنگ آهک چرتی)، Kab (سازند آب تلخ: شیل و سیلت سنگ)، Q2 (دشت‌های آبرفتی، پادگانه‌های جوان)، Qv (لس‌های رسوب‌گذاری شده در کف دره‌ها) و Qal (آبرفت‌های عصر حاضر) خندق وجود داشته است. (قابل ذکر است که بر روی اغلب سازندهای منطقه بسته به شرایط توپوگرافیکی آن‌ها رسوبات لسی تجمع پیدا کرده‌اند) بیشترین تعداد خندق‌های مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه به ترتیب در سازندهای Kad و Qal مشاهده شده‌اند. با در نظر گرفتن مساحت هر سازند، سازند Kad با مقدار وزنی برابر با ۸ بزرگترین مقدار وزن نسبت فراوانی را به خود اختصاص داده است. بعد از سازند Kad بیشترین حساسیت به فرسایش خندقی در سازندهای Qal و Kab با مقادیر وزن بزرگتر از ۱ می‌باشد. در سایر سازندها مقادیر وزن‌های محاسباتی خیلی کوچک بوده و در اغلب آن‌ها مقادیر وزن‌های محاسباتی برابر با صفر می‌باشد.

با توجه به جدول (۱) می‌توان دید تا فاصله ۵۰۰ متری از جاده تعداد خندق‌های مشاهداتی به‌طور یکنواخت افزایش یافته و از این فاصله به بعد از تعداد خندق‌های مشاهداتی کاسته شده است. مقادیر حداقل و حداکثر وزن‌های محاسباتی برای این پارامتر به ترتیب برابر با ۰/۵۲۶ و ۱/۶۰۶ می‌باشند که به ترتیب مربوط به طبقه‌های با فاصله کمتر از ۱۰۰ متر و ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر می‌باشد. در تحقیق [۹] فاصله تأثیرگذار در وقوع خندق، فاصله ۱۰۰ تا ۱۵۰ متری از جاده معرفی شد و در تحقیق [۳۴] فاصله مؤثر، ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر از جاده و در تحقیق [۳۰] نیز مؤثرترین فاصله از جاده را ۰ تا ۱۰۰ متر

فراوانی به‌صورت یکنواخت کاسته می‌شود. در تحقیقات [۳۱ و ۳۰] نیز بیشترین تعداد خندق‌ها به ترتیب در شیب ۰ تا ۲ درصد و ۰ تا ۱۴/۸ درصد بودند. همچنین در تحقیقات [۱۹ و ۴۱]، شیب ۰ تا ۳ درصد، مؤثرترین شیب در وقوع فرسایش خندقی معرفی شده است. [۱۸] نیز در مطالعه‌ای در کشور ایتالیا مؤثرترین شیب در وقوع خندق را ۰ تا ۵ درصد اعلام نمودند که نشان می‌دهد فرسایش خندقی در شیب‌های کم، احتمال وقوع بیشتری دارد. به طور معمول در شیب‌های بالا، مساحت حوضه بالادست بالا کند کم است و رواناب سطحی و زیرسطحی کافی برای ایجاد فرسایش خندقی وجود ندارد. با توجه به جدول (۱) ملاحظه می‌شود در تمام جهات شیب در منطقه مورد مطالعه خندق مشاهده شده است. بیشترین تعداد خندق‌های مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه به ترتیب در مناطق مسطح و جهت‌های جنوب غرب، شرق و جنوب شرق اتفاق افتاده‌اند. برای این فاکتور کمترین و بیشترین مقادیر وزن‌های محاسباتی به ترتیب برابر با ۰/۴۷۳ و ۵/۱۸۲ می‌باشند. با توجه به مساحت کم مناطق مسطح در منطقه مورد مطالعه بزرگترین مقادیر نسبت فراوانی در مناطق مسطح و سپس جنوب غربی به دلیل تعداد زیاد خندق‌های به‌دست آمده است. در مورد عامل ارتفاع، تا ارتفاع ۴۰۰ متر در منطقه مورد مطالعه در طبقه‌های ارتفاعی خندق مشاهده شده است. بزرگترین مقادیر نسبت فراوانی در طبقات ارتفاعی دوم یعنی در ارتفاعات از ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر به‌دست آمد. در تحقیق [۳۴] نیز ارتفاع کمتر از ۲۵۰ متر و در تحقیق [۳۰] ارتفاع کمتر از ۷۱۲ متر به عنوان ارتفاع شاخص وقوع فرسایش خندقی بیان شده است. در منطقه مورد مطالعه در ارتفاعات خیلی پایین اغلب زمین‌های با شیب خیلی کم و شوره‌زار که حساسیت پایینی نسبت به فرسایش دارند و همچنین رواناب سطحی کمتری در آن‌ها وجود دارد (در این قسمت رواناب جریان یافته از قسمت‌های بالادست در یک یا چند آبراهه تمرکز یافته‌اند) مشاهده گردید. در مناطق با ارتفاعات بالا که بیشتر در قسمت جنوبی حوضه واقع شده‌اند سازندهای

بیشتر از ۱۰، مؤثرترین مقدار در وقوع خندق‌ها تشخیص داده شد.

طبقه‌های شاخص SPI با مقادیر ۱۵۰ تا ۳۰۰، ۳۰۰ تا ۴۵۰ و بزرگتر از ۴۵۰، دارای وزن نسبت فراوانی بزرگتر از ۱ می‌باشند و تعداد بیشتری خندق در این طبقه‌ها اتفاق افتاده است و در طبقه‌هایی که شاخص SPI کمتر از ۱۵۰ و بین ۴۵۰ تا ۶۰۰ باشد مقدار شاخص FR کمتر از ۱ می‌باشد به غیر از طبقه چهار (مقادیر ۴۵۰ تا ۶۰۰) در این شاخص نیز همانند شاخص TWI با افزایش مقادیر شاخص، تعداد خندق بیشتری در منطقه مورد مطالعه اتفاق افتاده است. در تحقیق [۹] مشاهده کردند با افزایش مقادیر شاخص‌های SPI و TWI احتمال وقوع فرسایش خندقی افزایش یافته است. دلیل این مسئله را می‌توان در آن دانست که در محاسبه این دو شاخص از پارامترهای شیب و مساحت تجمعی استفاده می‌شود؛ هر قدر مقادیر این دو شاخص بیشتر باشند مساحت تجمعی نیز بیشتر بوده و در نتیجه مقدار رواناب بیشتری در بالادست فراهم می‌شود. مقادیر حداقل و حداکثر وزن‌های محاسباتی برای فاکتور انحنای صفحه برابر با ۰/۶۱۸ و ۱/۳۴۰ محاسبه شد. برای فاکتور انحنای پروفیل نیز مقادیر حداقل و حداکثر وزن‌های به دست آمده به ترتیب برابر ۰/۴۲۸ و ۱/۵۵۸ می‌باشند. در فاکتور انحنای صفحه با افزایش مقادیر آن، تعداد خندق‌های مشاهده‌ای و وزن‌های نسبت فراوانی کاهش یافته است. در حالی که در فاکتور انحنای پروفیل با افزایش مقادیر آن تعداد خندق‌های مشاهده‌ای و در نتیجه وزن‌های محاسبه شده افزایش یافته است.

با توجه به تأثیر طول و مقدار شیب بر روی قدرت جریان و در نتیجه مقدار فرسایش و با توجه به جدول (۱) مشاهده می‌شود به غیر از طبقه دوم (مقادیر بین ۱۵ تا ۳۰) با افزایش این فاکتور تعداد خندق‌های مشاهده‌ای و نتیجتاً مقادیر وزن‌های محاسبه شده با استفاده از روش نسبت فراوانی افزایش یافته‌اند. در منطقه مورد مطالعه در حالی که مقدار این شاخص (طول شیب) بزرگتر از ۳۰

تشخیص دادند.

بیشتر سطح منطقه مورد مطالعه دارای کاربری مرتعی بود و بعد از این کاربری زمین‌های دیم مساحت بیشتری به خود اختصاص داده بودند. با توجه به مساحت کم کاربری‌های کشت آبی و روستا هیچ خندقی در این دو کاربری مشاهده نشد. با در نظر گرفتن مساحت هر یک از کاربری‌ها، بزرگترین مقادیر وزن‌های محاسباتی مربوط به کاربری مرتع است. در تحقیق [۳۱] در حوضه قرناوه گلستان، از میان کاربری‌های موجود، کاربری مرتع دارای بیشترین حساسیت به فرسایش خندقی بود. در تحقیقات [۳۰، ۳۴ و ۴۱]، اراضی کشاورزی را مستعدترین اراضی، جهت رخداد فرسایش خندقی دانستند. بررسی پراکنش خندق‌ها نسبت به فاصله از گسل‌ها در منطقه نشان می‌دهد که در همه فواصل به جز فاصله ۵۰۰ تا ۶۰۰ متری از گسل‌ها فرسایش خندقی رخ داده است. بیشترین تعداد خندق‌های مشاهده‌ای در فاصله بیشتر از ۶۰۰ متر از گسل وجود دارد. در این فاکتور هم مانند فاکتور فاصله از جاده، با فاصله گرفتن از گسل روند مشخصی در مقادیر وزن‌های محاسباتی وجود ندارد. در رابطه با تراکم گسل نیز در طبقه‌های ۰/۳ تا ۰/۸ (متر بر متر مربع)، بیشترین مقدار شاخص FR مشاهده شد و در طبقه‌های ۱/۷ تا ۲/۷ و بیشتر از ۲/۷ مقدار شاخص FR برابر با صفر می‌باشد و بدین معناست که در این طبقه‌ها شاخص نسبت فراوانی در وقوع خندقی بی‌تأثیر است. با توجه به جدول (۱) مشاهده می‌شود با افزایش مقادیر شاخص TWI تعداد خندق‌های مشاهده‌ای و نتیجتاً مقادیر وزن‌های محاسباتی با استفاده از روش نسبت فراوانی افزایش می‌یابد. رابطه بین TWI و احتمال وقوع فرسایش خندقی نشان می‌دهد در طبقه‌های رطوبت توپوگرافی کمتر از ۹ حساسیت کمی به فرسایش خندقی وجود دارد و طبقه‌های با مقادیر شاخص رطوبت توپوگرافی بیشتر از ۹، دارای FR بزرگتر از ۱ می‌باشند و حساسیت به وقوع فرسایش خندقی افزایش می‌یابد و طبقه با مقادیر بیشتر از ۱۲ بالاترین مقدار FR را دارد. در مطالعه [۱۸] در ایتالیا نیز TWI

برای روش‌های شاخص آماری نیز با انتقال اطلاعات مربوط به تعداد سلول‌های دارای خندق و تعداد سلول‌های هر طبقه به نرم‌افزار اکسل وزن‌های هر فاکتور محاسبه گردید که نتایج آن به صورت جدول (۱) می‌باشد. با انتقال این وزن‌ها به لایه‌های اطلاعاتی و جمع زدن آن‌ها لایه نهایی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از این روش تهیه گردید. پس از تهیه نقشه پهنه‌بندی، با استفاده از روش شکست طبیعی نقشه پهنه‌بندی به ۴ طبقه خطر شامل طبقه خطر کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی گردید (شکل ۲).

بود مقدار وزن‌های محاسباتی بزرگتر ۱ به دست آمد. این در حالی است که در تحقیق [۱۸] این مقدار در بازه طول شیب‌های صفر تا ۲ به دست آمد.

پس از محاسبه وزن‌های روش نسبت فراوانی مقادیر وزن‌های محاسباتی به لایه‌های هریک از فاکتورها اعمال و سپس با جمع زدن تمام لایه‌ها نقشه نهایی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از روش نسبت فراوانی به دست آمد. پس از تهیه نقشه پهنه‌بندی، با استفاده از روش شکست طبیعی این نقشه به ۴ طبقه خطر شامل طبقه خطر خیلی کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی گردید که به صورت نقشه شکل (۲) است.

جدول ۱. مقادیر وزن‌های به دست آمده توسط روش‌های نسبت فراوانی و شاخص آماری

$$B = \frac{\text{تعداد کل سلول های دارای خندق هر طبقه}}{\text{تعداد کل سلول های دارای خندق منطقه}} \quad \text{و} \quad A = \frac{\text{تعداد سلول های هر طبقه}}{\text{تعداد کل سلول های منطقه}} \quad \text{در این جدول}$$

عامل	طبقه	A	B	Fr	SI
بازن	Qgch	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	Kab	۰/۶۲۲	۰/۶۴۲	۱/۰۳۲	۰/۰۳۱
	Kad	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۸/۸۲۸	۲/۱۷۸
	Ks	۰/۰۷۴	۰/۰۰۱	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰
	Kat	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	Qch	۰/۰۲۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	Q2	۰/۰۲۴	۰/۰۰۲	۰/۰۸۱	-۲/۵۱۴
	Ech	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	Qv	۰/۱۲۲	۰/۰۰۳	۰/۰۲۵	-۳/۶۷۱
	Qfe	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	Qffl	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	Qfb	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	Qal	۰/۱۰۴	۰/۱۰۴	۳/۳۲۴	۱/۲۰۱
شیب	۲-۰	۰/۰۸۶	۰/۱۵۰	۱/۷۵۹	۰/۵۶۵
	۴-۲	۰/۱۷۴	۰/۲۶۰	۱/۴۹۱	۰/۴۰۰
	۶-۴	۰/۲۰۹	۰/۲۲۵	۱/۰۷۶	۰/۰۷۳
	۹-۶	۰/۲۶۲	۰/۲۲۰	۰/۸۴۰	-۰/۱۷۴
	۱۲-۹	۰/۱۳۸	۰/۱۰۰	۰/۷۲۰	-۰/۳۲۹
	۱۵-۱۲	۰/۰۵۵	۰/۰۳۶	۰/۶۵۵	-۰/۴۲۳
	۱۵<	۰/۰۷۷	۰/۰۱۰	۰/۱۲۸	-۲/۰۵۲
کاربری اراضی	دیم	۰/۰۸۸	۰/۴۲۶	۴/۸۵۰	۱/۵۷۹
	مرتع	۰/۹۰۳	۰/۵۷۴	۰/۶۳۶	-۰/۴۵۲
	مسکونی	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	زراعت آبی	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

ادامه جدول ۱

SI	Fr	B	A	طبقه	فاکتور
-۳/۴۱۹	۰/۰۳۳	۰/۰۰۳	۰/۰۹۴	۱۰۰>	ارتفاع
۰/۵۱۰	۱/۶۶۵	۰/۹۷۵	۰/۵۸۶	۲۰۰-۱۰۰	
-۲/۱۶۱	۰/۱۱۵	۰/۰۲۱	۰/۱۸۳	۳۰۰-۲۰۰	
-۵/۰۵۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۸۸	۴۰۰-۳۰۰	
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۳۰	۵۰۰-۴۰۰	
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۱۳	۶۰۰-۵۰۰	
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	۶۰۰<	
-۰/۰۸۶	۰/۹۱۷	۰/۸۶۸	۰/۹۴۶	۱۵۰>	SPI
۰/۰۴۲	۱/۰۴۳	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۳۰۰-۱۵۰	
۰/۰۹۰	۱/۰۹۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۴۵۰-۳۰۰	
-۰/۱۰۲	۰/۹۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۶۰۰-۴۵۰	
۱/۳۵۱	۳/۸۶۱	۰/۱۰۵	۰/۰۲۷	۶۰۰<	
-۲/۷۷۱	۰/۰۶۳	۰/۰۰۱	۰/۰۱۳	۵>	TWI
-۰/۶۷۳	۰/۵۱۰	۰/۲۳۵	۰/۴۶۰	۷-۵	
-۰/۲۲۲	۰/۸۰۱	۰/۲۶۴	۰/۳۳۰	۹-۷	
۰/۴۵۴	۱/۵۷۴	۰/۱۷۶	۰/۱۱۲	۱۲-۹	
۱/۳۳۴	۳/۷۹۵	۰/۳۲۵	۰/۰۸۶	۱۲<	
۰/۲۹۳	۱/۳۴۰	۰/۵۵۶	۰/۴۱۵	-۰/۰۱>	انحنا صحفه
۰/۲۰۷	۱/۲۳۰	۰/۱۶۵	۰/۱۳۴	(-۰/۰۱)-(-۰/۰۱)	
-۰/۴۸۱	۰/۶۱۸	۰/۲۷۹	۰/۴۵۱	-۰/۰۱<	
-۰/۸۵۰	۰/۴۲۸	۰/۱۸۳	۰/۴۲۸	-۰/۰۱>	انحنا بروفیل
-۰/۰۷۰	۰/۹۳۲	۰/۱۱۰	۰/۱۱۸	(-۰/۰۱)-(-۰/۰۱)	
۰/۴۴۴	۱/۵۵۸	۰/۷۰۷	۰/۴۵۴	-۰/۰۱<	
۱/۶۴۵	۵/۱۸۲	۰/۰۰۰	۰/۰۳۸	مسطح	جهت شیب
-۰/۶۹۹	۰/۴۹۷	۰/۰۷۸	۰/۱۵۸	شمال	
-۰/۲۱۵	۰/۸۰۷	۰/۱۳۶	۰/۱۶۸	شمال شرقی	
۰/۱۱۶	۱/۱۲۳	۰/۱۱۷	۰/۱۰۴	شرق	
۰/۱۰۹	۱/۱۱۶	۰/۰۵۶	۰/۰۵۰	جنوب شرقی	
-۰/۱۴۰	۰/۸۶۹	۰/۰۳۹	۰/۰۴۵	جنوب	
۰/۴۰۶	۱/۵۰۱	۰/۱۷۳	۰/۱۱۵	جنوب غربی	
-۰/۱۸۸	۰/۸۲۹	۰/۱۲۴	۰/۱۵۰	غرب	
-۰/۷۴۹	۰/۴۷۳	۰/۰۸۱	۰/۱۷۲	شمال غربی	
-۱/۷۳۷	۰/۱۷۶	۰/۰۰۴	۰/۰۲۶	۱۰۰>	فاصله از گسل
-۱/۸۱۰	۰/۱۶۴	۰/۰۰۴	۰/۰۲۸	۲۰۰-۱۰۰	
-۱/۷۰۰	۰/۱۸۳	۰/۰۰۴	۰/۰۲۵	۳۰۰-۲۰۰	
-۲/۳۵۷	۰/۰۹۵	۰/۰۰۳	۰/۰۲۷	۴۰۰-۳۰۰	
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۲۵	۵۰۰-۴۰۰	
-۲/۵۹۷	۰/۰۷۴	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶	۶۰۰-۵۰۰	
۰/۱۵۱	۱/۱۶۴	۰/۹۸۲	۰/۸۴۴	۶۰۰<	

ادامه جدول ۱

S \odot	S \odot	S2(w-)	S2(w+)	C	فاکتور
-۰/۰۲۹	۰/۹۷۱	۰/۹۲۰	۰/۹۴۷	۱۵-۰	طول شیب
-۰/۲۵۸	۰/۷۷۲	۰/۰۲۱	۰/۰۲۸	۳۰-۱۵	
۰/۱۵۷	۱/۱۷۰	۰/۰۱۱	۰/۰۱۰	۴۵-۳۰	
۰/۴۲۶	۱/۵۳۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۶۰-۴۵	
۱/۳۰۰	۳/۶۷۰	۰/۰۴۰	۰/۰۱۱	۶۰<	
-۰/۶۴۳	۰/۵۲۶	۰/۰۰۷	۰/۰۱۴	۱۰۰>	فاصله از جاده
-۰/۱۷۱	۰/۸۴۳	۰/۰۱۰	۰/۰۱۲	۲۰۰-۱۰۰	
۰/۲۹۵	۱/۳۴۳	۰/۰۱۴	۰/۰۱۱	۳۰۰-۲۰۰	
۰/۳۰۹	۱/۳۶۲	۰/۰۱۶	۰/۰۱۲	۴۰۰-۳۰۰	
۰/۴۷۴	۱/۶۰۶	۰/۰۱۷	۰/۰۱۱	۵۰۰-۴۰۰	
۰/۲۲۵	۱/۲۵۲	۰/۰۱۴	۰/۰۱۱	۶۰۰-۵۰۰	تراکم گسل
-۰/۰۰۹	۰/۹۹۱	۰/۹۲۰	۰/۹۲۹	۶۰۰<	
۰/۱۲۸	۱/۱۳۷	۰/۹۸۴	۰/۸۶۵	۰/۳-۰/۸	
-۴/۹۶۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰	۰/۰۴۰	۰/۸-۱/۲	
-۱/۷۳۴	۰/۱۷۶	۰/۰۱۶	۰/۰۹۱	۱/۲-۱/۷	
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۱/۷-۲/۷	

بودند پس می‌توان نتیجه گرفت این دو متغیر با سایر متغیرها دارای رابطه هم‌خطی می‌باشند.

پس از اجرای مدل رگرسیون لجستیک پیش‌رو در نهایت از بین ۱۳ فاکتور مورد بررسی در این تحقیق ۱۰ عامل به عنوان عوامل مؤثر در وقوع فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه شناخته شدند. دلیل قرار نگرفتن عامل طول شیب و شاخص قدرت جریان را می‌توان در وجود رابطه هم‌خطی این فاکتور با سایر متغیرها دانست. مدل نهایی به دست آمده توسط روابط رگرسیون لجستیک به صورت رابطه زیر است:

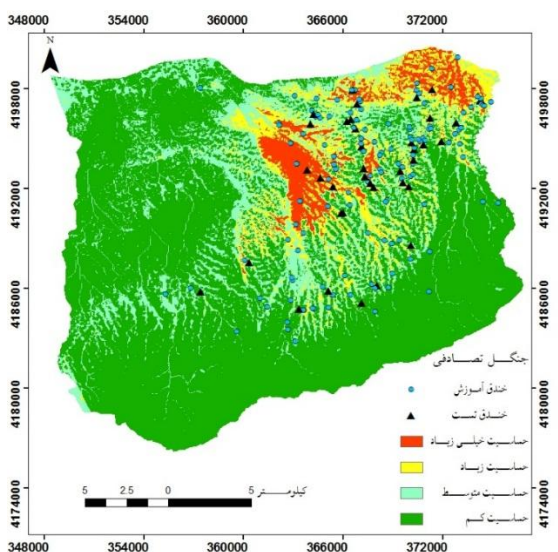
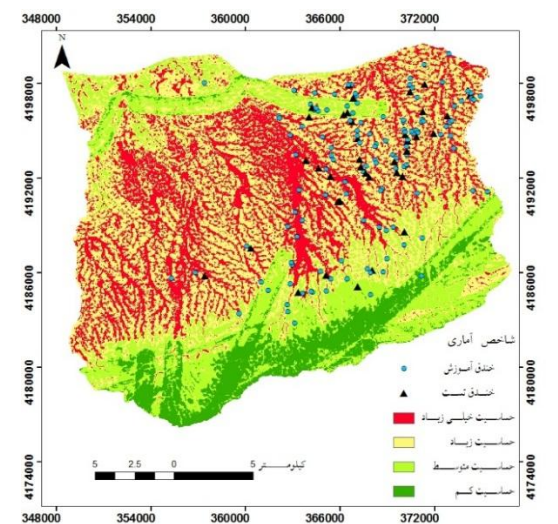
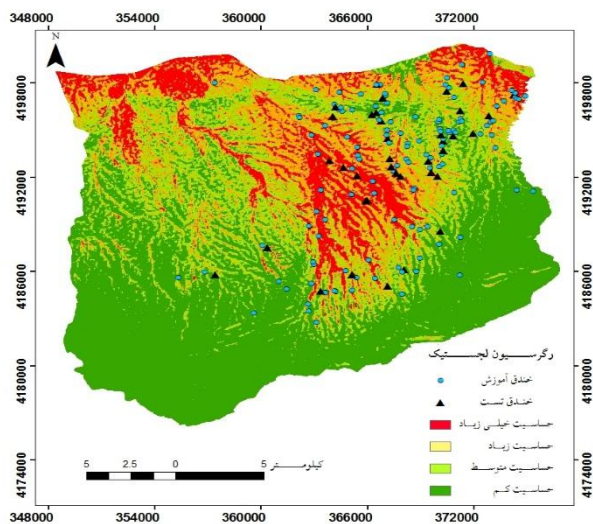
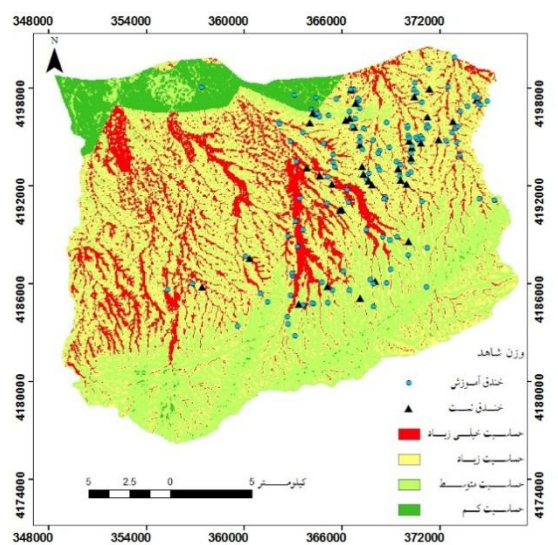
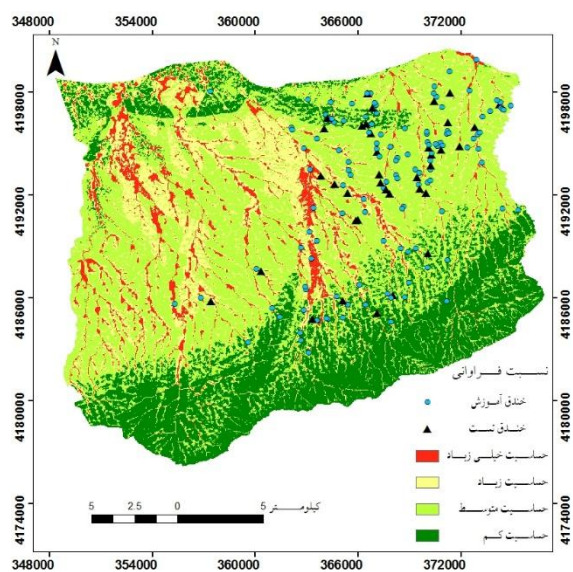
$$Y = 2/052 + (-0/0076 \times \text{ارتفاع}) + (-0/804 \times \text{گسل}) + (0/125 + (0/0003 \times \text{فاصله از گسل}) + (0/057 \times \text{شاخص رطوبت توپوگرافی}) + (0/057 \times \text{انحاء پروفیل}) + (6/48 \times \text{شیب}) + (-1/357 + (-2/18 \times \text{صفحه}) + (0/053 \times \text{سازند}) + (0/0004 \times \text{فاصله از جاده}))$$

$$p = \frac{e^y}{(1 + e^y)}$$

در روش رگرسیون لجستیک مسئله مهم وجود رابطه هم‌خطی بین ورودی‌های مختلف است. بدین منظور قبل از اجرای مدل رگرسیون لجستیک، داده‌ها از نظر وجود رابطه هم‌خطی مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور از پارامترهای عدد تحمل^۱ و عامل تورم واریانس^۲ استفاده گردید. چنانچه برای یک متغیر مقادیر VIF بزرگتر از ۱۰ باشد نشان‌دهنده وجود رابطه هم‌خطی بین متغیر مورد نظر و سایر متغیرها است. نتایج آزمون هم‌خطی بودن نشان داد برای ۱۱ متغیر مقادیر TOL بزرگتر از ۰/۱ و VIF کوچکتر از ۱۰ بودند ولی برای دو متغیر طول شیب (مقدار عداد تحمل و عامل تورم واریانس به ترتیب ۰/۰۸۵ و ۱۱/۶۳۴) و شاخص قدرت جریان (مقدار اعداد تحمل و عامل تورم واریانس به ترتیب ۰/۰۸۵ و ۱۱/۷۰۳) مقدار VIF از ۱۰ بزرگتر و مقدار TOL از ۰/۱ کوچکتر

^۱ Tolerance

^۲ Variance inflation factor



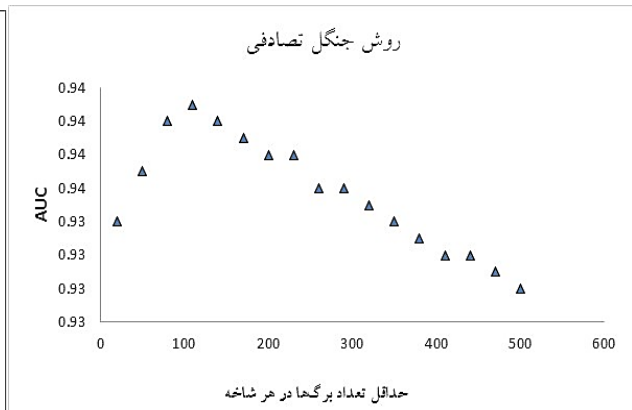
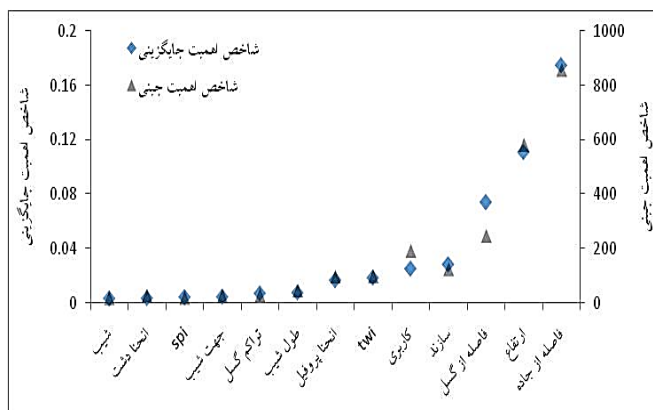
شکل ۳. نقشه طبقه‌بندی شده حساسیت به فرسایش خندقی با روش‌های مختلف

شد. در شکل (۵) مقادیر شاخص مساحت زیر منحنی ROC برای داده‌های آزمون و تعداد برگ‌های مختلف، ارائه شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود در حالتی که تعداد حداقل برگ برابر با ۱۱۰ باشد مدل بهترین عملکرد را دارد.

در شکل (۴) مقادیر شاخص اهمیت جایگشتی و شاخص اهمیت جینی برای ۱۳ فاکتور مورد استفاده، ارائه شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود، میانگین کاهش جینی برای فاکتور فاصله از جاده با مقدار ۸۵۸/۴۸۳ بیشتر از سایر فاکتورها به دست آمد، بعد از آن به ترتیب ارتفاع با مقدار ۵۸۲/۵۶۶، فاصله از گسل با مقدار ۲۴۷/۲۲، کاربری اراضی با مقدار ۱۹۱/۲۷۰ قرار گرفتند.

پس از تعیین عوامل مؤثر و محاسبه پارامترهای مدل رگرسیون لجستیک این مدل در نرم‌افزار ARCGIS اجرا و نقشه نهایی پهنه‌بندی حساسیت منطقه به فرسایش خندقی به دست آمد. پس از تهیه نقشه پهنه‌بندی با در نظر گرفتن ۴ طبقه خطر شامل طبقه کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد نقشه تهیه شده به روش شکست طبیعی طبقه‌بندی گردید که در شکل (۳) نتایج آن ارائه شده است.

در روش جنگل تصادفی مسئله مهم، تعداد حداقل برگ در هر شاخه است. برای تعیین این تعداد برگ، هیچ روش مدونی وجود نداشته و بسته به مسئله مورد بررسی، به صورت سعی و خطا تعیین می‌گردد. در این تحقیق تعداد حداقل برگ‌ها بین ۵ تا ۵۰۰ در نظر گرفته شد و به صورت سعی و خطا حداقل تعداد برگ بهینه تعیین



شکل ۴. نمودار رابطه AUC و تعداد برگ‌ها در روش جنگل تصادفی (شکل سمت چپ) و نمودار میانگین کاهش دقت و کاهش جینی برای روش جنگل تصادفی (شکل سمت راست)

حساسیت به فرسایش خندقی در قسمت‌های مرکزی حوضه به دست آمده‌اند. پس از آنکه نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش خندقی با روش جنگل تصادفی به دست آمد با استفاده از روش شکست طبیعی نقشه پهنه‌بندی به ۴ طبقه خطر شامل طبقه کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد، طبقه‌بندی گردید که به صورت شکل (۵) است.

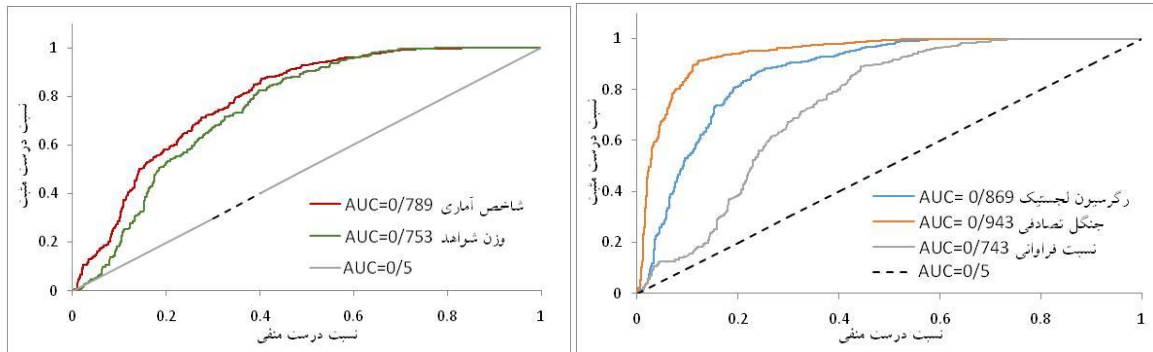
پس از محاسبه پارامترهای روش جنگل تصادفی این مدل برای کل منطقه اجرا گردید. در نهایت با در نظر گرفتن مختصات نقاط، لایه نهایی حساسیت با استفاده از روش جنگل تصادفی در نرم‌افزار ARCGIS تهیه شد (شکل (۶)). در این روش بزرگترین، کوچکترین و متوسط وزن‌ها به ترتیب برابر با ۱، ۰ و ۰/۱۴ به دست آمدند. با توجه به نقشه (۶) ملاحظه می‌شود بیشترین مقادیر

مدل‌های مورد بررسی با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی و شاخص‌های مساحت زیر منحنی ROC، تعداد سلول‌های خندق‌های مشاهداتی در هر یک از طبقه‌های خطر و مساحت طبقه با حساسیت خیلی بالا گردید.

۱.۳. اعتبارسنجی نقشه‌های حساسیت فرسایش

خندقی

ارائه مدل بدون ارزیابی کارایی آن، فاقد ارزش لازم می‌باشد. بنابراین پس از اجرای مدل نیاز است تا کارایی مدل بررسی گردد. در این مرحله اقدام به ارزیابی کارایی



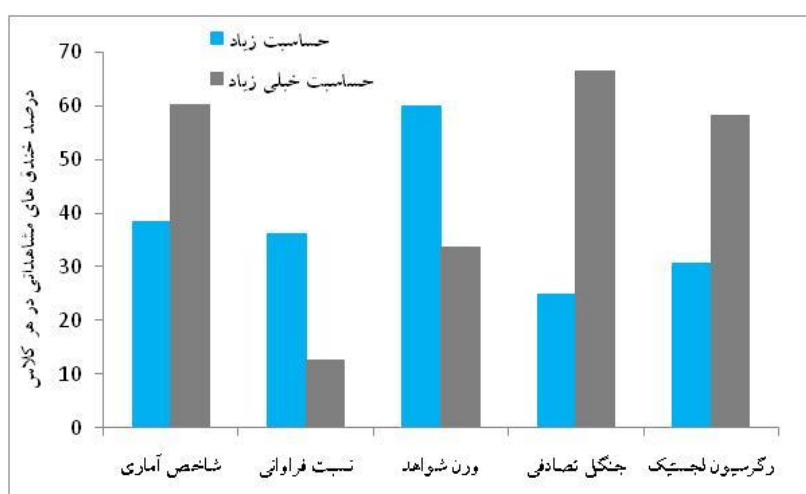
شکل ۵. منحنی ROC روش‌های مختلف برای داده‌های اعتبارسنجی

مساحت زیر منحنی ROC برابر با ۰/۸۲ بود که نسبت به روش رگرسیون لجستیک با داشتن مقدار مساحت زیر منحنی ROC برابر با ۰/۸۶ عملکرد ضعیف‌تری داشت. در تحقیق [۹] مقدار شاخص AUC برای مدل وزن شاهد برابر با ۰/۸۹۹ و در تحقیق [۳۰] این مقدار برابر با ۰/۸۹۹ به دست آمد. در تحقیقی [۱۲] بیان کردند چنانچه مقدار مساحت زیر منحنی ROC بین ۰/۷ تا ۰/۸ باشد عملکرد مدل قابل قبول است، چنانچه مساحت زیر منحنی ROC بین ۰/۸ تا ۰/۹ باشد عملکرد مدل عالی است و چنانچه مقدار AUC بیشتر از ۰/۹ باشد عملکرد مدل خیلی عالی می‌باشد. بر این اساس عملکرد مدل جنگل تصادفی خیلی عالی و عملکرد مدل رگرسیون لجستیک عالی است. عملکرد روش‌های دو متغیره در طبقه قابل قبول هستند. این در حالی است که در تحقیقی [۶] عملکرد مدل رگرسیون لجستیک در محدوده قابل قبول قرار گرفت. علاوه بر منحنی ROC برای مقایسه کارایی روش‌های مختلف، تغییرات تدریجی پراکنش خندق‌ها در طبقات مختلف احتمال وقوع نقشه‌های پهنه‌بندی مورد بررسی

در شکل (۵) منحنی‌های ROC چهار روش نسبت فراوانی، شاخص آماری، رگرسیون لجستیک و جنگل تصادفی برای داده‌های اعتبارسنجی ارائه شده‌اند. با توجه به این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که مساحت زیر منحنی ROC (AUC)، برای خندق‌های اعتبارسنجی روش‌های نسبت فراوانی، شاخص آماری، رگرسیون لجستیک و جنگل تصادفی به ترتیب برابر با ۰/۷۴، ۰/۷۸، ۰/۸۶ و ۰/۹۴ به دست آمده‌اند. با توجه به مقادیر مساحت زیر منحنی ROC مشاهده می‌شود در منطقه مورد مطالعه بهترین عملکرد مربوط به جنگل تصادفی است و پس از این مدل، روش رگرسیون لجستیک عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. به نوعی می‌توان گفت در کل روش‌های چند متغیره بهتر از روش‌های دو متغیره توانسته مناطق دارای خندق و فاقد خندق را مدل‌سازی کند. در بین روش‌های دو متغیره نیز روش شاخص آماری عملکرد بهتری نسبت به روش نسبت فراوانی داشته است. در تحقیق [۱۸] در پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در Northern Calabria ایتالیا روش شاخص آماری دارای

گرفتند ۶۶/۴ درصد سلول‌های دارای خندق در طبقه با حساسیت خیلی بالا اتفاق افتاده‌اند. این درصد برای مدل‌های رگرسیون لجستیک، شاخص آماری و نسبت فراوانی به ترتیب برابر ۵۸/۱، ۶۰/۱ و ۱۲/۶ بوده است. در طبقه با حساسیت بالا برای روش‌های جنگل تصادفی، رگرسیون لجستیک، شاخص آماری و نسبت فراوانی درصد خندق‌های اعتبار سنجی مشاهداتی به ترتیب برابر ۲۴/۸۶، ۳۰/۶۲، ۳۸/۳۴ و ۳۶/۱۰ بودند.

قرار گرفتند. شکل (۹) فراوانی خندق‌های مشاهداتی در طبقه‌های با حساسیت خیلی زیاد و زیاد فرسایش خندقی به دست آمده با روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. مدلی کارآمدتر است که تعداد بیشتری خندق در طبقه‌های با حساسیت بالا اتفاق افتاده باشد. همان‌طور که از شکل (۶) مشخص است، در نقشه حساسیت خطر فرسایش خندقی با روش جنگل تصادفی از تعداد ۷۱۲ سلول دارای خندق که در آزمون مورد استفاده قرار



شکل ۶. فراوانی خندق‌های مشاهداتی در نقشه‌های حساسیت فرسایش خندقی روش‌های مختلف

جدول ۳. درصد مساحت هر طبقه خطر فرسایش خندقی در روش‌های استفاده شده در منطقه مورد مطالعه

طبقه بندی	مدل	خطر کم	خطر متوسط	خطر زیاد	خطر خیلی زیاد
نسبت فراوانی	۲۷/۴۷	۴۸/۰۹	۱۷/۸۰	۶/۶۴	
شاخص آماری	۱۰/۰۱	۲۲/۴۰	۴۳/۵۸	۲۴	
رگرسیون لجستیک	۴۷/۲۱	۲۳/۹۵	۱۷/۱۵	۱۱/۶۹	
جنگل تصادفی	۶۵/۶۷	۱۹/۷۰	۹/۲۴	۵/۳۸	

نقشه‌های طبقه‌بندی شده محاسبه گردید که نتایج آن به صورت جدول (۳) می‌باشد. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود روش‌های جنگل تصادفی، نسبت فراوانی و رگرسیون لجستیک به ترتیب دارای کمترین مساحت طبقه با حساسیت خیلی زیاد هستند. بعد از این روش‌ها، مدل‌های شاخص آماری دارای کمترین مساحت طبقه با

برخی محققان بیان می‌کنند در طبقه‌بندی نقشه‌های پهنه‌بندی، بهترین روش پهنه‌بندی روشی است که ۱- بیشترین تعداد خندق‌های مشاهداتی در طبقه با حساسیت خیلی بالا قرار گیرند، ۲- طبقه با حساسیت خیلی بالا مساحت کمی را به خود اختصاص دهد [۵]. بدین منظور مساحت طبقه‌های مختلف حساسیت

متغیره و وزن‌های روش‌های دومتغیره خندق‌های مشاهداتی که شامل ۱۵۵ خندق و تعداد ۴۲۶۸ سلول خندقی بود به دو دسته آموزش (۸۰ درصد که شامل ۱۲۴ خندق و ۳۵۵۶ سلول خندقی) و آزمون (۲۰ درصد خندق‌ها که شامل ۳۱ خندق و ۷۱۲ سلول خندقی بود) تقسیم‌بندی شدند. با شمارش تعداد سلول‌های دارای خندق در هر طبقه فاکتورهای مستقل و انتقال آن‌ها به نرم‌افزار اکسل وزن‌های فاکتورهای مختلف محاسبه شدند. برای اجرای روش جنگل تصادفی از پکیج Random Forest نرم‌افزار R و برای اجرای مدل رگرسیون لجستیک از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

در منطقه مورد مطالعه با استفاده از رگرسیون لجستیک پیش‌رو از میان ۱۳ عامل مؤثر ۱۱ عامل ارتفاع، تراکم گسل، شاخص رطوبت توپوگرافی، شیب، انحناء صفحه، انحناء پروفیل، کاربری اراضی، سازند، فاصله از گسل و فاصله از جاده به عنوان مؤثرترین عوامل انتخاب گردیدند که در بین ۱۱ عامل، انحناء پروفیل دارای بیشترین ضریب است. در این میان شاخص SPI و فاکتور طول-شیب، به دلیل داشتن رابطه هم‌خطی با سایر پارامترها به عنوان پارامتر مهم انتخاب نشد. مقدار شاخص ROC برای این روش، ۰/۸۶ به دست آمد که گویای عملکرد نسبتاً خوب این مدل است. بر اساس روش جنگل تصادفی پارامترهای فاصله از جاده، ارتفاع، فاصله از گسل، کاربری و سازند به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرسایش خندقی انتخاب شدند. در تحقیق [۱۶] فاکتورهای نوع سازند، ارتفاع کاربری اراضی، انحناء صفحه و مساحت حوضه بالادست اهمیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها در توزیع خندق‌ها داشته‌اند و مقدار شیب، کمترین اهمیت را در پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در حوضه Oltet Drainage Basin کشور رومانی، با استفاده از روش درخت تصمیم داشت. در تحقیق [۱۳] در پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی با استفاده از مدل MARS در حوضه San Giorgio (ایتالیا) پارامترهای شاخص رطوبت توپوگرافی و ارتفاع و در حوضه Mula

حساسیت بالا می‌باشند. بنابراین از نظر مساحت طبقه با حساسیت خیلی بالا بهترین عملکرد به ترتیب مربوط به روش‌های جنگل تصادفی، نسبت فراوانی و رگرسیون لجستیک می‌باشند.

در کل با در نظر گرفتن سه معیار ارزیابی می‌توان بیان داشت روش جنگل تصادفی بهترین عملکرد را در بین تمام مدل‌های مورد بررسی به خود اختصاص داده و بعد از این روش، رگرسیون لجستیک عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته است. در بین روش‌های دو متغیره مدل شاخص آماری عملکرد بهتری نسبت به روش نسبت فراوانی داشته است. این در حالی است که در تحقیق [۱۷] در پهنه‌بندی فرسایش خندقی و همچنین برآورد مقدار رسوب خندق‌ها در کوئینزلند استرالیا با استفاده از روش جنگل تصادفی، این مدل با خطای بالا همراه بود و نتوانسته مقدار رسوب را به خوبی برآورد کند [۱۶].

۴. بحث و نتیجه‌گیری

به منظور کاهش اثرات ناشی از فرسایش خندقی نیاز است تا مناطق مستعد این نوع فرسایش شناسایی شده و اقداماتی جهت کنترل این نوع فرسایش انجام گیرد. بدین منظور در این تحقیق با استفاده از روش‌های دو متغیره نسبت فراوانی و شاخص آماری و روش‌های چند متغیره رگرسیون لجستیک و جنگل تصادفی اقدام به پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در حوضه آی‌تمر استان گلستان گردید. پس از تهیه نقشه پراکنش خندق‌ها اقدام به تهیه نقشه پراکنش ۱۳ فاکتور مستقل یعنی فاکتورهای، شیب، ارتفاع، جهت شیب، طول-شیب، انحناء صفحه، انحناء پروفیل، فاصله از گسل، فاصله از جاده، تراکم گسل، سازند، کاربری اراضی، شاخص قدرت جریان و شاخص رطوبت توپوگرافی که به نوعی در وقوع فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه نقش دارند، گردید. به منظور آموزش و تخمین پارامترهای روش‌های چند

منطقه مورد مطالعه نداشته است و در تحقیق [۳۰] بافت خاک، تراکم زهکشی و نوع سازند به عنوان مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در تشکیل خندق‌ها تشخیص داده شدند. با توجه به موارد بیان شده می‌توان گفت که در هر منطقه نمی‌توان از قبل مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در وقوع فرسایش خندقی را تعیین کرد. با توجه به فاکتورهای انتخاب شده می‌توان بیان داشت در حوضه آبی‌تمر بین دو عامل مساحت حوضه بالادست و شیب، عامل مساحت حوضه بالادست خندق از اهمیت بیشتری نسبت به شیب هدکت خندق در گسترش خندق‌ها، در منطقه مورد مطالعه دارد. نتایج ارزیابی روش‌های مختلف با استفاده از سه معیار مساحت زیر منحنی ROC، مساحت طبقه با حساسیت خیلی بالا و تعداد سلول در طبقه‌های مختلف حساسیت نشان داد که روش جنگل تصادفی، بهترین عملکرد را به خود اختصاص داده و بعد از این مدل روش رگرسیون لجستیک در مرتبه دوم قرار می‌گیرد. در بین روش‌های دو متغیره از نظر معیار مساحت زیر منحنی ROC بهترین عملکرد مربوط به روش شاخص آماری بود و از نظر معیار مساحت طبقه با حساسیت خیلی بالا بهترین عملکرد مربوط به روش نسبت فراوانی است. در مجموع با توجه به سه معیار مورد بررسی بهترین شاخص آماری عملکرد بهتری نسبت به روش نسبت فراوانی داشت.

(اسپانیا) انحاء کل به عنوان مهمترین پارامترها انتخاب شدند.

در تحقیق [۱۴] در پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی با استفاده از روش درخت تصمیم، پارامتر شیب به عنوان پارامتر مهم شناخته نشد و پارامتر ارتفاع و مساحت حوضه بالادست از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و به عنوان پارامترهای مهم انتخاب شدند. در تحقیق [۳۵] شیب، کاربری اراضی و جهت شیب به عنوان مهم‌ترین پارامترهای مهم در فرسایش خندقی انتخاب شدند. در پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی با استفاده از رگرسیون لجستیک در Sicily ایتالیا عوامل SPI، انحنای صفحه و پروفیل به همراه پارامترهای شیب، TWI، عامل طول شیب، فاصله از جاده و رودخانه، کاربری اراضی، زمین‌شناسی و جهت شیب به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرسایش خندقی انتخاب شدند [۶]. در تحقیق [۱۸] در پهنه‌بندی فرسایش خندقی با استفاده از روش رگرسیون لجستیک و شاخص آماری در Crati River ایتالیا، فاکتورهای نوع سازند، کاربری اراضی، شیب، SPI، TWI، طول شیب و انحناء توسط رگرسیون لجستیک انتخاب شدند. در تحقیق [۹] نیز کاربری اراضی، فاصله از رودخانه و شاخص SPI هم‌بستگی معنی‌داری با وقوع فرسایش خندقی داشته‌اند. این در حالی است که در تحقیق مذکور فاصله از جاده و شاخص TWI هم‌بستگی معنی‌داری با وقوع فرسایش خندقی در

References

- [1] Barbieri, G. and Cambuli, P. (2009). The weight of evidence statistical method in landslide susceptibility mapping of the Rio Pardu valley (Sardinia, Italy). 18 th world IMACS / MODSIM congress, Cairns, Australia, 299, 2658-2664.
- [2] Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wright D.F. (1988). Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. Photogram Eng Remote sensing, 54, 1585-1592.
- [3] Bonham-Carter, G.F. (1994). Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon Press, Ontario.
- [4] Breiman, L. (2000). Some infinity theory for predictor ensembles. Technical Report 579, Statistics Department UCB.

- [5] Can, T., Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H. and Duman, T.Y. (2005). Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. *Geomorphology*, 72, 250-271.
- [6] Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V. and Märker, M. (2014). Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, 204, 399-411.
- [7] Dewitte, O., Daoudi, M., Bosco, C. and Van Den Eeckhaut, M. 2015. Predicting the susceptibility to gully initiation in data-poor regions. *Geomorphology*, 228, 101-115.
- [8] Dietrich, W.E., Wilson, C.J., Montgomery, D.R., McKean, J. and Bauer, R. (1992). Erosion thresh-olds and land surface morphology. *Geology*, 20, 675 -679.
- [9] Dube, F., Nhapi, I., Murwira, A., Gumindoga, W., Goldin, J., Mashauri, D.A. (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.
- [10] Hastie, T., Tibshirani, R. and Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning, Data Mining, Inference, and Prediction*. Second Edition, Springer, Verlag New York.
- [11] Heede, B.H. (1975). Watershed indicators of landform development. In *Hydrology and water resources in Arizona and the Southwest, Volume 5. Proceedings, 1975 Meeting, Arizona Section, American Water Resources Association and Hydrology Section of the Arizona Academy of Science*, 6-43.
- [12] Hosmer, D.W. and Lemeshow, S. 2000. *Applied Logistic Regression*, Second Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- [13] Gomez-Gutierrez, A., Conoscenti, C., Eleonora Angileri, S., Rotigliano, E. and Schnabel, S. (2015). Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two mediterranean basins: advantages and limitations. *Natural Hazards*, 79, 291-314.
- [14] Gomez Gutierrez, A., Schnabel, S. and Felicísimo, A.M. (2009). Modeling the occurrence of gullies in range lands of south west Spain. *Earth Surface Process Landform*, 34, 1894-1902.
- [15]. Istanbuluoglu, E., Tarboton, D.G, Pack, R.T. and Luce, C. 2002. A probabilistic approach for channel initiation. *Water Resour. Res*, 38, 61-14.
- [16] Jurchescu, M. and Grecu, F. (2015). Modelling the occurrence of gullies at two spatial scales in the Oltet drainage basin-Romania. *Nat Hazards*, 79, 255-289.
- [17] Kuhnert, M., Henderson, p., Bartley, A. and Herr, R.A. (2010). Incorporating uncertainty in gully erosion calculations using the random forests modelling approach in Queensland- Australia. *Environmentrics*, 21, 493-509.
- [18] Luca, F., Conforti, M. and Robustilli, G. (2011). Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping multivariate statistics, northern Calabria, south Italy. *Geomorphology*, 134, 297-308.
- [19] Maleki, A., Ahmadi, M. and Miladi, B. (2013). Simulation Gully Prone areas using of SPI method in the Mereg River Watershed. *Journal of Quantitative Geomorphological Researches*, 1(3), 23-38. [Persian]
- [20] Meyer, A. and Martinez-Casasnovas, J.A. (1999). Prediction of existing gully erosion in vineyard parcels of the NE Spain: a logistic modelling approach. *Soil Tillage Research*, 50, 319-331.
- [21] Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. (1988). Where do channels begin? *Nature*, 336, 232-234.
- [22] Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. (1989). Source areas, drainage density, and channel initiation. *Water Resour. Res.* 25, 1907-1918.
- [23] Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. (1994). Landscape dissection and drainage area-slope thresh olds. In: Kirkby, M.J. (Ed.), *Process models and theoretical geomorphology*. Wiley, Chichester, 221-246.
- [24] Nyssen, J., Poesen, J., Veyret-Picot, M., Moeyersons, J., Haile, M., Deckers, J., Dewit, J., Naudts, J., Teka, T. and Govers, G. (2006). Assessment of gully erosion rates through inter-views and measurements: A case study from northern Ethiopia. *Earth Surface Process Landform*, 31, 167-185.
- [25] Parker, T., Page, M.J., Muratani, T. and Trustrum, N. A. (2006). Development and controlling factors of gullies and gully complexes, East Coast, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 187-199.

- [26] Patton, P.C. and Schumm, S.A. (1975). Gully erosion, northwestern Colorado: a threshold phenomenon. *Geology*, 3(2), 88–90.
- [27] Poesen, J. (1993). Gully typology and gully control measures in the European loess belt. In Wicherek, S. (ed.), *Farmland erosion in temperate plains environment and hills*. Elsevier, Amsterdam.
- [28] Poesen, J., Vandekerckhove, L., Nachtergaele, J., Oostewoud Wijdenes, D., Verstraeten, G. and Van Wesemael, B. (2002). Gully erosion in dryland environments. In: L.J. Bull, M.J. Kirkby (Eds.), *Dryland rivers: Hydrology and geomorphology of semi-arid channels*. John Wiley & sons Ltd, West Sussex.
- [29] Pourghasemi, H.R., Mohammady, M. and Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena*, 97, 71-84.
- [30] Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R. and Feizizadeh, B. (2016). Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework. *Science of the Total Environment*, 579, 913-927.
- [30] Saber Chenari, K., Bahremand, A., Berdi Sheikh, V. and Biram Komaki, G. (2016). Gully Erosion Hazard Zoning Using of Dempster-Shafer Model in the Gharnaveh Watershed, Golestan Province. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 3(2), 219-231. [Persian].
- [32] Schumm, S.A. (1979). Geomorphic thresholds: the concept and its applications. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 4, 485–515.
- [33] Seeger, M., Marzloff, I. and Ries, J.B. (2009). Identification of gully-development processes in semi-arid NE-Spain. *Z. Geomorphol*, 53, 417 –431.
- [34] Shadfar, S. (2014). Application of fuzzy logic operators for investigation of Gully erosion using GIS (Case study: Troud watershed basin). *Scientific Research Quarterly of Geographical data*, 92, 35-42. [Persian]
- [35] Svoray, T., Michailov, E., Cohen, A., Rokah, L. and Sturm, A. (2012). Predicting gully initiation: comparing data mining techniques, analytical hierarchy processes and the topo-graphic threshold. *Earth Surf. Process. Landforms*, 37, 607–619.
- [36] UNCCD. (1994). Article 2 of the text of the United Nations convention to Combat Desertification.
- [37] UNCCD. (2013). A Stronger UNCCD for a land-degradation neutral world. Bonn: UNCCD secretariat.
- [38] Valentin, C., Poesen, J. and Li, Y. (2005). Gully erosion impacts, factor and control. *Catena*, 63, 132-153.
- [39] Van Westen, C.J., Rengers, N., Terlien, M.T.J. and Soeters, R. (1997). Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS based hazard zonation. *Geol Rundsch*, 86, 404–414.
- [40] Van Westen, C.J., Van Asch, T.W.J. and Soeters, R. 2006. Landslide hazard and risk zonation why is it still so difficult. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 167 –184.
- [41] Yamani, M., Zamanzadah, S.M. and Ahmadi, M. 2013. Analysis of Factors Affecting the Formation and Development of Gully Erosion: A Case Study of Kahoor Plain in Fars Province. *Geographic Desert Regions*, 1(1), 53-84.

