

## ارزیابی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل ماکزیمم آنتروپی (مطالعه موردی: منطقه شورلوق استان خراسان رضوی)

مریم مهربان<sup>۱</sup>، علی گلکاریان<sup>۲\*</sup>، خه بات خسروی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه فردوسی مشهد maryammehraban808@gmail.com

۲. استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد Golkarian@um.ac.ir

۳. دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ایران. khabat.khosravi@yahoo.com

### چکیده

فرسایش خاک در ایران یکی از مشکلات اساسی به ویژه در بخش های کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست است که پیشگیری یا مبارزه با آن نیازمند شناخت مناطق بحرانی و همچنین شناخت و نقش انواع مختلف فرسایش آبی در تخریب زمین و تولید رسوب است. از میان انواع مختلف فرسایش آبی، فرسایش خندقی یکی از مهم ترین رخداد های موثر در نابودی خاک، تغییر منظر زمین و تخریب منابع آبی است. هدف از تحقیق حاضر ارزیابی حساسیت به فرسایش خندقی و شناسایی عوامل موثر در وقوع فرسایش خندقی منطقه شورلوق می باشد. بدین منظور با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه های توپوگرافی، تصاویر ماهواره ای و بازدید های صحرایی، لایه های اطلاعاتی مورد نیاز شامل نقشه پراکنش خندق ها، و نقشه های ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، ویژگی های خاک (بافت)، شاخص پوشش گیاهی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، تراکم آبراهه، تراکم جاده، شاخص قدرت جریان، شاخص انتقال رسوب، شاخص رطوبت توپوگرافی تهیه گردید. سپس به بررسی رابطه متقابل بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل پرداختیم. با توجه به تعداد نقاط خندقی و در نظر گرفتن همان تعداد نقاط غیر خندقی توسط مدل MAXENT و بررسی ارتباط بین عوامل موجود، براساس درجه اهمیت به ترتیب لیتولوژی و فاصله از رودخانه به عنوان مهم ترین عوامل مشخص شدند و پس از تهیه نقشه پیش بینی نتایج نشان داد که ۶۶/۱۷ درصد از خندق های منطقه در کلاس پرخطر و بسیار پرخطر واقع شده اند. میزان AUC نهایی مدل ماکزیمم آنتروپی برای داده های آموزش ۰/۸۴ و داده های آزمون ۰/۷۹ به دست آمد که نشان دهنده دقت بالای مدل می باشد.

واژه های کلیدی: فرسایش خندقی، ماکزیمم آنتروپی، MAXENT، AUC

## مقدمه

فرسایش خاک در ایران یکی از مشکلات اساسی به‌ویژه در بخش‌های کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست است به طوری که حدود ۱۲۵ میلیون هکتار از ۱۶۵ میلیون هکتار اراضی کشور در معرض فرسایش آبی قرار دارند (رفاهی، ۱۳۸۸). فرسایش خاک به وسیله آب و پیامدهای ناشی از آن، از دیرباز مورد توجه پژوهشگران حفاظت خاک بوده است. از میان انواع مختلف فرسایش آبی فرسایش خندقی یکی از عوامل مهم و تهدیدکننده تعادل منابع زیست محیطی و پایداری آن به شمار می‌رود، به گونه‌ای که این تهدید تنها محدود به ایجاد تغییرات ناهنجار در منظر زمین، تخریب اراضی و از بین رفتن خاک و عدم امکان فعالیت‌های کشاورزی و بهره‌برداری اقتصادی از عرصه‌های منابع طبیعی نمی‌شود، بلکه با رخداد و گسترش این نوع فرسایش، جاری شدن تنداب‌ها و سیل، جابجایی حجم قابل توجهی از رسوبات و پیامدهای ناشی از آن و در نهایت، غیر قابل استفاده شدن اراضی تشدید می‌شوند (قدوسی و همکاران، ۱۳۸۴). افزون بر این و به طور معمول این نوع فرسایش در مناطق خشک و نیمه خشک جهان هنگامی که بهره‌برداری از منابع خاک و آب مبتنی بر اصول صحیح و متناسب با توان‌های طبیعی و شرایط محیطی نباشد اتفاق می‌افتد. (Ezechi, ۱۹۸۹) پیشگیری یا مبارزه با فرسایش آبی نیازمند شناخت مناطق بحرانی و همچنین شناخت و نقش انواع مختلف فرسایش آبی در تخریب زمین و تولید رسوب است. طبق تعریف، خندق، آبراه‌ای است نسبتاً دائمی با دیواره‌های جانبی قائم که جریان‌های موقتی آب از آن می‌گذرد. (Bradford Piest, 1980). با توجه به اینکه فرسایش خندقی غالباً در شیب‌های زیر ۱۵ درصد اتفاق می‌افتد و اراضی واقع در این شیب معمولاً از نظر اقتصادی و اجتماعی برای انسان‌ها بسیار با اهمیت می‌باشند و چون محل گسترش مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی هستند، مطالعه پیرامون این نوع از فرسایش و تعیین میزان هدررفت خاک ناشی از آن از اهمیت بالایی برخوردار است (رستمی زاد و خان بابایی، ۱۳۹۵).

در رابطه با فرسایش خندقی مطالعات زیادی با اهداف و روش‌های مختلف انجام شده است. براساس اهداف، این مطالعات را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد: گروه اول مطالعات مربوط به عوامل مؤثر در ایجاد و رشد خندق‌ها و گروه دوم مربوط به مطالعه رسوب مناطقی است که فرسایش خندقی در آنجا ایجاد می‌شود که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(ذبیحی و همکاران، ۲۰۱۸) به مدلسازی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های آماری دو متغیره مانند نسبت فراوانی<sup>۱</sup> (FR)، وزن دهی شواهد<sup>۲</sup> (WoE) و شاخص آنتروپی<sup>۳</sup> (IoE) در استان مازندران در شمال ایران پرداختند. عوامل مؤثر از جمله ارتفاع، شیب، درجه شیب، طول شیب (LS)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، طرح انحنا، پروفیل انحنا، کاربری، سنگ شناسی، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی و فاصله از جاده برای تهیه نقشه‌های حساسیت به فرسایش خندقی انتخاب شدند. نتایج نشان داد که مدل نسبت فراوانی عملکرد بهتری نسبت به مدل وزن دهی شواهد و شاخص آنتروپی داشت. (اسماعیلی و شوکتی، ۱۳۹۴) به تحلیل حساسیت پذیری فرسایش خندقی با استفاده از روش آماری رگرسیون لجستیک در منطقه صلوات آباد استان کردستان پرداختند. در این پژوهش متغیرهای لیتولوژی، کاربری و پوشش اراضی و توپوگرافی مشتمل بر شیب، جهت دامنه، شکل دامنه، فاکتور طول دامنه، شاخص قدرت جریان و شاخص رطوبت توپوگرافی جهت آنالیز استفاده شد. در این پژوهش شاخص سطح زیر منحنی برابر با ۰/۷۹ بدست آمد که نشان‌دهنده تطبیق خوب مدل، جهت پیش‌بینی نقاط حساس به فرسایش آبکندی خندقی در منطقه می‌باشد. (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۶) با استفاده از داده‌های مبتنی بر GIS و مدل‌های جنگل تصادفی RF و مدل ماکزیمم آنتروپی MAXENT به تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مهران پرداختند. در این پژوهش هردو مدل مورد استفاده در این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار بودند و می‌توانند در تهیه نقشه بالقوه آب‌های زیرزمینی کارآمد باشند. RF و MAXENT مدل‌های مؤثری برای تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی هستند و مدل MAXENT عملکرد پیش‌بینی بهتری نسبت به مدل RF داشت.

در تحقیق حاضر هدف آن است که با توجه به خاصیت تکرار پذیری خندق در مناطق مشابه و با الهام از خصوصیات عرصه‌های فرسایش یافته خندقی با بررسی متغیرهای مؤثر (ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک

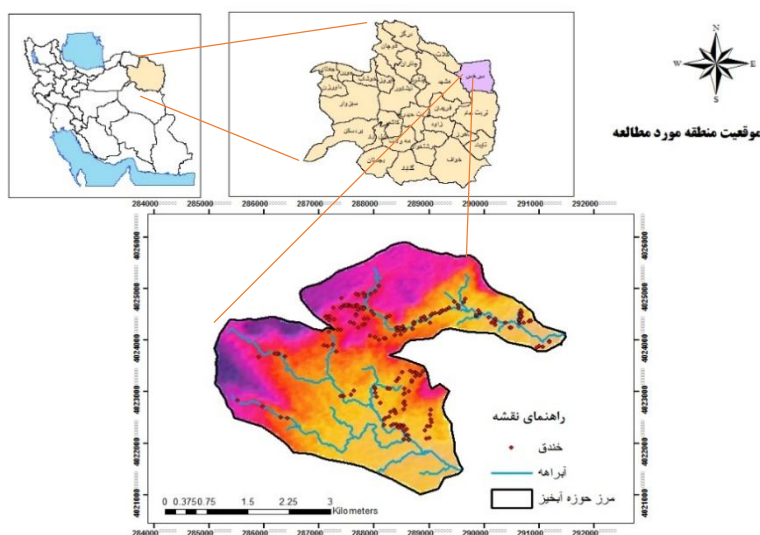
1 Frequency Ratio  
2 Weights of evidence  
3 Index of entropy

(بافت شاخص پوشش گیاهی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، تراکم آبراهه، تراکم جاده، شاخص قدرت جریان، شاخص انتقال رسوب، شاخص رطوبت توپوگرافی) به کمک روش MAXENT اقدام به مکان‌یابی و تعیین خطر پذیری مناطق مستعد به خندق و پیش بینی و تعیین مهم‌ترین عوامل موثر در وقوع فرسایش خندقی شود.

## روش تحقیق

### منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز شورلوق در جنوب شرقی شهرستان سرخس در استان خراسان رضوی و در محدوده حوزه آبخیز اصلی قره قوم در طول جغرافیایی ۲۸۵۰۰۰ تا ۲۹۲۰۰۰ شرقی و عرض جغرافیایی ۴۰۲۱۰۰۰ تا ۴۰۲۶۰۰۰ شمالی گسترده شده است. مساحت حوضه شورلوق ۱۴۸/۹۳ کیلومتر مربع و دارای ارتفاع متوسط ۶۵۰ متر از سطح دریا است. میانگین بارندگی حوضه ۲۳۰ میلی‌متر و بیش‌ترین بارندگی مربوط به اسفند ماه و کمترین بارندگی در مرداد ماه است. رطوبت نسبی منطقه ۵۳ درصد و درجه حرارت متوسط ۱۴/۵ درجه می‌باشد. این حوضه در زون کپه داغ واقع شده که از مجموعه‌ای از واحدهای زمین‌شناسی ژوراسیک تا کرتاسه با ترکیب سنگ‌شناسی متنوع تشکیل یافته است.



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه شورلوق در استان خراسان رضوی

## روش پژوهش

ابتدا نقشه خندق‌های موجود در منطقه شورلوق به عنوان پارامتر وابسته در فرایند آموزش و آزمون از طریق بازدید صحرایی و برداشت میدانی تهیه شد. پس از تهیه این نقشه نقاط خندقی به نسبت ۷۰ به ۳۰ به روش تصادفی سیستماتیک در قالب دو نقشه مجزا جهت فرایند آموزش و آزمون در نظر گرفته شد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که عوامل متعددی در ایجاد و توسعه خندق نقش دارند. برخی از این عوامل که در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرند شامل لیتولوژی، ارتفاع، کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک (بافت)، شیب و جهت شیب، شاخص پوشش گیاهی (SAVI)، طرح انحنا، پروفیل انحنا، شاخص قدرت جریان، شاخص رطوبت توپوگرافی و شاخص حمل رسوب، شاخص جریان تجمعی، تراکم زهکشی، تراکم جاده، فاصله از رودخانه و فاصله از جاده می‌باشد. (Gutierrez, ۲۰۰۹). (Dub, ۲۰۱۴) لیتولوژی از شاخص‌های مهم شکل‌گیری و توسعه فرسایش خندقی است. این لایه اطلاعاتی از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی متعلق به سازمان زمین‌شناسی تهیه و از طریق بازدید میدانی تدقیق شد. نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست ۵ (TM) برای ماه May سال ۲۰۱۰ در نرم افزار ادریسی تهیه و با توجه به وسعت کم منطقه شورلوق فقط سه نوع کاربری (مرتع، دیم‌زار، منطقه مسکونی) مشاهده شد. نقشه ارتفاعی منطقه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی در محیط GIS

کلاسه بندی شد. یکی از عوامل مهم در ایجاد خندق ها شیب زمین می باشد با افزایش شیب سرعت آب زیاد و موجب افزایش سرعت تشکیل خندق می شود و نقشه شیب منطقه پس از کلاسه بندی در محیط GIS تهیه شد (شادفر، ۱۳۹۳). جهت شیب در فرسایش و آبدوی اثر غیر مستقیم دارد که پس از کلاسه بندی نقشه جهت شیب در محیط GIS تهیه شد. به منظور تهیه نقشه فاصله از جاده، جاده ها از روی نقشه توپوگرافی بدست آمده، سپس نقشه مورد نظر به ۸ کلاس با فواصل ۵۰-۰، ۵۰-۱۰۰، ۱۰۰-۲۰۰، ۲۰۰-۴۰۰، ۴۰۰-۶۰۰، ۶۰۰-۸۰۰، ۸۰۰-۱۰۰۰، ۱۰۰۰-۱۲۰۰ تقسیم و به منظور بیان ارتباط بین فرسایش خندقی و فاصله از جاده به کار گرفته شد (شادفر ۱۳۹۳). همچنین به منظور تهیه نقشه فاصله از آبراهه، شبکه آبراهه از روی نقشه توپوگرافی بدست آمده، سپس نقشه مورد نظر به ۷ کلاس با فواصل ۵۰-۰، ۱۰۰-۵۰، ۲۰۰-۱۰۰، ۴۰۰-۲۰۰، ۶۰۰-۴۰۰، ۸۰۰-۶۰۰ و ۱۱۰۰-۸۰۰ تقسیم و به منظور بیان ارتباط بین فرسایش خندقی و فاصله از آبراهه به کار گرفته خواهد شد (شادفر، ۱۳۹۰).

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) یک پارامتر ساده ریاضی از وضعیت رطوبت خاک است. این شاخص گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از حوضه و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین دست توصیف می کند. شاخص رطوبت توپوگرافی که از ترکیب مساحت حوضه بالادست و شیب به دست می آید، معمولاً برای کمی کردن کنترل توپوگرافی بر روی فرآیندهای هیدرولوژیکی می باشد. این شاخص تعیین کننده تأثیر توپوگرافی بر روی میزان سطوح اشباع جهت تولید رواناب است که با استفاده از رابطه شماره ۱ محاسبه می گردد (Luca et al, 2011).

$$TWI = \ln(A_s / \tan \sigma)$$

رابطه ۱

TWI: شاخص رطوبت توپوگرافی،  $A_s$ : مساحت ویژه حوضه (متر)،  $\sigma$ : درجه شیب

شاخص قدرت جریان ( $Spi^a$ ) گویای میزان قدرت فرسایندهای جریان آب است. بر این اساس آنگذری متناسب است با مساحت ویژه حوضه و شیب، که با استفاده از رابطه شماره ۲ به دست می آید (Luca et al, 2011).

$$Spi = (fa * Cell\ size / 22.3)^{0.4} * (\sin \sigma / 0.0896)^{1.3}$$

رابطه ۲

که در آن  $Spi$ : شاخص قدرت جریان،  $fa$ : تجمع جریان،  $\sigma$ : درجه شیب می باشد.

شاخص انتقال رسوب ( $Sti^b$ ) این شاخص حاصل انعکاس قدرت فرسایش و رسوب گذاری خاک در منطقه است. که با استفاده از رابطه شماره ۳ محاسبه می گردد (Moore et al, 1993).

$$Sti = (A_s / 22.13)^{0.6} * (\sin \sigma / 0.0896)^{1.3}$$

رابطه ۳

$Sti$ : شاخص انتقال رسوب،  $A_s$ : مساحت ویژه حوضه (متر)،  $\sigma$ : درجه شیب

برای تهیه نقشه بافت خاک با نمونه برداری از سطح خاک منطقه و بررسی های آزمایشگاهی نقشه بافت منطقه در محیط ARCGIS تهیه شد. پروفیل انحنا و طرح انحنا با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) در محیط GIS تهیه و به سه کلاس محدب، صاف و مقعر کلاسه بندی شدند. شاخص پوشش گیاهی با تنظیم انعکاس خاک ( $SAVI^c$ ) که از اهداف شاخص آن به حداقل رساندن اثرات بازتاب خاک زمینه بر روی اثر بازتاب پوشش گیاهی به وسیله ترکیب کردن فاکتور تنظیم کننده خاک ( $L$ ) با مخرج معادله  $NDVI^d$  می باشد. این شاخص یک شاخص گیاهی عالی برای محیط هایی با پوشش کم می باشد.

- 4 Topographic Wetness Index
- 5 Stream Power Index
- 6 Flow Accumulation
- 7 Sediment Transport Index
- 8 Soil Adjusted Vegetation Index
- 9 Normalized Difference Vegetation Index

$$SAVI = \frac{P_{nir} - P_{red}(1+L)}{P_{nir} + P_{red}}$$

رابطه ۴

L فاکتور تعدیل کننده خاک است که معمولاً به صورت تجربی تعیین می‌گردد. دامنه آن از صفر برای پوشش گیاهی متراکم و ۱ برای پوشش گیاهی با تراکم کمتر می‌باشد (پرویز و همکاران، ۱۳۸۹). تراکم زهکشی نسبت طول کل آبراهه‌ها به مساحت حوزه آبریز است. هرچه تراکم زهکش‌ها بیشتر باشد، سرعت جریان‌های سطحی افزایش می‌یابد. نقشه تراکم شبکه زهکشی با استفاده از نقشه آبراهه منطقه در محیط GIS تهیه شد. (Yalcin, ۲۰۰۸) تراکم جاده نسبت طول کل جاده‌ها به مساحت حوزه آبخیز است. نقشه تراکم جاده منطقه در محیط GIS تهیه و کلاسه بندی شد.

### روش ماکزیمم آنتروپی (Maxent)

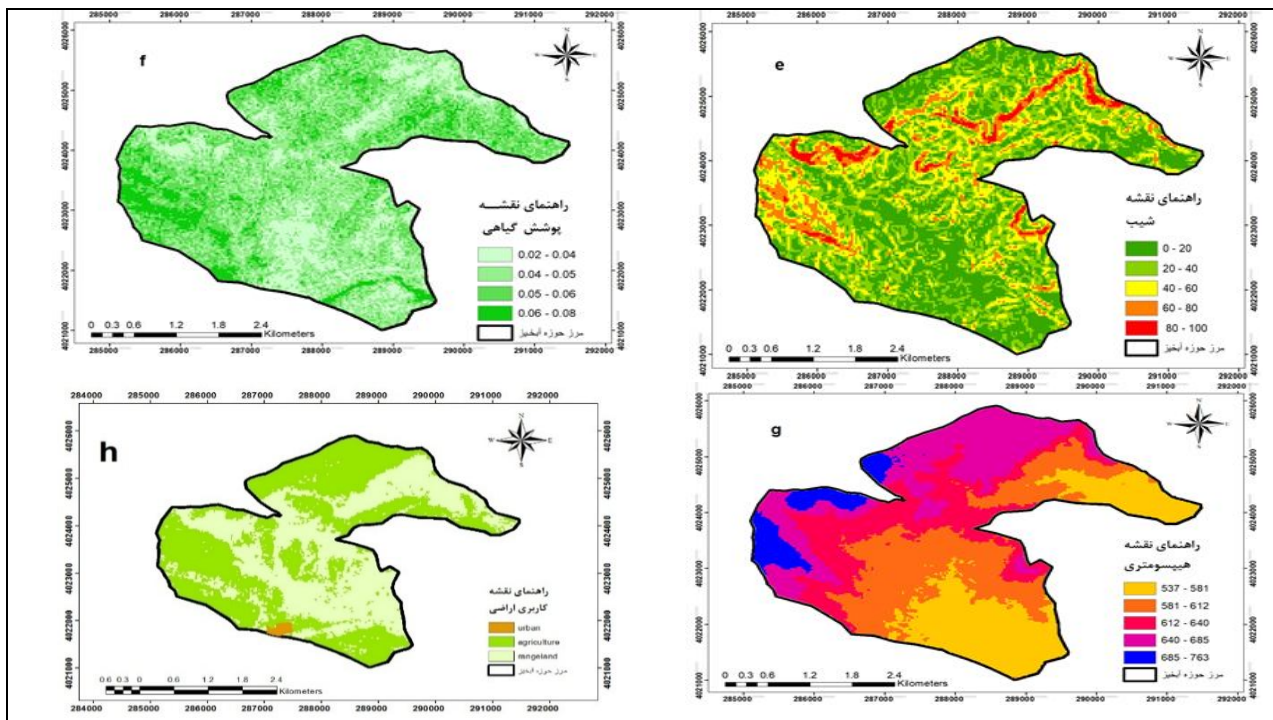
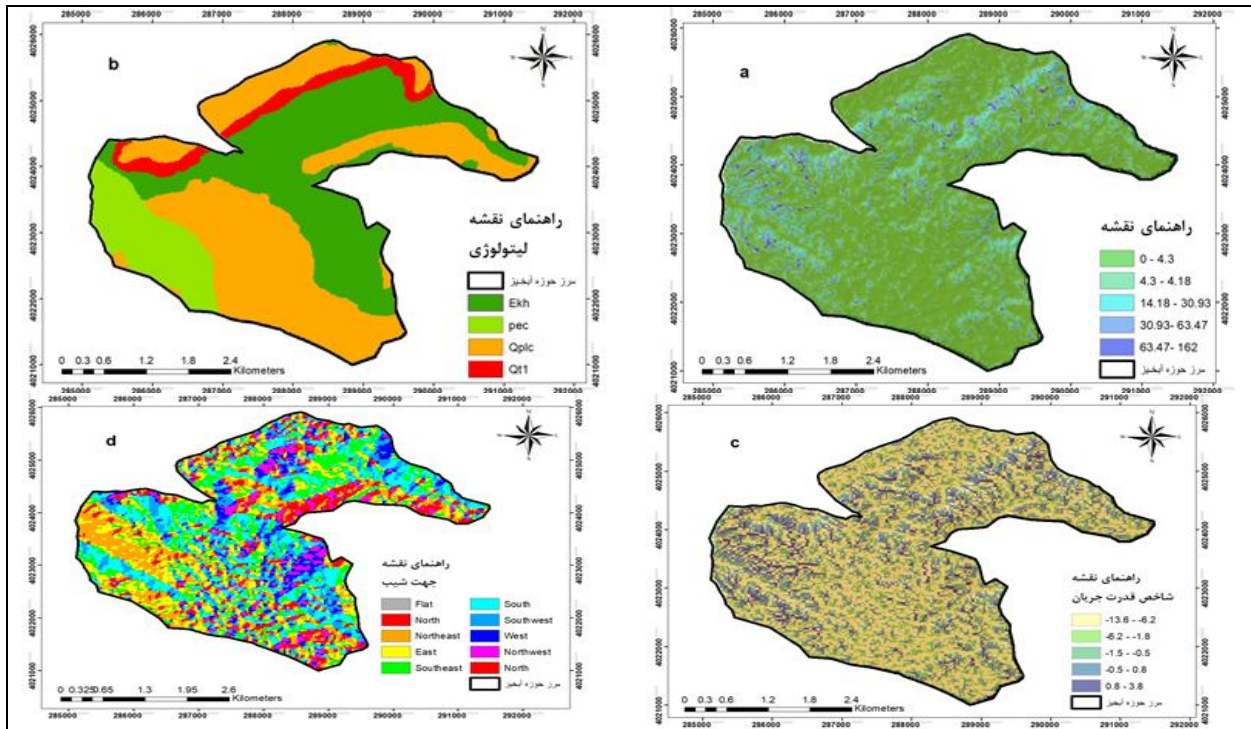
Maxent یکی از الگوریتم‌های بسیار رایج یادگیری ماشینی است. اصل Maxent به حداکثر آنتروپی یا نزدیک به واقعیت بر می‌گردد. ماکزیمم آنتروپی یا حداکثر آشفتگی نام قانون دوم ترمودینامیک است، که آن را به نام قانون افزایش آشفتگی می‌شناسند. اصل ماکزیمم آنتروپی بیان می‌دارد که در تخمین یک توزیع نامعلوم توزیعی نزدیک به واقعیت است که دارای حداکثر آشفتگی است. (Philips و همکاران، ۲۰۰۶) مدل حداکثر آنتروپی را به طور خاص برای مدل‌سازی محیط زیست و ارزیابی توزیع گونه‌ها، زمانی که تنها داده‌های حضور برای مدل‌سازی موجود است طراحی کردند. مدل حداکثر آنتروپی (ME) نسبت به خطاهای مکانی در داده‌های حضور قوی‌تر است و برای پیش‌بینی تناسب زیستگاه و یا احتمال وقوع پدیده فقط مجموعه داده حضور استفاده می‌شود. مدل ME نوعی ماشین یادگیری است که باعث می‌شود پیش‌بینی‌های مکانی از داده‌های غیر کافی بدست آید. برای تهیه نقشه پتانسیل خندق‌ها مدل با توزیع یکنواخت شروع می‌شود و تعدادی تکرار براساس عوامل مهم جغرافیایی محیط زیستی انجام می‌دهد تا زمانی که دیگر هیچ بهبود بیشتری در پیش‌بینی مکانی صورت نگیرد.

### تجزیه و تحلیل مکانی حساسیت به فرسایش خندقی و تهیه نقشه پیش‌بینی فرسایش خندقی

اجرای مدل ME برای مدل‌سازی حساسیت به فرسایش خندقی و تهیه نقشه نهایی پیش‌بینی فرسایش خندقی با استفاده از نرم‌افزار MAXENT صورت می‌گیرد. در این پژوهش ۷۰ درصد نقاط خندقی به صورت تصادفی با استفاده از الگوریتم انتخاب تصادفی برای آموزش مدل در فاز کالیبراسیون انتخاب می‌شوند. مدل ME یک تکنیک ماشین یادگیری عامه پسند است که امکان بررسی رابطه متقابل بین متغیر وابسته و چندین متغیر مستقل را فراهم می‌کند که در این پژوهش این متغیرها به ترتیب حضور نقاط خندقی و ۱۷ ویژگی موثر در وقوع خندق‌ها هستند. با توجه به تعداد نقاط حضور خندقی و در نظر گرفتن همان تعداد نقاط غیر خندقی توسط مدل MAXENT و بررسی ارتباط بین عوامل موجود، مهم‌ترین عوامل در تشکیل فرسایش خندقی بر اساس درجه اهمیت تعیین شده و نقشه پیش‌بینی نقاط خندقی تهیه می‌شود. در این روش برای هر پیکسل یک مقدار حضور تعلق می‌گیرد. سپس با استفاده از ۳۰ درصد نقاط آزمون که توسط نرم‌افزار کنار گذاشته شده، اقدام به بررسی صحت مدل می‌کند. صحت پیش‌بینی مدل با استفاده از منحنی ROC مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش سطح زیرمنحنی ROC می‌تواند کیفیت صحت پیش‌بینی را آزمون کند. در این پژوهش برای ارزیابی عدم قطعیت پیش‌بینی پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از آزمون جک نایف به بررسی اثرات حذف هریک از عوامل مربوطه بر روی نقشه مربوطه انجام شد. از سوی دیگر آزمون جک نایف می‌تواند برای دسترسی به سهم عوامل در مدل‌سازی در نظر گرفته شود.

### نتایج

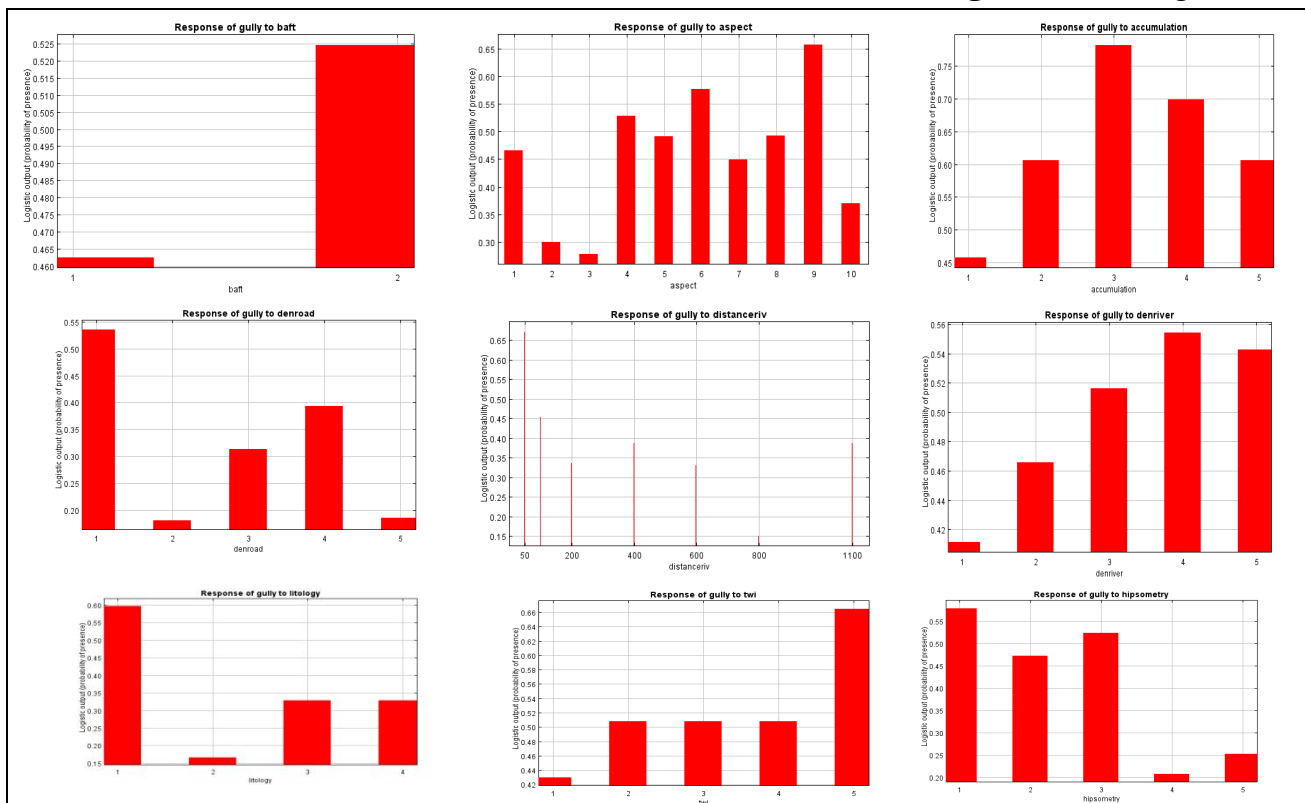
براساس بازدیدهای میدانی از منطقه شورولق و برداشت موقعیت ۲۲۰ نقطه به عنوان فرسایش خندقی و شناسایی عوامل موثر در وقوع فرسایش خندقی منطقه، در محیط نرم‌افزار ARC GIS اقدام به تهیه لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل موثر در وقوع فرسایش خندقی گردید که در شکل ۲ نشان داده شده است.

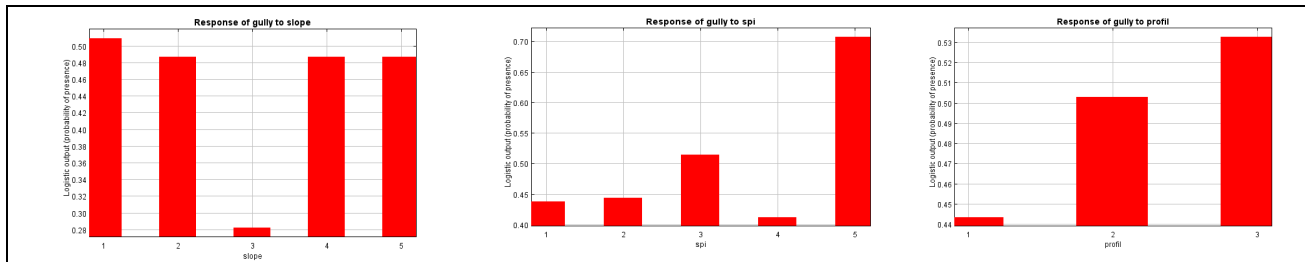


جدول ۱. درصد سهم نسبی هریک از متغیرها در مدل سازی فرسایش خندقی به روش ماکزیمم آنترپی

درصد سهم	نام اختصاری	متغیر
۲۱/۵	Distance of river	فاصله از آبراهه
۲۱/۲	Litology	سنگ شناسی
۹/۳	Hypsometry	ارتفاع
۸/۹	Silt	میزان سیلت
۸/۱	Land use	کاربری اراضی
۷/۳	Aspect	جهت شیب
۶/۷	Density road	تراکم جاده
۵/۹	Spi	شاخص انتقال جریان
۴/۷	Distance of road	فاصله از جاده
۱/۴	Savi	شاخص پوشش گیاهی
۱/۴	Slope	شیب
۱	Twi	شاخص رطوبت توپوگرافی
۰/۹	Texture	بافت خاک
۰/۹	Plan	طرح انحنای
۰/۵	Density river	تراکم رودخانه
۰/۳	Sti	شاخص انتقال رسوب
۰/۱	Accumulation	جهت جریان تجمع
۰	Profil	پروفیل انحنای

شکل ۳ منحنی پاسخ برای هریک از عوامل موثر بر وقوع فرسایش خندقی در منطقه شورلوک و تاثیر هر کدام از عوامل به تنهایی در وقوع فرسایش را نشان می‌دهد.



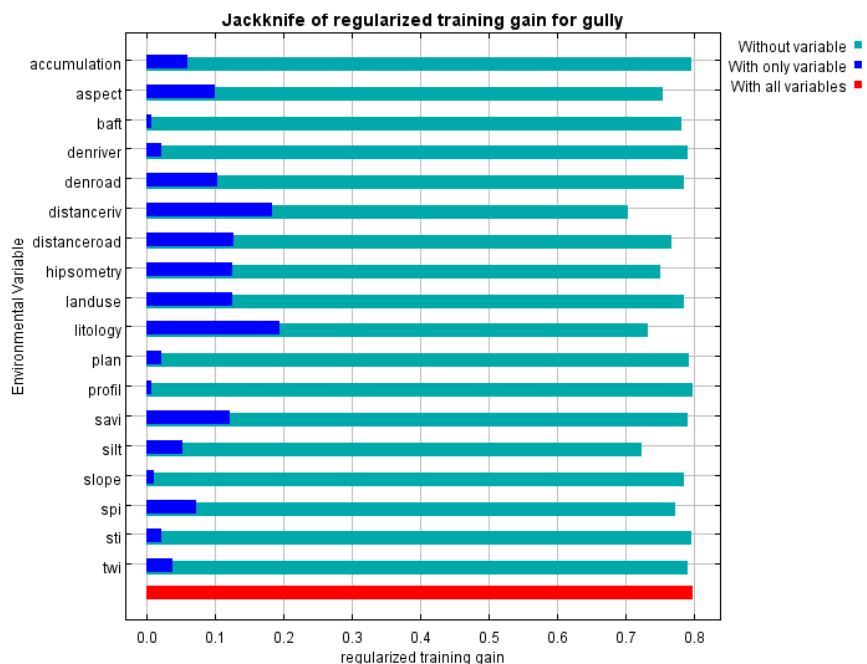


شکل ۳. منحنی پاسخ هریک از عوامل موثر بر وقوع فرسایش خندقی

نتایج بررسی منحنی‌های پاسخ در مدل ماکزیمم آنتروپی نشان می‌دهد که در معیار شیب خندق‌ها بیشتر در طبقه ۲۰ - ۰ درصد واقع شده‌اند. رواناب در شیب‌های پایین فرصت تمرکز و نفوذ بیشتری دارد و احتمال خندقی شدن بیشتر است. تحلیل منحنی پاسخ مرتبط با فاکتور جهت شیب نشان می‌دهد که از میان جهات شیب بیشترین خندق‌های اتفاق افتاده در جهت شیب غرب و شمال غربی رخ داده‌اند. بررسی‌ها نشان داده است که جهت شیب نقش مستقیم روی رواناب و فرسایش ندارد. نقش اصلی آن در میزان رواناب و ایجاد فرسایش، به سبب تفاوت در میکروکلیمای موجود در طبقات مختلف شیب است. هم‌چنین با توجه به طبقات ارتفاعی بیشترین تاثیر را کلاس‌های ۱ تا ۳ داشته که با افزایش ارتفاع میزان فرسایش خندقی کاسته شده و از نظر شرایط لیتولوژیکی بیشترین خندق‌ها در جنس سنگ شیل و آهک واقع شده‌اند.

بررسی کاربری اراضی منطقه نشان دهنده آن است که بیشترین خندق‌ها در مراتع و دیم‌زارها اتفاق افتاده‌اند که دلیل آن را می‌توان به نقش انسان در اکوسیستم منطقه و تخریب‌هایی که به واسطه تغییر کاربری اعمال کرده است نسبت داد. در معیار بافت خاک منطقه، بیشترین خندق‌ها در بافت خاک لومی رسی با درصد سیلت ۳۰ درصد رخ داده‌اند. دامنه‌های مشرف به آبراهه، تعادل این دامنه‌ها برهم می‌خورد و حساسیت به ایجاد فرسایش خندقی در کنار آبراهه‌ها افزایش می‌یابد. هم‌چنین در ارتباط با فاکتور فاصله از جاده، خندق‌ها در جاده‌های با فاصله بیشتر از ۲۰۰ متر واقع شده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد مناطق مشرف به جاده پایداری بیشتری نسبت به دیگر طبقات فاصله از جاده دارند و هرچه تراکم جاده کمتر باشد میزان خندق رخ داده بیشتر است و در مورد تراکم آبراهه بالعکس می‌باشد. در تحلیل پیکسل‌های خندق‌دار مرتبط با پروفیل و انحنای طرح رودخانه قسمت‌هایی که مورفولوژی مقعر دارند بیشترین حساسیت به خندق را دارا هستند. مورفولوژی مقعر با تمرکز جریان آب و رطوبت می‌تواند مناطق مستعدی برای ایجاد فرسایش خندقی باشد. هم‌چنین هرچه رطوبت و قدرت جریان بیشتر باشد خندق‌های بیشتری رخ می‌دهد و در رابطه با میزان رسوب حمل شده در صورتی که این شاخص به مقدار کمتر تا متوسط باشد، با این موضوع مطابقت دارد.





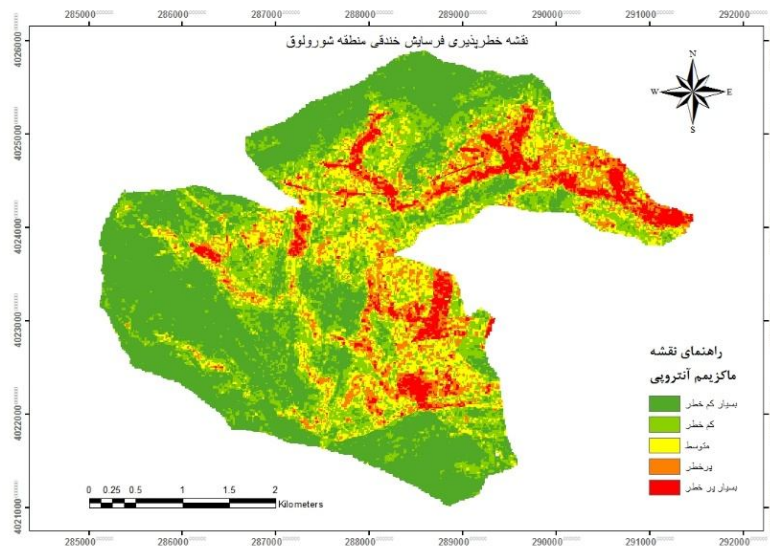
شکل ۴. آزمون جک نایف برای بررسی اهمیت هر کدام از متغیرهای محیطی در پتانسیل سنجی فرسایش خندقی در منطقه شورلوق

این منحنی شامل دستیابی به افزوده در سه حالت مختلف است. لیتولوژی متغیری است که با حذف آن بیشترین کاهش در افزوده اتفاق می افتد. حالت دوم مربوط به زمانی است که مدل سازی تنها براساس یک متغیر انجام می شود و براساس آن میزان افزوده برآورد می گردد. در این حالت نیز مهم ترین متغیر برای وقوع پتانسیل فرسایش خندقی لیتولوژی و فاصله از آبراهه می باشد. از نقطه نظر تاثیر نوع لیتولوژی در ایجاد فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه بررسی ها نشان داد که نوع لیتولوژی تاثیر معنی داری در ایجاد خندق ها داشته است. بطوری که نوع لیتولوژی شیل و آهک توانسته بیشترین اثرگذاری را در ایجاد خندق ها از خود نشان دهد. علت را می توان در حساسیت بسیار بالای این سازند و این نوع لیتولوژی به فرآیند فرسایش خاک بویژه فرسایش انحلالی دانست. بطوری که این اراضی بدلیل ضخامت لایه و دانه ریز بودن شرایط را جهت ایجاد و توسعه خندق ها در حوزه شورلوق فراهم نموده است. همچنین در ارتباط با فاکتور فاصله از آبراهه دامنه های مشرف به آبراهه تعادل این دامنه ها بهم میخورد و حساسیت به ایجاد فرسایش خندقی افزایش می یابد.

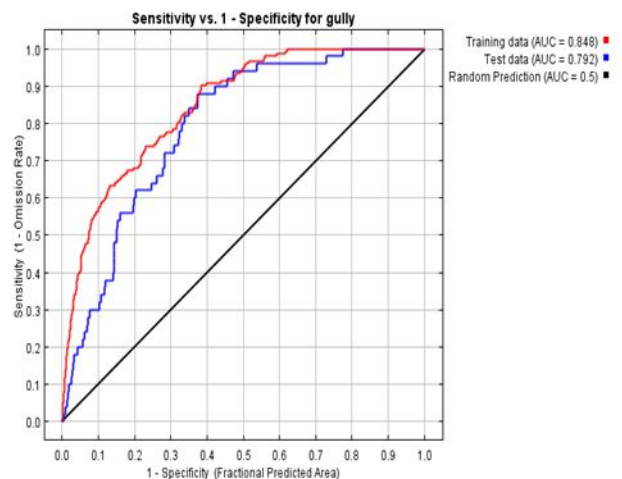
در نهایت نقشه پتانسیل خطرپذیری فرسایش خندقی پس از کلاسه بندی در محیط GIS تهیه شده در شکل ۵ و نتایج صحت سنجی در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۲. مساحت و درصد طبقات خطر فرسایش خندقی در حوزه شورلوق با استفاده از روش ماکزیمم آنتروپی

طبقه بندی خطر	کل مساحت	مساحت (درصد)	خندق (درصد)
بسیار کم خطر	۲۷۷۴۸۱	۴۵/۶۶	۵/۴۰
کم خطر	۱۳۹۶۶۶	۲۲/۹۸	۹/۰۹
متوسط	۹۴۵۸۳	۱۵/۵۶	۱۷/۲۷
پرخطر	۶۱۸۷۷	۱۰/۱۸	۲۴/۸۱
بسیار پرخطر	۳۴۰۱۸	۵/۵۹	۴۱/۳۶



شکل ۵. نقشه پتانسیل سنجی فرسایش خندقی با استفاده از روش ماکزیمم آنتروپی در منطقه شورلولوق



شکل ۶. منحنی roc داده‌های train, test

### بحث و نتیجه گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی و خطرپذیری فرسایش خندقی در منطقه شورلولوق صورت گرفت. پس از تهیه شاخص‌های موثر در محیط GIS و بررسی رابطه متقابل بین متغیر وابسته و چندین متغیر مستقل که در این پژوهش این متغیرها به ترتیب ۲۲۰ نقطه حضور خندق و ویژگی موثر در وقوع خندق‌ها هستند. با توجه به تعداد نقاط حضور خندقی و در نظر گرفتن همان تعداد نقاط غیر خندقی توسط مدل MAXENT و بررسی ارتباط بین عوامل موجود، مهم‌ترین عوامل در تشکیل فرسایش خندقی بر اساس درجه اهمیت به ترتیب لیتولوژی و فاصله از رودخانه مشخص شدند و پس از تهیه نقشه پیش‌بینی فرسایش خندقی و کلاس بندی به صورت بسیار کم خطر، کم خطر، متوسط، پرخطر، بسیار پرخطر بر اساس نتایج بدست آمده نشان داد که ۶۶/۱۷ درصد از خندق‌های منطقه در کلاس پرخطر و بسیار پرخطر واقع شده‌اند. میزان AUC نهایی مدل ماکزیمم آنتروپی برای داده‌های آموزش ۰/۸۴ و داده‌های آزمون ۰/۷۹ می باشد که نشان دهنده دقت بالای مدل است. نتایج این پژوهش در زمینه تاثیر مهم‌ترین عوامل در وقوع فرسایش خندقی با

نتایج تحقیقات (هادیان امری و جعفری گرزین، ۱۳۸۴). (بیاتی خطیبی، ۲۰۱۱) و (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۵) مطابقت دارد.

## منابع

- اسماعیلی، رضا، شوکتی، روناک، ۱۳۹۴، ارزیابی حساسیت‌پذیری به فرسایش خندقی با استفاده از رگرسیون لجستیک در حوزه صلوات آباد استان کردستان، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، تابستان ۱۳۹۴، دوره ۵، شماره ۲۰، ۱۰۴-۹۱
- پرویز، لاله، خلقی، مجید، ولیزاده، خلیل، عراقی نژاد، شهاب، ایران نژاد، پرویز، ۱۳۸۹، ارزیابی کارایی شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی NDVI از طریق پایش وضعیت پوشش گیاهی، همایش ملی ژئوماتیک، اردیبهشت ۱۳۸۹.
- رستمی‌زاد، ق، خان بابایی، ز، ۱۳۹۵، ارزیابی تاثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر گسترش فرسایش آب‌کندی (مطالعه موردی: شهرستان دره شهر). مجله محیط زیست و مهندسی آب. ۲(۴): ۳۷۶-۳۸۹.
- رفاهی، ح، ق، ۱۳۸۸، فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران، تهران،
- شادفر، صمد، ۱۳۹۳، کاربرد منطق فازی در پهنه بندی فرسایش خندقی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) حوضه طرود. فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر). زمستان ۱۳۹۳، دوره ۲۳، شماره ۹۲
- شادفر، صمد، عباسی، محمد، نمکی، محمد، ۱۳۹۰، بررسی نقش عوامل کاربری اراضی و جهت شیب بر فرسایش خندقی با استفاده از GIS در حوضه راهجرد، استان قم. پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک. اسفندماه ۱۳۹۰. کرمان
- قدوسی، ج، داوری، م، ۱۳۸۴، بررسی تاثیر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک در وقوع فرسایش آب‌کندی استان قم. کنفرانس ملی فرسایش و رسوب، ۹ تا ۱۳ شهریور. مرکز حفاظت خاک و آبخیزداری ایران. تهران.
- ابراهیمی، محمد، جوادی، مریم، وفاخواه، محمدرضا، ۱۳۹۵، تعیین عوامل موثر در رخداد فرسایش خندق پنجاهی در حوزه آبخیز آق امام، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، بهمن - اسفند ۱۳۹۵، جلد ۳۰، شماره ۶، ص ۱۹۹۹-۱۹۷۸
- هادیان امری، محمدعلی، جعفری گرزین، بهنوش، ۱۳۸۴، تعیین عوامل موثر در ایجاد فرسایش خندقی با استفاده از GIS در حوزه آبخیز سرخ آباد مازندران، چهارمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، ۱۳۸۴.
- Bayati Khatibi M., Rajabi M., and Karami F. 2011. Investigation of topographic thresholds and analyzing role of surface materials on gully development in the hill slope of semi arid areas (Case study: Shoorchay). *Geography and Environmental Planning Journal*, 41(1):15-34.
- Bradford, J. and R. piest, 1980; Erosional development of valley bottom gullies in the upper Midwestern united states, In: coates, D.R., Vited, J.D., Geomorphic th resholds, Dowden and culver, Stroudsburg a., Pennsylvania, pp.75-11
- Dube F, Nhapi I, Murwira A, Gumindoga W, Goldin J, Mashauri DA. (2014). Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District-Zimbabwe. *Physics and chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2014. Vol 67, 145-152
- Ezechi, J.I and C.O. Okagbue (1989), a genetic classification of gullies in eastern Nigeri and its implications on control measures. *Journal of African Earth Sciences*, 9, p p 711-718
- Gutiérrez, Alvaro Gomez, Schnabel, Susanne, and Contador, J.Francisco lavado. (2009) . Using and comparing two nonparametric methods (CART and MARS) to Model the potential distribution of gullies. *Ecological Modelling*. 2009. Vol 220 3630-3637
- Lucà, Federica , Conforti, Massimo and Robustelli, Gaetano. 2011. Comparison of GIS-based gullying susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134 (3): 297-308
- Moore, I. D., Gessler, P. E., Nielsen, G. A. and Peterson, G. A. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 57(2): 443-452
- Phillips, S.J., Anderson, R.P, Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Melesse, A. M (2016). Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: a case study at Mehran Region, Iran. *Catena*, 137, 360-372

- Yalcin, Ali, (2008). GIS based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations .CATENA.2008. Vol 72 .1jan. 1-12
- Zabihi, Mohsen, Mirchooli, Fahime, Motevalli, Alireza, Darvishan, Abdolvahed. Pourghasemi, Hamidreza. Zakeri, Mohamad Ali, and Sadighi, Fatemeh. (2018). Spatial modelling of gully erosion in Mazandaran Province, northern Iran. CATENA, 161, 1-13.