

مهارت صحیح (TSS) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد بیشترین احتمال وقوع فرسایش آبکندی در بخش مرکزی حوضه متمرکز شده است و با حرکت به سمت قسمت‌های مرزی به‌ویژه جنوب‌شرق حوضه، از میزان این احتمال کاسته می‌شود. معیارهای ارزیابی دقت $ROC=0.97$ و $TSS=0.84$ نیز نشان‌دهنده عملکرد عالی مدل گارپ در پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش آبکندی در آبخیز آبکندی است.

کلیدواژه‌ها: حفاظت خاک، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، مدل یادگیری ماشینی.

مقدمه

فرسایش خاک، یکی از مهم‌ترین عوامل در کاهش عمق، حجم توده‌ی خاک و تخریب و کاهش حاصل‌خیزی است. فرسایش آبی در سطح کشور، طی چند دهه‌ی اخیر روند صعودی داشته است به‌طوری‌که نرخ سالانه‌ی فرسایش خاک، ۳۳ تن در هکتار در سال گزارش شده است که ۶/۵ برابر حد مجاز است [۱۳]. طی این مدت، علاوه بر افزایش میزان فرسایش در واحد سطح یا شدت فرسایش، وسعت مناطق دارای فرسایش آبی نیز گسترش داشته، از طرف دیگر، به‌دلیل افزایش سیل‌خیزی، فرسایش آبی در سطحی معادل ۳۲۵ میلیون هکتار (۷۹/۲) درصد از کل کشور خارج از حد طبیعی می‌باشد و میزان رسوب‌دهی حوزه‌های آبخیز روند افزایشی داشته است [۱۸].

با توجه به هدررفت و تخریب فراوان ناشی از فرسایش آبکندی و اهمیت حفاظت از منابع خاک و لزوم اتخاذ تمهیدات لازم جهت پیشگیری از وقوع و گسترش این پدیده مخرب در منطقه مورد اشاره، ضروری است تا نسبت به پیش‌بینی مناطق مستعد وقوع فرسایش آبکندی اقدام شود. در این راستا تاکنون مدل‌های مختلفی توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به جنگل تصادفی^۶ [۱۵]، درخت‌های رگرسیون و طبقه‌بندی^۷ [۱۰]، توپوگرافی نرمال شده^۸ [۴] و تجزیه و تحلیل شرطی^۹ [۵] اشاره کرد. شادفر [۲۵] در مطالعه‌ای از عملگرهای منطق فازی به‌منظور پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع فرسایش آبکندی

ارزیابی کارایی مدل GARP در پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش آبکندی در آبخیز آبکندی استان کهگیلویه و بویراحمد

ایمان صالح^۱، امید رحمتی^۲، سید مسعود سلیمان‌پور^۳، مجید خزایی^۴، صمد شادفر^۵
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹

چکیده

در این مطالعه به ارزیابی کارایی مدل GARP در پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش آبکندی در حوزه‌ی آبخیز آبکندی استان کهگیلویه و بویراحمد پرداخته شده است. پس از بازدیدهای میدانی، تعداد ۸۱ آبکند به‌وسیله‌ی GPS و دوربین نقشه‌برداری ثبت و نقشه‌ی پراکنش فرسایش آبکندی در منطقه‌ی مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. هم‌چنین متغیرهای ارتفاع، شیب زمین، جهت شیب، فاصله از جاده، فاصله از جریان‌های سطحی، کاربری اراضی، خاکشناسی، سنگ‌شناسی، تراکم زهکشی و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) به‌عنوان متغیرهای اثرگذار بر وقوع فرسایش آبکندی، انتخاب شده و در فرآیند مدل‌سازی به‌عنوان متغیرهای مستقل در وقوع فرسایش آبکندی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. مدل‌سازی وقوع فرسایش آبکندی در نرم‌افزار Desktop Garp اجرا شد و برای اعتبارسنجی نتایج پیش‌بینی، منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) و آماره

۱- نویسنده مسئول و استادیار بخش تحقیقات جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یاسوج، ایران. پست الکترونیک:

salehiman61@gmail.com

۲- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران.

۳- دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.

۴- استادیار بخش تحقیقات جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یاسوج، ایران.

۵- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

6. Random forests

7. Classification and regression trees

8. Normalized topographic method

9. Conditional analysis

استفاده کرد. بر اساس نتایج پژوهش مورد اشاره، استفاده از روش جمع جبری فازی دقت بالاتری نسبت به دیگر عملگرهای فازی در پیش‌بینی خطر فرسایش دارد. رحمتی و همکاران [۲۳] نیز در پژوهشی کارایی مدل بیشینه‌ی آنتروپی را در پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش آب‌کندی در حوزه‌ی آبخیز کشکان- پل‌دختر مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس گزارش ایشان، نقشه‌ی مناطق مستعد فرسایش آب‌کندی حاصل از مدل بیشینه‌ی آنتروپی ۹۰/۷ درصد دقت داشت. در این پژوهش از بافت خاک، تراکم زهکشی، سنگ‌شناسی و فاصله از جریان به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرسایش آب‌کندی نام برده شده است در حالی که عوامل ارتفاع، فاصله از جاده، جهت شیب، کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی و انحناى سطح تأثیر کمتری در وقوع فرسایش آب‌کندی منطقه‌ی مورد مطالعه داشتند. انتظاری و همکاران [۹] نیز پنج عامل شیب، انحناى افقى شیب، کاربری اراضی، فاصله از جاده‌ها و سنگ‌شناسی را به‌عنوان عوامل مؤثر در تولید آب‌کندها معرفی نموده‌اند و در تحقیقی دیگر که در آن امیری و همکاران [۲] به مدل‌سازی مکانی فرسایش آب‌کندی حوزه‌ی آبخیز مهارلو با استفاده از سناریوهای مختلف و الگوریتم وزن و واقعه پرداخته‌اند، اعلام شده است که افزایش بارندگی، تراکم زهکشی بالا، درصد سیلت زیاد، طبقات ارتفاعی کم، جهت‌های شیب جنوبی، فاصله کم از جاده و آبراهه، سازندهای زمین‌شناسی آسماری، آغا‌جاری، گچساران و میشان و همچنین اراضی لخت نقش مؤثری در وقوع فرسایش آب‌کندی در منطقه‌ی مورد مطالعه داشته‌اند. مطالعات بسیاری شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) را یکی از عواملی معرفی کردند [۱۱، ۱۴، ۱۷، ۲۴] که نقش قابل توجهی در وقوع فرسایش آب‌کندی دارد. این عامل تعیین‌کننده تأثیر توپوگرافی بر میزان سطوح اشباع جهت تولید رواناب است و از رابطه‌ی $TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \theta}\right)$ به‌دست می‌آید. در این رابطه A_s : مساحت ویژه حوضه بر حسب متر و θ : درجه‌ی شیب است [۲].

رحمتی و همکاران [۲۲] با استفاده از روش‌های آماری نسبت فراوانی و وزن واقعه، مناطق حساس به وقوع فرسایش آب‌کندی را در منطقه‌ی چوار استان ایلام شناسایی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که روش‌های مورد اشاره در مدل‌سازی احتمال وقوع فرسایش آب‌کندی مفید و قابل اعتماد است. از آن‌جا که آب‌کندها در زمان بارندگی و شکل‌گیری جریان‌های موقتی قادر به انتقال مقدار زیادی رسوب به مناطق پایین‌دست خود است، باید اقدامات مدیریتی شامل شناسایی مناطق مستعد وقوع فرسایش آب‌کندی، احیاء پوشش گیاهی و مدیریت اقدامات انسانی به‌منظور پیش‌گیری و کاهش اثرات مخرب آن انجام پذیرد. از طرف دیگر، روش‌هایی که در بالا به آن‌ها اشاره شد، دارای محدودیت‌ها و نقاط ضعف هستند. به‌عنوان مثال، این روش‌ها برای تجزیه و تحلیل روابط بین وقوع فرسایش آب‌کندی و عوامل مؤثر بر آن نیازمند طبقه‌بندی عوامل محیطی هستند که به‌دلیل عدم وجود روشی مناسب برای یافتن محدوده‌های طبقه‌بندی، عدم قطعیت مدل‌سازی افزایش می‌یابد.

این در حالی است که مدل GARP، به‌عنوان یک مدل یادگیری ماشینی می‌تواند بر این محدودیت غلبه کند. در همین زمینه دارابی و همکاران [۶] دو مدل GARP و QUEST را به منظور تهیه نقشه‌ی خطر سیلاب شهری مورد ارزیابی قرار داده و در پایان پژوهش خود، دقت عملکرد مدل GARP را در پیش‌بینی خطر وقوع سیلاب شهری برتر توصیف نمودند. هم‌چنین داوودی مقدم و همکاران [۷] به بررسی کارایی مدل‌های یادگیری ماشینی در تهیه نقشه‌ی پتانسیل آب‌های زیرزمینی پرداختند که از میان مدل‌های مورد مطالعه، مدل GARP عملکرد بهتری نشان داد. ایشان توصیه نمودند به‌منظور ارتقاء اعتبار مدل‌سازی، باید گزینه‌های متعدد بخش‌بندی تصادفی به‌منظور آماده‌سازی گروه‌های آموزش و اعتبارسنجی مدنظر قرار گیرد.

در دو دهه اخیر بیش‌ترین نوع فرسایشی که در سطح استان کهگیلویه و بویراحمد ظاهر شده، فرسایش آب‌کندی بوده است. به‌طوری‌که ظهور پدیده‌ی فرسایش آب‌کندی در منطقه‌ی دریلا (شهرستان گچساران) که یکی از مناطق گرمسیری استان است، مراتع و مزارع عشایری را به‌طور جدی مورد تهدید قرار داده است. هم‌چنین در شهرستان دهدشت که بخش عمده‌ی حوزه‌ی آبخیز سد مارون در آنجا واقع شده است نیز از این پدیده به‌شدت متأثر گردیده و نه تنها باعث تخریب اراضی زراعی دیم منطقه شده بلکه تهدیدی برای پر شدن سد مارون است. در منطقه‌ی آب‌کندی نیز شدیدترین اشکال فرسایش آب‌کندی با تراکم بسیار زیاد به‌چشم می‌خورند که هر ساله رو به گسترش بوده و سبب هدررفت زیاد خاک می‌شوند. از این رو پایداری اکوسیستم در این منطقه بر اثر تخریب سرزمین، از بین رفتن اراضی و تولید رسوب نه تنها با مشکل روبرو شده است، بلکه وضعیت اقتصادی- اجتماعی ساکنان منطقه را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر اساس مرور منابع انجام شده، مدل GARP تاکنون برای شناسایی مناطق مستعد آب‌کندی استفاده نشده است. بنابراین در این مطالعه کارایی مدل GARP در پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش آب‌کندی در حوزه‌ی آبخیز آب‌کندی استان کهگیلویه و بویراحمد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقه‌ی مورد مطالعه

حوزه‌ی آبخیز آب‌گندی در ۳۵ کیلومتری جنوب‌غربی شهرستان گچساران واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد بین طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۲۱ دقیقه و ۲۵ ثانیه تا ۴۷ درجه و ۶۳ دقیقه و ۳۵ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۸ دقیقه و ۲۶ ثانیه تا ۳۳ درجه و ۵۷ دقیقه و ۵۸ ثانیه قرار دارد. متوسط بارندگی سالانه محدوده‌ی مورد مطالعه ۳۸۶/۹ میلی‌متر، حداکثر میزان بارندگی ۲۴ ساعته ۷۶/۹ میلی‌متر، متوسط میزان تبخیر سالانه ۲۹۳۴ میلی‌متر و متوسط دمای روزانه ۲۱/۴ درجه‌ی سانتی‌گراد است. اقلیم منطقه طبق روش

آمبرژه، نیمه‌خشک معتدل و طبق روش کوپن، مدیترانه‌ای با زمستان معتدل است. از نظر زمین‌شناسی نیز کل حوضه از سازندهای آغاجاری، گچساران، میشان و بختیاری تشکیل شده است. در این منطقه شدیدترین اشکال فرسایش آبکندی با تراکم بسیار زیاد به چشم می‌خورند که هر ساله رو به گسترش بوده و دارای هدررفت خاک زیاد ناشی از فرسایش آبکندی است.

روش تحقیق

بازدید میدانی و ثبت موقعیت آبکندهای منطقه‌ی مورد مطالعه

موقعیت‌های مکانی فرسایش آبکندی در مدل‌سازی به‌عنوان متغیر وابسته مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۸]. پس از بازدیدهای میدانی، تعداد ۸۱ آبکند به‌وسیله‌ی GPS و دوربین نقشه‌برداری ثبت و نقشه‌ی پراکنش فرسایش آبکندی در منطقه در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد (شکل ۲). از میان موقعیت‌های ثبت شده، ۷۰ درصد (۵۷ آبکند) به‌عنوان گروه آموزش و ۳۰ درصد (۲۴ آبکند) به‌عنوان گروه اعتبارسنجی به‌صورت تصادفی انتخاب شدند [۶].

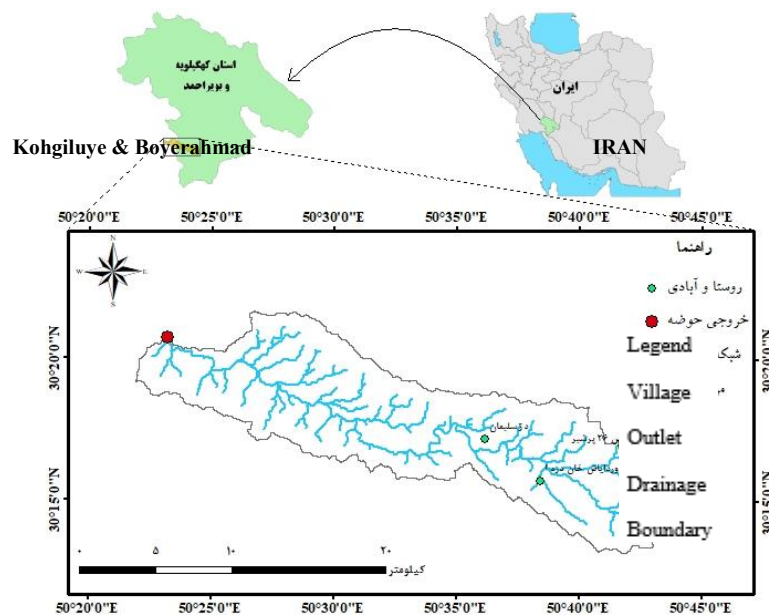
انتخاب عوامل محیطی اثرگذار بر وقوع آبکند

بر اساس منابع و پژوهش‌های موجود [۲، ۵، ۹]، متغیرهای ارتفاع،

شیب زمین، جهت شیب، فاصله از جاده، فاصله از جریان‌های سطحی، کاربری اراضی، بافت خاک، سنگ‌شناسی، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، انحنا سطح، شاخص همگرایی، انحنا مقطع و موقعیت شیب نسبی به‌عنوان متغیرهای اثرگذار بر وقوع فرسایش آبکندی، انتخاب و نقشه‌ی عوامل یاد شده در محیط نرم‌افزار GIS تهیه شده و در فرآیند مدل‌سازی به‌عنوان متغیرهای مستقل در وقوع فرسایش آبکندی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

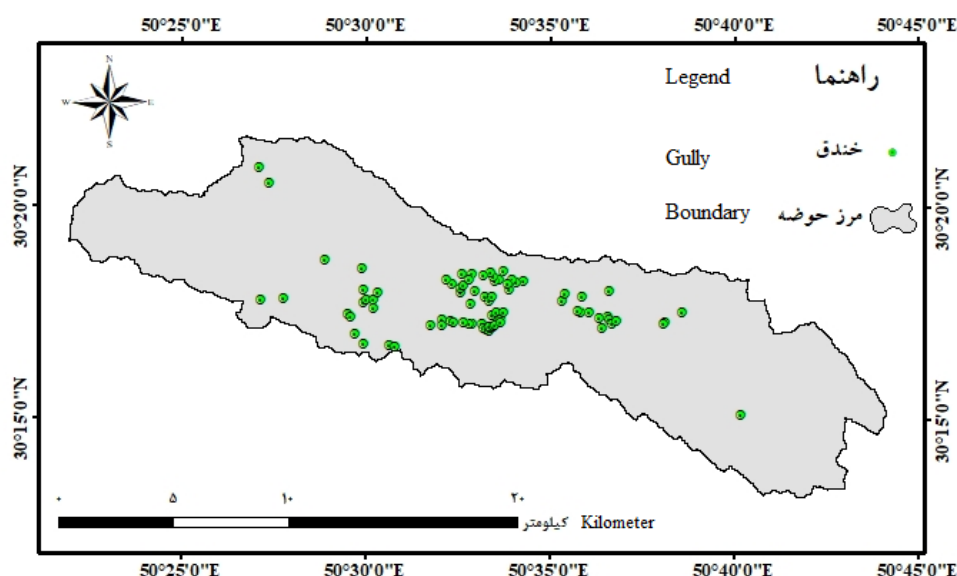
اجرای مدل GARP

در این پژوهش از مدل GARP به‌منظور پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش آبکندی در حوزه‌ی آبخیز آبکندی استفاده شد. ایده‌ی سامانه‌ی مدل‌سازی GARP مبتنی بر الگوریتم ژنتیک است که اولین بار توسط هالند در سال ۱۹۷۵ ارائه شد [۱۱]. این مدل، یک الگوریتم یادگیری ماشینی است که نرم‌افزار آن توسط استاکول و نوبل در سال ۱۹۹۱ توسعه یافت. مدل GARP از جمله روش‌های فقط حضور است به این معنی که فقط از داده‌های حضور قطعی رخداد مورد مطالعه استفاده می‌کند و از یک مجموعه قواعد یا ارتباطات (اگر-سپس) برای مدل‌های پیش‌بینی توزیع جغرافیایی استفاده می‌کند [۲۱].



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز آبکندی

Fig 1. Geographical location of Abgendi basin



شکل ۲- موقعیت ۸۱ آبکند ثبت شده در حوزه آبخیز آبگندی

Fig 2. The recorded 81 gullies location in Abgendi basin

چهار نوع قاعده Atomic, Logit, Garp و Envelop در فرآیند مدل سازی به کار گرفته شد. نقشه های پیش بینی ساخته شده توسط مدل GARP تنها مقدار دوتایی وقوع و عدم وقوع را ارائه می کند. بنابراین نقشه های پیش بینی موجود در پوشه بهترین زیر مجموعه، در محیط نرم افزار Arc GIS با هم تلفیق و به یک نقشه ی پیوسته تبدیل شده و به عنوان نقشه ی نهایی احتمال وقوع فرسایش آبگندی ارائه گردید [۳].

اعتبارسنجی نقشه ی مناطق مستعد فرسایش آبگندی

به منظور اعتبارسنجی نقشه ی نهایی موقعیت نقاط مستعد فرسایش آبگندی حوزه ی آبخیز آبگندی، از داده های موقعیت آبکندهای گروه اعتبارسنجی استفاده شد. در راستای تعیین دقت پیش بینی نقشه ی نهایی از روش منحنی تشخیص عملکرد (ROC) که رایج ترین روش کمی صحت سنجی در مدل سازی های مکانی و پیش بینی پدیده های طبیعی است، استفاده شد [۲۰]. هر چه مساحت زیر منحنی ROC بیش تر (نزدیک به یک) باشد، کارایی مدل در پیش بینی پدیده ی مورد مطالعه بیش تر خواهد بود؛ به طوری که هرگاه مساحت زیر منحنی از ۰/۷ بیش تر باشد، دقت مدل قابل قبول در نظر گرفته می شود [۲۶]. به منظور اطمینان بیش تر از عملکرد مدل، از آمار مهارت صحیح^۲ (TSS) استفاده شد. این آماره جایگزین معیار کاپا بوده و علی رغم حذف معایب معیار کاپا، مزایای آن را حفظ نموده است [۱].

این مدل، شامل یک فرآیند تکراری از انتخاب قاعده ها، ارزیابی، تکرار و تلفیق یا حذف قواعد است. هر نوع قاعده، یک روش خاص را برای ساخت مدل های پیش بینی گونه به کار می گیرد. در این نرم افزار، از چهار نوع قاعده استفاده می شود؛ قاعده ی Envelop که محدوده ای از هر متغیر را جهت پیش بینی حضور یک پدیده ی طبیعی نیاز دارد، قاعده ی GARP که مشابه Envelop می باشد به استثناء این که بعضی متغیرها می توانند ارتباطی به وجود یا عدم وجود پدیده ی طبیعی نداشته باشند. قاعده ی Logic که تا حدودی مشابه رگرسیون لجستیک است و قاعده ی Atomic که برای پیش بینی، نیازمند مقادیر مشخصی از هر متغیر است. در تعریف الگوریتم ژنتیک، هر قاعده عضوی از یک جمعیت و هر تکرار یک نسل محسوب می شود. در هر نسل، مجموعه قواعد ارزیابی، تکثیر و جهش می یابند و در نهایت یک مجموعه قاعده انتخاب می شود تا بهترین وجه ممکن ارتباط بین وقوع پدیده ی طبیعی و مؤلفه های محیطی را نشان دهد. فرآیند کلی الگوریتم ژنتیک شامل مقداردهی اولیه ی ساختارهای جمعیتی، انتخاب تصادفی یک زیر مجموعه داده، ارزیابی جمعیت جاری، ذخیره کردن بهترین قواعد، توقف اجرای الگوریتم یا ادامه دادن، انتخاب جمعیت جدید با استفاده از بهترین قواعد ذخیره شده و نسل های تصادفی، اعمال عملگرهای جهش و تقاطع به جمعیت و مجدداً بازگشت به مرحله ی دوم، یعنی انتخاب تصادفی یک زیر مجموعه داده است. دفعات تکرار و اتمام فرآیند الگوریتم ژنتیک توسط کاربر تعیین می شود [۲۶].

فرآیند مدل سازی در نرم افزار Desktop Garp اجرا شد. هر

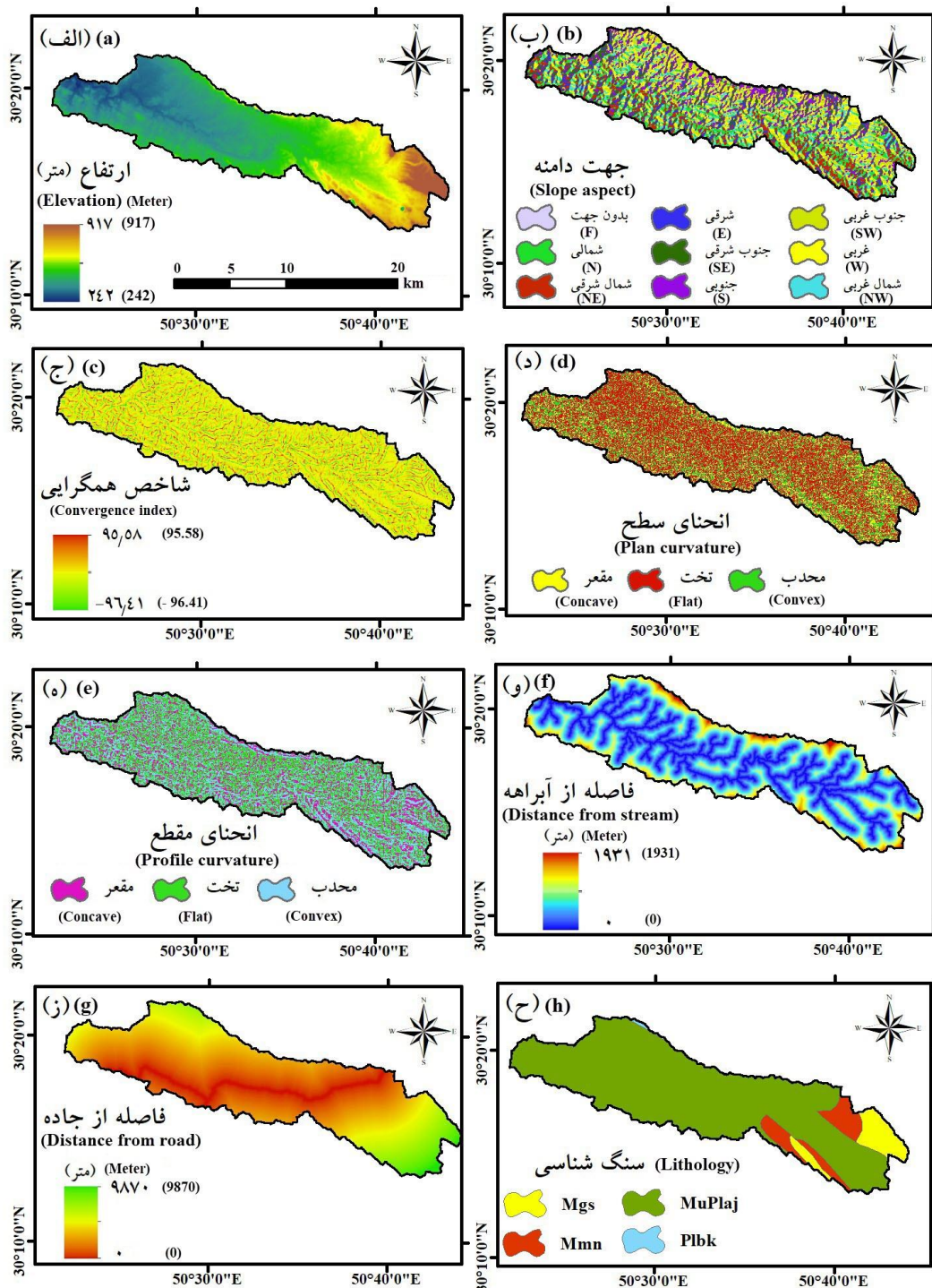
1. Receiver Operating Characteristic (ROC)

2. True Skill Statistic (TSS)

نتایج

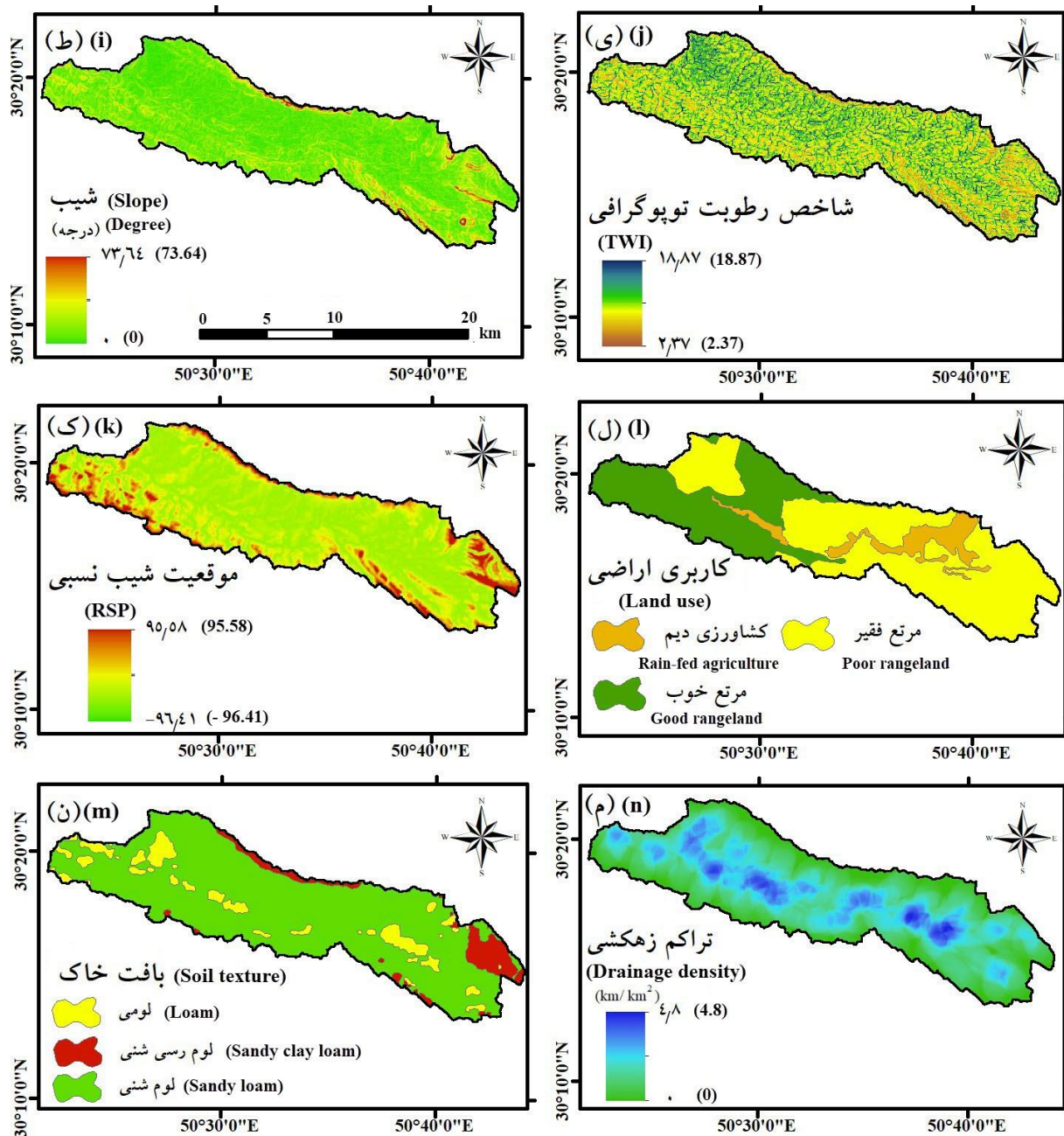
عوامل محیطی اثرگذار بر وقوع فرسایش آبکندی
به منظور پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش آبکندی با استفاده از
مدل GARP، نقشه‌ی عوامل محیطی مؤثر در وقوع فرسایش آبکندی
در محیط نرم‌افزار GIS تهیه شد که نتایج آن در شکل (۳) قابل
مشاهده است.

بررسی و اندازه‌گیری‌ها نشان داد که آبکنده‌های ثبت شده بیش‌تر
از نوع پنجه‌ای با دامنه‌ی طول ۴/۶۳ تا ۱۴۲ متر، عرض بالای ۰/۸۲
تا ۳/۷۲ متر، عرض پایین ۰/۴۷ تا ۲/۶۶ متر، میانگین عمق ۰/۳۶ تا
۱/۳۵ و حجم ۲/۰۵ تا ۶۰۲/۴۶ متر مکعب هستند.



شکل ۳- نقشه‌ی عوامل محیطی مؤثر در وقوع فرسایش آبکندی شامل الف) ارتفاع، ب) جهت دامنه، ج) شاخص همگرایی، د) انحنای سطح، ه) انحنای مقطع، و) فاصله از آبراهه، ز) فاصله از جاده، ح) سنگ‌شناسی

Fig 3. Map of environmental factors affecting the occurrence of gully erosion including a) Elevation, b) Slope direction, c) Distance to river, g) Distance to road, h) Lithology Convergence Index, d) Plan curvature, e) Profile curvature, f)



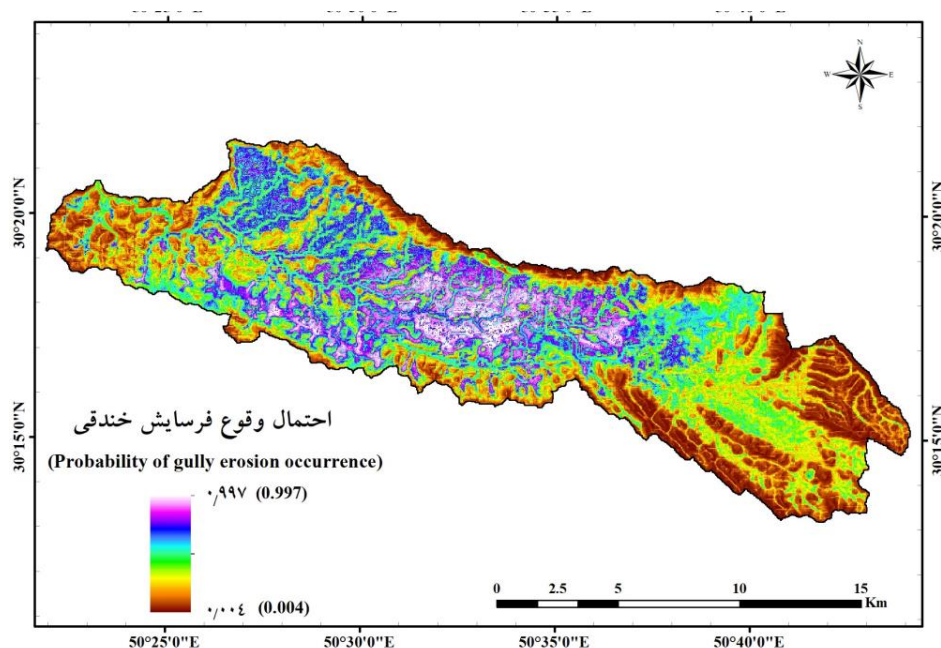
ادامه شکل ۳- نقشه‌ی عوامل محیطی مؤثر در وقوع فرسایش آب‌کندی شامل (ط) شیب، (ی) شاخص رطوبت توپوگرافی، (ک) موقعیت شیب نسبی، (ل) کاربری اراضی، (م) تراکم زهکشی

Continuation of Fig 3. Map of environmental factors affecting the occurrence of gully erosion including i) Slope, j) TWI, k) Relative slope position, l) Land use, m) Drainage density, n) Soil texture

پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش آب‌کندی

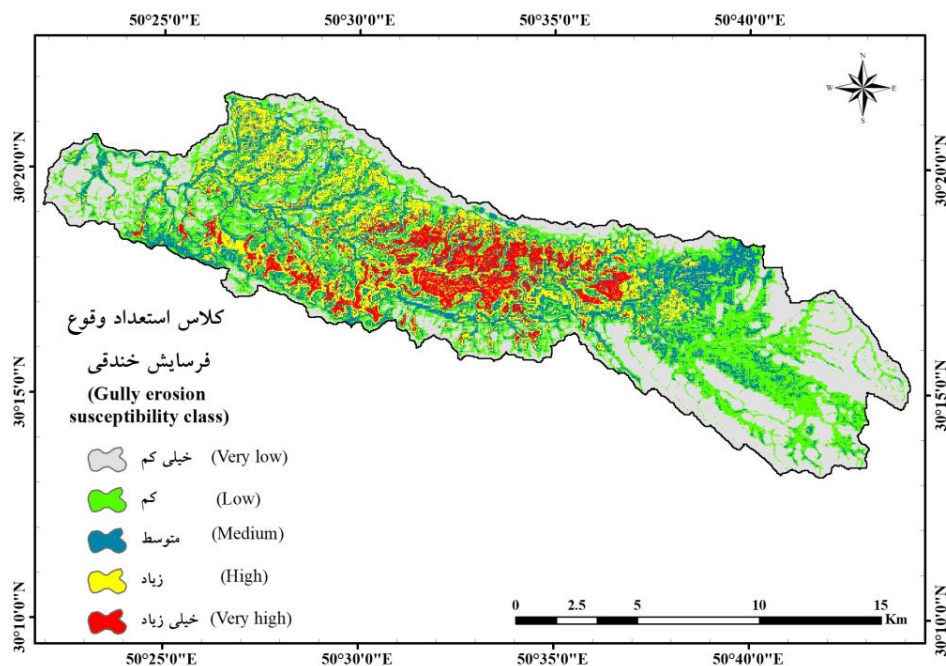
شکل (۴) نقشه‌ی احتمال وقوع فرسایش آب‌کندی در آبخیز آب‌کندی که با استفاده از مدل GARP تهیه شده است، را نشان می‌دهد. در این نقشه، احتمال وقوع فرسایش آب‌کندی از ۰/۰۰۴ تا ۰/۹۹۷ متغیر است، رنگ‌های سفید و قهوه‌ای به ترتیب نشان دهنده‌ی بیش‌ترین و کم‌ترین میزان احتمال وقوع فرسایش آب‌کندی هستند. به‌منظور ایجاد سهولت در استفاده از نقشه‌ی احتمال وقوع

فرسایش در برنامه‌های مدیریتی و اجرایی حفاظت خاک، اقدام به تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی استعداد وقوع فرسایش آب‌کندی در آبخیز آب‌کندی شد (شکل ۵). همان‌طور که در نقشه مشاهده می‌شود، استعداد وقوع فرسایش به پنج کلاس از خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی شده است. مساحت کلاس‌های استعداد وقوع فرسایش آب‌کندی نیز در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۴- نقشه‌ی احتمال وقوع فرسایش آبگندی با استفاده از مدل گارپ در آبخیز آبگندی

Fig 4. Map of the probability of gully erosion occurrence using GARP model in Abgendi basin



شکل ۵- نقشه‌ی پهنه‌بندی استعداد وقوع فرسایش آبگندی با استفاده از مدل گارپ در آبخیز آبگندی

Fig 4. Zoning map for gully erosion susceptibility using GARP model in Abgendi basin

جدول ۱- مساحت کلاس‌های استعداد وقوع فرسایش آبگندی

Table 1. Area of gully erosion susceptibility classes

Area (percent)(درصد)	مساحت (هکتار) Area (ha)	کلاس استعداد (Susceptibility class)
30.35	6579.18	خیلی کم (Very low)
24.99	5417.19	کم (Low)
21.97	4761.72	متوسط (Moderate)
15.56	3372.21	زیاد (High)
7.12	1544.22	خیلی زیاد (Very high)

ارزیابی عملکرد مدل

نتایج مربوط به ارزیابی عملکرد مدل GARP با استفاده از معیارهای ارزیابی دقت ROC و TSS در جدول (۲) ارائه شده است. همانطور که در بخش روش تحقیق نیز اشاره شد، هر چه مقدار ROC و TSS به عدد یک نزدیکتر باشد، به این معنی است که مدل مورد استفاده از دقت بالاتری برخوردار است.

جدول ۲- عملکرد پیش‌بینی مدل گارپ در مرحله‌ی اعتبارسنجی بر اساس معیارهای ارزیابی دقت

Table 2. Forecasting performance of GARP model in validation stage based on accuracy evaluation criteria

نام مدل (Name of the model)	AUC	TSS
مدل گارپ (GARP Model)	0.97	0.84

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به ارزیابی کارایی مدل GARP در پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش آبکندی در آبخیز آبکندی استان کهگیلویه و بویراحمد پرداخته شده است. بر اساس نقشه‌ی ارتفاع، ارتفاع حوضه‌ی آبکندی از ۲۴۲ تا ۹۱۷ متر از سطح دریا متغیر است که حدود ۵۸ درصد از سطح حوضه در ارتفاع ۴۴۰-۶۴۰ متر از سطح دریا واقع شده و عمده آبکندهای موجود در منطقه نیز در همین محدوده‌ی ارتفاعی واقع شده‌اند. همچنین نقشه‌ی شیب نشان می‌دهد که شیب منطقه‌ی مورد مطالعه از صفر تا ۷۳/۶۴ درجه متغیر است و این در حالی است که بیش از ۹۵ درصد سطح حوضه دارای شیب صفر تا ۲۰ درجه است. غالب شیب منطقه دارای جهت‌های جنوب‌غربی، غرب و شمال به ترتیب با ۱۷، ۱۴/۷ و ۱۴/۷ درصد سطح کل حوضه است. جهت‌های جنوب، شمال‌شرقی، شمال‌غربی، جنوب‌شرقی و شرق نیز در رتبه‌های بعد قرار دارند. فاصله از آبراهه در آبخیز مورد مطالعه از صفر تا ۱۹۲۳ متر متغیر است و همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود میزان این فاصله به دلیل تراکم شبکه‌ی زهکشی در بیش‌تر نقاط حوضه، ناچیز است. این حوضه دارای یک جاده‌ی اصلی است و همان‌طور که در شکل (نقشه‌ی فاصله از جاده) مشخص است، فاصله تا جاده در نقاط مختلف حوضه از صفر تا ۹۸۵۹ متر است. بخش عمده‌ی آبخیز مورد مطالعه را (۵۸ درصد مساحت کل حوضه برابر با ۱۲۵/۵۶ کیلومتر مربع) مراتع با پوشش فقیر تشکیل می‌دهند. مرتع خوب با ۷۱/۲۸ کیلومتر مربع و زراعت دیم با ۱۹/۷۲ کیلومتر مربع نیز در رده‌های بعدی قرار دارند. همچنین کمترین سطح مربوط به بیشه‌زار و بوته‌زار است. از نقشه‌ی شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) نیز می‌توان دریافت که میزان این شاخص در حوزه‌ی آبخیز آبکندی از ۲/۳۷ تا ۱۸/۸۷ متغیر است. با توجه نقشه‌ی زمین‌شناسی، می‌توان اشاره نمود سازند آغاچاری شامل سنگ آهک‌دار قهوه‌ای- خاکستری با رگه‌های گچ، مارن قرمز و سیلتستون با مساحت ۱۸۵/۹ کیلومتر مربع، بیش‌ترین سهم (۸۶)

درصد) از سطح آبخیز مورد مطالعه را در بر گرفته‌اند. سازند میشان، شامل مارن با هوازگی کم با رگه‌های سنگ آهک مقاوم‌تر؛ و سازند گچساران، شامل: انیدریت، نمک، مارن خاکستری و قرمز با رگه‌های گچی، آهک آرژیلیتی و آهک در رده‌های بعد قرار دارند. سازند بختیاری، شامل: کنگلومرای توده‌ای سیمانی با دگرسانی شدید و ماسه‌سنگ کمی هوازده نیز سطح ناچیزی از حوضه را اشغال نموده است. همچنین نقشه‌ی احتمال وقوع فرسایش آبکندی در آبخیز مورد مطالعه نشان داد بیش‌ترین احتمال وقوع فرسایش آبکندی در بخش مرکزی حوضه متمرکز شده است و با حرکت به سمت قسمت‌های مرزی، به‌ویژه جنوب‌شرق حوضه، از میزان این احتمال کاسته می‌شود.

با توجه به نقشه‌های عوامل محیطی و مقایسه‌ی آن‌ها با نقشه‌ی احتمال وقوع فرسایش آبکندی به‌دست آمده از مدل GARP، می‌توان دریافت که احتمال وقوع فرسایش آبکندی در اکثر مناطق مرتفع حوضه، کمتر از مناطق کم ارتفاع است. همچنین سطوح تخت استعداد بیش‌تری از سطوح محدب و مقعر، جهت وقوع فرسایش آبکندی دارند. کاهش فاصله از جاده و آبراهه نیز احتمال وقوع فرسایش آبکندی را در آبخیز آبکندی افزایش می‌دهد.

مهم‌ترین نتیجه‌ی این مقایسه مربوط به کاربری اراضی است به طوری که مراتع، و به‌ویژه مراتع فقیر در آبخیز آبکندی، به میزان زیادی در معرض وقوع فرسایش آبکندی قرار دارند. این نتایج با نتایج به‌دست آمده توسط انتظاری و همکاران [۹] و امیری و همکاران [۲] هم‌سو است.

بر اساس نتایج ارزیابی عملکرد مدل GARP، با استفاده از معیارهای ارزیابی دقت ROC و TSS، می‌توان گفت: این مدل در پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش آبکندی در آبخیز آبکندی عملکردی در حد عالی داشته است.

دلیل عملکرد مناسب مدل GARP در این است که این مدل، یک رویکرد مبتنی بر فقط-حضور^۱ است که برای اکثر مواردی که در آن‌ها داده‌های عدم‌حضور واقعی کم است، مناسب است. به صورت تئوری می‌توان گفت: این روش، مدل‌هایی از داده‌های پس‌زمینه و حضور را بر هم منطبق می‌کند. این در حالی است که دیگر مدل‌های فقط-حضور، داده‌های شبه-حضور را از نقاط نمونه‌برداری خارج از مرز داده‌های حضور تولید می‌کنند و یا به شدت از مدل‌سازی فقط-حضور استفاده می‌کنند [۷]. همچنین مدل GARP، الزامات ساده و سهل‌الوصولی به لحاظ داده‌های ورودی، زمان انجام محاسبات و هزینه دارد. از آن‌جا که تاکنون مدل GARP برای پیش‌بینی وقوع فرسایش آبکندی توسط دیگر پژوهشگران مورد استفاده قرار نگرفته است، بنابراین امکان مقایسه‌ی نتایج این پژوهش با دیگران وجود نداشت؛ اما این مدل توسط دیگر محققان برای مدل‌سازی‌های مکانی دیگری در طبیعت مورد استفاده قرار گرفته و دقت عملکرد بسیار مناسبی نشان داده است که از جمله‌ی این پژوهشگران می‌توان به

1. Presence-only

GARP and QUEST models: A comparative study of machine learning techniques, *Journal of Hydrology* (2018), doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.002>

7. Davoudi Moghaddam, D., Rahmati, O., Haghizadeh, A. and Kalantari, Z. 2020. A Modeling Comparison of Groundwater Potential Mapping in a Mountain Bedrock Aquifer: QUEST, GARP, and RF Models. *Water*, 12, 679; doi:10.3390/w12030679

8. Dube, F., I. Nhapi, A. Murwira, W. Gumindoga, J. Goldin, and D.A. Mashauri. 2014. Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District – Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 67-69: 145–152.

9. Entezari, M., Maleki, A., Moradi, Kh. and Olfati, S. 2013. Gully erosion mapping in Deyreh watershed using AHP. *Journal of Spatial Planning*, 17(4): 63-86. (In Persian).

10. Geissen, V., C. Kampichler, J.J. López-de Llergo-Juárez and A. Galindo-Acántara. 2007. Superficial and subterranean soil erosion in Tabasco, tropical Mexico: development of a decision tree modeling approach. *Geoderma*, 139: 277–287

11. Ghosh, A. and Maiti, R. 2021. Soil erosion susceptibility assessment using logistic regression, decision tree and random forest: study on the Mayurakshi river basin of Eastern India. *Environ. Earth. Sci.* 80(328): <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09631-5>

12. Holland, J. H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (Ann Arbor: University of Michigan Press).

13. Hosseini, S. S. and Qorbani, M. 2010. *Economics of soil Erosion*. 2nd edition, Mashhad Ferdowsi University Press, 128 pages. (In Persian).

14. Igwe, O., John, U.I., Solomon, O. 2020. GIS-based gully erosion susceptibility modeling, adapting bivariate statistical method and AHP approach in Gombe town and environs Northeast Nigeria. *Geoenviron. Disasters*, 7(32): <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00166-8>

15. Kuhnert, P. M., Henderson, A., Bartley, R., Herr, A. 2010. Incorporating uncertainty in gully erosion calculations using the random forests modelling approach. *ENVIRONMETRICS*, 21: 493-509.

16. Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5: 3–30.

17. Mosavi, A., Sajedi-Hosseini, F., Choubin, B., Taromideh, F., Rahi, G. and Dineva, A. A. 2020. Susceptibility Mapping of Soil Water Erosion Using Machine Learning Models. *Water*, 12(7):

داوودی مقدم و همکاران [۷] و دارابی و همکاران [۶] اشاره کرد که نتایج ایشان با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. با توجه به یافته‌های این پژوهش، استفاده از مدل GARP در پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش آبکندی در آبخیزهای مشابه به منظور بهبود برنامه‌ریزی‌های مدیریتی اجرایی حفاظت خاک و ارتقاء کارایی و اثرگذاری آن‌ها توصیه می‌شود. همچنین انجام پژوهش‌های پیش‌تر با هدف ارزیابی عملکرد این مدل در پیش‌بینی وقوع فرسایش آبکندی در حوضه‌های با ویژگی‌های محیطی متفاوت و متنوع نیز پیشنهاد می‌گردد.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از بخشی از نتایج پروژه‌ی تحقیقاتی ملی با کد مصوب ۹۹۰۵۱۴-۰۲۴-۲۹-۵۰-۰ در پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (تات) است. نویسندگان این اثر، به این وسیله از مسئولین محترم پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کهگیلویه و بویراحمد و کلیه‌ی عزیزانی که نویسندگان مقاله را در راه انجام هر چه بهتر این پژوهش یاری نمودند، قدردانی به‌عمل می‌آورند.

منابع

1. Allouche, O., Tsoar, A. and Kadmon, R., 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of applied ecology*, 43(6): 1223-1232.
2. Amiri, M., Pourghasemi, H. R., Ghanbarian, Gh. and Afzali, S. F. 2020. Spatial modeling of gully erosion in Maharlou Watershed using different scenarios and Weights-of-evidence algorithm. *Watershed Engineering and Management*, 11(4): 1016-1032.
3. Anderson, R. P. Lew, D, Townsend Peterson, A. 2003. Evaluating predictive models of species distributions, criteria for selecting optimal models, *Ecological Modelling*, 162: 211-232.
4. Castillo, C., E.V. Taguas, P. Zarco-Tejada, M.R. James and J.A. Gómez. 2014. The normalized topographic method: an automated procedure for gully mapping using GIS. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(15): 2002–2015
5. Conoscenti, C., S. Angileri, C. Cappadonia, E. Rotigliano, V. Agnesi and M. Märker. 2014. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, 204(1): 399–411.
6. Darabi, H., Choubin, B., Rahmati, O., Torabi Haghighi, A., Pradhan, B., Kløve, B., Urban flood risk mapping using the

23. Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R. and Feizizadeh, B. 2018. Assessing the effectiveness of the maximum entropy model to gully erosion susceptibility prediction in the Kashkan-Poldokhtar Watershed. doi: 10.22092/IJWMSE.2018.118040
24. Saha, S., Gayen, A., Pourghasemi, H. R. 2019. Identification of soil erosion-susceptible areas using fuzzy logic and analytical hierarchy process modeling in an agricultural watershed of Burdwan district, India. *Environ. Earth. Sci.* 78(649): <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8658-5>
25. Shadfar, S. 2015. Application of Fuzzy Logic Operatorsto Investigate Gully Erosion using Geographic information system (GIS) (Case study: Troud watershed basin). *Geographical Data (Sepehr)*, 23(92): 35-42. (In Persian).
26. Stocckwell, D., Peters, D. 1999. The GARP modeling system: problems and solutions to automated spatial prediction, *Geographical Information Science*, 13: 143-158.
27. Yesilnacar, E.K. 2005. The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey. PhD 1995. <https://doi.org/10.3390/w12071995>
18. Nikkani, D. 2015. Integrated management of natural resources and agriculture in watersheds. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. 49 p. (In Persian).
19. Poesen J., Vandaele K., van Wesemael B. (1998) Gully Erosion: Importance and Model Implications. In: Boardman J., Favis-Mortlock D. (eds) *Modelling Soil Erosion by Water*. NATO ASI Series (Series I: Global Environmental Change), vol 55. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-58913-3_22
20. Pourghasemi, H.R., B. Pradhan, C. Gokceoglu, M. Mohammadi and H.R. Moradi. 2013. Application of weights-of-evidence and certainty factor models and their comparison in landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6: 2351–2365.
21. Pouteau, R., Meyer, J. Y., Taputuarai, R, Stoll, B. 2011. A comparison between GARP model and SVM regression to predict invasive species potential distribution: the case of *Miconia calvescens* on Moorea, French Polynesia.
22. Rahmati, O., A. Haghizadeh, F. Noormohammadi and S. Lee. 2016. Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Natural Hazards*, 82(2): 1231-1258.

Performance Evaluation of GARP Model in Forecasting the Probability of Gully Erosion Occurrence in Abgendi Basin, Kohgiluyeh & Boyerahmad Province

I. Saleh¹, O. Rahmati², S. M. Soleimanpour³, M. Khazaei⁴, S. Shadfar⁵

Received: 24-05-2022 Accepted: 10-09-2022

Abstract

The present study has evaluated the efficiency of GARP model in forecasting the probability of gully erosion occurrence in Abgendi basin, Kohgiluyeh & Boyerahmad province. After field visits, 81 gullies were recorded by GPS and surveying camera, then the map of gully erosion distribution was prepared in ArcGIS environment. Variables of elevation, slope, slope direction, distance to road, distance to surface streams, land-use, pedology, lithology, drainage density and Topographic Wetness Index (TWI) were selected as the factors affecting the occurrence of gully erosion and used as independent variables in the modelling process. The modelling of gully erosion occurrence was accomplished using Desktop Garp software. Also, Receiver Operating Characteristic (ROC) and True Skill Statistic (TSS) were used for validation of the prediction results. The results indicated that, the most likely probability of gully erosion occurrence is concentrated in the central part of the basin, and it is reduced by moving towards the border parts especially southeast of the basin. Accuracy evaluation criteria ROC=0.97 and TSS=0.84 also indicate excellent performance of the GARP model in forecasting the probability of gully erosion in Abgendi basin.

Keywords: *Land-use, Machine learning model, Soil conservation, Topographic wetness index*

1. Corresponding Author and Assistant Professor, Forests, Rangelands and Watershed Management Research Department, Kohgiluyeh & Boyerahmad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yasuj, Iran. Email: salehiman61@gmail.com

2. Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sanandaj, Iran.

3. Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran.

4. Assistant Professor, Forests, Rangelands and Watershed Management Research Department, Kohgiluyeh & Boyerahmad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yasuj, Iran.

5. Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.