

ارزیابی پایداری برآوردهای مدل بیشینه آنتروپی برای مدل‌سازی فرسایش شیاری^۱

مریم پورنادر^۱، سادات فیض‌نیا^{۲*}، حسن احمدی^۳، حاجی کریمی^۴ و حمیدرضا پیروان^۵

۱) فارغ‌التحصیل دکتری آبخیزداری، گروه آبخیزداری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۲*) استاد گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

* نویسنده مسئول مکاتبات: sfeiz@ut.ac.ir

۳) استاد گروه آبخیزداری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۴) استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

۵) دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۴

چکیده

لازمه مدیریت فرسایش خاک، ارائه راهکارهای مناسبی می‌باشد که با شناخت از وضعیت فرسایش خاک حاصل می‌شود. هدف از مطالعه حاضر، مدل‌سازی پتانسیل فرسایش شیاری با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی و بررسی پایداری مدل به‌منظور آگاهی از حساسیت‌پذیری این فرسایش در حوضه آبخیز گل‌گل استان ایلام است. بدین منظور، فاکتورهای زمین-محیطی برای استفاده در فرآیند مدل‌سازی انتخاب شد. افزون بر این، موقعیت ۱۵۷ واقعه فرسایش شیاری با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جغرافیایی (GPS) ثبت شد. این وقایع در قالب دو گروه آموزش و اعتبارسنجی با نسبت ۷۰ به ۳۰ کلاس‌بندی شد. به‌منظور ارزیابی پایداری مدل، کلاس‌بندی‌های مذکور سه بار تکرار شد و بنابراین، سه نمونه مجموعه داده (D1، D2 و D3) آماده شد. ارزیابی کارایی مدل با استفاده از سطح زیر منحنی ROC صورت پذیرفت. با توجه به نتایج پایداری، تمامی مجموعه داده‌ها، مقادیر سطح زیر منحنی خوبی را کسب نمودند و از نظر کارایی برآزش (RAUC = ۱/۳) و پیش‌بینی (RAUC = ۳/۱) پایدار می‌باشند. به‌بیان دیگر، نتایج ثابت نمود زمانی که داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی تغییر پیدا نمود مدل کاملاً پایدار باقی ماند. علاوه بر این، مشخص شد که مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) قادر به تولید نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش شیاری است. از سوی دیگر، بر مبنای آنالیز حساسیت، مشخص شد که مهم‌ترین اجزا در مدل‌سازی حساسیت‌پذیری فرسایش شیاری سنگ‌شناسی و فاصله از آبراهه می‌باشد. روش‌شناسی تطبیق‌یافته به‌عنوان یک رویکرد مؤثر برای برنامه‌ریزی کاربری اراضی و مدیریت ریسک فرسایش سودمند می‌باشد.

کلید واژه‌ها: پایداری؛ سامانه اطلاعات جغرافیایی؛ فرسایش خاک؛ یادگیری ماشین

مقدمه

فرسایش خاک جزء محدودیت‌های اساسی در استفاده بهینه و پایدار از منابع آب و خاک می‌باشد، از این رو آگاهی از وضعیت فرسایشی منطقه، به منظور درک بهتر سامانه‌های آبخیز و اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب ضروری می‌باشد. تولید رسوب به‌عنوان یکی از پیامدهای مهم و مشخص فرسایش خاک، در اشکال مختلف سبب اثرات درون و برون منطقه‌ای ویژه‌ای می‌شود (Williams, 1983). فرسایش به‌طور مستقیم بر تولید محصول و به‌طور غیرمستقیم بر افزایش خطر سیل، رسوب‌گذاری و نیز تغییرات اقلیمی در خارج از منطقه اثر می‌گذارد. در سامانه‌های آبخیز ایران نیز فرسایش خاک و تولید رسوب از موضوعات بسیار مهم اقتصادی، اجتماعی و عمرانی کشور بوده که با از دست رفت سالانه بیش از یک میلیارد تن از خاک‌های حاصلخیز و نیز با تولید و انتقال حجم بالای رسوب از مناطق منشأ به سمت پایین‌دست، سبب تخریب شدید اکوسیستم‌های طبیعی، زیرساخت‌ها و مناطق مسکونی و صنعتی می‌شود (Bayramin et al., 2003). پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور نرخ سالانه فرسایش خاک در ایران را تا ۳۳ تن در هکتار برآورد کرده که ۵ تا ۶ برابر حد مجاز است (Hosseini et al., 2012). از این رو، درک فرایند فرسایش به‌منظور پیش‌بینی فرسایش خاک و جلوگیری از تمام چالش‌های مذکور مهم می‌باشد.

فرسایش بین‌شیاری و شیاری نقش مهمی در نرخ فرسایش دارند و فرسایش بین‌شیاری در سیر تکامل زمین در دامنه‌های پرشیب به فرسایش شیاری تبدیل می‌شود (Flanagan et al., 2005). افزون بر آن، هنگامی که فرسایش در دامنه‌ها ظاهر می‌شود، بیشتر رسوبات فرسایش یافته توسط فرسایش ورقه‌ای طول کوتاهی را پیمایش نموده سپس به کانال‌هایی در مقیاس میکرو به نام شیار متصل می‌شوند که عمدتاً توسط جریان شیاری انتقال

می‌یابند. لذا در دامنه‌های با فرسایش شیاری غالب، اهمیت تخمین فرسایش حاصل از شیار برای پیش‌بینی فرسایش خاک بیشتر می‌شود. فرسایش شیاری عبارت از جدا شدن و انتقال رسوب به‌وسیله جریان متمرکز آب در کانالی باریک و فرسایش‌پذیر است (Bagnold, 1996). فرسایش شیاری مانند دیگر فرسایش‌ها یک پدیده بحرانی ناشی از هیدرولیک جریان، بارش، توپوگرافی، ژئومورفولوژی و کاربری اراضی است. در ایجاد این فرسایش، شیب زمین بسیار مؤثر است. فرسایش شیاری، در دامنه‌های کوه و حتی در سطح زمین‌های کم‌شیب دیده می‌شود. این نوع فرسایش، پیشرفته‌تر از فرسایش سطحی می‌باشد و ممکن است به صورت یکسری خطوط موازی ظاهر شود که ابتدا کم‌عمق هستند، ولی به‌سرعت عمیق‌تر می‌شوند. فرسایش شیاری و شکل پیشرفته‌تر آن (که فرسایش آبراه‌ای نامیده می‌شود)، زمانی اتفاق می‌افتد که رواناب متمرکز شده، کانال‌هایی را در دل خاک ایجاد کند (رفاهی، ۱۳۸۲). به‌طور کلی فرسایش شیاری به‌عنوان یکی از چهار نوع فرسایش اصلی (فرسایش سطحی، شیاری، خندقی و آبراه‌ای) طبقه‌بندی شده است (Bahadori, 2014). هدرروی خاک و عناصر غذایی سطحی به وسیله فرسایش شیاری علاوه بر کاهش حاصلخیزی خاک، موجب رسوب‌گذاری در مخازن سدها و کاهش کیفیت آب‌ها می‌گردد. Brunne (۱۹۹۵) عنوان نمود که در زمین‌هایی که فرسایش شیاری توسعه یافته، نرخ فرسایش سه برابر شده است. علاوه بر این Bruno و همکاران (۲۰۰۸) مقدار تولید رسوب در مزارع ذرت دارای فرسایش شیاری را ۹ تا ۲۱ برابر بیشتر از حالتی گزارش نمودند که مزرعه دارای فرسایش سطحی بوده است. Moreno-de las Heras و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی اثرات زیست-محیطی فرسایش شیاری روی دامنه‌های خشک مدیترانه-ای اعلام نمودند از دست رفتن آب توسط شبکه شیاریها منجر به افزایش استرس آب در گیاهان در حال رشد گشته و باعث کاهش غیرخطی بیومس و غنای گونه‌ای و

عملکرد را در بین مدل‌ها داشته‌اند. Zabihi و همکاران (۲۰۱۸) برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش خندقی از سه مدل آماری نسبت فراوانی، اوزان شاهد و شاخص آنتروپی استفاده نمودند نتایج نشان داد مدل نسبت فراوانی بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها دارد. جعفری گرزین و کاویان (۱۳۸۸) به ارزیابی وقوع فرسایش خندقی در حوضه آبخیز سرخ‌آباد مازندران با استفاده از سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی اقدام نمودند. در این پژوهش عواملی نظیر سنگ‌شناسی، شیب، جهت جغرافیایی، طبقات ارتفاعی، درصد پوشش گیاهی، کاربری اراضی، عمق خاک، گروه‌های هیدرولوژی خاک و فاصله از راه‌ها به‌عنوان عوامل مؤثر در شکل‌گیری و توسعه خندق مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور لایه‌های اطلاعاتی عوامل یادشده، در ۵ منطقه خندقی حوضه مورد بررسی قرار گرفته و با محاسبه شاخص تراکم وزنی عوامل گوناگون، نقش این عوامل در وقوع فرسایش خندقی ارزیابی شد. نتایج پژوهش نشان داد نزدیک به ۴۸ درصد از سطح حوضه از نظر فرسایش خندقی، در نقشه حساسیت در طبقه‌ی بالا قرار دارند. محمدی ترکشوند و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی چند روش تهیه نقشه فرسایش شیاری در حوضه‌های آبخیز کن- سولقان و جاجرود با استفاده از RS و GIS اقدام نمودند. در این پژوهش در مرحله اول در حوضه آبخیز کن- سولقان چهار نقشه واحدهای کاری از تلفیق لایه‌های اطلاعاتی (الف) پوشش گیاهی، سنگ‌شناسی و شیب (ب) کاربری، سنگ‌شناسی و شیب (ج) کاربری، حساسیت سنگ‌ها به فرسایش و شیب (د) کاربری حساسیت سنگ‌ها به فرسایش و واحدهای اراضی، تهیه شد. برای بررسی کارایی این چهار نقشه، ۵۳ نقطه زمینی کنترل شد. نتایج نشان داد که نقشه واحدهای کاری «د» با توجه به ملاحظات اقتصادی و اجرایی بهتر از نقشه‌های واحدهای کاری «الف»، «ب» و «ج» تا حدودی «ج» در تهیه نقشه فرسایش شیاری می‌باشد. در مرحله دوم در حوضه آبخیز

بروز شرایط نامطلوب برای استقرار گیاهان می‌شود. به همین سبب بررسی فرسایش خاک برای ارزیابی راهبردهای مدیریتی و نیز برنامه توسعه تمامی کشورها بسیار مهم می‌باشد (Ownegh and Nohtani, 2003).

روش‌های مختلف آماری، شبکه عصبی، منطق فازی و یادگیری ماشین بر مبنای سیستم اطلاعات جغرافیایی تاکنون در مطالعات مختلف فرسایش خاک ارائه شده است که می‌توان به موارد زیر اشاره داشت. نسبت فراوانی^۲ (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۶؛ Zabihi و همکاران، ۲۰۱۸)، اوزان شاهد^۳ (Zabihi و همکاران، ۲۰۱۸)، رگرسیون لجستیک^۴ (Conoscenti و همکاران، ۲۰۱۴؛ Dewitte و همکاران، ۲۰۱۵)، رگرسیون خطی^۵ (Chaplot, ۲۰۰۵)، تجزیه و تحلیل شرطی^۶ (Magliulo, ۲۰۱۲؛ Conoscenti و همکاران، ۲۰۱۳)، فرایند تحلیل سلسله مراتبی^۷ (Maerker و Zakerinejad, ۲۰۱۴)، درخت طبقه‌بندی و رگرسیونی^۸ (Märker و همکاران، ۲۰۱۱؛ Jurchescu و Grecu, ۲۰۱۵)، جنگل تصادفی^۹ (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۷)، ماشین بردار پشتیبان^{۱۰} (Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۷) شاخص آماری^{۱۱} (غیائی و همکاران، ۱۳۹۶)، حداکثر آنتروپی^{۱۲} (رجب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷). Rahmati و همکاران (۲۰۱۷) به منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش خندقی در حوضه آبخیز کشکان-پلدختر در ایران، اقدام به مقایسه ۷ مدل (L-SVM, P-SVM, RBF-SVM, S-SVM, BP- ANN, RF و BRT) از مدل‌های یادگیری ماشین نمودند. نتایج ثابت نمود دو مدل RF و RBF-SVM بهترین

² Frequency Ratio

³ Weights of evidence

⁴ Logistic regression

⁵ Linear regression

⁶ Conditional analysis

⁷ Analytical hierarchy process

⁸ Classification and regression trees

⁹ Random forest

¹⁰ Support vector machine

¹¹ Statistical index

¹² Maximum entropy

جاجرود، نقشه واحدهای کاری حاصل از روش «د» به همراه سه نقشه واحدهای کاری مبتنی بر «ه» واحدهای اراضی، «و» واحدهای حساسیت سنگ‌ها و «ز» واحدهای فتومورفیک حاصل از تفسیر تصاویر ماهواره‌ای ETM+، مورد ارزیابی قرار گرفتند. شدت فرسایش شیاری در ۳۱۴ نقطه زمینی کنترل و نقشه واقعی فرسایش شیاری تهیه شد. نقشه فرسایش شیاری با هر یک از نقشه‌های واحدهای کاری «د»، «ه»، «و» و «ز» قطع داده شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین صحت مربوط به روش تفسیر تصاویر ماهواره‌ای با ۸۱ درصد صحت بود. همچنین صحت روش‌های تلفیق لایه‌ها، واحدهای اراضی و حساسیت سنگ‌ها به ترتیب ۷۸/۴، ۶۶/۶ و ۵۹/۹ درصد بود. در کل روش تفسیر تصاویر ماهواره‌ای در تهیه نقشه فرسایش شیاری، از روش‌های دیگر بهتر بوده است. شادفر (۱۳۹۰) به بررسی فرسایش خندقی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در شهرستان رودبار، استان گیلان اقدام نمود. نتایج نشان داد که واحدهای مارن سیلتی و مخروط افکنه‌های قدیمی ۱۰۰ درصد و تیپ اراضی تپه‌ماهور ۵۷ درصد از مناطق تحت تأثیر فرسایش خندقی را به خود اختصاص داده‌اند که حدود ۹۲ درصد از فرسایش‌های خندقی در شیب ۲۰-۵ درصد گسترده شده‌اند. در این تحقیق روش تحلیل سلسله مراتبی، به دلیل اولویت‌بندی عوامل، به‌عنوان مدل مناسب جهت پهنه‌بندی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی معرفی شده است. محمد پور و همکاران (۱۳۹۶) نسبت به مدل-سازي غلظت رسوب حاصل از فرسایش بادی با استفاده از سیستم نروفازی (ANFIS) در منطقه نیمه‌خشک استان گلستان اقدام نمودند. ارزیابی مدل نشان داد که مدل نروفازی با ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب، به ترتیب ۰/۶۹۷، ۳۰/۵ و ۱/۰ قادر به پیش‌بینی قابل قبول رسوب حاصل از فرسایش شیاری می‌باشد. صابرچناری و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و روش پیشنهادی گوپتا و

جوشی (GNRF) اقدام به پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در حوضه آبخیز قرناوه استان گلستان اقدام نمودند. نتایج اعتبارسنجی مدل با استفاده از روش جمع کیفی و ضریب کاپا نشان داد که مدل نسبت فراوانی با مقدار جمع کیفی و ضریب کاپای بالاتر (۳ و ۰/۸۹) نسبت به مدل (GNRF) ۱/۲۷ و ۰/۷۴ برای پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می‌گردد. از بررسی پژوهش‌های صورت پذیرفته چنین جمع‌بندی می‌شود که در مطالعات فوق به‌ضرورت استفاده از یک مدل (Conoscenti و همکاران، ۲۰۱۴؛ گیائی و همکاران، ۱۳۹۶؛ رجب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷) و در برخی دیگر به چندین مدل (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۶؛ Zabihی و همکاران، ۲۰۱۸) پرداخته شده است. نکته حائز اهمیت بیانگر آن است که در هیچ‌کدام از مطالعات صورت پذیرفته نسبت به پایداری مدل مورد استفاده در شرایط تغییر تصادفی داده‌ها در بخش آموزش و اعتبارسنجی توجه نشده است. این در حالی است که پایداری مدل در شرایط تغییر داده‌های وقوع از اهمیت بسزایی برخوردار است و در قبول یا رد مدل مورد استفاده به‌عنوان مدل مناسب در مدل‌سازی تعیین کننده می‌باشد. هدف از مطالعه حاضر استفاده از مدل حداکثر آنتروپی به‌عنوان یک مدل یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تغییرات مکانی فرسایش شیاری بود. مدل حاضر به دلیل اینکه با انواع مختلفی از متغیرهای مستقل اجرا می‌شود، نیازی به تعریف فرضیات ابتدایی ندارد (Lucà *et al.*, 2011)، توانایی بالایی در ایجاد رابطه غیرخطی بین پیش‌بینی کننده‌ها و نتایج ادواری داشته و نیز مطالعات اندکی نسبت به آزمایش عملکرد این مدل جهت پیش‌بینی حساسیت‌پذیری فرسایش شیاری انجام شده، مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین، اهداف ویژه این تحقیق شامل بررسی پایداری مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی حساسیت‌پذیری فرسایش شیاری و تعیین فاکتورهای مهم در وقوع فرسایش شیاری می‌باشد. بدین منظور، در

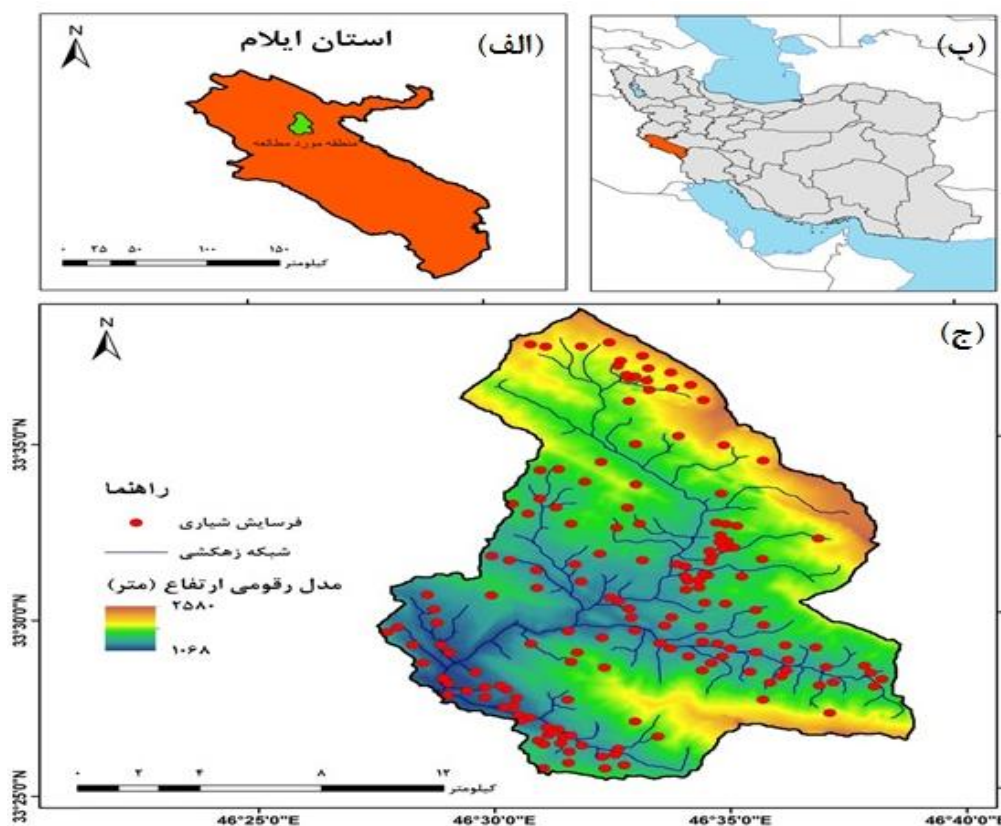
سد ایلام به‌عنوان مخزن آب شرب شهر ایلام در پایین- دست حوضه قرار دارد. نزدیک به ۹۰٪ از خاک منطقه اینسپتی‌سول بوده که جزو خاک‌های با محدودیت‌های نسبتاً زیاد اقلیمی و عمق برای جنگل‌کاری می‌باشد (خاک دره‌ها مناسب برای درخت‌کاری است). ۱۰٪ باقیمانده انتی‌سول بوده و با محدودیت‌های نسبتاً زیاد اقلیمی و عمق برای مرتع می‌باشد. ورود رسوب حاصل از زیرحوضه‌های بالادست به مخزن سد همواره به‌عنوان تهدیدی جدی در توسعه پایدار منطقه مطالعاتی محسوب می‌شود (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۵). منطقه مطالعاتی به- عنوان بخشی از زون زاگرس گسل‌خورده با واحدهای سنگ‌شناسی متنوع از قبیل شیل، سنگ‌آهک و رسوبات پادگانه آبرفتی می‌باشد.

راستای تحقق اهداف مذکور، پژوهشی در حوضه آبخیز گل‌گل در استان ایلام صورت پذیرفت که تاکنون در کشور انجام نشده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز گل‌گل به وسعت تقریبی ۲۵۲ کیلومترمربع در غرب ایران و در استان ایلام قرار دارد. منطقه مطالعاتی، در محدوده جغرافیایی ۲۶' ۴۶° تا ۳۸' ۴۶° طول شرقی و ۲۴' ۳۳° تا ۳۹' ۳۳° عرض شمالی، با محدوده ارتفاعی ۱۰۶۸ تا ۲۵۸۰ متر از سطح دریا گسترده شده است. متوسط دمای منطقه °C ۱۶/۹ و میانگین بارش سالانه آن ۵۸۰ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز گل‌گل و موقعیت فرسایش‌های شیاری

پردازش و گردآوری اطلاعات

مختلف منطقه برداشت شده بود، مورد مطابقت قرار گرفت و صحت تفکیک مورد تأیید قرار گرفت. پس از اصلاح نقشه کاربری اراضی با مراجعه مجدد به منطقه مطالعاتی نسبت به تدقیق مرز کاربری‌ها به‌ویژه مراتع از اراضی کشاورزی و باغات از جنگل اقدام شد. لایه‌های سنگ‌شناسی و آبراهه‌های منطقه نیز در قالب مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده بود. تمامی لایه‌ها، با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر آماده‌سازی شد که منطقه‌ای با وسعت تقریبی ۲۲۵ کیلومترمربع را پوشش می‌دهند. به‌عبارت‌دیگر، کلیه نقشه‌ها به‌صورت رستری با پیکسل سایز ۳۰ متر تهیه گردید و جهت استفاده در مدل‌سازی به کار گرفته شد. به دلیل اینکه سه لایه سنگ‌شناسی، تراکم زهکشی و کاربری اراضی دارای مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ هستند و بقیه نقشه‌ها از دقت بالایی برخوردارند، مقیاس خروجی نهایی با حداقل مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در نظر گرفته شد.

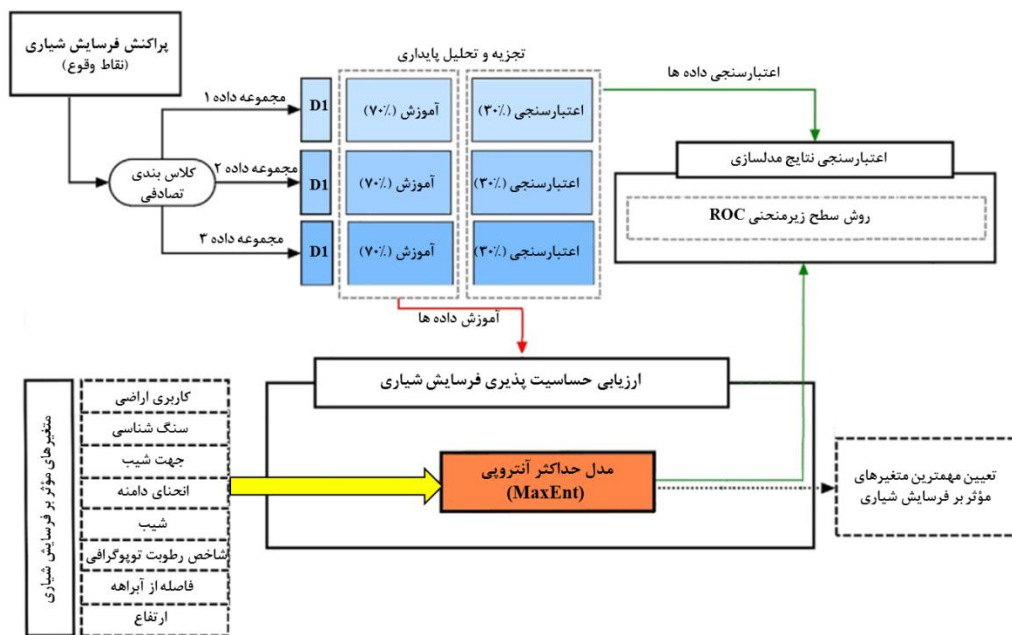
نقشه پراکنش فرسایش شیاری

به‌منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش شیاری در منطقه مورد مطالعه، ابتدا موقعیت فرسایش‌های شیاری اتفاق افتاده در حوضه آبخیز گل‌گل از طریق پیمایش‌های صحرائی چندباره تعیین گردید (شکل ۱ ج). در پایش صحرائی حوضه، ۱۵۷ مورد واقعه فرسایش شیاری با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) ثبت شد. فرسایش‌های شیاری موجود در منطقه مطالعاتی به‌صورت متراکم بوده و حالت موازی داشته و دارای عرض و عمق کمی بودند. در موارد معدودی که تفکیک فرسایش شیاری از فرسایش خندقی اولیه مشکل بود بر اساس نظر کارشناسی، چنانچه امکان تسطیح فرسایش موجود با استفاده از عملیات خاک‌ورزی و شخم وجود داشت به‌عنوان فرسایش شیاری مدنظر قرار گرفت.

این بررسی بر اساس مجموعه داده‌های حاصل از سامانه اطلاعات جغرافیایی که شامل موقعیت فرسایش‌های شیاری و عوامل مؤثر در وقوع فرسایش شیاری می‌باشد صورت گرفت. روش استفاده‌شده در این مطالعه شامل مراحل می‌باشد که در شکل ۲ به‌صورت رویکرد کلی و در قالب یک الگوی مفهومی از روند تحقیق ارائه شده که به‌منظور تجزیه و تحلیل فرسایش شیاری با استفاده از مدل پیشینه آنتروپی در تکرارهای مختلف توسعه یافته است. نقاط وقوع فرسایش شیاری به‌عنوان عامل وابسته و عواملی مانند شیب، جهت، ارتفاع، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی و انحنا دامن به‌عنوان عوامل مستقل مورداستفاده قرار گرفتند. از بین ۸ لایه اطلاعاتی به‌غیر از دو لایه کاربری اراضی و سنگ‌شناسی که ماهیت طبقه‌ای^{۱۳} دارند، بقیه لایه‌ها از ماهیت پیوسته^{۱۴} برخوردارند. به‌منظور تولید و نمایش لایه‌های اطلاعاتی یادشده، از نرم‌افزار Arc GIS 10.2 استفاده شد (شکل ۴). همچنین در فرایند تجزیه و تحلیل، تمام لایه‌های برداری (shp) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر به لایه‌های رستری تبدیل شد. از بین لایه‌های موردبررسی به‌غیر از لایه‌های سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و فاصله از آبراهه، ۵ لایه دیگر از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر تهیه شده‌اند که نسبت به سه لایه مذکور از دقت بالایی برخوردارند. به‌منظور همسان‌سازی لایه‌های مختلف با توجه به ماهیت و نحوه تهیه آن‌ها، بر اساس عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای موجود از منطقه، دقت نقشه کاربری اراضی اصلاح گردید و تا مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ ارتقا یافت. به‌منظور بررسی صحت تفکیک کلاس‌های مختلف کاربری اراضی، با فراخوانی تعداد ۴۰ نقطه از نقاط واقعی زمینی، که در بازدیدهای مکرر میدانی و با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) از نقاط

¹³ Categorical Data

¹⁴ Continues Data



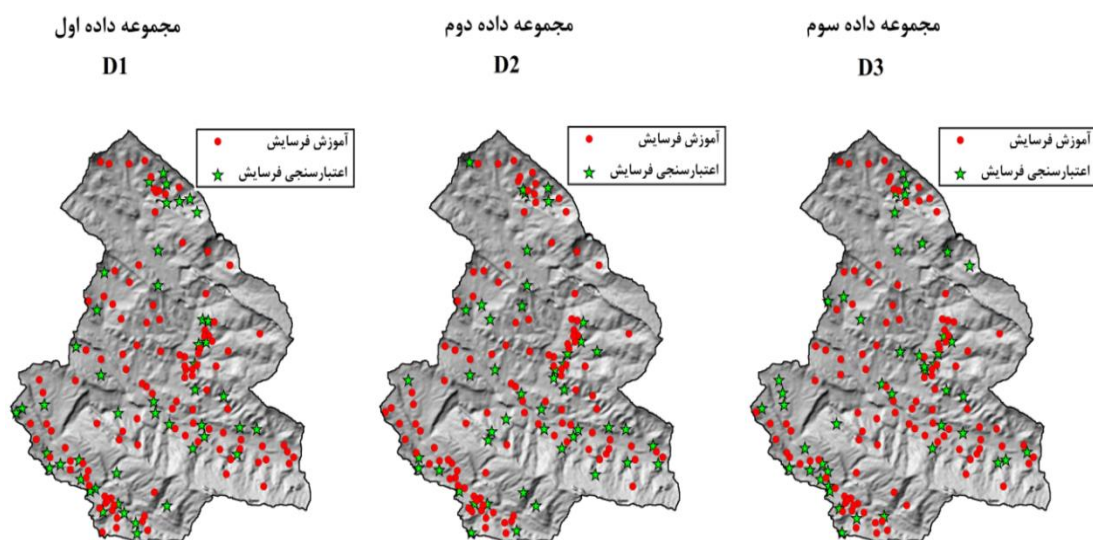
شکل ۲. الگوی مفهومی روند تحقیق در حوضه آبخیز گل‌گل

به صورت تصادفی توسط نرم‌افزار انتخاب می‌شود و کاربر، تنها نسبت این دو گروه را تعیین می‌نماید.

متغیرهای مؤثر در فرسایش شیاری

از آنجایی که چهارچوب استاندارد و نظام‌مندی در خصوص تعیین و انتخاب فاکتورهای مؤثر در مدل‌سازی حساسیت‌پذیری فرسایش شیاری وجود ندارد (Conoscenti et al. 2014; Angileri et al. 2016). لذا بر مبنای بررسی تحقیقات مشابه (Auerswald و همکاران، ۲۰۰۹؛ Wirtz و همکاران، ۲۰۱۲؛ Angileri و همکاران، ۲۰۱۶؛ Pournader و همکاران، ۲۰۱۸) هشت فاکتور مؤثر (ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)، فاصله از آبراهه، انحنای دامنه، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی) در فرایند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. فاکتورهای مؤثر در وقوع فرسایش شیاری به عنوان متغیرهای مستقل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

نقاط وقوع به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی با نسبت ۷۰ به ۳۰ طبقه‌بندی شد. از کل نقاط وقوع، ۱۱۰ واقعه به صورت اتفاقی برای آموزش مدل (مرحله کالیبراسیون) و ۴۷ مورد با هدف اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. مجموعه داده‌های استفاده شده برای آموزش در مدل MaxEnt به عنوان متغیرهای مستقل مورد استفاده قرار گرفت. در گام بعدی به منظور بررسی پایداری مدل مذکور نسبت به انتخاب تصادفی، مجموعه داده‌هایی که برای آموزش و اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفته بود به صورت تصادفی تغییر داده شد (Conoscenti et al., 2014; Angileri et al., 2016; Cama et al., 2017; Rahmati et al., 2018). این طبقه‌بندی در قالب سه تکرار و با استفاده از دستور Subset features واقع در الحاقی Geostatistical Analyst در محیط Arc Map 10.2 صورت پذیرفت، سپس، سه مجموعه داده با عنوان D1، D2 و D3 آماده شد (شکل ۳). لازم به ذکر است انتخاب تصادفی گروه آموزش نسبت به گروه اعتبارسنجی هر بار



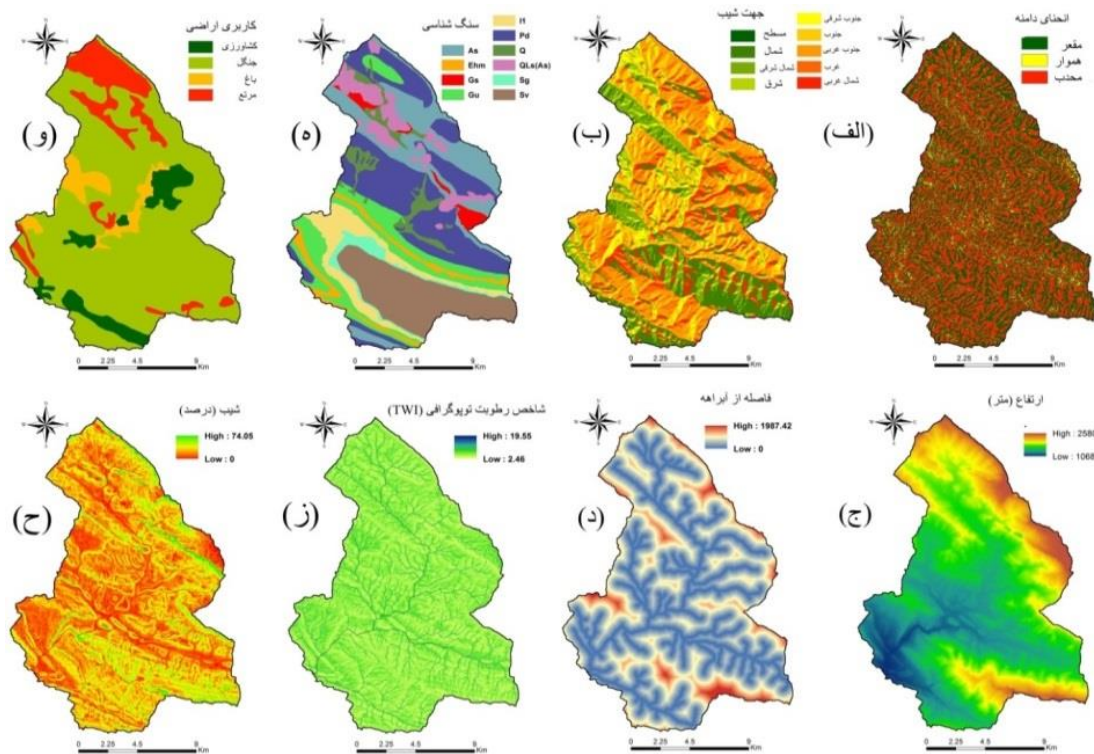
شکل ۳. مجموعه داده‌های مورد استفاده به منظور ارزیابی پایداری مدل MaxEnt در برآورد پتانسیل وقوع فرسایش شیاری

تشکیل یافته به وسیله تطبیق یک خط افقی با سطح تلقی می‌گردد (Ghorbani Nejad *et al.* 2017). نقشه سنگ‌شناسی منطقه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه و رقومی شد. سنگ‌شناسی منطقه در قالب ۱۰ گروه سنگی Pd, Gu, As, Gs, Qa, Sv, Sg, Il and Ehm, Qls آماده گردید (شکل ۴ ه). نقشه کاربری اراضی تهیه شده توسط سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور مقیاس (۱:۲۵۰۰۰۰) به عنوان نقشه اولیه کاربری اراضی مدنظر قرار گرفته و بر اساس تصاویر نرم‌افزار Google Earth و نیز نقاط کنترل زمینی تدقیق گردید و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ ارتفاع یافت. چهار کلاس کاربری اراضی کشاورزی، مرتع، مناطق مسکونی و جنگل در منطقه مطالعاتی وجود داشت (شکل ۴ و). علاوه بر این، فاصله از آبراهه برمبنای الگوریتم‌های فاصله اقلیدسی از شبکه زهکشی در محیط ArcGIS 10.2 تهیه شد (شکل ۴ د).

لایه درصد شیب، جهت شیب، انحنای سطح و ارتفاع از سطح دریا از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر سنجنده Aster ماهواره Terra استخراج گردید. درصد شیب بر سرعت جریان آب تأثیر گذاشته و متعاقباً، دامنه‌های پرشیب در وقوع فرسایش شیاری بسیار مستعد می‌باشند (Jiang *et al.* 2018). محدوده درصد شیب محاسبه شده در این مطالعه از صفر تا ۷۰٪ متغیر می‌باشد (شکل ۴ ح). جهت شیب در قالب ۹ کلاس طبقه‌بندی شد (شکل ۴ ب). فاکتور توپو-هیدرولوژیکی TWI (شکل ۴ ز) که توسط Moore و همکاران (۱۹۹۱) توسعه داده شد از عوامل مستقل دیگری است که مورد استفاده قرار گرفت و از طریق معادله زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$TWI = \ln(\alpha / \tan\beta) \quad (1)$$

که α مناطق تجمع را نشان می‌دهد که جریان در بر می‌گیرد، و β زاویه شیب می‌باشد. فاکتور توپوگرافیکی دیگری که مورد بررسی قرار گرفت انحنای دامنه می‌باشد (شکل ۴ الف). فاکتور مذکور به عنوان انحنای خط کنتور



شکل ۴. نقشه متغیرهای محیطی در منطقه مطالعاتی

مبنای مدل حداکثر آنتروپی

مدل حداکثر آنتروپی یکی از فن‌آوری‌های یادگیری ماشین^{۱۵} (MLTs) است که قابلیت پیش‌بینی مکانی بالایی در زمینه‌های مختلف علوم محیطی دارد (Phillips *et al.*, 2006; Park, 2015). یکی از مزیت‌های استفاده از این مدل، بالا بردن قطعیت در پیش‌بینی کانون‌های تولید گردوغبار است. زیرا فرایند مدل‌سازی بر اساس وقوع فرسایش شیاری ثبت شده انجام می‌گیرد و این امر موجب کاهش عدم قطعیت مدل‌سازی می‌شود. برخلاف مدل‌های آماری که قبل از مدل‌سازی تعدادی فرضیات آماری تعریف می‌نمایند، مدل حداکثر آنتروپی از ابتدا سعی در یافتن روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته دارد تا بر اساس آن پیش‌بینی مکانی مبتنی بر واقعیت را ارائه دهد (Phillips *et al.*, 2006). هم‌چنین، مدل حداکثر آنتروپی فقط بر اساس موقعیت فرسایش‌های شیاری مدل‌سازی را

انجام می‌دهد، درحالی‌که مدل‌های آماری مانند رگرسیون لجستیک علاوه بر موقعیت‌های وقوع، نیازمند موقعیت‌های عدم وقوع نیز می‌باشد (Park, 2015). به‌منظور استفاده از مدل حداکثر آنتروپی برای تعیین فرسایش شیاری، ابتدا متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش شیاری) و متغیر وابسته (شناسایی نقاط دارای فرسایش شیاری) به فرمت موردنیاز تبدیل شده و به نرم‌افزار MAXENT معرفی گردید. لازم به ذکر است که در این مرحله تنها از داده‌های فرسایش شیاری گروه آموزش که در مراحل قبلی تهیه شده است، برای واسنجی مدل استفاده گردید. مدل حداکثر آنتروپی بر اساس "اصل آنتروپی" شبکه ارتباطات بین متغیرهای مستقل و وابسته را تعیین نموده که بر اساس نقش هر متغیر مستقل و وزن تأثیر و منحنی پاسخ آن به دست می‌آید. این مدل قادر است توزیع احتمالاتی داده‌های هریک از لایه‌های رستری مربوط به عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش شیاری را

¹⁵ Machine learning techniques

دست می‌آید که دارای بیشترین قدرت تشخیص در مناطق با پتانسیل بالای فرسایش شیاری می‌باشد (Phillips *et al.*, 2006). از سوی دیگر از آنجاکه یافتن نقاط عدم مستعد برای وقوع فرسایش شیاری و اطمینان از این عدم استعداد مشکلات زیادی در مطالعات در پی خواهد داشت (Baiati Khatibi; 2006) لذا، استفاده از مدل MAXENT به‌عنوان روشی که فقط وابسته به نقاطی هستند که مستعد وقوع فرسایش شیاری هستند، می‌تواند منجر به حذف بسیاری از ناکارآمدی‌ها و عدم قطعیت ناشی از نقاط عدم حضور گردد (Phillips *et al.*, 2006). هم‌چنین یکی از مهم‌ترین مزایای به‌کارگیری الگوریتم حداکثر آنتروپی به کمک نرم‌افزار MaxEnt، قابلیت این مدل در شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار و تعیین اهمیت نسبی هر یک از عوامل مؤثر بر شناسایی کانون‌های تولید گردوغبار و تحلیل حساسیت مدل به روش Jackknife می‌باشد (Phillips *et al.*, 2006). در این روش پس از ایجاد مدل کامل با دخالت تمامی متغیرها، مدل‌سازی به تعداد متغیرها تکرار شده و هر بار یکی از متغیرها از روند مدل‌سازی حذف می‌گردد. بدین ترتیب میزان تأثیر هر یک از متغیرها در پیش‌بینی نواحی مطلوب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

آزمون کارایی مدل ارزیابی فرسایش شیاری با استفاده از منحنی ROC

منحنی ROC یکی از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمال و پیش‌بینی سامانه‌هاست که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (Van Western, 1997) که به‌طور گسترده به‌منظور آزمون مدل حساسیت‌پذیری خطرات طبیعی استفاده شده است (Pourghasemi *et al.*, 2013). در واقع منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش^{۱۹}ها است. محور X

استخراج نماید. مدل آنتروپی این توزیع‌ها بر اساس رابطه (۲) قابل محاسبه است (Phillips *et al.*, 2006):

$$H(\hat{\pi}) = - \sum_{x \in X} \hat{\pi}(x) \ln \hat{\pi}(x) \quad (2)$$

که در آن $H(\hat{\pi})$ مقدار آنتروپی توزیع احتمالاتی متغیر موردنظر، \ln لگاریتم طبیعی، x مقدار ارزش هر سلول و X مجموعه‌ای از داده‌های یک لایه رستری است. توزیع احتمالاتی Gibbs برای هریک از متغیرهای مستقل مطابق رابطه (۳) به دست می‌آید (Elith *et al.* 2010):

$$q_{\lambda}(x) = \frac{e^{\lambda f(x)}}{Z_{\lambda}} \quad (3)$$

که در آن $q_{\lambda}(x)$ تابع توزیع Gibbs، λ وزن متغیر موردنظر، Z_{λ} ثابت نرمال‌کننده تابع Gibbs هستند. به‌منظور تعیین رابطه وقایع فرسایش شیاری، هریک از عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش شیاری، باید بر اساس "اصل آنتروپی" و استخراج منحنی‌های پاسخ یادگیری ماشین^{۱۶} صورت گیرد (Phillips *et al.*, 2006; Graham *et al.*, 2008).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این تحقیق با استفاده از الگوریتم حداکثر آنتروپی و به کمک نرم‌افزار MAXENT نواحی دارای پتانسیل وقوع فرسایش شیاری مورد بررسی قرار گرفت و نقاط مستعد وقوع فرسایش شیاری که به جهت آموزش مدل انتخاب گردیده بودند به‌عنوان نقاط حضور به مدل معرفی شدند. در این روش همبستگی پارامترهای مؤثر بر وقوع فرسایش شیاری با نقاط مستعد فرسایش شیاری محاسبه و با همبستگی متغیرها با ۵۰۰۰۰۰ نقطه تصادفی از منطقه به‌عنوان نقاط زمینه^{۱۷} یا شبه عدم حضور^{۱۸} مقایسه می‌گردد و از این طریق بی‌نظمی نسبی میان نقاط فرسایش شیاری و نقاط تصادفی کاهش می‌یابد. در نهایت مدلی به

¹⁶ Machine-learning response

¹⁷ Background location

¹⁸ Pseudo-absence location

¹⁹ Trade off

نسخه ۳/۳/۳ استفاده شد. نقاط حضور با فرمت CSV و همچنین لایه‌های مربوط به پارامترهای مؤثر بر گردوغبار با فرمت ASCII وارد آنالیز شدند. همچنین از سطح زیر منحنی ROC به‌عنوان معیاری از عملکرد مدل به‌دست‌آمده در تشخیص نقاط وقوع (فرسایش شیاری) از نقاط شبه عدم وقوع استفاده شد. در این پژوهش پس از وارد کردن نقاط وقوع و متغیرهای موردنظر در نرم‌افزار MAXENT پتانسیل کل منطقه جهت پتانسیل‌یابی مناطق مستعد وقوع فرسایش شیاری محاسبه و نقشه حاصل به فرمت رستری به نرم‌افزار ArcGIS منتقل شد. افزون بر این، پایداری مدل، از طریق مقادیر صحت حداقل و حداکثر بر اساس ارزیابی هر معیار محاسبه شد (Conoscenti et al., 2014) که در معادله ۶ ارائه شده است:

$$R_{AUC} = AUC_{max} - AUC_{min} \quad (6)$$

که، R_{AUC} پایداری مدل بر مبنای سطح زیر منحنی معیار می‌باشد. AUC_{max} و AUC_{min} نیز به ترتیب مقادیر صحت حداکثر و حداقل در میان تمام مجموعه داده‌ها می‌باشند.

نتایج و بحث

مدل حساسیت‌پذیری فرسایش شیاری

مدل MaxEnt با استفاده از کل سه مجموعه داده گروه آموزش (D1، D2 و D3) ساخته شد. سپس، نقشه‌های تهیه‌شده (شکل ۵) در قالب چهار کلاس با حساسیت-پذیری خیلی کم، کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شد (Akgün and Türk, 2011; Conoscenti et al., 2018).

پایداری مدل با استفاده از مجموعه داده‌های انتخاب‌شده

بعد از ساخت مدل با استفاده از سه مجموعه داده متفاوت، پایداری مدل MaxEnt مورد ارزیابی قرار گرفت و رفتار مدل در شرایط متفاوت، با استفاده از نمونه‌های

درصد اختصاصیت^{۲۰} (احتمال تشخیص صحیح نقاط شبه عدم وقوع) (معادله ۴) و محور Y حساسیت^{۲۱} (احتمال تشخیص صحیح نقاط وقوع) (معادله ۵) را نشان می‌دهد. سطح زیر منحنی^{۲۲} ROC بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخداد (فرسایش شیاری) و عدم وقوع رخداد (فرسایش شیاری) آن است (Bui et al., 2011). ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد (Shakoor and Nandi, 2010) و مقادیر AUC از ۰/۵ تا ۱ متغیر است. سطح زیر نمودار (AUC) به‌دست‌آمده به‌عنوان معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقاط وقوع از عدم وقوع مورد توجه قرار می‌گیرد. چنانچه مدلی نتواند رخداد فرسایش شیاری را بهتر از دیدگاه احتمالی (تصادفی) تخمین زند مقدار AUC آن ۰/۵ می‌باشد و زمانی که منحنی ROC، سطح زیر منحنی برابر با یک داشته باشد بیانگر بهترین دقت از نقشه حساسیت‌پذیری تهیه شده است. همبستگی کیفی- کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به‌صورت زیر است (Wang and Zhu, 2009). ضرایب مذکور بر اساس روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند.

$$Se = \frac{Tp}{Tp+Fn} \quad (4)$$

$$Sp = \frac{Tn}{Tn+Fp} \quad (5)$$

که در آن‌ها، Tp و Tn تعداد پیکسل‌هایی که به‌درستی به‌صورت وقوع و عدم‌وقوع فرسایش شیاری طبقه‌بندی شده‌اند. ضرایب Fn و Fp نیز تعداد پیکسل‌هایی هستند که اشتباهاً به‌صورت وقوع و عدم‌وقوع فرسایش شیاری طبقه‌بندی شده‌اند.

در پژوهش حاضر برای پیش‌بینی نواحی دارای پتانسیل وقوع فرسایش شیاری از نرم‌افزار MAXENT

²⁰ Specificity

²¹ Sensitivity

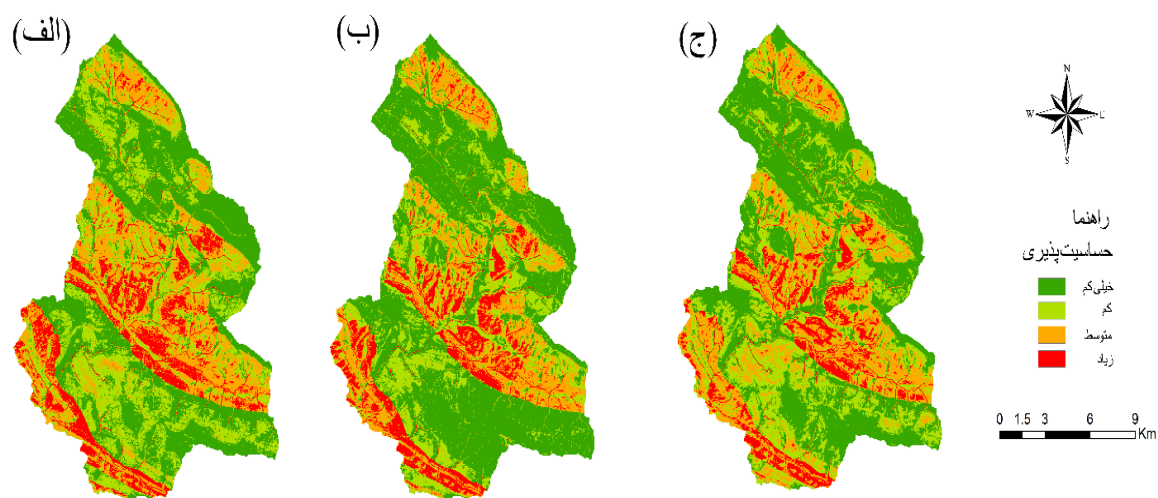
²² Area Under of Curve

دارند ($AUC_{D1} = ۷۳/۸\%$ ، $AUC_{D2} = ۶۸/۴\%$ و $AUC_{D3} = ۷۱/۳\%$). در مقابل، AUC پیش‌بینی شده برای D1، D2 و D3 به ترتیب $۸۲/۳\%$ ، $۸۳/۴\%$ و $۸۲/۴\%$ بود. بنابراین، مدل MaxEnt به‌عنوان یک مدل مؤثر در تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش شیاری شناخته شد. نتایج حاضر بیانگر مطابقت بالا با مطالعاتی است که از این مدل به‌عنوان ابزاری مؤثر در تهیه نقشه حساسیت‌پذیری خطرات طبیعی خندق و زمین‌لغزش استفاده نموده‌اند (Park, 2015; kornejady *et al.*, 2017; Pandey *et al.*, 2018; Conoscenti *et al.*, 2018).

انتخاب‌شده از مجموعه داده‌های آموزش و اعتبارسنجی مورد سنجش قرار گرفت (جدول ۱).

اعتبارسنجی

نهایتاً، نتایج حاصل از نقشه‌های حساسیت‌پذیری با استفاده از مجموعه داده‌های مشاهده‌ای فرسایش شیاری و روش ROC (گروه اعتبارسنجی) ارزیابی شد. عدم قطعیت در تهیه فاکتورهای مؤثر به‌منظور تقویت مدل در نظر گرفته شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد کل نقشه‌های حساسیت‌پذیری تهیه‌شده با سه مجموعه داده بازده خوبی



شکل ۵. مدل‌های حساسیت‌پذیری تهیه شده بر اساس سه مجموعه داده گروه آموزش

جدول ۱. ارزیابی پایداری مدل بر اساس سه مجموعه داده (D3 و D2، D1)

| R_{AUC} (%) | AUC (%) | آزمون چندباره | |
|---------------|---------|----------------|------------------|
| | | مراحل مدل‌سازی | (مجموعه داده‌ها) |
| ۱/۳ | ۸۲/۳ | | D1 |
| | ۸۳/۶ | آموزش | D2 |
| | ۸۲/۶ | | D3 |
| ۳/۱ | ۷۳/۸ | | D1 |
| | ۷۰/۷ | اعتبارسنجی | D2 |
| | ۷۱/۳ | | D3 |

مشارکت فاکتور حذف شده می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. آزمون جک‌نایف مشخص نمود سنگ‌شناسی به-عنوان مهم‌ترین فاکتور محیطی در نقشه حساسیت‌پذیری پیش‌بینی شده برای فرسایش شیاری در منطقه مطالعاتی می‌باشد (جدول ۲). فاصله از آبراهه و جهت شیب نیز به-عنوان دیگر عوامل مهم شناخته شدند.

به‌منظور بررسی قوی‌ترین فاکتور مؤثر بر پیش‌بینی نتایج، آزمون جک‌نایف مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور، فاکتورها به‌صورت جداگانه از مدل خارج شده و مدل با استفاده از بقیه فاکتورها به‌عنوان عوامل ورودی اجرا می‌شود. سپس، کارایی مدل ساخته‌شده با استفاده از کل فاکتورها در مقایسه با حالتی که مدل بر اساس سایر فاکتورها ساخته‌شده موردسنجش قرار می‌گیرد. بنابراین،

جدول ۲. نتایج حاصل از آزمون جک‌نایف برای تک‌تک متغیرها

| متغیرهای مهم | | | متغیر |
|--------------|------|------|----------------------------|
| D3 | D2 | D1 | |
| ۳۷/۸ | ۵۲ | ۴۷/۸ | سنگ‌شناسی |
| ۲۵/۳ | ۱۴/۲ | ۲۲/۸ | فاصله از آبراهه |
| ۱۳ | ۵/۸ | ۷/۴ | جهت شیب |
| ۱۱ | ۱۱ | ۹/۷ | ارتفاع |
| ۹/۳ | ۵/۹ | ۴/۹ | کاربری زمین |
| ۰/۹ | ۷/۵ | ۳/۴ | شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) |
| ۰/۶ | ۱ | ۳/۲ | انحنای دامنه |
| ۲/۱ | ۲/۶ | ۰/۸ | درصد شیب |

نتیجه‌گیری
در این مطالعه، پایداری مدل MaxEnt با در نظر گرفتن سه مجموعه داده متفاوت از گروه‌های آموزش و اعتبارسنجی به‌منظور ارزیابی حساسیت‌پذیری فرسایش شیاری در حوضه آبخیز گل‌گل در استان ایلام بررسی شد. با توجه به نتایج پایداری، عملکرد برآزش و پیش‌بینی تمام مجموعه داده‌ها که بر مبنای شاخص R_{AUC} بودند مقادیر AUC بالایی کسب نموده‌اند. به‌عبارت‌دیگر، نتایج ثابت نمود زمانی که داده‌های مرحله کالیبراسیون و اعتبارسنجی تغییر پیدا می‌کند مدل مذکور از ثبات و پایداری کاملی برخوردار می‌باشد. افزون بر این، نتایج نشان داد که مدل

MaxEnt قادر به تولید نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش شیاری می‌باشد. بر مبنای نتایج آنالیز حساسیت، مشخص شد که مهم‌ترین عامل در مدل‌سازی حساسیت‌پذیری فرسایش شیاری عامل سنگ‌شناسی و فاصله از آبراهه می-باشد درحالی‌که عامل انحنای دامنه تأثیر کمتری در پروسه مدل‌سازی دارد. نتایج مطالعه حاضر بیانگر دقت و پایداری بالای مدل MaxEnt است که نشان از ایده آل بودن مدل مذکور در مدل‌سازی حساسیت‌پذیری فرسایش شیاری می‌باشد. لازم به ذکر است مدل مذکور در تدوین برنامه‌ریزی کاربری اراضی و مدیریت ریسک فرسایش ابزاری کاملاً مناسب و قدرتمند می‌باشد.

منابع مورد استفاده
رجب‌زاده، ف.، غیائی، س.س. و رحمتی، الف. ۱۳۹۷. کارایی الگوریتم حداکثر آنتروپی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۸ (۲): ۵۷-۷۳.

- جعفری گرزین، ب. و کاویان، ع. ۱۳۸۸. ارزیابی وقوع فرسایش خندقی در حوضه آبخیز سرخ‌آباد مازندران با استفاده از سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری*، ۳ (۷): ۵۵-۸۵.
- رفاهی، ح. ۱۳۸۲. فرسایش آبی و کنترل آن (چاپ چهارم). انتشارات دانشگاه تهران، ۶۷۱ ص.
- شادفر، ص. ۱۳۹۰. بررسی فرسایش خندقی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در شهرستان رودبار استان گیلان. *فصلنامه پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱ (۳): ۱۶-۳۰.
- صابرچناری، ک.، بهره‌مند، ع.، بردی شیخ، و. و بایرام کمکی، ج. ۱۳۹۸. پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در حوضه آبخیز قرناوه استان گلستان. *مجله زمین‌شناسی مهندسی*، ۱۳ (۱): ۶۹-۹۴.
- غیاثی، س.س.، رجب‌زاده، ف.، ناجی راد، س.، فیض‌نیا، س. و نظری سامانی، ع.الف. ۱۳۹۶. تعیین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق در حوضه آبخیز خیاوچای. *نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۹ (۲): ۱۴۰-۱۵۴.
- محمد پور، س.، روحانی، ح.، قربانی واقعی، ح.، سیدیان، س.م. و فتح‌آبادی، الف. ۱۳۹۶. مدل‌سازی غلظت رسوب حاصل از فرسایش شیاری با استفاده از سیستم نروفازی (ANFIS) در منطقه نیمه‌خشک. *مجله منابع طبیعی ایران*، ۷۰ (۱): ۲۱۹-۲۳۴.
- محمدی ترکشوند، ع.، نیک‌کامی، د.، اسفندیاری، م. و علوی‌پناه، س. ۱۳۸۹. بررسی چند روش تهیه نقشه فرسایش شیاری با استفاده از RS و GIS. *نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۲ (۳): ۱۵۰-۱۶۰.
- میرزایی، س.، زینی‌وند، ح. و حقی‌زاده، ع. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی رسوب معلق روزانه و بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر آن در حوضه آبخیز گل‌گل، ایلام. *پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز*، ۷ (۱۴): ۴۸-۵۹.
- Akgün, A. and Türk, N. 2011. Mapping erosion susceptibility by a multivariate statistical method: a case study from the Ayvalık region NW Turkey. *Geoscience*, 37(9): 1515-1524.
- Angileri, S.E., Conoscenti, C., Hochschild, V., Märker, M., Rotigliano, E. and Agnesi, V. 2016. Water erosion susceptibility mapping by applying stochastic gradient treeboost to the Imera Meridionale River basin (Sicily, Italy). *Geomorphology*, 262: 61-76.
- Auerswald, K., Fiener, P. and Dikau, R. 2009. Rates of sheet and rill erosion in Germany—a meta-analysis. *Geomorphology*, 111(3-4): 182-193.
- Bagnold, R.A. 1996. An approach to the sediment transport problem from general physics. *US Geological Survey Paper*, 1-42.
- Bahadori, N. 2014. Measuring soil loss using the roots of trees and rills and comparison with MPSIAC, M.Sc Thesis. Islamic Azad University, Arsanjan Branch, 190 pp.
- Bayramin, I., Dengiz, O., BAŞKAN, O. and Parlak, M. 2003. Soil erosion risk assessment with ICONA model; case study: Beypazarı area. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27(2): 105-116.
- Brunner, G.W. 1995. HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 1.0, DTIC Document.
- Bruno, C., Stefano, C.D. and Ferro, V. 2008. Field investigation on rilling in the experimental Sparacia area, South Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 263-279.
- Bui, D.T., Lofman, O., Revhaug, I. and Dick, O. 2011. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural hazards*, 59: 1413-1444.
- Cama, M., Lombardo, L., Conoscenti, C. and Rotigliano, E. 2017. Improving transferability strategies for debris flow susceptibility assessment: Application to the Saponara and Itala catchments (Messina, Italy). *Geomorphology*, 288: 52-65.
- Chaplot, V., Giboire, G., Marchand, P. and Valentin, C. 2005. Dynamic modelling for linear erosion initiation and development under climate and land-use changes in northern Laos. *Catena*, 63(2-3): 318-328.
- Conoscenti, C., Agnesi, V., Angileri, S., Cappadonia, C.R. and Märker, M. 2013. A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: a test in Sicily, Italy. *Environment Earth Science*, 70(3): 1179-1195.
- Conoscenti, C., Agnesi, V., Cama, M., Caraballo-Arias, NA. and Rotigliano, E. 2018. Assessment of gully erosion susceptibility using multivariate adaptive regression splines and accounting for terrain connectivity. *Land Degradation and Development*, 29(3): 724-736.

- 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.
- 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.
- Elith, J.S., Phillips, T., Hastie, M., Dudík, Y., Chee, L. and Yates, C. 2010. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Journal of Diversity and Distributions*, 17(1): 43-57.
- Flanagan, D.C., Ascough, J.C., Geter, W.F. and David, O. 2005. Development of a hillslope erosion module for the object modeling system. *ASAE Annual International Meeting*, 1-12.
- Ghorbaninejad, S., Falah, F., Daneshfar, M., Haghizadeh, A. and Rahmati, O. 2017. Delineation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS-based data-driven models. *Geocarto International*, 32(2): 167-187.
- Graham, C.H.J., Elith, R.J., Hijmans, A., Guisan, A.T., Peterson, G. and Loiselle, B.A. 2008. The influence of spatial errors in species occurrence data used in distribution models. *Journal of Applied Ecology*, 45: 239-247.
- Hosseini, S.M., Mosaedi, A., Naseri, K. and Golkarian, A. 2012. Identification of the most effective elements on rill erosion in the hill slope units of Mashhad south west, Iran. *Geography and Environmental Hazards*, 2: 87-99.
- Jiang, F., Zhan, Z., Chen, J., Lin, J., Wang, M.K., Ge, H. and Huang, Y. 2018. Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain. *Catena*, 169: 46-58.
- Jurchescu, M. and Grecu, F. 2015. Modelling the occurrence of gullies at two spatial scales in the Olteț Drainage Basin (Romania). *Natural Hazards*, 79(1): 255-289.
- Kornejady, A., Ownegh, M. and Bahremand, A. 2017. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena*, 152: 144-162.
- Lucà, F., Conforti, M. and Robustelli, G. 2011. Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134(3-4): 297-308.
- Magliulo, P. 2012. Assessing the susceptibility to water-induced soil erosion using a geomorphological, bivariate statistics-based approach. *Environment Earth Science*, 67(6): 1801-1820.
- Märker, M., Pelacani, S. and Schröder, B. 2011. A functional entity approach to predict soil erosion processes in a small Plio-Pleistocene Mediterranean catchment in Northern Chianti, Italy. *Geomorphology*, 125(4): 530-540.
- Moreno-de las Heras, M., Espigares, T., Merino-Martín, L. and Nicolau, J.M. 2011. Water-related ecological impacts of rill erosion processes in Mediterranean-dry reclaimed slopes. *Catena*, 84, 114-124.
- Nandi, A. and Shakoor, A. 2010. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, 110(1): 11-20.
- Ownegh, M. and Nohtani, M. 2003. Relationship between geomorphologic units and erosion and sediment yield in kashidar watershed, Golestan province, Iran. 13th International soil Conservation Organization Conference – Brisbane.
- Pandey, V.K., Pourghasemi, H.R. and Sharma, M.C. 2018. Landslide susceptibility mapping using maximum entropy and support vector machine models along the Highway Corridor, Garhwal Himalaya. *Geocarto International*, 33: 24-37.
- Park, N.W. 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental datasets. *Environment Earth Science*, 73(3): 937-949.
- Phillips, S., Anderson, R. and Schapire, R. 2006. Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.
- Pourghasemi, H.R., Moradi, H.R. and Fatemi Aghda, S.M. 2013. Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances. *Natural hazards*, 69(1): 749-779.
- Pourghasemi, H.R., Yousefi, S., Kornejady, A. and Cerdà, A. 2017. Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. *Science of the Total Environment*, 609: 764-775.
- Pournader, M., Ahmadi, H., Feiznia, S., Karimi, H. and Peirovan, H.R. 2018. Spatial prediction of soil erosion susceptibility: an evaluation of the maximum entropy model. *Earth Science*, 47: 96-111.
- Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R. and Noormohamadi, F. 2016. Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Natural Hazards*, 82(2): 1231-1258.
- Rahmati, O., Naghibi, S.A., Shahabi, H., Bui, D.T., Pradhan, B. and Azareh, A. 2018. Groundwater spring potential modelling: comprising the capability and robustness of three different modeling approaches. *Journal of Hydrology*, 565: 248-261.

- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R. and Feizizadeh, B. 2017. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology*, 298: 118-137.
- Van Westen, C. J. 1997. Statistical landslide hazard analysis. *ILWIS*, 2: 73-84.
- Williams, G.P. 1983. Paleohydrological methods and some examples from Swedish fluvial environments I. Cobble and boulder deposits. *Geografiska Annaler, Series A*, 65(3-4): 227-243.
- Wirtz, S., Seeger, M. and Ries, J.B. 2012. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*, 91: 21-34.
- Zabihi, M., Mirchooli, F., Motevalli, A., Darvishan, A.K., Pourghasemi, H.R., Zakeri, M.A. and Sadighi, F. 2018. Spatial modelling of gully erosion in Mazandaran Province, northern Iran. *Catena*, 161: 1-13.
- Zakerinejad, R. and Märker, M. 2014. Prediction of Gully erosion susceptibilities using detailed terrain analysis and maximum entropy modeling: a case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran. *Geography and Environmental Hazards*, 37(1): 67-76.
- Zhu, C. and Wang, X. 2009. Landslide susceptibility mapping: A comparison of information and weights-of-evidence methods in Three Gorges Area. *International Conference on Environmental Science and Information application Technology*, 187: 342-346.

Assessing the stability of maximum entropy prediction for rill erosion modelling

Maryam Pournader¹, Sadat Feiznia^{2*}, Hassan Ahmadi³, Haji Karimi⁴, and Hamid Reza Peirovan⁵

1) PhD graduate of Watershed Management department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2*) Professor of Reclamation of Arid and Mountainous Regions department, University of Tehran, Karaj, Iran.

*Corresponding author email: sfeiz@ut.ac.ir

3) Hasan Ahmadi, professor of Watershed Management department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

4) Haji Karimi, professor of Range and Watershed Management department, Ilam University, Ilam, Iran.

5) Hamid Reza Peirovan, professor of Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Tehran, Iran.

Received: 25-08-2019

Accepted: 03-02-2020

Abstract

Soil erosion management requires providing appropriate solutions that can be achieved with knowing soil erosion situation. The aim of this study, modeling rill erosion potentially by using maximum entropy (MaxEnt) and investigation of its robustness to knowing about rill erosion susceptibility in the Golgol watershed, Ilam province. To this purpose, different geo-environmental factors were selected to be employed in the modeling process. In addition, 157 rill erosion events were recorded by a global positioning system (GPS). These events were then classified into two classes of training and validation with a ratio of 70:30. To evaluate model robustness, these classifications were repeated three times, and therefore, three sample datasets (D1, D2, and D3), were prepared. The area under receiver operating characteristics (AUC) curve was used for evaluating the performance of the model. Regarding the robustness results, all of the datasets obtained good AUC values and all of them were robust for both the goodness-of-fit (RAUC =1.3) and prediction performance (RAUC =3.1). In other words, the results demonstrated that the model remained quite stable when the calibration and validation data were changed. In addition, we found that the MaxEnt model is capable to produce rill erosion susceptibility map. Furthermore, based on the sensitivity analysis, it found that the most important components in rill erosion susceptibility modeling are lithology and distance from stream. The adopted methodology can be useful as an efficient approach for land use planning and erosion risk management.

Keywords: Soil erosion; Machine learning; Robustness; GIS