

## 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 به‌ویژه در بخش‌های 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 مهم‌ترین رخدادها 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 می‌باشد. بدین‌منظور با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای صحرائی، لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز شامل نقشه پراکنش خندق‌ها، و نقشه‌های ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، ویژگی‌های 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 مهم‌ترین عوامل مشخص شدند و پس از تهیه نقشه پیش‌بینی نتایج 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 به‌دست آمد که نشان دهنده دقت بالای مدل می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش خندقی، ماکزیمم آنتروپی، MAXENT، AUC

## مقدمه

فرسایش خاک در ایران یکی از مشکلات اساسی به ویژه در بخش های 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 می رود، به گونه ای که این تهدید تنها محدود به ایجاد تغییرات ناپهناجر در منظر زمین، تخریب اراضی و از بین رفتن خاک و عدم امکان فعالیت های کشاورزی و بهره برداری اقتصادی از عرصه های منابع طبیعی نمی شود، بلکه با رخداد و گسترش این نوع فرسایش، جاری شدن تنداب ها و سیل، جابجایی حجم قابل توجهی از رسوبات و پیامدهای ناشی از آن و در نهایت، غیر قابل استفاده شدن اراضی تشدید می شوند (قدوسی و همکاران، ۱۳۸۴). افزون بر این و به طور معمول این نوع فرسایش در مناطق خشک و نیمه خشک جهان هنگامی که بهره برداری از منابع خاک و آب مبتنی بر اصول صحیح و متناسب با توان های طبیعی و شرایط محیطی نباشد اتفاق می افتد (Ezechi, 1989). 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، آبراهه ای است نسبتاً دائمی با دیواره های جانبی قائم که جریان های موقتی آب از آن می گذرد (Bradford & Piest, 1980). با توجه به اینکه فرسایش خندقی غالباً در شیب های زیر ۱۵ درصد اتفاق می افتد و اراضی واقع در این شیب معمولاً از نظر اقتصادی و اجتماعی برای انسان ها بسیار با اهمیت می باشند 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 روش های مختلف انجام شده است. براساس اهداف، این مطالعات را می توان به دو گروه تقسیم کرد: گروه اول مطالعات مربوط به عوامل مؤثر در ایجاد و رشد خندق ها و گروه دوم مربوط به مطالعه رسوب مناطقی است که فرسایش خندقی در آنجا ایجاد می شود که می توان به موارد زیر اشاره کرد:

ذبیحی و همکاران (۲۰۱۸) به مدلسازی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های 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 انحنای، پروفیل انحنای، کاربری، سنگ شناسی، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی و فاصله از جاده برای تهیه نقشه های 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 نشان دهنده تطبیق خوب مدل، جهت پیش بینی نقاط حساس به فرسایش آبکندی خندقی در منطقه می باشد. رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از داده های مبتنی بر GIS و مدل های جنگل تصادفی RF و مدل ماکزیمم آنتروپی MAXENT به تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مهران پرداختند. در این پژوهش هر دو مدل مورد استفاده در این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار بودند و می توانند در تهیه نقشه بالقوه آب های زیرزمینی کارآمد باشند. RF و MAXENT مدل های مؤثری برای تهیه نقشه پتانسیل آب های زیرزمینی هستند و مدل MAXENT عملکرد پیش بینی بهتری نسبت به مدل RF داشت.

<sup>1</sup> Frequency Ratio

<sup>2</sup> Weights of evidence

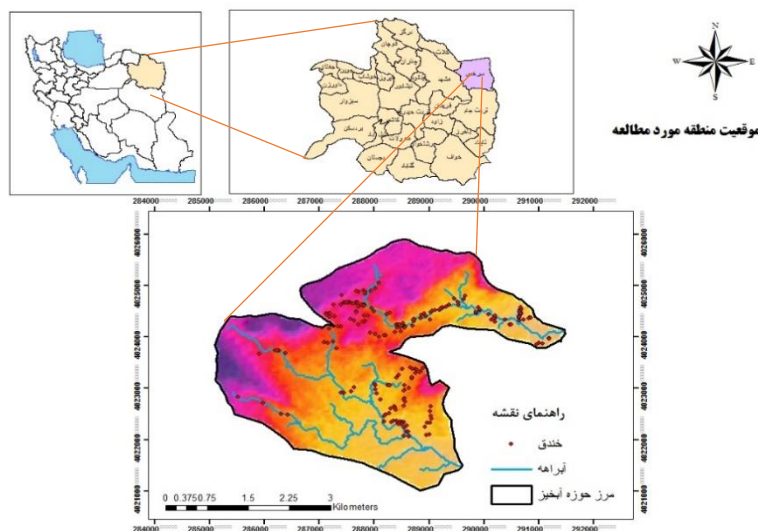
<sup>3</sup> Index of entropy

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 موثر (ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک (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 حوزه شورلوق ۱۴۸/۹۳ کیلومتر مربع و دارای ارتفاع متوسط ۶۵۰ متر از سطح دریا است. میانگین بارندگی حوزه 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 حوزه 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 خندق های 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، ویژگی های 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 (Dub et al, 2014 & Gutierrez et al, 2009). 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 5 (TM) برای ماه May سال ۲۰۱۰ در نرم افزار ادریسی تهیه و باتوجه به وسعت کم منطقه شورولق 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 خندق‌ها شیب زمین می‌باشد با افزایش شیب سرعت آب زیاد و موجب افزایش سرعت تشکیل خندق می‌شود و نقشه شیب منطقه پس از کلاسه‌بندی در محیط GIS تهیه شد (شادفر، ۱۳۹۳). جهت شیب در فرسایش و آبدوی اثر غیر مستقیم دارد که پس از کلاسه‌بندی نقشه جهت شیب در محیط GIS تهیه شد. به منظور تهیه نقشه فاصله از جاده، جاده‌ها 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، ۵۰-۱۰۰، ۱۰۰-۲۰۰، ۲۰۰-۴۰۰، ۴۰۰-۶۰۰، ۶۰۰-۸۰۰ و ۸۰۰-۱۱۰۰ تقسیم و به منظور بیان ارتباط بین فرسایش خندقی و فاصله از آبراهه به کار گرفته خواهد شد (شادفر، ۱۳۹۰).

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI<sup>4</sup>) 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 می‌کند. شاخص رطوبت توپوگرافی که از ترکیب مساحت حوضه بالادست و شیب به دست می‌آید، معمولاً برای کمی کردن کنترل توپوگرافی بر روی فرآیندهای هیدرولوژیکی می‌باشد. این شاخص تعیین‌کننده تأثیر توپوگرافی بر روی میزان سطوح اشباع جهت تولید رواناب است که با استفاده از رابطه شماره ۱ محاسبه می‌گردد (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 ( $Spi^5$ ) گویای میزان قدرت فرسایندهای جریان آب است. بر این اساس آبگذری متناسب است با مساحت ویژه حوضه و شیب، که با استفاده از رابطه شماره ۲ به دست می‌آید (Luca et al, 2011).

$$Spi = (f a^6 * Cell\ size / 22.3)^{0.4} * (\sin \sigma / 0.0896)^{1.3}$$

رابطه ۲

که در آن  $Spi$ : شاخص قدرت جریان،  $f a^6$ : تجمع جریان،  $\sigma$ : درجه شیب می‌باشد.

شاخص انتقال رسوب ( $Sti^7$ ) این شاخص حاصل انعکاس قدرت فرسایش و رسوب‌گذاری خاک در منطقه است. که با استفاده از

<sup>4</sup> Topographic Wetness Index

<sup>5</sup> Stream Power Index

<sup>6</sup> Flow Accumulation

<sup>7</sup> Sediment Transport Index

رابطه شماره ۳ محاسبه می گردد (Moore et al, 1993).

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

رابطه ۳

Sti : شاخص انتقال رسوب ، As : 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 رقمی ارتفاعی (DEM) در محیط GIS تهیه و به سه کلاس محدب، صاف و مقعر کلاس بندی شدند. شاخص پوشش گیاهی با تنظیم انعکاس خاک<sup>8</sup> (SAVI) 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<sup>9</sup> می باشد. این شاخص یک شاخص گیاهی عالی برای محیط هایی با پوشش کم می باشد.

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

رابطه ۴

L فاکتور تعدیل کننده خاک است که معمولا به صورت تجربی تعیین می گردد. دامنه آن از صفر برای پوشش گیاهی متراکم و ۱ برای پوشش گیاهی با تراکم کمتر می باشد (پرویز و همکاران، ۱۳۸۹). تراکم زهکشی نسبت طول کل آبراهه ها به مساحت حوزه آبریز است. هرچه تراکم زهکش ها بیشتر باشد، سرعت جریان های سطحی افزایش می یابد. نقشه تراکم شبکه زهکشی با استفاده از نقشه آبراهه منطقه در محیط GIS تهیه شد (Yalcin, 2008). تراکم جاده نسبت طول کل جاده ها به مساحت حوزه آبخیز است. نقشه تراکم جاده منطقه در محیط GIS تهیه و کلاسه بندی شد.

### روش ماکزیمم آنتروپی (Maxent)

Maxent یکی از الگوریتم های بسیار رایج یادگیری ماشینی است. اصل Maxent به حداکثر آنتروپی یا نزدیک به واقعیت بر می گردد. ماکزیمم آنتروپی یا حداکثر آشفتگی نام قانون دوم ترمودینامیک است، که آن را به نام قانون افزایش آشفتگی می شناسند. اصل ماکزیمم آنتروپی بیان می دارد که در تخمین یک توزیع نامعلوم توزیعی نزدیک به واقعیت است که دارای حداکثر آشفتگی است. (Philips و همکاران، 2006) مدل حداکثر آنتروپی را به طور خاص برای مدل سازی محیط زیست و ارزیابی توزیع گونه ها، زمانی که تنها داده های حضور برای مدل سازی موجود است طراحی کردند. مدل حداکثر آنتروپی (ME) نسبت به خطاهای مکانی در داده های حضور قوی تر است و برای پیش بینی تناسب زیستگاه و یا احتمال وقوع پدیده فقط مجموعه داده حضور استفاده می شود. مدل ME نوعی ماشین یادگیری است که باعث می شود پیش بینی های مکانی از داده های غیر کافی بدست آید. برای تهیه نقشه پتانسیل خندق ها مدل با توزیع یکنواخت شروع می شود و تعدادی تکرار براساس عوامل مهم جغرافیایی محیط زیستی انجام می دهد تا زمانی که دیگر هیچ بهبود بیشتری در پیش بینی مکانی صورت نگیرد.

### تجزیه و تحلیل مکانی حساسیت به فرسایش خندقی و تهیه نقشه پیش بینی فرسایش خندقی

اجرای مدل ME برای مدل سازی حساسیت به فرسایش خندقی و تهیه نقشه نهایی پیش بینی فرسایش خندقی با استفاده از نرم افزار MAXENT صورت می گیرد. در این پژوهش ۷۰ درصد نقاط خندقی به صورت تصادفی با استفاده از الگوریتم انتخاب تصادفی برای

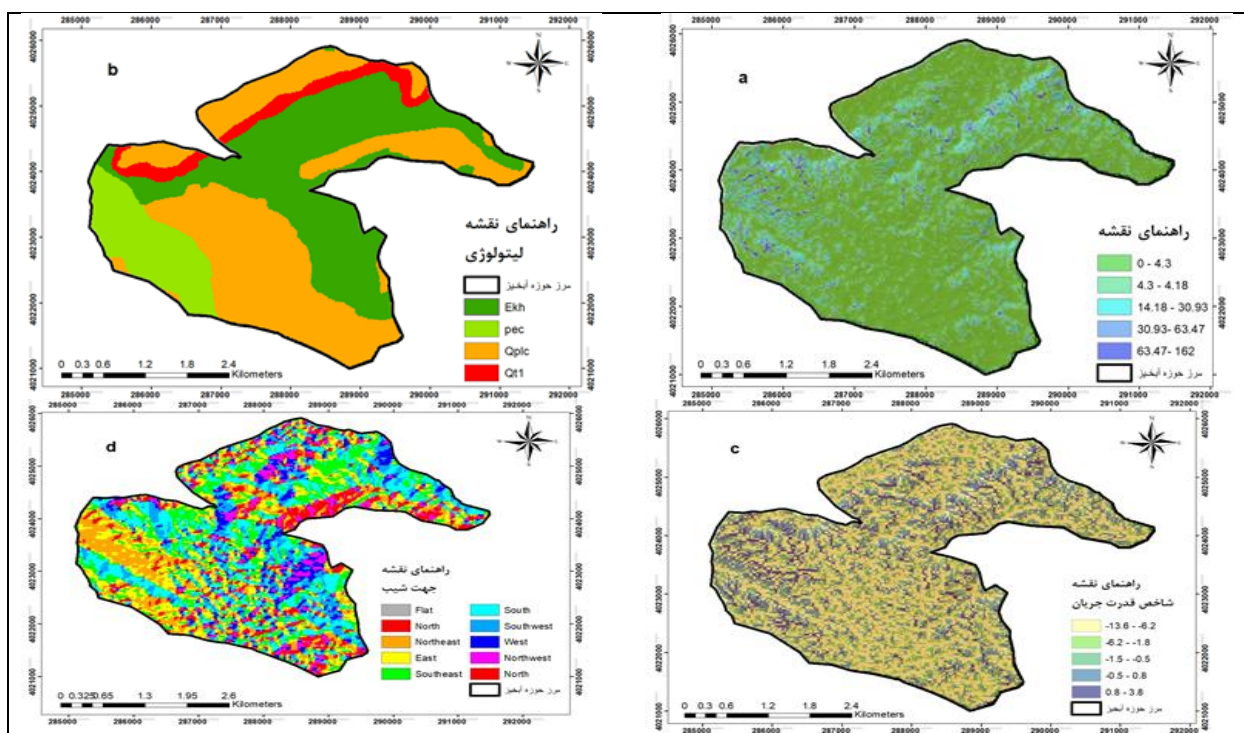
<sup>8</sup> Soil Adjusted Vegetation Index

<sup>9</sup> Normalized Difference Vegetation Index

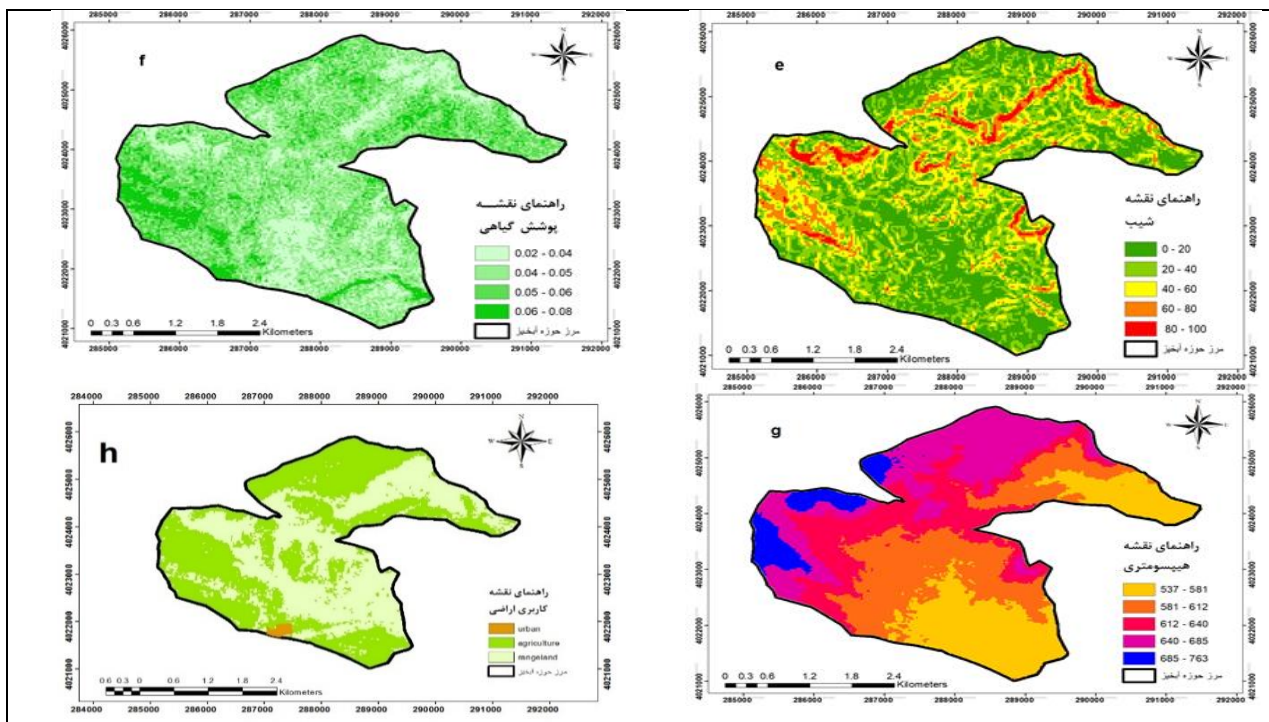
آموزش مدل در فاز کالیبراسیون انتخاب می شوند. مدل ME یک تکنیک ماشین یادگیری عامه پسند است که امکان بررسی رابطه متقابل بین متغیر وابسته و چندین متغیر مستقل را فراهم می کند که در این پژوهش این متغیرها به ترتیب حضور نقاط خندقی و ویژگی موثر در وقوع خندق ها هستند. با توجه به تعداد نقاط حضور خندقی و در نظر گرفتن همان تعداد نقاط غیر خندقی توسط مدل MAXENT و بررسی ارتباط بین عوامل موجود، مهم ترین عوامل در تشکیل فرسایش خندقی بر اساس درجه اهمیت تعیین شده و نقشه پیش بینی نقاط خندقی تهیه می شود. در این روش برای هر پیکسل یک مقدار حضور تعلق می گیرد. سپس با استفاده از ۳۰ درصد نقاط آزمون که توسط نرم افزار کنار گذاشته شده، اقدام به بررسی صحت مدل می کند. صحت پیش بینی مدل با استفاده از منحنی ROC مورد بررسی قرار می گیرد. در این روش سطح زیرمنحنی ROC می تواند کیفیت صحت پیش بینی را آزمون کند. در این پژوهش برای ارزیابی عدم قطعیت پیش بینی 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 می تواند برای دسترسی به سهم عوامل در مدل سازی 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 نرم افزار ARC GIS اقدام به تهیه لایه های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل موثر در وقوع فرسایش خندقی گردید که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. برخی از عوامل موثر بر وقوع فرسایش خندقی. a (شاخص انتقال رسوب)، b (لیتولوژی)، c (شاخص انتقال جریان)، d (جهت شیب)

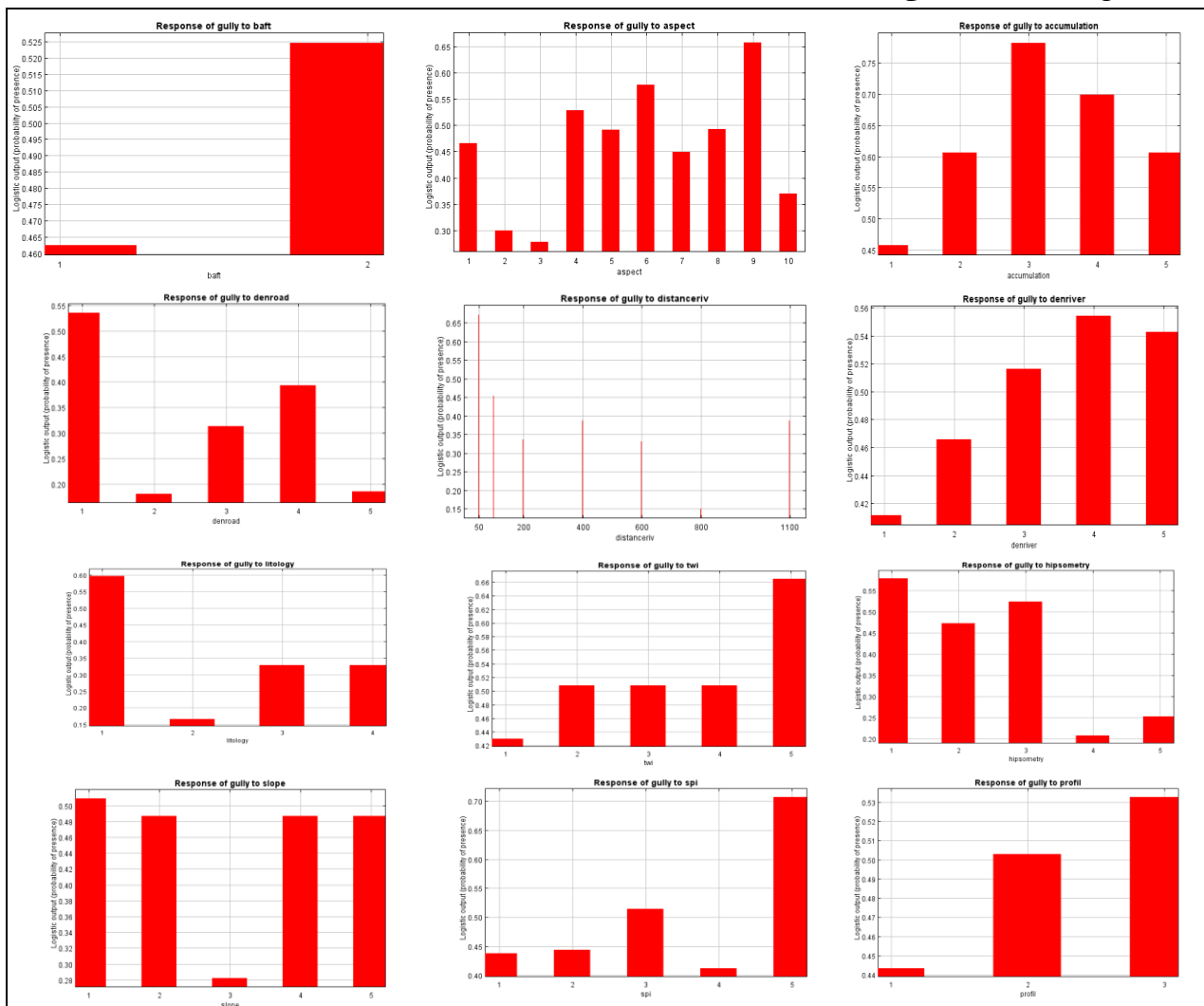


ادامه شکل ۲. برخی از عوامل موثر بر وقوع فرسایش خندقی. e (شیب)، f (شاخص پوشش گیاهی)، g (هیپسومتری)، h (کاربری اراضی)

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

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 شورلوق 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 منحنی های پاسخ در مدل ماکزیمم آنتروپی نشان می دهد که در معیار شیب خندق ها بیشتر در طبقه ۲۰ - ۰ درصد واقع شده اند. رواناب در شیب های پایین فرصت تمرکز و نفوذ بیشتری دارد و احتمال خندقی شدن بیشتر است. تحلیل منحنی پاسخ مرتبط با فاکتور جهت شیب نشان می دهد که از میان جهات شیب بیشترین خندق های اتفاق افتاده در جهت شیب غرب و شمال غربی رخ داده اند. بررسی ها 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. هم چنین با توجه به طبقات ارتفاعی بیشترین تاثیر را کلاس های ۱ تا ۳ داشته که با افزایش ارتفاع میزان فرسایش خندقی کاسته شده و از نظر شرایط لیتولوژیکی بیشترین خندق ها در جنس سنگ شیل و آهک واقع شده اند.



بررسی کاربری اراضی منطقه نشان دهنده آن است که بیشترین خندق ها در مراتع و دیمزارها اتفاق افتاده اند که دلیل آن را می توان به نقش انسان در اکوسیستم منطقه و تخریب هایی که به واسطه تغییر کاربری اعمال کرده است نسبت داد. در معیار بافت خاک منطقه، بیشترین خندق ها در بافت خاک لومی رسی با درصد سیلت ۳۰ درصد رخ داده اند. دامنه های مشرف به آبراهه، تعادل این دامنه ها برهم می خورد و حساسیت به ایجاد فرسایش خندقی در کنار آبراهه ها افزایش می یابد. همچنین در ارتباط با فاکتور فاصله از جاده، خندق ها در جاده های با فاصله بیشتر از ۲۰۰ متر واقع شده اند. این موضوع نشان می دهد 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 می باشد. در تحلیل پیکسل های خندق دار مرتبط با پروفیل و انحنای طرح رودخانه قسمت هایی که مورفولوژی مقعر دارند بیشترین حساسیت به خندق را دارا هستند. مورفولوژی مقعر با تمرکز جریان آب و رطوبت می تواند مناطق مستعدی برای ایجاد فرسایش خندقی باشد. همچنین هرچه رطوبت و قدرت جریان بیشتر باشد خندق های بیشتری رخ می دهد و در رابطه با میزان رسوب حمل شده در صورتی که این شاخص به مقدار کمتر تا متوسط باشد، با این موضوع مطابقت دارد.

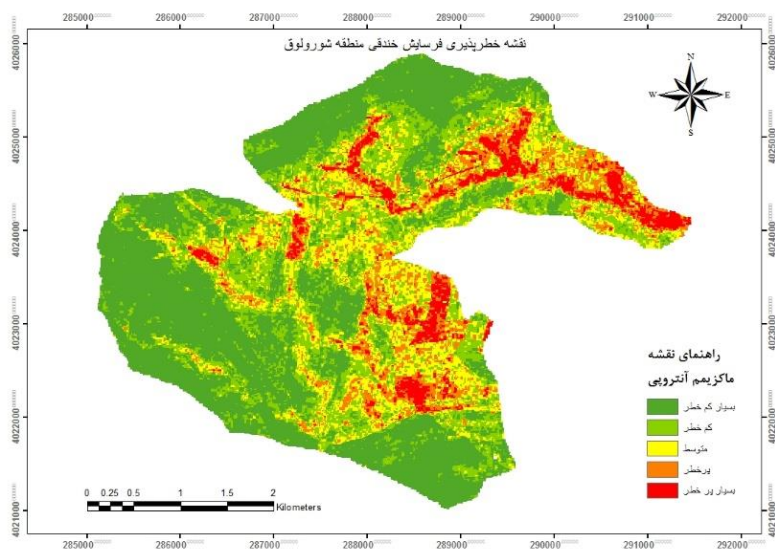


شکل ۴. آزمون جک نایف برای بررسی اهمیت هر کدام از متغیرهای محیطی در پتانسیل سنجی فرسایش خندقی در منطقه شورلوق

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 می خورد و حساسیت به ایجاد فرسایش خندقی

افزایش می یابد.

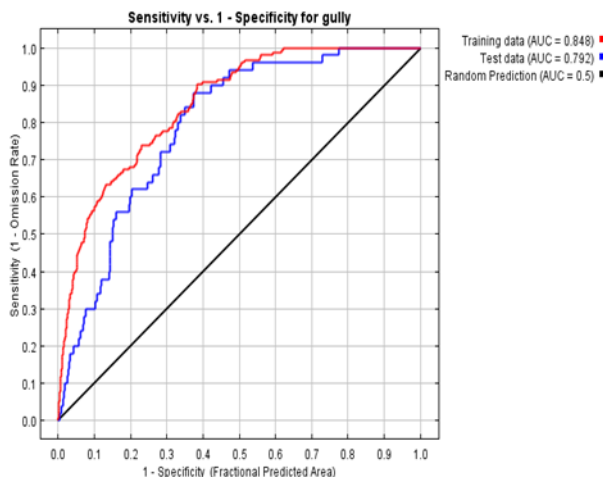
در نهایت نقشه پتانسیل خطرپذیری فرسایش خندقی پس از کلاسه بندی در محیط GIS تهیه شده در شکل ۵ و نتایج صحت سنجی در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است.



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

جدول ۲. مساحت و درصد طبقات خطر فرسایش خندقی در حوزه شورولوق 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	۹۰/۹
متوسط	۹۴۵۸۳	۱۵/۵۶	۱۷/۲۷
پرخطر	۶۱۸۷۷	۱۰/۱۸	۲۴/۸۱
بسیار پرخطر	۳۴۰۱۸	۵/۵۹	۴۱/۳۶



شکل ۶. منحنی roc داده های train, test

#### بحث و نتیجه گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی و خطرپذیری فرسایش خندقی در منطقه شورلوق صورت گرفت. پس از تهیه شاخص های 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 ۱۷ ویژگی موثر در وقوع خندق ها 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، مهم ترین عوامل در تشکیل فرسایش خندقی بر اساس درجه اهمیت به ترتیب لیتولوژی و فاصله از رودخانه مشخص شدند و پس از تهیه نقشه پیش بینی 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 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 می باشد که نشان دهنده دقت بالای مدل است. نتایج این پژوهش در زمینه تاثیر مهم ترین عوامل در وقوع فرسایش خندقی با نتایج تحقیقات (هادیان امری و جعفری گرزین، ۱۳۸۴) و (بیاتی خطیبی، ۲۰۱۱) و (محمد ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۵) مطابقت دارد.

### فهرست منابع

1. اسماعیلی، رضا و شوکتی، روناک. ارزیابی حساسیت پذیری 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
2. پرویز، لاله، خلقی، مجید، ولیزاده، خلیل، عراقی نژاد، شهاب و ایران نژاد، پرویز، ارزیابی کارایی شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی NDVI از طریق پایش وضعیت پوشش گیاهی، همایش ملی ژئوماتیک، اردیبهشت ۱۳۸۹.
3. رستمی زاد، ق. و خان بابایی، ز. ۱۳۹۵. ارزیابی تاثیر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک بر گسترش فرسایش آبکندی ( مطالعه موردی : شهرستان دره شهر). مجله محیط زیست و مهندسی آب. ۲(۴): ۳۷۶-۳۸۹.
4. رفاهی، ح. ق. ۱۳۸۸. فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران، تهران،
5. شادفر، صمد، کاربرد منطق فازی در پهنه بندی فرسایش خندقی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) حوزه طرود. فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر). زمستان ۱۳۹۳، دوره ۲۳، شماره ۹۲
6. شادفر، صمد، عباسی، محمد و نمکی، محمد. بررسی نقش عوامل کاربری اراضی و جهت شیب بر فرسایش خندقی با استفاده از GIS در حوزه راهجرد، استان قم. پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک. اسفندماه ۱۳۹۰. کرمان
7. قدوسی، ج و داوری، م. ۱۳۸۴. بررسی تاثیر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک در وقوع فرسایش آبکندی استان قم. کنفرانس ملی فرسایش و رسوب، ۹ تا ۱۶ شهریور. مرکز حفاظت خاک و آبخیزداری ایران. تهران.
8. محمدابراهیمی، مریم، جوادی، محمدرضا و وفاخواه، مهدی، تعیین عوامل موثر در رخداد فرسایش خندق پنجه ای در حوزه آبخیز آق امام، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، بهمن - اسفند ۱۳۹۵، جلد ۳۰، شماره ۶، ص ۱۹۹۹-۱۹۷۸
9. هادیان امری، محمدعلی و جعفری گرزین، بهنوش، تعیین عوامل موثر در ایجاد فرسایش خندقی با استفاده از GIS در حوزه آبخیز سرخ آباد مازندران، چهارمین همایش زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، ۱۳۸۴.
10. 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.
11. 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
12. 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
13. 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
14. 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
15. Lucà, Federica , Conforti, Massimo and Robustelli, Gaetano. 2011 .Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134 (3): 297-308
16. 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

17. Phillips, S.J., Anderson, R.P, Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259
18. 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
19. 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
20. 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.