

ارزیابی کارایی مدل پیشینه آنتروپی در پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش آبکندی حوزه آبخیز کشکان-پل دختر

امید رحمتی^۱، ناصر طهماسبی پور^{۲*}، علی حقی‌زاده^۳، حمیدرضا پورقاسمی^۴ و بختیار فیضی‌زاده^۵
^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، ^۲ استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان،
^۳ استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز و ^۴ استادیار، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۲۵

چکیده

فرسایش آبکندی، مشکلی مهم در مدیریت منابع طبیعی و توسعه پایدار بوده که غالباً با پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی همراه است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی قابلیت مدل پیشینه آنتروپی برای پیش‌بینی مکانی استعداد وقوع فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز کشکان-پل دختر، واقع بین استان‌های لرستان و ایلام انجام شد. ابتدا بر اساس بررسی‌های میدانی و با استفاده از دستگاه GPS، نقشه پراکنش فرسایش آبکندی منطقه مورد مطالعه تهیه شد. همچنین، عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی شامل سنگ‌شناسی، بافت خاک، کاربری اراضی، تراکم زهکشی، فاصله تا جریان‌های سطحی، شاخص رطوبت توپوگرافی، ارتفاع، درصد شیب، انحنای سطح و فاصله از جاده انتخاب و نقشه آن‌ها در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. در مجموع، موقعیت ۶۵ واقعه فرسایش آبکندی ثبت و این پایگاه داده به صورت تصادفی به دو دسته آبکندهای گروه آموزش مدل (۴۵ واقعه) و آبکندهای گروه اعتبارسنجی مدل (۲۰ واقعه) تقسیم شد. پیش‌بینی استعداد فرسایش آبکندی و تعیین اهمیت عوامل مؤثر بر وقوع آن بر اساس مدل پیشینه آنتروپی در نرم‌افزار MAXENT انجام گرفت. در نهایت برای اعتبارسنجی نتایج پیش‌بینی، از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد. نتایج نشان داد که بخش‌های مرکزی حوزه آبخیز مورد مطالعه دارای استعداد فرسایش آبکندی بالایی هستند. بر اساس نتایج اعتبارسنجی، نقشه مناطق مستعد فرسایش آبکندی حاصل از مدل پیشینه آنتروپی ۹۰/۷ درصد دقت داشت. همچنین، نتایج اثبات نمود که "بافت خاک"، "تراکم زهکشی"، "سنگ‌شناسی" و "فاصله از جریان" مهمترین عوامل مؤثر در وقوع فرسایش آبکندی منطقه مورد مطالعه بوده که مقدار شاخص اهمیت آن‌ها به ترتیب ۲۳، ۱۸، ۱۵/۲ و ۱۵/۱ درصد به دست آمد. این در حالی است که عوامل "ارتفاع"، "فاصله از جاده"، "جهت شیب"، "کاربری اراضی"، "شاخص رطوبت توپوگرافی" و "انحنای سطح" تأثیر کمتری در وقوع فرسایش آبکندی منطقه مورد مطالعه داشتند. بنابراین، پیش‌بینی دقیق استعداد فرسایش آبکندی با استفاده از مدل پیشینه آنتروپی در مطالعه حاضر مورد تأیید قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی مکانی، حساسیت به فرسایش، عوامل مؤثر، مدل ماشین یادگیری

مقدمه
بوده که به وسیله دامنه وسیعی از عوامل محیطی کنترل شده، موجب تولید رسوب زیادی در حوزه‌های آبخیز می‌شود (Sadeghi و همکاران، ۲۰۰۸؛ Yamani و

فرسایش آبکندی که در اثر تخریب افق‌های سطحی و زیرین خاک به وجود می‌آید، فرایند بسیار پیچیده‌ای

(۲۰۱۱) با به‌کارگیری تکنیک‌های سنجش از دور و تفسیر عکس‌های هوایی و همچنین، انجام مطالعات میدانی به پهنه‌بندی حساسیت اراضی به فرسایش آبکندی پرداختند که نتایج نشان داد سنگ‌شناسی، شیب زمین، جهت شیب، قابلیت و کاربری اراضی عوامل اصلی مؤثر در وقوع فرسایش آبکندی محسوب می‌شود. Shadfar (۲۰۱۴) به‌منظور پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز طرود، از عملگرهای منطق فازی استفاده کرد. نتایج ایشان نشان داد که به‌کارگیری روش جمع جبری فازی دقت بالاتری نسبت به سایر عملگرهای فازی در پیش‌بینی خطر فرسایش آبکندی دارد. Conoscenti و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روش آماری رگرسیون لجستیک و تجزیه و تحلیل‌های محیطی به بررسی و پایش فرسایش آبکندی در حوزه آبخیزی در کشور ایتالیا پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که وقوع و گسترش فرسایش‌های آبکندی تحت تأثیر عوامل زیادی از جمله شیب زمین، خاک‌شناسی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، ارتفاع، فاصله از جریان‌های سطحی، شاخص توان جریان، فاصله از جاده، طول شبکه جاده‌ها، شاخص رطوبت توپوگرافی و انحنای سطح است که با یافتن مناطق دارای پتانسیل فرسایش آبکندی، با برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح می‌توان از وقوع این نوع فرسایش جلوگیری کرد. Rahmati و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از روش‌های آماری نسبت فراوانی و وزن واقعه، مناطق حساس به وقوع فرسایش آبکندی را در منطقه چوار استان ایلام شناسایی کرده‌اند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که روش‌های مذکور در مدل‌سازی مکانی وقوع فرسایش آبکندی مفید و قابل اعتماد است. به هر حال دقت پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آبکندی با استفاده از روش‌های آماری، تحت تأثیر چگونگی طبقه‌بندی متغیرهای مستقل پیوسته (ارتفاع، شیب، انحنای سطح و غیره) بوده؛ از این‌رو بررسی قابلیت مدل‌های خودکار برای تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع فرسایش آبکندی و رفع این محدودیت امری ضروری محسوب می‌شود.

همکاران، ۲۰۱۳؛ Servati و همکاران، ۲۰۱۴). فرسایش آبکندی پدیده‌ای با تأثیرات متقابل میان عوامل مؤثر در وقوع آن (مانند حجم و سرعت رواناب، نوع و حساسیت خاک به فرسایش)، عوامل حفاظت‌کننده سطح خاک (مانند پوشش‌های گیاهی و یا پوشش‌های غیر بیولوژیک) و اقدامات و فعالیت‌های انسانی (مانند تغییر کاربری اراضی و جاده‌سازی) در مناطق مختلف است (Poesen, ۲۰۰۳؛ Ireneusz, ۲۰۰۸). با توجه به توسعه فرسایش‌های آبکندی در حوزه‌های آبخیز کشور و خسارات‌های ناشی از آن، از جمله تخریب اراضی کشاورزی، تخریب جاده‌ها، کاهش کیفیت آب‌های سطحی و انباشته شدن رسوبات در پشت سدهای مخزنی، پیش‌بینی مناطق مستعد وقوع فرسایش آبکندی امری ضروری در مدیریت حوزه‌های آبخیز تلقی می‌شود (Jafari Gorzin و Kaviani, ۲۰۰۹). Valentin و همکاران (۲۰۰۵) و Marzolf و Poeson (۲۰۰۹) نشان دادند که فرسایش آبکندی یکی از عوامل تهدید کننده تعادل زیست‌محیطی و پایداری آن بوده، نقش برجسته‌ای در بالابردن توان رسوب‌زایی حوزه‌های آبخیز و تغییر خصوصیات هیدرولوژیکی جریان‌های سطحی دارد.

بنابراین با توجه به اهمیت این موضوع، تبیین و به-کارگیری مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی مکانی مناطق مستعد وقوع فرسایش آبکندی به‌وسیله پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به روش‌های رگرسیون لجستیک (Farajzadeh و همکاران، ۲۰۱۲؛ Karimi Sangchini و Ownegh, ۲۰۱۵)، ارزش اطلاعاتی^۱ (Conforti و همکاران، ۲۰۱۰؛ Lucà و همکاران، ۲۰۱۱)، تجزیه و تحلیل شرطی^۲ (Conoscenti و همکاران، ۲۰۱۳)، وزن واقعه^۳ (Dube و همکاران، ۲۰۱۴)، درخت‌های رگرسیون و طبقه‌بندی^۴ (Geissen و همکاران، ۲۰۰۷؛ Märker و همکاران، ۲۰۱۱)، توپوگرافی نرمال شده^۵ (Castillo و همکاران، ۲۰۱۴) و جنگل تصادفی^۶ (Kuhnert و همکاران، ۲۰۱۰) اشاره کرد. در سال‌های گذشته، Maghsodi و همکاران

⁴ Classification and regression trees

⁵ Normalized topographic method

⁶ Random forests

¹ Information value

² Conditional analysis

³ Weight of evidence

طول‌های جغرافیایی $۲۳^{\circ} ۴۷'$ تا $۳۷^{\circ} ۴۷'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $۲^{\circ} ۳۳'$ تا $۱۳^{\circ} ۳۳'$ شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوزه آبخیز دارای مساحتی بالغ بر ۲۴۵ کیلومتر مربع می‌باشد. میانگین بارش حوزه ۳۸۵ میلی‌متر، متوسط دمای کمینه سالانه ۵- و دمای بیشینه سالانه $۴۸/۸$ درجه سانتی‌گراد است. در منطقه مورد مطالعه فرسایش‌های آبکندی بسیار زیادی اتفاق افتاده است که رسوبات ناشی از آن‌ها از طریق رودخانه سیمره به پشت سد کرخه منتقل می‌شود. رودخانه سیمره منبع اصلی آبیاری اراضی کشاورزی بوده که در مواقع بارندگی به دلیل تولید رسوب بالای اراضی دارای فرسایش آبکندی، کاملاً گل‌آلود و غیر قابل استفاده است. توپوگرافی، کاربری اراضی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه دارای تنوع زیادی است.

روش پژوهش

انتخاب متغیرهای مؤثر در وقوع فرسایش آبکندی: بر اساس مرور منابع انجام شده (Baiati Khatibi, ۲۰۰۶؛ Soleimanpour و همکاران، ۲۰۰۸؛ Dube و همکاران، ۲۰۱۴؛ Conoscenti و همکاران، ۲۰۱۴؛ Servati و همکاران، ۲۰۱۴) در زمینه شناسایی مناطق مستعد فرسایش آبکندی و تعیین عوامل مؤثر بر وقوع آن، متغیرهای سنگ‌شناسی، بافت خاک، کاربری اراضی، تراکم زهکشی، فاصله از جریان‌های سطحی، شاخص رطوبت توپوگرافی^۳ (TWI)، ارتفاع، شیب زمین، جهت شیب، انحنای سطح و فاصله از جاده به-عنوان متغیرهای اثرگذار در وقوع فرسایش آبکندی انتخاب شد. در فرایند مدل‌سازی، تمامی عوامل مؤثر فوق‌به‌عنوان متغیرهای مستقل در وقوع فرسایش آبکندی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نقشه سنگ-شناسی حوزه آبخیز کشکان-پلدختر با استفاده از نقشه-های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی (شیت‌های پلدختر و کبیرکوه) تهیه و رقومی شد. به-منظور تهیه نقشه بافت خاک منطقه مورد مطالعه، نمونه‌برداری خاک بر اساس نقشه‌های پایه خاک‌شناسی انجام گرفت.

یکی از مواردی که اهمیت کنترل گسترش و وقوع فرسایش‌های آبکندی حوزه کشکان-پلدختر را دوچندان می‌کند، موقعیت قرارگیری آن نسبت به سد کرخه است که رسوب خارج شده از این حوزه پس از پیمودن مسافت کوتاهی به دریاچه سد کرخه انتقال می‌یابد. به دلیل این که سد کرخه بزرگ‌ترین سد خاکی کشور بوده، در عین حال هزینه زیادی صرف ساخت آن شده است، توجه به مسائل مدیریتی مناطق بالادست آن برای کنترل فرسایش‌های آبکندی و کاهش تولید رسوب بسیار حائز اهمیت است. بر اساس مطالعه Jafari Gorzin و Kavian (۲۰۰۹) آبکندها در زمان بارندگی و شکل‌گیری جریان‌های موقتی قادر به انتقال مقدار رسوب زیادی به مناطق پایین‌دست خود بوده، باید اقدامات مدیریتی شامل شناسایی مناطق مستعد وقوع فرسایش آبکندی، احیا پوشش گیاهی و مدیریت اقدامات انسانی به‌منظور پیش‌گیری و کاهش اثرات تخریبی آن انجام گیرد. از سوی دیگر، روش‌هایی که در فوق مطرح شد دارای محدودیت و ضعف هستند. به-عنوان مثال این روش‌ها برای تجزیه و تحلیل روابط بین وقوع فرسایش آبکندی و عوامل مؤثر بر آن، نیازمند طبقه‌بندی عوامل محیطی هستند که به دلیل نبود روشی مناسب برای یافتن محدوده‌های طبقه‌بندی، عدم قطعیت مدل‌سازی افزایش می‌یابد. این در حالی است که مدل بیشینه آنتروپی^۱ (ME) به‌عنوان یک مدل یادگیری ماشینی^۲ می‌تواند بر این محدودیت غلبه کند. بنابراین هدف از انجام پژوهش حاضر پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آبکندی حوزه آبخیز کشکان-پلدختر استان‌های لرستان-ایلام با استفاده از مدل خودکار بیشینه آنتروپی و تعیین کارایی آن بر اساس وقایع ثبت شده فرسایش آبکندی است. علاوه بر آن، اهمیت نسبی عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش آبکندی تعیین خواهد شد.

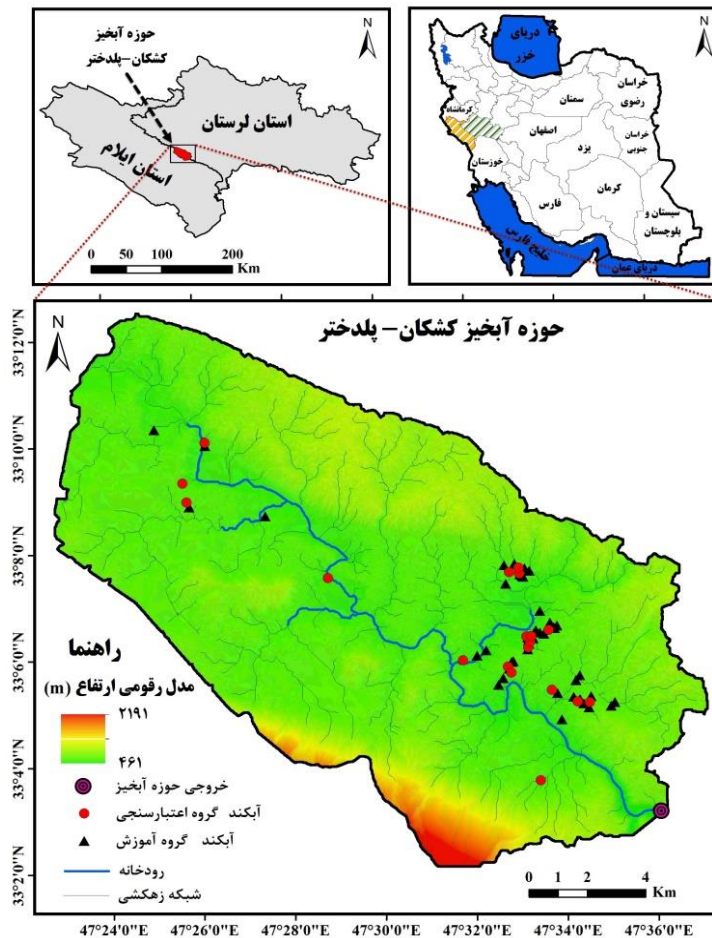
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز کشکان-پلدختر در مرز استان‌های لرستان و ایلام و بین

³ Topographic Wetness Index (TWI)

¹ Maximum entropy

² Machine learning model



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز کشکان-پلدختر و موقعیت گروه‌های آبکند آموزش و اعتبارسنجی

شد. شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) که یکی از مهمترین نقشه‌ها در مطالعات ژئومورفولوژی کمی و مورفومتری است، از رابطه (۱) به‌دست آمد (Moore, ۱۹۹۱).

$$TWI = Ln\left(\frac{As}{S}\right) \quad (1)$$

که در آن، As و S به ترتیب بیان‌گر سطح ویژه منطقه و درصد شیب زمین (درجه) است.

بررسی و ثبت موقعیت آبکندهای منطقه مورد مطالعه: موقعیت‌های وقوع فرسایش آبکندی در مدل‌سازی به‌عنوان متغیر وابسته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (Dube و همکاران، ۲۰۱۴). در این پژوهش، پس از بازدیدهای گسترده میدانی در حوزه آبخیز کشکان-پلدختر، موقعیت مکانی ۶۵ آبکند به وسیله دستگاه GPS و دوربین نقشه‌برداری ثبت و این مناطق به‌عنوان نقشه پراکنش موقعیت‌های فرسایش آبکند در نرم افزار ArcGIS 10.2 تهیه شد. از میان نقاط ثبت شده ۷۰ درصد (۴۵ واقعه آبکند) به‌عنوان آبکندهای

سپس نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل شده، با روش هیدرومتر بافت هر یک از نمونه‌ها تعیین شد. در نهایت نقشه بافت خاک در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. همچنین، نقشه کاربری اراضی اداره کل منابع طبیعی استان‌های لرستان و ایلام (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) به‌عنوان نقشه اولیه کاربری اراضی مدنظر قرار گرفته که این نقشه بر اساس بررسی‌های میدانی اصلاح شد. بر اساس نقشه کاربری اراضی به‌دست آمده می‌توان بیان کرد که کاربری‌های اصلی منطقه عبارتند از مراتع، کشاورزی، جنگل‌های تنک و مناطق مسکونی. نقشه‌های درصد شیب و جهت شیب زمین از لایه‌ی مدل رقومی ارتفاع زمین (با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر) در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ به‌دست آمد. علاوه بر آن، پس از تهیه نقشه شبکه زهکشی آبراهه‌ها در نرم‌افزار ArcGIS 10.2 و انجام اصلاحات لازم، نقشه فاصله از جریان‌های سطحی با استفاده از تابع Euclidean distance در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه

نماید. آنتروپی این توزیع‌ها براساس رابطه (۲) قابل محاسبه است (Phillips و همکاران، ۲۰۰۶):

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

که در آن، $H(\hat{\pi})$ مقدار آنتروپی توزیع احتمالاتی متغیر مورد نظر، \ln لگاریتم طبیعی، x مقدار ارزش هر سلول و X مجموعه‌ای از داده‌های یک لایه رستری است. توزیع احتمالاتی Gibbs برای هر یک از متغیرهای مستقل مطابق رابطه (۳) به‌دست می‌آید (Elith و همکاران، ۲۰۱۰).

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

که در آن، $q_{\lambda}(x)$ تابع توزیع Gibbs، λ وزن متغیر مورد نظر، Z_{λ} ثابت نرمال کننده تابع Gibbs هستند. به‌منظور تعیین رابطه وقایع فرسایش آبکندی و هریک از عوامل مؤثر بر وقوع آن، باید بسط "اصل آنتروپی" و استخراج منحنی‌های پاسخ یادگیری ماشینی^۴ صورت گیرد (Phillips و همکاران، ۲۰۰۶؛ Graham و همکاران، ۲۰۰۸).

در این پژوهش مدل بیشینه آنتروپی با استفاده از نرم‌افزار MAXENT اجرا شده، سپس روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بر اساس توابع احتمالاتی به‌دست آمده، نقشه پیش‌بینی احتمال وقوع فرسایش آبکندی در این نرم‌افزار تهیه شد. علاوه بر آن، آزمون جنکنایف^۵ (Boos و Brownie، ۲۰۰۴) برای تعیین اهمیت نسبی هر یک از عوامل مؤثر بر فرسایش آبکندی انجام گرفت. در این آزمون، شاخص اهمیت نسبی هر یک از عوامل مؤثر محاسبه شده و بر اساس آن می‌توان اهمیت عوامل محیطی را در وقوع فرسایش آبکندی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

اعتبارسنجی نقشه مناطق مستعد فرسایش آبکندی: به‌منظور اعتبارسنجی نقشه نهایی مناطق مستعد فرسایش آبکندی حوزه آبخیز کشکان-پلدختر، از داده‌های موقعیت آبکندهای گروه اعتبارسنجی استفاده شد. دقت پیش‌بینی نقشه نهایی از روش منحنی تشخیص عملکرد نسبی^۶ (ROC) که رایج‌ترین روش کمی صحت‌سنجی در مدل‌سازی‌های مکانی و

گروه آموزش^۱ و ۳۰ درصد (۲۰ واقعه آبکند) باقی‌مانده به‌عنوان گروه اعتبارسنجی^۲ به‌طور تصادفی انتخاب شدند (شکل ۱).

مدل بیشینه آنتروپی: مدل بیشینه آنتروپی یکی از فناوری‌های ماشین یادگیری^۳ (MLTs) است که قابلیت پیش‌بینی مکانی بالایی در زمینه‌های مختلف علوم محیطی دارد (Phillips و همکاران، ۲۰۰۶؛ Park، ۲۰۱۵). یکی از مزیت‌های استفاده از این مدل، بالابردن قطعیت در پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آبکندی است؛ زیرا فرایند مدل‌سازی براساس وقوع آبکندهای ثبت شده انجام می‌گیرد و این امر موجب کاهش عدم قطعیت مدل‌سازی می‌شود. برخلاف مدل‌های آماری که قبل از مدل‌سازی تعدادی فرضیات آماری تعریف می‌کنند، مدل بیشینه آنتروپی از ابتدا سعی در یافتن روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته دارد تا براساس آن پیش‌بینی مکانی مبتنی بر واقعیت را ارائه دهد (Phillips و همکاران، ۲۰۰۶). هم‌چنین، مدل بیشینه آنتروپی فقط براساس موقعیت‌های وقوع فرسایش آبکندی مدل‌سازی را انجام می‌دهد، درحالی که مدل‌های آماری مانند رگرسیون لجستیک علاوه بر موقعیت‌های وقوع فرسایش آبکندی، نیازمند موقعیت‌های عدم وقوع فرسایش آبکندی نیز هستند (Park، ۲۰۱۵). به‌منظور استفاده از مدل بیشینه آنتروپی برای تعیین مناطق مستعد فرسایش آبکندی، ابتدا متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش آبکندی) و متغیر وابسته (وقایع فرسایش آبکندی) به فرمت موردنیاز تبدیل شده و به نرم‌افزار MAXENT معرفی شد. لازم به ذکر است که در این مرحله تنها از داده‌های آبکند گروه آموزش که در مراحل قبلی تهیه شده است، برای واسنجی مدل استفاده شد. مدل بیشینه آنتروپی براساس "اصل آنتروپی" شبکه ارتباطات بین متغیرهای مستقل و وابسته را تعیین کرده که براساس نقش هر متغیر مستقل و وزن تأثیر و منحنی پاسخ آن به‌دست می‌آید. این مدل قادر است توزیع احتمالاتی داده‌های هریک از لایه رستری مربوط به عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش آبکندی را استخراج

⁴ Machine-learning response

⁵ Jackknife test

⁶ Receiver Operating Characteristic (ROC)

¹ Training group

² Validation group

³ Machine learning techniques

شنی، رسی‌سیلنتی، لومی‌سیلنتی، شنی‌سیلنتی، لومی- رسی‌شنی، شنی‌لومی و شنی است (شکل ۲- ب). براساس نقشه کاربری‌اراضی می‌توان اظهار کرد که کاربری مراتع بیش‌ترین مساحت (۷۱ درصد) را به‌خود اختصاص داده است (شکل ۲- ج). نقشه تراکم زهکشی نشان داد که مقدار تراکم زهکشی منطقه مورد مطالعه بین صفر تا ۲/۲۴ کیلومتر بر کیلومتر مربع متغیر بوده که بخش‌های مرکزی منطقه دارای بیش‌ترین مقدار تراکم زهکشی است (شکل ۲- د). براساس نقشه فاصله از جریان‌های سطحی، بخش‌های زیادی از منطقه مورد مطالعه در مجاورت جریان‌های سطحی قرار دارند درحالی که بخش‌های حاشیه‌ای منطقه فاصله بیشتری با جریان‌های سطحی دارند (شکل ۲- ه). شاخص رطوبت توپوگرافی منطقه بین ۰/۸ تا ۱۹/۲۴ متغیر است که بخش‌های شمال غربی منطقه مورد مطالعه شاخص رطوبت توپوگرافی بیشتری را به‌خود اختصاص داده‌اند (شکل ۲- و). نقشه ارتفاع منطقه نشان داد که مناطق مرکزی دارای کم‌ترین ارتفاع و مناطق حاشیه‌ای دارای بیش‌ترین ارتفاع هستند (شکل ۲- ز)؛ به‌همین دلیل غالب جریان‌های سطحی در بخش مرکزی قرار گرفته است. براساس نقشه شیب زمین، بخش‌های جنوبی منطقه دارای بیش‌ترین شیب هستند (شکل ۲- ح). تجزیه و تحلیل جهات شیب زمین نشان داد که در منطقه مورد مطالعه تمام جهات نه‌گانه شیب وجود دارد (شکل ۲- ط). براساس نقشه انحنای سطح می‌توان گفت که بخش‌های شمالی و جنوبی منطقه دارای انحنای محدب و مقعر بوده درحالی که بخش‌های مرکزی دارای انحنای کم هستند و یا کاملاً حالت تخت دارند (شکل ۲- ی). نقشه فاصله از جاده نشان می‌دهد که بخش‌های شرقی و شمال غربی دارای کم‌ترین فاصله از جاده‌های اصلی هستند (شکل ۲- س).

تهیه نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آب‌کندی: پس از انجام مدل‌سازی مکانی پیش‌بینی مناطق دارای پتانسیل فرسایش آب‌کندی، نتایج به‌دست‌آمده از مدل پیشینه آنتروپی در نرم افزار ArcGIS10.2 طبقه‌بندی شد که در شکل ۳ نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، بخش‌های مرکزی حوزه

پیش‌بینی پدیده‌های طبیعی است (Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۳؛ Dube و همکاران، ۲۰۱۴) در نرم‌افزار MedCalc استفاده شد. منحنی تشخیص عملکرد نسبی براساس دو ضریب حساسیت و اختصاصیت ترسیم می‌شود. ضرایب حساسیت (Se) و اختصاصیت (Sp) براساس رابطه (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 آب‌کندی طبقه‌بندی شده‌اند. ضرایب FP و FN نیز تعداد پیکسل‌هایی هستند که اشتباهاً به‌صورت وقوع و عدم‌وقوع فرسایش آب‌کندی طبقه‌بندی شده‌اند. سپس مساحت زیر منحنی^۱ (AUC) که نشان‌دهنده میزان دقت نقشه نهایی پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آب‌کندی است نیز محاسبه شد. مساحت زیر منحنی ROC از صفر تا یک متغیر بوده، هرچه بیش‌تر (نزدیک به یک) باشد، کارایی مدل در پیش‌بینی پدیده موردنظر بالاتر است. به‌طور معمول، هرگاه مساحت زیرمنحنی ROC بیش‌تر از ۰/۷ (۷۰ درصد) باشد، دقت مدل قابل قبول در نظر گرفته می‌شود (Yesilnacar, ۲۰۰۵).

نتایج و بحث

نقشه عوامل ورودی مؤثر بر فرسایش آب‌کندی مدل پیشینه آنتروپی شامل سنگ‌شناسی، بافت خاک، کاربری اراضی، تراکم زهکشی، فاصله از جریان‌های سطحی، شاخص رطوبت توپوگرافی، ارتفاع، شیب زمین، جهت شیب، انحنای سطح و فاصله از جاده در شکل ۲ ارائه شده است. نقشه سنگ‌شناسی نشان داد که منطقه مورد مطالعه دارای واحدهای سنگ‌شناسی مختلفی است که از آن جمله می‌توان به آهک مارن‌دار و انیدریت، ماسه‌سنگ و سیلتستون، آهک و تناوب شیل، رسوبات آبرفتی، آهک خاکستری و آهک و شیل اشاره کرد (شکل ۲- الف). نتایج تعیین بافت خاک نشان داد که منطقه مورد مطالعه دارای بافت‌های خاک لومی-

¹ Area Under Curve (AUC)

۹۰ درصد بوده، کارایی خیلی خوب در پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آب‌کندی دارد.

باتوجه به نتایج به‌دست آمده و مطالعات میدانی صورت‌گرفته در حوضه کشکان-پلدختر می‌توان گفت که مهمترین عوامل در وقوع فرسایش‌های آب‌کندی این منطقه به دو دسته طبیعی و انسانی قابل تقسیم است. در بخش طبیعی می‌توان به عامل‌های سنگ‌شناسی و خاک‌شناسی اشاره نمود و در بخش عوامل انسانی جاده-سازی، مدیریت کاربری اراضی، استفاده غیراصولی از زمین و چرای بیش از حد مجاز دام‌ها اشاره کرد. برای این اساس، اصلاح کاربری اراضی مطابق با پتانسیل‌های منطقه، اجرای برنامه‌های مدیریتی شامل تعادل دام در مرتع به‌همراه مدیریت پوشش گیاهی و کنترل جریان آبراهه‌ها از طریق اقدامات آب‌خیزداری را می‌توان به‌عنوان مناسب‌ترین راهبردهای کلان پیش‌گیری از وقوع و گسترش فرسایش‌های آب‌کندی معرفی کرد (Yamani و همکاران، ۲۰۱۳).

تعیین اهمیت عوامل مؤثر در وقوع فرسایش آب‌کندی: بر اساس آزمون جکنیاف، شاخص اهمیت متغیرهای مورد بررسی در فرایند وقوع فرسایش آب‌کندی به‌دست آمد (شکل ۵). نتایج نشان داد که عوامل "بافت خاک"، "تراکم زهکشی"، "سنگ-شناسی" و "فاصله از جریان" مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرسایش آب‌کندی منطقه مورد مطالعه بوده که مقدار شاخص اهمیت آن‌ها به‌ترتیب ۲۳، ۱۸، ۱۵/۲ و ۱۵/۱ درصد به‌دست آمد. همچنین مشخص شد که عوامل "ارتفاع"، "فاصله از جاده"، "جهت شیب"، "کاربری اراضی"، "شاخص رطوبت توپوگرافی" و "انحنای سطح" تأثیر کمتری در وقوع فرسایش آب‌کندی منطقه مورد مطالعه داشتند.

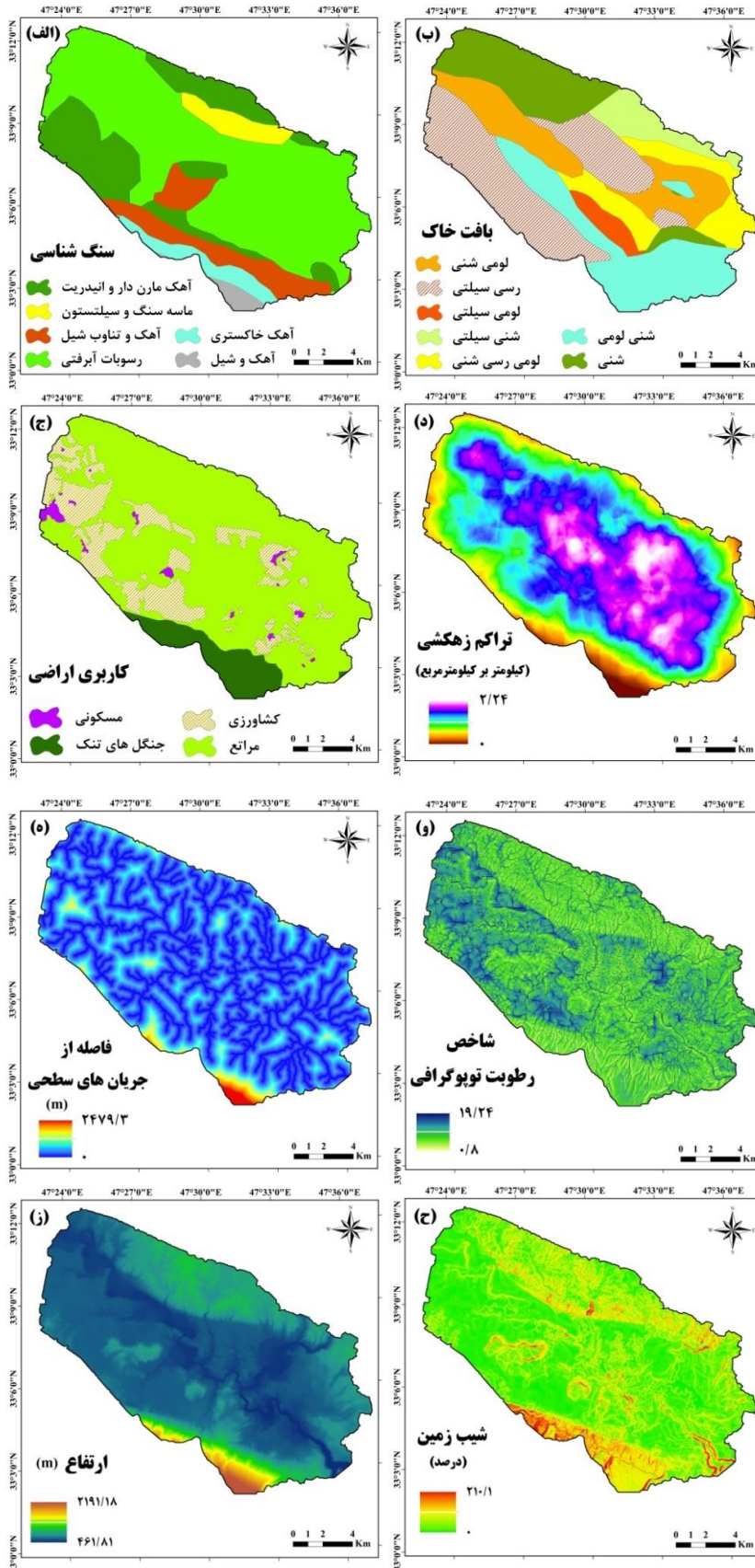
نتایج تجزیه و تحلیل روابط میان عوامل مؤثر مورد نظر و وقوع فرسایش آب‌کندی نشان داد که بیش‌ترین تراکم فرسایش آب‌کندی در رسوبات آبرفتی، بافت خاک لومی‌شنی و شنی‌رسی لومی، کاربری کشاورزی و تراکم زهکشی بالا مشاهده می‌شود. همچنین می‌توان گفت که مناطق نزدیک به جریان‌های سطحی و دارای شاخص رطوبت توپوگرافی بالا که در محدوده ارتفاعی و شیب پایینی قرار دارند، دارای فرسایش‌های آب‌کندی

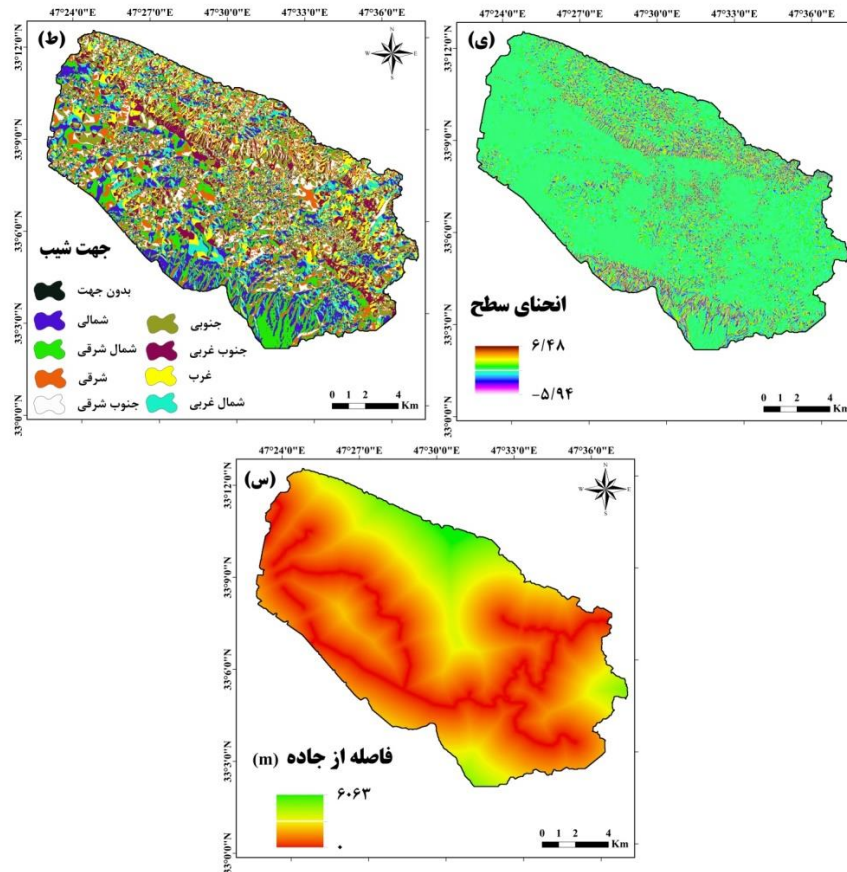
آب‌خیز کشکان-پلدختر پتانسیل بالایی در وقوع فرسایش آب‌کندی دارند. همان‌گونه که در نقشه‌های ورودی مدل پیشینه آنتروپی مشاهده می‌شود، بخش‌های مستعد فرسایش آب‌کندی، دارای سنگ‌شناسی حساس (رسوبات کواترنری)، بافت خاک لومی‌شنی و کاربری کشاورزی بوده، بیش‌تر در طبقات تراکم زهکشی بالا، شیب کم، اراضی پست و بدون جهت جغرافیایی، شاخص رطوبت جریان بالا و فاصله کم از جاده مشاهده می‌شوند. براساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش Entezari و همکاران (۲۰۱۴) در حوزه آب‌خیز دیره، وقوع فرسایش آب‌کندی نیازمند وجود شرایط بحرانی هم‌زمان بین چندین متغیر محیطی از جمله سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، شیب و فاصله از آبراهه است که در پژوهش حاضر نیز نتیجه مشابه به‌دست آمد. نتایج Servati و همکاران (۲۰۱۴) در شمال شرق استان گلستان نیز نشان داد که آستانه‌های مختلف ژئومورفولوژیکی و توپوگرافی برای وقوع فرسایش آب‌کندی وجود دارد، که غالباً شرایط بحرانی چندین عامل محیطی موجب این نوع فرسایش می‌شود. همچنین مطالعه Feiznia و همکاران (۲۰۰۷) نشان داد که فرایند فرسایش آب‌کندی با سایر اشکال فرسایشی متفاوت بوده، معمولاً در اراضی کم‌شیب مشاهده می‌شود. دلیل این امر را می‌توان فرصت نفوذ بیش‌تر جریان‌های سطحی در اراضی کم-شیب بیان کرد که در صورت حساس بودن خاک منطقه (وجود املاح) احتمال ایجاد حفره افزایش می‌یابد که پس از فرسایش لانه روباهی، فرسایش آب‌کندی به‌وقوع می‌پیوندد (Heidarzadeh و Nohegar، ۲۰۱۱).

اعتبارسنجی نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آب‌کندی: پس از اعتبارسنجی نقشه پیش-بینی مناطق مستعد فرسایش آب‌کندی براساس منحنی ROC، مساحت زیر منحنی (AUC) در حالت‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل پیشینه آنتروپی به ترتیب ۰/۹۶۶ و ۰/۹۰۷ به‌دست آمد (شکل ۴). بنابراین مدل پیشینه آنتروپی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب دارای دقت ۹۶/۶ و ۹۰/۷ درصد است. بر اساس منابع علمی در زمینه تحلیل روش منحنی ROC و اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی مکانی می‌توان بیان کرد که چون مدل پیشینه آنتروپی دارای دقت بیش از

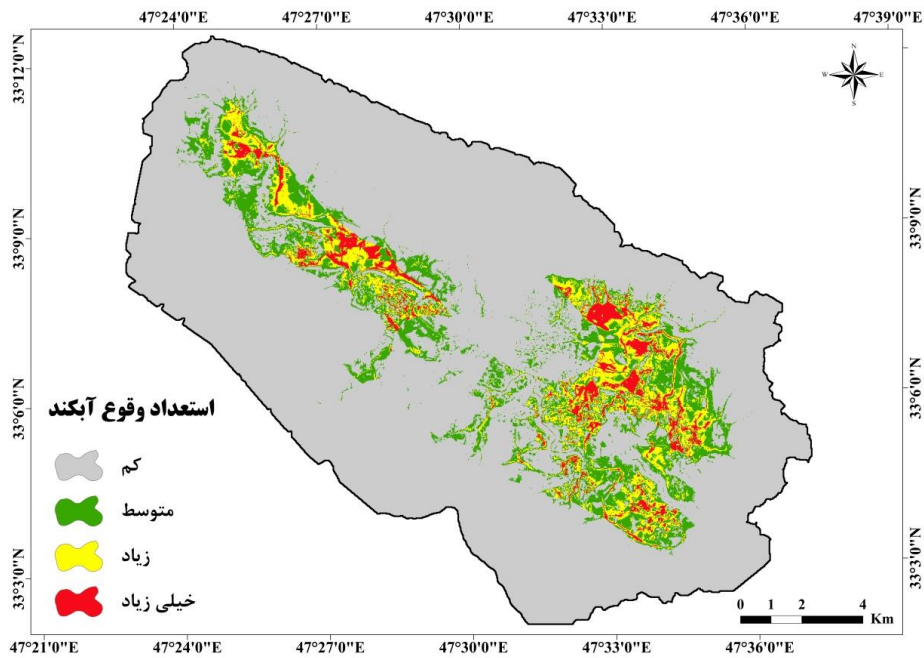
فرسایش آب‌کندی در مناطق تخت (بدون جهت) و در مجاورت جاده‌های اصلی قرار دارند.

متعددی هستند. درخصوص جهات شیب و فاصله از جاده نیز می‌توان مشاهده نمود که بیشتر وقایع

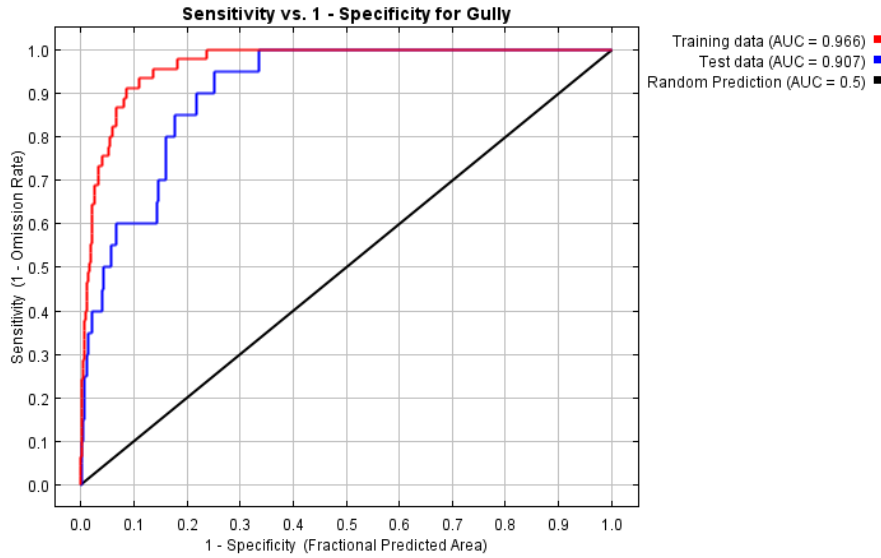




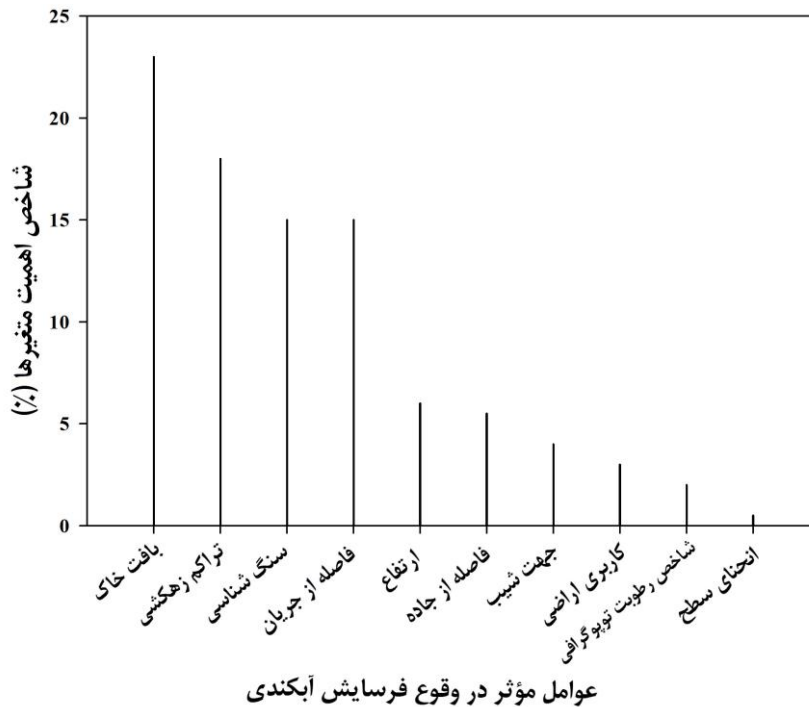
شکل ۲- نقشه متغیرهای ورودی مدل حداکثر آنتروپی در حوزه آبخیز مورد مطالعه



شکل ۳- نقشه استعداد وقوع فرسایش آبکندی حوضه کشکان-پلدختر بر اساس مدل بیشینه آنتروپی



شکل ۴- نمودار ROC در حالت‌های واسنجی (Training) و اعتبارسنجی (Test) نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آب‌کندی



شکل ۵- شاخص اهمیت متغیرها در فرایند وقوع فرسایش آب‌کندی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کارایی مدل بیشینه آنتروپی برای شناسایی مناطق مستعد فرسایش آب‌کندی در حوضه کشکان-پلدختر بر اساس مطالعات میدانی و ثبت ۶۵ مورد از آبکندهای موجود در منطقه بررسی شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، می‌توان بیان نمود که مدل بیشینه آنتروپی کارایی بسیار خوبی در تعیین پتانسیل مناطق مستعد فرسایش آب‌کندی دارد.

این مدل برای تولید نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آب‌کندی، از وقایع آب‌کندی گذشته به‌عنوان متغیر وابسته استفاده کرده، روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته را بر اساس میزان آنتروپی شناسایی می‌کند، تا خطای پیش‌بینی به کمینه برسد. بنابراین میزان عدم قطعیت پیش‌بینی‌های آن کم بوده، نتایج حاصل از آن برای مدیریت و کنترل فرسایش حوزه‌های آبخیز مفید و قابل اعتماد می‌باشد. همچنین، نتایج

توجه به آن‌ها در مدیریت و حفاظت خاک منطقه حائز اهمیت است. بنابراین توجه به این نکات کلیدی در خصوص وضعیت پتانسیل وقوع فرسایش آبکندی در برنامه‌ها و اقدامات حفاظت خاک می‌تواند راه‌گشا باشد. درنهایت به‌کارگیری مدل بیشینه آنتروپی برای شناسایی مناطق مستعد فرسایش‌های آبکندی برای تمرکز هرچه بهتر پروژه‌های اجرایی آبخیزداری در مناطق حساس به فرسایش آبکندی پیشنهاد می‌شود.

نشان داد که تراکم و احتمال وقوع فرسایش‌های آبکندی در بخش‌های مختلف منطقه متفاوت بوده، یافتن مناطق مستعد وقوع فرسایش آبکندی اولین گام در مدیریت حفاظت خاک و کنترل فرسایش و تولید رسوب منطقه است. مدل بیشینه آنتروپی نشان داد که طبقات کاربری کشاورزی، بافت خاک لومی شنی، فاصله کم از جاده، شیب کم و فاصله کم از جریان‌های سطحی شرایط بحرانی برای وقوع فرسایش آبکندی هستند که

منابع مورد استفاده

- Baiati Khatibi, M. 2006. Gully characteristics and factors controlling of gully processes, case study: between Ahar and Meshgin-shahr region. *Geography and Development Iranian Journal*, 7: 115-136 (in Persian).
- Boos, D.D. and C. Brownie. 2004. Comparing variances and other measures of dispersion. *Statistical Science*, 19(4): 571-578.
- 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.
- 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.
- Conoscenti, C., V. Agnesi, S. Angileri, C. Cappadonia, E. Rotigliano and M. Märker. 2013. A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: a test in Sicily, Italy. *Environmental Earth Sciences*, 70(3): 1179-1195.
- 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.
- Elith, J., S. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. Chee, and C. Yates. 2010. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1): 43-57.
- Entezari, M., M. Amjad, Kh. Moradi and S. Olfati. 2014. Zoning of gully erosion in catchment of Dyreh by Analytical Hierarchy Process (AHP). *The Journal of Spatial Planning*, 17: 63-86 (in Persian).
- Farajzadeh, M., A. Afzali, Y. Khalili and E. Gholichi. 2012. Gully erosion susceptibility assessment using multivariate regression model, case study: Kiasar, Southern Mazandaran Province. *Environmental Erosion Research Journal*, 2: 42-57 (in Persian).
- Feiznia, S., M. Heshmati, H. Ahmadi and J. Ghodosi. 2007. Gully erosion assessment in Aghajari Formation in Ghasr-shirin region. *Research and Construction*, 40: 32-74 (in Persian).
- 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.
- Graham, C.H., J. Elith, R.J. Hijmans, A. Guisan, A.T. Peterson, B.A. Loiselle. 2008. The NCEAS predicting species distributions working group. The influence of spatial errors in species occurrence data used in distribution models. *Journal of Applied Ecology*, 45: 239-247.
- Ireneusz, M. 2008. Dating of small gully formation and establishing erosion rates in old gullies under forest by means of anatomical changes in exposed tree roots (Southern Poland). *Geomorphology*, 93: 421-436.
- Jafari Gorzin, B. and A. Kavian. 2009. Assessment of gully erosion occurrence in Sorkh-Abad watershed using remote sensing and geographical information system. *Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 7: 55-59 (in Persian).
- Karimi Sangchini, E. and M. Ownegh. 2015. Evaluation of gully erosion hazard by statistical models in Naghan Inter basin, Chaharmahal Va Bakhtiari province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(5): 315-319 (in Persian).
- Maghsodi, M., S. Shadfar and M. Abasi. 2011. Zonation of gully erosion susceptibility in Zavian watershed, Qom Province. *Journal of Quantitative Geomorphological Research*, 2: 35-52 (in Persian).

17. Märker, M., S. Pelacani and B. Schröder. 2011. A functional entity approach to predict soil erosion processes in a small Plio-Pleistocene Mediterranean catchment in Northern Chianti, Italy. *Geomorphology*, 125: 530–540.
18. Moore, I.D., R.B. Grayson and A.R. Ladson. 1991. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Process*, 5: 3–30.
19. Nohegar, A. and M. Heidarzadeh. 2011. The study of physical-chemical characteristics and morphometry of gullying area, case study: Gezir, Hormozgan Province. *Environmental Erosion Research Journal*, 1(1): 29-44 (in Persian).
20. Park, N.W. 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geo environmental data sets. *Environmental Earth Science*, 73: 937–949.
21. Phillips, S., R. Anderson and R. Schapire. 2006. Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231–259.
22. Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten and C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50: 91-133.
23. 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.
24. 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.
25. Sadeghi, S.H.R., F. Noormaohamadi, M. Sufi and B. Yasrebi. 2008. Estimation of sediment volume caused by storms in gully erosion using important rain components. *Agricultural Sciences and Natural Resources*, 1: 172-180 (in Persian).
26. Servati, M.R., M. Ghahrodi Tali, A. Golkarami and E. Njafi. 2014. Geomorphological thresholds for gully erosion in Kchick watershed, NE Golestan Province. *Applied researches in geographical sciences*, 32: 231-249 (in Persian).
27. Shadfar, S. 2014. Application of Fuzzy logic in gully erosion assessment using geographical information system. *Journal of geographical information of Sepehr*, 92: 35-42 (in Persian).
28. Soleimanpour, S.M., M. Sufi and H. Ahmadi. 2008. Effect of different land uses on initiation of gully erosion in Fars Province. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 7: 66-69 (in Persian).
29. Valentin, C., J. Poesen and Y. Li. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63: 132-153.
30. Yamani, M., S.M. Zamanzadeh and M. Ahmadi. 2013. Analysis of factors affecting the formation and development of gully erosion: a case study of Kahoor Plain in Fars Province. *Geographic Exploring in Desert Areas*, 1: 53-84 (in Persian).
31. Yesilnacar, E.K. 2005. The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey. PhD Thesis, University of Melbourne, 423 pages.

Assessing the effectiveness of the maximum entropy model to gully erosion susceptibility prediction in the Kashkan-Poldokhtar Watershed

Omid Rahmati¹, Naser Tahmasebipour^{*2}, Ali Haghizadeh³, Hamidreza Pourghasemi⁴ and Bakhtiar Feizizadeh⁵

¹ PhD Student, Agriculture Faculty, Lorestan University, Iran, ^{2 and 3} Assistant Professor, Agriculture Faculty, Lorestan University, Iran, ⁴ Assistant Professor, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Iran and ⁵ Assistant Professor, Department of Physical Geography, University of Tabriz, Iran

Received: 15 August 2016

Accepted: 22 November 2016

Abstract

Gully erosion is an important challenge in natural resource management and sustainable development that often has severe environmental, economic, and social consequences. Thus, the objective of the present study is to assess the capability of maximum entropy (ME) model for spatial prediction of gully erosion susceptibility at Kashkan-Poldokhtar Watershed, between Lorestan and Ilam provinces, Iran. At first, a gully erosion inventory map was produced using GPS in field surveys. The gully conditioning factors including lithology, soil texture, land use, drainage density, distance to streams, topographic wetness index, altitude, slope percent, slope aspect, plan curvature, and distance from road were selected, and their maps were prepared in geographical information system (GIS). A total of 65 gully locations were divided into two groups (1) training of the model (45 gully occurrences), and (2) validation of the model (20 gully occurrences). The prediction of gully susceptibility and variables importance analysis were carried out based on maximum entropy model using MAXENT software. Finally, the validation of the prediction results was conducted based on the receiver operating characteristic (ROC) curve method, and the area under the curve (AUC) was calculated using MedCalc software. Results indicated that highest gully erosion susceptibility is located on the center parts of the study area. According to validation results, the resulting map of areas susceptible to gully erosion obtained by ME model has a prediction accuracy of 90.7%. In addition, the results demonstrated soil texture, drainage density, lithology, and distance to streams are most important factors and their variable importance index (VII) 23, 18, 15.2, and 15.1 were obtained, respectively. However, altitude, distance from road, slope aspect, land use, topographic wetness index, and plan curvature have a less influence on gully erosion occurrence. Therefore, it was established in current study that the ME is promising of make accurate prediction in gully erosion susceptibility.

Keywords: Erosion susceptibility, Machine learning model, Spatial prediction, Conditioning factors

* Corresponding author: tahmasebi.n@lu.ac.ir