



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی

ارزیابی تأثیر عامل‌های محیطی در استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان براساس رخدادهای تاریخی سیل

امید رحمتی^{۱*}، آیدینگ کرنژادی^۲، بهرام چوبین^۳، ابوالفضل جعفری^۴، عطا امینی^۵

- ۱ - استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران
- ۲ - استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران
- ۳ - استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران
- ۴ - استادیار پژوهشی، مؤسسه‌ی تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
- ۵ - استاد پژوهشی، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران

چکیده‌ی مبسوط

مقدمه و هدف

هرساله سیل خسارت‌های مالی و تلفات جانی زیادی دارد که مدیریت آن از رکن‌های ضروری مدیریت آبخیزها به‌شمار می‌آید. در این پژوهش استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان در استان کردستان بررسی شد و در نهایت براساس رخدادهای تاریخی سیل، اهمیت عامل‌های مختلف محیطی در وضعیت استعداد سیل‌گیری تعیین شد.

مواد و روش‌ها

از مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی همراه با ۱۳ عامل زمینه‌ساز پستی بلندی، آب‌شناختی، آبریخت‌سنجی (مورفوهیدرولوژیک)،

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: o.rahmati@areeo.ac.ir

استناد: رحمتی، ا.، کرنژادی، آ.، چوبین، ب.، جعفری، ا.، امینی، ع. ۱۴۰۳. ارزیابی تأثیر عامل‌های محیطی در استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان براساس رخدادهای تاریخی سیل. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۱): ۸۰-۹۷.

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2023.361544.1527

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۱/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره‌ی ۳۷، شماره ۱، شماره‌ی پیاپی ۱۴۲، بهار ۱۴۰۳، صفحه‌های ۸۰ تا ۹۷.

©نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



زمین‌شناختی و محیطی مؤثر بر رخداد سیلاب، استفاده شد. واحد محاسبه‌ای سلولی (پیکسل) به‌عنوان معیار تهیه‌ی نقشه‌ی عامل‌های محیطی و نقشه‌ی استعداد سیل-گیری انتخاب شد. به‌عنوان متغیر هدف در مدل، ۱۲۳ رخداد تاریخی و قابل‌ملاحظه‌ی سیل‌گیری در بازه‌ی زمانی ۱۴۰۲-۱۳۹۰ شناسایی و استفاده شد. برای بررسی نتایج مدل رخدادها به دو دسته یادگیری (۰.۷۰) و اعتبارسنجی (۰.۳۰) طبقه‌بندی شد. از معیار مساحت زیر منحنی مشخصه‌ی عملکرد گیرنده (AUC) نیز برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد.

نتایج

نتایج ارزیابی دقت مدل نشان داد که مساحت زیر منحنی مشخصه‌ی عملکرد گیرنده در دو مرحله‌ی یادگیری و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۹۸/۲ و ۹۷/۳٪ به‌دست آمد که بیان‌گر عملکرد عالی مدل بود. بر اساس تفسیر چشمی نقشه‌ی استعداد سیل‌گیری، مشخص شد که آبراهه‌های با رتبه‌ی بیشتر در نزدیکی خروجی مجرای عبور جریان با حجم بیشتر، در مناطق پست‌تر بودند، در نتیجه استعداد سیل‌گیری بیشتری داشتند. بر اساس نتایج آزمون اهمیت نسبی عامل‌ها، چهار عامل فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، تراکم زهکشی و کاربری زمین‌ها به‌ترتیب با مشارکت ۱۷، ۱۳، ۱۲ و ۱۰٪ به‌عنوان مهمترین عامل‌های مؤثر در فرآیند مدل‌سازی استعداد سیل‌گیری معرفی شدند. این یافته نشان داد که عامل‌های طبیعی (آب‌شناختی و ریخت‌شناختی آب) و محیطی (شامل طبیعی و انسان‌ساخت) در افزایش استعداد سیل‌گیری باهم تأثیر دارند. براساس تحلیل‌های کمی به‌دست آمده از مدل‌سازی، ۰/۷۶٪ (۵۶۰۰ هکتار) از منطقه‌ی مطالعه‌شده در طبقه استعداد زیاد و خیلی‌زیاد سیل‌گیری بودند که این عرصه نیازمند برنامه‌ریزی و مدیریت سیل است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

جداسازی دقیق و طبقه‌بندی استعداد سیل در سطح آبخیز سیروان استان کردستان و تعیین اندازه‌ی اهمیت عامل‌های محیطی در رخداد سیل‌گیری، این امکان را برای مدیران فراهم می‌کند تا با برنامه‌ریزی امکانات و زیرساخت‌های امدادی، گام مؤثری در رویکرد پیش‌گیرانه بردارند. مدیریت بحران سیل آبخیز سیروان باید مبتنی بر چهار عامل اصلی شناخته‌شده در این پژوهش برنامه‌ریزی شود تا ریسک ناشی از سیل‌گیری کاهش یابد. برای مدیریت سیل آبخیزها، استفاده از مدل پیشینه‌بی‌نظمی در استعدادیابی رخداد سیل پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: پیشینه‌بی‌نظمی، سیروان، مدیریت ریسک، مدیریت بحران، منحنی مشخصه‌ی عملکرد گیرنده

مقدمه

طبیعی سازمان ملل متحد (۲۰۱۰). در ایران در پنج دهه‌ی پیشین روند افزایش سیل نشان می‌دهد که تعداد رخداد سیل در دهه‌ی ۸۰ در مقایسه با دهه‌ی ۴۰ تقریباً ۱۰ برابر شده است و به عبارت دیگر ۱۰۰٪ افزایش یافته است (عبدی ۲۰۰۷). سیلاب به جریان شدید همراه با بالا آمدن نسبتاً زیاد آب در یک رود گفته می‌شود که معمولاً زمین‌های پست را دربرمی‌گیرد (اسمعی و عبداللهی ۲۰۱۳). سیل‌ها در فاصله‌های مختلف با مدت‌های مختلف رخ می‌دهند و باعث خسارت جدی به محیط‌زیست، حمل‌ونقل، اقتصاد، کشاورزی و زندگی مردم می‌شوند (یوسف و همکاران ۲۰۱۶). در کشور ایران پدیده‌ی سیل بیش از آن که ناشی از رخداد بارش‌های شدید باشد، از پیامد به‌هم خوردن تعادل طبیعی و شرایط جغرافیایی منطقه است. به‌طوری‌که بروز بارش‌های معمولی نیز موجب جاری شدن سیلاب می‌شود. افزایش جمعیت و در پی آن کمبود مکان برای

بر اساس پژوهش‌های کوهورست و همکاران (۲۰۰۵) مبتنی بر تحلیل داده‌های ۱۰۰ ساله خطرهای طبیعی، سیل شایع‌ترین بلای طبیعی در جهان است. در سراسر جهان هر ساله بلاهای طبیعی مانند سیلاب باعث تلفات فراوان جانی و مالی می‌شود که سیلاب به‌دلیل وسعت زمانی و مکانی آن، ویران‌گرترین آن‌ها شناخته‌شده است (تیرنی و همکاران ۲۰۰۲). در سراسر جهان در سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۰۰ سالانه تقریباً ۹۹ میلیون نفر تحت تأثیر سیل قرار گرفته‌اند (اوپولوت ۲۰۱۳). از میان ۴۳ نمونه‌ی رایج بلاهای طبیعی رخ داده در بخش‌های مختلف جهان، حدود ۳۸ نمونه در ایران مشاهده‌شده است، که زمین‌لرزه‌های بزرگ، سیلاب‌های ویران‌گر، خشکسالی، زمین‌لغزش، بیابان‌زایی، جنگل‌زدایی و طوفان از نمونه‌های شایع آن است. این نکته سبب‌شده تا کشور ایران بر اساس برآوردهای بین‌المللی در میان ۱۰ کشور بلاخیز جهان باشد (طرح مهار کردن بلاهای

(غلامی و همکاران ۲۰۲۰؛ مجددی ریزه‌ئی و همکاران ۲۰۲۱)، مدل‌های درختی (اسلامی‌نژاد و همکاران ۲۰۲۲) و جنگل تصادفی (ابراهیمی ۲۰۲۰؛ آوند و همکاران ۲۰۲۱) اشاره کرد.

با توجه به نتایج این پژوهش‌ها، مدل‌های یادگیری ماشین نیز جایگاه ویژه‌ای نزد پژوهشگران دارند و می‌توان از آن‌ها در فرموله کردن رابطه‌های درهم‌تنیده و پیچیده‌ی عامل‌های طبیعی با رخداد هدف (سیل) استفاده کرد. بر خلاف رابطه‌های ساده‌انگارانه مدل‌های آماری، مدل‌های یادگیری ماشین از رابطه‌های قدرتمند برآورد توزیع احتمالاتی پیروی می‌کنند. از طرف دیگر، نیازی به طبقه‌بندی کارشناسانه‌ی لایه‌های کمی پیوسته و وزن‌دهی و نرخ‌دهی به عامل‌ها و طبقه‌های عامل‌ها نیست و مدل‌های داده‌کاوی و یادگیری ماشین مسئولیت تعیین و انتشار قوانین حاکم میان عامل‌های مستقل و وابسته را برعهده می‌گیرند. مدل‌های احتمالاتی داده‌محور عمدتاً برپایه‌ی شواهد صرف حضور و یا ترکیب شواهد حضور و حضور نداشتن پدیده در طبیعت استوار است.

بررسی پژوهش‌های پیشین در آبخیز مزبور بیان‌گر ارزیابی نشدن کارایی مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری و تعیین مهم‌ترین عامل‌های مؤثر در رخداد سیل است. از این‌رو در این پژوهش از مدل یادگیری ماشین پیشینه‌ی بی‌نظمی^۳ و کارکردهای منحصربه‌فرد آن استفاده شد. هدف‌های این پژوهش شامل: (۱) جمع‌آوری داده و تولید نقشه‌ی عامل‌های مؤثر در رخداد سیل از جمله شاخص‌های پستی‌بلندی، آب‌شناختی و اقلیمی، ریخت‌شناختی آب، زمین‌شناختی و محیطی (طبیعی و انسان‌ساخت)، (۲) پهنه‌بندی استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان استان کردستان و (۳) اولویت‌بندی مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عامل‌ها در روند مدل‌سازی سیل آبخیز سیروان بر اساس درصد مشارکت این عامل‌ها بود.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه‌ی مطالعه‌شده

آبخیز سیروان با مساحت ۷۳۵۰ کیلومترمربع در جنوب‌غرب استان کردستان و میان طول‌های جغرافیایی ۴۰°۴۶' و ۱۷°۴۷' شرقی و میان عرض‌های جغرافیایی ۴۰°۳۴' و ۳۷°۳۵' شمالی است. از شهرهای مهم آبخیز سیروان می‌توان سنندج، مریوان، سروآباد، موجش، چناره و شویسه را نام برد. تغییرات پستی‌بلندی در آبخیز

ساخت‌وساز خصوصاً در کلان‌شهرها، تغییرهای شدیدی را در ریخت‌شناسی آبخیزها ایجاد کرده است. تجاوز به حریم رودها، مسیل‌ها و آبراهه‌ها، الگوی زهکشی طبیعی را تغییر داده است و باعث جاری شدن جریان‌های مازاد بر ظرفیت آبراهه‌ها و مسیل‌های طبیعی و شهری می‌شود. در این میان شهرها و مراکز جمعیتی، بیشترین خطر و احتمال خسارت فیزیکی قابل‌لمس ناشی از رخداد سیل را دارند (دلیران‌فیروز و همکاران ۲۰۱۶). یکی از جنبه‌های مهم و قابل توجه در برنامه‌ریزی توسعه، تأکید و توجه به آسیب‌پذیری کشور و مهم‌تر از همه عنصرهای آسیب‌پذیر از خطرهای طبیعی است. از این‌رو با توجه به حجم زیاد سرمایه‌گذاری و مکان‌گزینی بسیاری از تأسیسات و ابزارهای اقتصادی و اجتماعی جامعه، باید به این نکته مهم توجه بیشتری کرد. بنابراین شناسایی مناطق حساس به رخداد سیل و شناخت عامل‌های مؤثر بر آن، در انجام اقدام‌های لازم، برای کاهش خسارت‌ها ضروری است (بوبک و همکاران ۲۰۱۲).

پیش از هرگونه برنامه‌ریزی برای مهار کردن سیل، باید رفتار فرآیندی آن را شناخت. دامنه‌ی وسیعی از روش‌های مدل‌سازی در ارزیابی سیلاب پیشنهاد و استفاده شده‌اند. امروزه با وجود توسعه‌ی مدل‌های پیشرفته، مدل‌سازی فرآیندهای دخیل در ایجاد سیل با سرعت و دقت زیاد انجام می‌شود؛ البته بخش بزرگی از این مدل‌ها نیازمند داده‌های ورودی دقیق و بسیار است که اغلب با تعیین سنجه‌های پرشماری اجرا می‌شوند. در زمینه‌ی مدل‌سازی استعداد مکانی سیل‌خیزی، مجموعه‌ی وسیعی از مدل‌های آماری (دومتغیره و چندمتغیره)، مدل‌های کمی و نیمه‌کمی مبتنی بر نظر کارشناسی، مدل‌های قاعده‌محور فازی^۱ و روش‌های احتمالاتی داده‌محور^۲ از جمله مدل‌های داده‌کاوی یادگیری ماشین/ عمیق توسعه‌داده شده‌اند. از میان این مدل‌ها می‌توان به پژوهش‌های پهنه‌بندی سیل‌گیری با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و تاپسیس (رضوی‌ترمه و همکاران ۲۰۱۹؛ نوری و همکاران ۲۰۲۰)، روش تلفیقی بیزین و تحلیل سلسله‌مراتبی (عرب‌عامری و همکاران ۲۰۱۸)، وایازی لجستیک (خسروی و همکاران ۲۰۱۷)، آنتروپی شانون (نوحانی و همکاران ۲۰۱۷؛ عقیفی ۲۰۲۰)، ترکیب مدل‌های بگینگ و آنتروپی شانون (شهبابی ۲۰۲۲)، نسبت فراوانی و وزن شواهد (دارابی و همکاران ۲۰۱۷؛ گلشن و همکاران ۲۰۱۹؛ انتظار و همکاران ۲۰۲۱)؛ تابع شواهد قطعی (آزادطلب و همکاران ۲۰۲۱)؛ آزادی و همکاران (۲۰۲۱)، مدل ماشین بردار پشتیبان

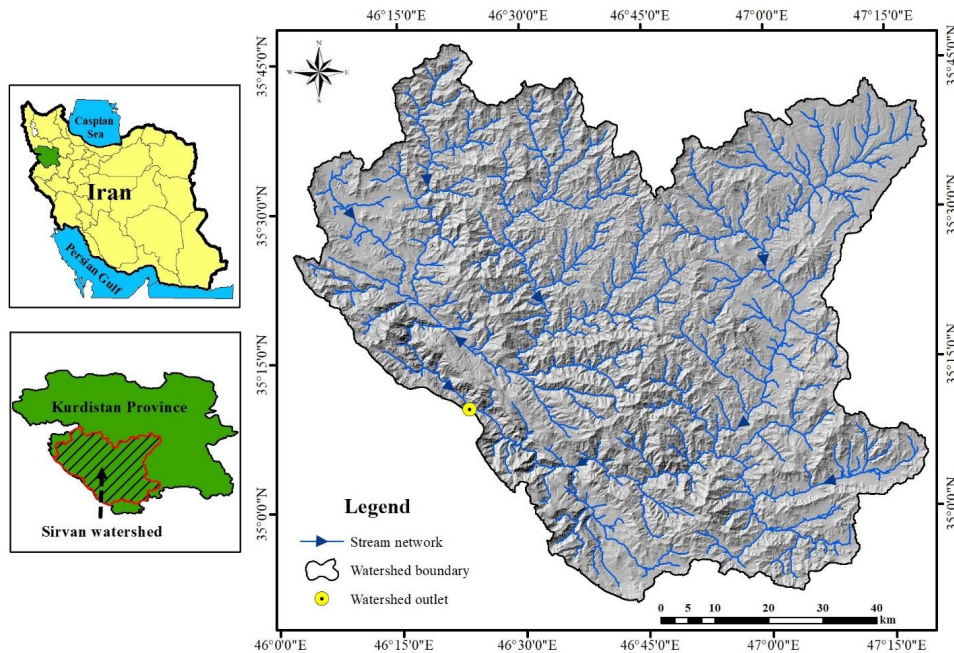
1 - Rule-based

2 - Data-driven

3 - Maximum Entropy

از بخش‌های شمالی، غربی، شرقی و جنوب‌شرقی به سمت خروجی آن در جنوب‌غربی جریان دارند. گاو رود و قشلاق از سرشاخه‌های مهم رود سیروان است. آبخیز سیروان جزء محدوده‌های مرزی است و جریان‌های خروجی این آبخیز در نهایت به خاک عراق وارد می‌شود.

سیروان زیاد است به‌گونه‌ای که کمترین بلندی آن ۷۵۲ متر و بیشترین بلندی آن ۳۱۱۰ متر گزارش شده است. اقلیم آبخیز سیروان معتدل و مرطوب است و اندازه‌ی میانگین درازمدت بارندگی سالانه‌ی آن ۵۰۴ میلی‌متر ثبت شده است. شبکه‌ی زهکشی آن از نوع شاخه درختی پر پیچ و خم است و رواناب‌های سطحی آبخیز سیروان



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز سیروان استان کردستان.
Figure 1- Geographic location of the Sirwan Watershed in Kurdistan province.

یادگیری (۷۰٪) و اعتبارسنجی (۳۰٪) طبقه‌بندی شد. دسته‌ی اول در مرحله‌ی مدل‌سازی به‌منظور یادگیری و واسنجی سنج‌های مدل و دسته‌ی دوم به‌منظور ارزیابی قدرت پیش‌بینی و تعمیم نتایج مدل استفاده شد.

عامل‌های محیطی مؤثر بر رخداد سیل

عامل‌های پرشماری می‌توانند بر رخداد سیل اثرگذار باشند. امروزه با انجام پژوهش‌های مدل‌سازی مکانی استعداد سیل‌گیری، از لایه‌های مادری مانند پستی‌بلندی و مدل رقومی ارتفاع بیشترین بهره‌برداری شده است. نقش تعیین‌کننده و امیدوارکننده‌ی مشتقات زمین‌ریخت‌سنجی، ریخت‌شناسی آب و آب‌زمین‌ریخت‌شناختی (هیدروژئومورفولوژیک) از لایه‌ی رقومی ارتفاع در مدل‌سازی مکانی خطرهای طبیعی در پژوهش‌های پرشماری بررسی‌شده است (روگرس و وودروفی ۲۰۱۶؛ پورالی و همکاران ۲۰۱۶). از این‌رو، می‌توان همراه با شاخص‌های زمین‌ساز و اصلی مانند کاربری زمین‌ها، زمین‌شناختی، آب‌شناختی و اقلیمی، با بهره‌گیری از شاخص‌های پرشمار به‌دست آمده از پستی‌بلندی نیز به تعیین حدود عرصه‌های پرخطر سیلاب در قالب مدل‌سازی مکانی، کمک

روش پژوهش

داده‌های سیل‌گیری

شواهد رخداد یک پدیده به‌عنوان اصلی‌ترین لایه برای هرگونه مدل‌سازی مکانی نیاز است. پدیده‌ی سیل نیز از این نکته مستثنی نبوده و باید با تکیه بر بایگانی سازمانی و اطلاعات محلی، این کار انجام شود. در این پژوهش، تعداد ۱۲۳ موقعیت سیل‌گیری در بازه‌ی زمانی ۱۴۰۲-۱۳۹۰ از بانک سیل سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری، مدیریت بحران استانداری، اداره راهداری و حمل و نقل جاده‌ای و جمعیت هلال احمر استان کردستان جمع‌آوری شد و در محیط ArcGIS 10.8 به‌شکل پایگاه داده مکانی ذخیره شد. هر نقطه بیان‌گر یک رخداد سیل است که پهنه‌ی مشخصی دارد. بر اساس پیشنهاد هارل و همکاران (۱۹۹۶) و برینر و همکاران (۲۰۱۵)، در مدل‌سازی پدیده‌های طبیعی، تعداد نقاط نمونه (شواهد سیل) معمولاً باید ۹ الی ۱۰ برابر تعداد عامل‌های مؤثر در رخداد پدیده باشد. در این پژوهش نیز با انتخاب ۱۳ عامل محیطی مؤثر، این اصل مد نظر بود. از دیدگاه اصول مدل‌سازی و بر پایه‌ی تجربه‌های موفق پیشین در زمینه‌ی مدل‌سازی خطرهای طبیعی به‌ویژه پدیده‌ی سیل، شواهد سیل به دو دسته‌ی

کرد. شاخص رطوبت پستی‌بلندی بیان‌گر مساحت بالادست پیکسل و شیب پیکسل مزبور است. هرچه مساحت بالادست پیکسل بزرگ‌تر باشد، استعداد تولید رواناب نیز بیشتر است. از طرف دیگر، هرچه شیب زمین کمتر باشد، استعداد برای آب‌گرفتنی و سیل‌گیری بیشتر خواهد بود. شاخص رطوبت پستی‌بلندی این دو نکته را به‌شکل همزمان توصیف می‌نماید. شاخص توان جریان نیز نشان‌دهنده‌ی انرژی جریان است و بیان‌گر اندازه‌ی احتمال ویرانی است. لایه‌ی پهنه‌ی بارش میانگین بلندمدت نیز براساس داده‌های بارندگی اداره‌ی کل هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان تهیه شد. نقشه‌های بافت خاک و کاربری زمین‌ها نتیجه‌ی مطالعات تفصیلی آبخیزداری، از اداره‌ی کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان جمع‌آوری شد. لایه‌ی زمین‌شناسی نیز از نقشه‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد.

شایانی کرد (اوتلو و قاسملونیا ۲۰۲۱). به این منظور، در این پژوهش براساس بازدیدهای میدانی و منابع علمی در زمینه‌ی پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری، در مجموع ۱۳ عامل مؤثر در رخداد سیل‌گیری انتخاب شدند (یوسف و همکاران ۲۰۱۶؛ ترمه و همکاران ۲۰۱۸؛ ژاوو و همکاران ۲۰۱۸). لایه‌ی مدل رقومی ارتفاع از داده‌های سنجنده‌ی SRTM تهیه شد که با کاربرد این لایه دیگر لایه‌های پستی‌بلندی و آب‌شناختی مانند شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه نیز تهیه شد. همچنین، چهار شاخص ریخت‌شناختی آب شامل انحنا، مقطع، انحنا، سطح، شاخص رطوبت پستی‌بلندی (TWI) و شاخص توان جریان (SPI) از لایه‌ی مدل رقومی ارتفاع در محیط SAGA-GIS تهیه شد که به‌طور غیرمستقیم بر سازوکارهای تولید رواناب و متغیرهای جریان دلالت دارند. شاخص‌های انحنا، سطح و مقطع نشان‌دهنده‌ی شکل دامنه از دو دیدگاه طولی و عرضی است و می‌توان براساس آن‌ها همگرایی جریان را تصور

جدول ۱- اطلاعات لایه‌های عامل‌های مؤثر در رخداد سیل آبخیز سیروان استان کردستان.

Table 1- Information on the factors affecting the flood occurrence in the Sirwan watershed of Kurdistan Province.			
Classification of factors	Factors	Affecting roles (direct and indirect)	Scale
Topographic	Elevation	Prevailing rainfall regime in the region and its changes with altitude	1:25000
	Slope percent	Flow speed	1:25000
	Aspect	Vegetation, energy received from the sun, humidity of the domain	1:25000
Morpho-hydraulic	Plan curvature	Controlling flow convergence and divergence	1:25000
	Profile curvature	Controlling flow speed	1:25000
	Topographic wetness index	Percentage of local participation of cells in the production of runoff	1:25000
	Stream power index	Expressing the speed and volume of transfer flow	1:25000
Hydrologic and climatic	Distance from stream	Runoff production mechanisms, flood zones, hydrological response zones	1:25000
	Drainage density	The speed of water transfer and drainage to the outlet	1:25000
	Mean annual precipitation	The main factor of runoff production and overall spatial distribution of precipitation	1:25000
Soil and geology	Soil texture	Soil hydrological group and water infiltration and runoff production status	1:25000
	Lithology	The speed of infiltration in formations	1:100000
Environmental	Land use	Vegetation percentage indicates the amount of infiltration and flow speed in natural, aquatic or man-made areas	1:25000

اطلاعات و داده‌ی ذخیره و پنهان‌شده در یک سامانه یافت. به‌دنبال افزایش این بی‌نظمی، حجم اطلاعات در دسترس و در نتیجه، احتمال تشخیص یک الگو نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین، از میان تقسیم‌های متنوع مدل‌های پهنه‌بندی مکانی (ابتکاری، آماری، احتمالاتی، قطعی)، روش پیشینه‌ی بی‌نظمی یک مدل احتمالاتی داده محور است. مزیت این روش آن است که

مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی

برای نخستین بار روش پیشینه‌ی بی‌نظمی در پیش‌بینی پراکنش گونه‌های جانوری طراحی شد و به‌مرور در زمینه‌های دیگر مانند پیش‌بینی و پهنه‌بندی بلاهای طبیعی نیز استفاده شده است. بر پایه‌ی این تعریف، یکی از مصداق‌های بی‌نظمی را می‌توان در حجم

- 4 - Topographic Wetness Index
- 5 - Stream Power Index
- 6 - Data-driven probabilistic model

اندازه‌های مثبت‌های کاذب^{۱۰} (مناطق‌ی که مدل به اشتباه نبودن حضور زمین‌لغزش را به‌عنوان زمین‌لغزش پیش‌بینی کرده است) روی محور افقی و اندازه‌های مثبت‌های صحیح^{۱۱} (مناطق‌ی که مدل به‌درستی حضور زمین‌لغزش را پیش‌بینی کرده است) روی محور عمودی می‌باشند (پونیتوس و اشنایدر ۲۰۰۱). سطح زیر نمودار ROC بیان‌گر کارایی مدل است؛ به‌طوری که هر چه این عدد به یک نزدیک‌تر باشد کارایی مدل بیشتر است و هرچه به ۰/۵ نزدیک‌تر باشد مدل خنثی و کارایی آن کم خواهد بود. در این پژوهش این نمودار در دو مرحله‌ی یادگیری و اعتبارسنجی به‌شکل مجزا رسم شد، به‌طوری که سطح زیر منحنی ROC در مرحله‌ی یادگیری بیان‌گر قدرت مدل به داده‌های تعلیمی و در مرحله‌ی اعتبارسنجی بیان‌گر قدرت پیش‌بینی و تعمیم نتایج بود (فراآینی و همکاران ۲۰۱۰).

نمودار دیگر که به سطح زیر منحنی ROC وابسته است و بیان‌گر اهمیت نسبی عامل‌های مؤثر در رخداد سیل می‌باشد، جک‌نایف نام دارد. تعیین اهمیت نسبی عامل‌ها در فرآیند مدل‌سازی با کاربرد این نمودار ستونی از یک تحلیل بازگشتی^{۱۲} پیروی می‌کند و یک‌بار با دخالت دادن تمام عامل‌ها مدل‌سازی انجام می‌شود و اندازه‌ی سطح زیر منحنی ROC تعیین می‌شود. سپس، هر بار یک عامل از چرخه‌ی مدل‌سازی حذف و اندازه‌ی تأثیر حذف آن عامل بر اندازه‌ی سطح زیر منحنی ROC (کاهش یا افزایش) بررسی می‌شود؛ از این‌رو، مدل‌سازی به تعداد عامل‌های مؤثر تکرار خواهد شد. نام این روش تحلیل حساسیت حذفی است. عاملی که با حذف آن بیشترین کاهش در اندازه‌ی شاخص رخ دهد، به‌عنوان مهم‌ترین عامل در مدل‌سازی معرفی خواهد شد. از طرف دیگر شاخصی که با حذف آن تغییر معنی‌داری در شاخص ارزیابی مدل رخ ندهد، به‌عنوان یک عامل خنثی معرفی خواهد شد (اوه و همکاران ۲۰۱۱).

نتایج

تهیه‌ی نقشه‌ی عامل‌های محیطی

نقشه‌ی ۱۳ عامل محیطی اثرگذار بر رخداد سیل در محیط ArcGIS 10.8 و SAGA-GIS تهیه شد. این نقشه در شکل ۲ نشان داده شده است. بررسی اولیه‌ی نقشه‌های تولیدشده از شاخص‌های پستی‌بلندی، ریخت‌شناختی آب، اقلیمی و آب‌شناختی، زمین‌شناسی

برای پیش‌بینی رفتار یک گونه یا پدیده نیاز به نقاط حضورنداشتن نیست بلکه از یک گروه عامل‌های تأثیرگذار (عامل‌های مؤثر بر رخداد سیل) و همچنین نقاط حضور و مشاهده‌ای از پدیده (پهنه‌های دوره‌ای سیل) استفاده می‌کند (فیلیپس و دودیک ۲۰۰۸). در این روش لایه‌های عامل‌های تأثیرگذار بر اساس یک گروه رابطه و عملگرهای ریاضی (مانند میانگین، انحراف از معیار و غیره) به خصوصیات و ماهیت^۷ ثانویه قابل تعریف در ریاضی تبدیل می‌شوند. سپس، با کاربرد مدل و استفاده از ارتباط و همبستگی این لایه‌های ثانویه و محل رخدادها و شواهد، الگوی هدف که خود از یک توزیع احتمالاتی پیروی می‌کند، برآورد می‌شود. بنابراین، پیشینه‌ی بی‌نظمی را می‌توان یک دستورالعمل برآورد توزیع دانست. این برآورد، ابتدا با یک حدس اولیه و خام شروع می‌شود، به‌طوری که مدل حدس می‌زند کلیه پیکسل‌های نماینده محدوده‌ی مطالعه‌شده از یک توزیع احتمالاتی با سنج‌های مشخص پیروی می‌کنند و به‌مرور پس از برقراری ارتباط میان لایه‌های ثانویه عامل‌های مؤثر در رخداد سیل و شواهد سیل و مقایسه این رابطه‌ها با مناطقی که ظاهراً پدیده‌ی سیل مشاهده نشده (به‌اصطلاح نقاط پس‌زمینه^۸)، به توزیع احتمالاتی هدف و بهینه نزدیک می‌شود. این مجموعه عملیات ریاضی با پیروی از احتمالات شرطی در قضیه‌ی بیز انجام می‌شود که سپس بی‌نظمی مزبور با استفاده از تابع‌های گیبس و لاگرانژی به پیشینه می‌رسد. این مفاهیم در پژوهش‌های فیلیپس و همکاران (۲۰۰۶، ۲۰۰۴)، ایلث و همکاران (۲۰۱۱، ۲۰۰۶) و کرنزادی و همکاران (۲۰۱۷) به تفصیل آورده شده‌اند. در این پژوهش، مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی در نرم‌افزار MaxEnt اجرا شد. دو خروجی مهم این نرم‌افزار شامل نمودار منحنی عملکرد نسبی سامانه است که کارایی مدل در پیش‌بینی مکانی الگوی سیل را ارزیابی می‌کند و نمودار جک‌نایف است که اهمیت نسبی عامل‌های محیطی در رخداد سیل تعیین می‌کند.

ارزیابی کارایی مدل و تعیین اهمیت نسبی عامل‌ها

منحنی مشخصه‌ی عملکرد نسبی سامانه^۹ (منحنی عملیاتی گیرنده) یکی از شاخص‌های پرکاربرد و مهم در زمینه‌ی ارزیابی کارایی مدل‌های مکانی به‌شمار می‌آید (دارابی و همکاران ۲۰۱۷). در رسم منحنی ROC،

7 - Feature

8 - Background points: pseudo absence locations

9- Receiver Operating Characteristic Curve (ROC)

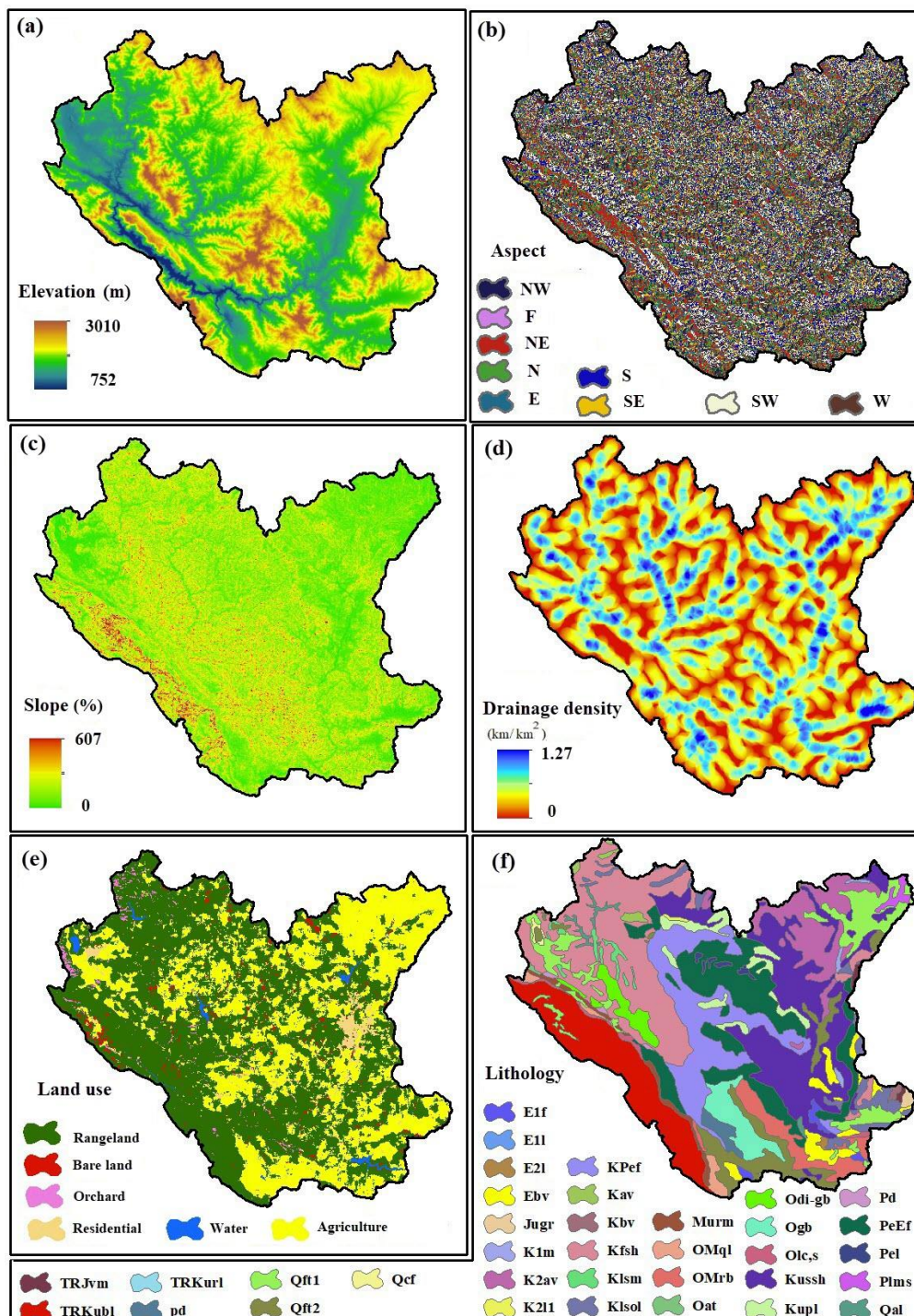
10 - False Positives (FP)

11 - True Positives (TP)

12 - Backward analysis

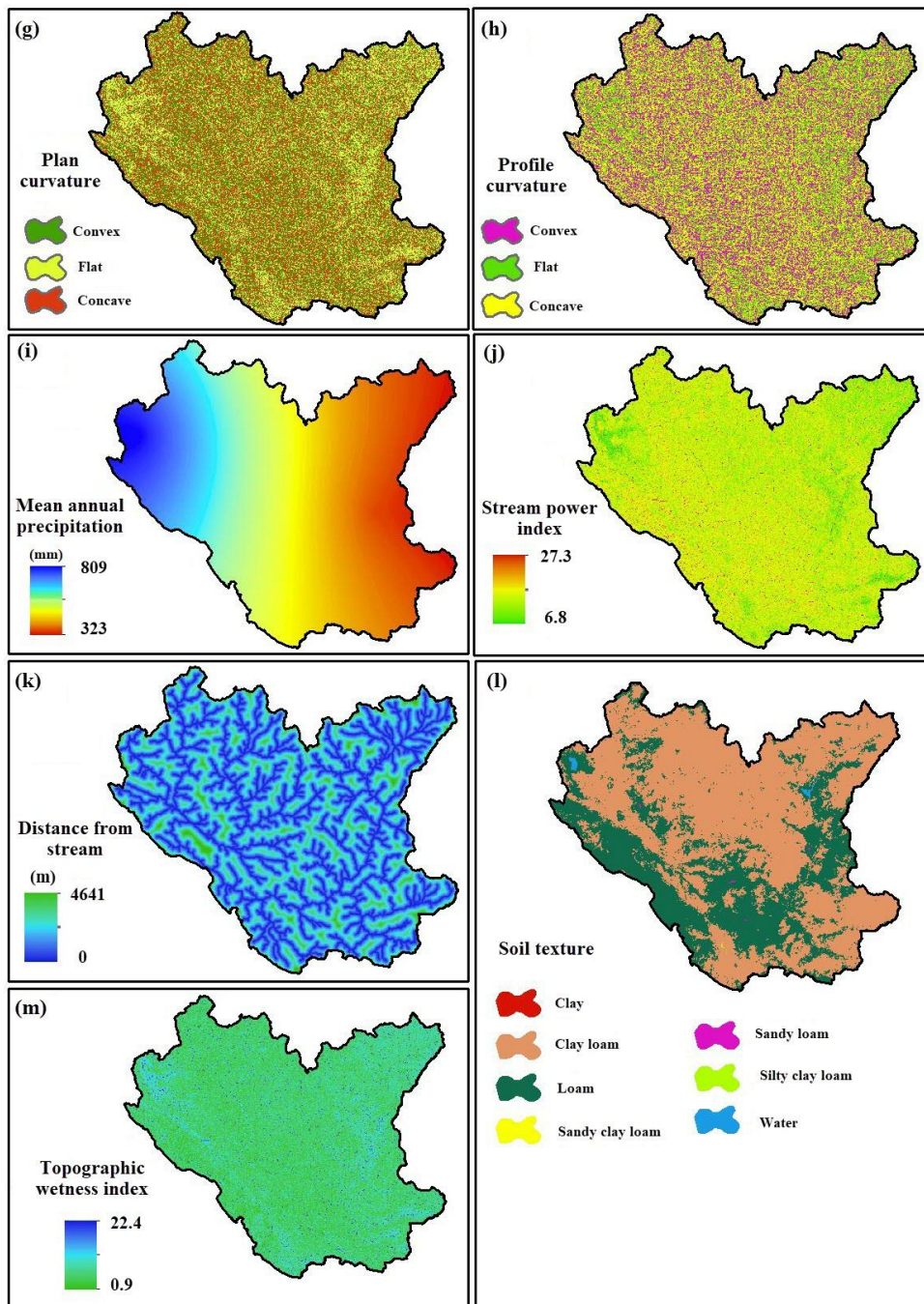
عامل با الگوی ساده و بدون تغییرپذیری مکانی در کل محدوده‌ی مطالعه‌شده شامل اطلاعات مفیدی برای مدل نیست. از این‌رو، در فرآیند تحلیل حساسیت عامل‌ها نیز

و خاکشناسی نشان داد که الگوی این شاخص‌ها در سطح منطقه پیچیده و متنوع است و این نکته یکی از شرایط مدل‌سازی مکانی است. به عبارت دیگر، یک



شکل ۲- نقشه‌ی عامل‌های اثرگذار بر رخداد سیل.

Figure 2- Maps of flood-affecting factors.



ادامه‌ی شکل ۲.

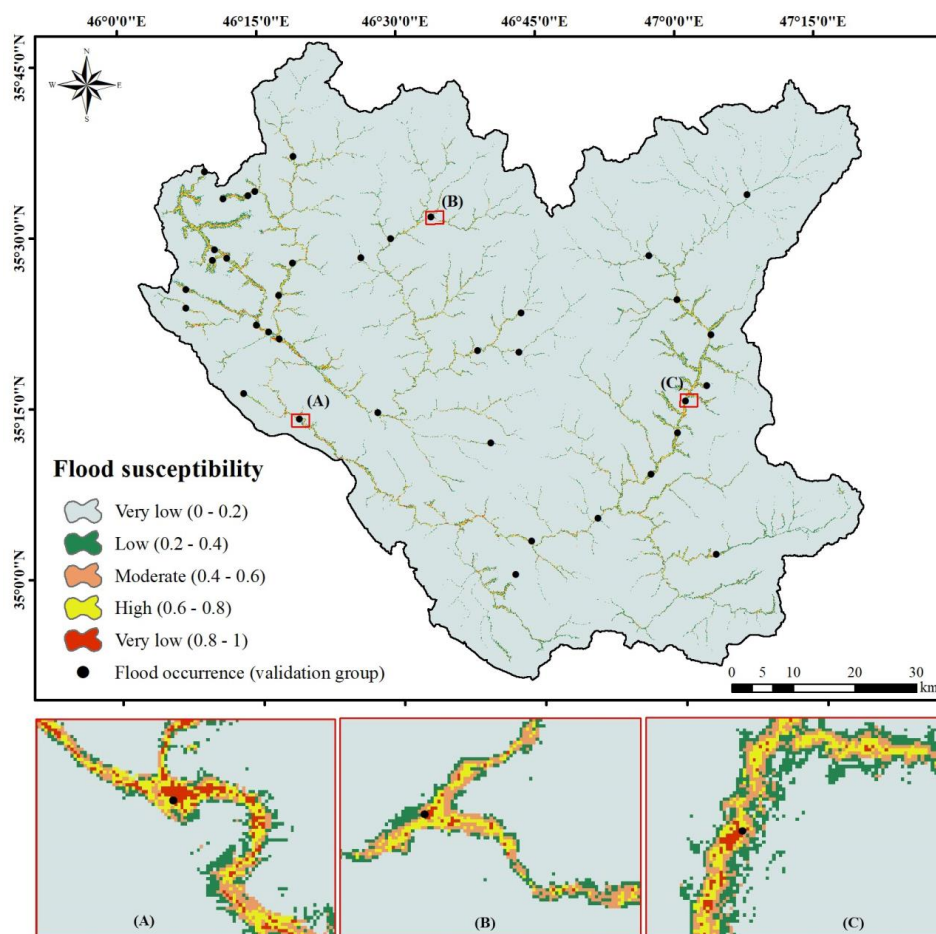
Continuation of Figure 2.

مدل پیش‌بینی بی‌نظمی، نقشه‌ی پهنه‌بندی احتمال سیل‌گیری تهیه شد و در نهایت با پیروی از روش نقاط عطف منحنی فراوانی تجمعی پیکسل‌ها به پنج طبقه‌ی استعداد شامل خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم‌بندی شد (شکل ۳). در این پژوهش با توجه به نقشه‌ی استعداد سیل‌گیری مشخص شد که نقش اصلی و مؤثر آبراه‌ها، بستر اصلی تولید سیلاب است (شکل ۳). می‌توان گفت که بخش بزرگی از محدوده‌ی

به‌عنوان یک عامل خنثی در نظر گرفته خواهد شد. **پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری** پس از تهیه‌ی لایه‌های عامل‌های مؤثر در رخداد سیل، مدل پیش‌بینی بی‌نظمی با پیروی از پیش‌فرض‌های پیشنهاد شده به‌وسیله‌ی فیلیپس و همکاران (۲۰۰۶)، در نرم‌افزار MaxEnt شامل ۵۰۰ تکرار مدل‌سازی، ۱۰۰۰۰ نقطه‌ی پس‌زمینه و ۰/۰۰۰۰۱ به‌عنوان حد آستانه‌ی توقف مدل‌سازی، اجرا شد. سپس، با اجرای

اصلی تخصیص اقدام‌های مدیریتی به طبقه‌های پرخطر به‌شمار می‌آید که در این پژوهش برطرف شده است. به‌عبارت دیگر، یک مدیر به راحتی می‌تواند با جداسازی واحد پرخطر (طبقه‌های استعداد زیاد و خیلی زیاد) به اولویت‌بندی واحدهای مدیریتی پرشماری در سطح آبراهه‌ها دست یابد و به‌راحتی اقدام‌های مدیریتی خود را به محیط اختصاص دهد. در این پژوهش با بررسی الگوی ارائه‌شده مشخص شد که آبراهه‌های با رتبه‌ی بیشتر و عریض‌تر توان، حجم و سرعت جریان ورودی قابل توجهی داشتند و در طبقه‌های استعداد زیاد و خیلی زیاد بودند. این نقشه می‌تواند سند مکان‌یابی سازه‌های آبخیزداری نیز باشد تا به‌جای صرف هزینه‌ی گزاف ساخت سازه‌های پرشمار در سرشاخه‌ها، به ساخت سازه‌های کمتر اما بزرگ‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر در مناطق با استعداد ذاتی زیاد سیل‌گیری اقدام شود. بر اساس نتایج این پژوهش ۷۶٪ (۵۶۰۰ هکتار) از منطقه‌ی مطالعه‌شده در طبقه‌ی استعداد زیاد و خیلی زیاد سیل‌گیری بودند که این عرصه نیازمند برنامه‌ریزی و مدیریت سیل است (شکل ۳).

پژوهشی استعداد سیل‌گیری خیلی کم و کم داشت که این نکته کاملاً با ماهیت آبخیزهایی که آبستن خطرهای طبیعی هستند، هماهنگی دارد؛ زیرا تنها بخش محدودی از یک عرصه‌ی طبیعی هدف خطرهای طبیعی است. اگرچه، یکی از برتری‌های این نقشه درجه‌بندی سطح خطر در میان آبراهه‌های مختلف در سطح آبخیز بود اما همه‌ی آبراهه‌ها در یک طبقه‌ی استعداد سیل‌گیری نبودند. این یافته یکی از مزیت‌های مدل بشینه‌ی آنتروپی به‌شمار می‌آید. این مدل با کنار هم گذاشتن حجم بزرگی از داده‌ها در هر پیکسل، به یک الگوی قابل فهم و قابل تعمیم (الگوی مشخص استعداد زیاد سیل‌گیری در محدوده‌ی آبراهه‌ها) و در عین حال ناهمگن (ارزش‌دهی به پیکسل‌های خاص در میان پیکسل‌های عام) دست یافته است؛ نکته‌ای که در بیشتر مدل‌های داده‌کاوی رعایت نمی‌شود و گاهی به‌سبب بهره‌گیری از دستورالعمل‌های انتشار الگو، کل یک واحد از نقشه (مثلاً کل آبراهه‌ها) در یک طبقه‌ی استعداد خاص تقسیم‌بندی می‌شوند و الگو کاملاً همگن خواهد بود. این نوع از طبقه‌بندی‌ها یکی از مانع‌های

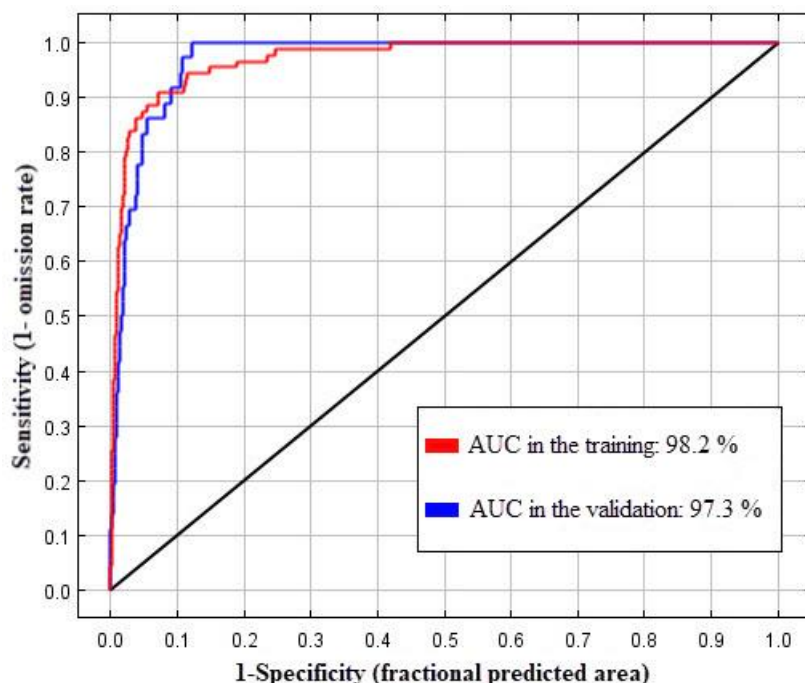


شکل ۳- استعداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان استان کردستان با استفاده از مدل بشینه‌ی بی‌نظمی.
Figure 3- Flood susceptibility in the Sirwan watershed using the Maximum Entropy model.

اعتبارسنجی و ارزیابی دقت مدل‌سازی

سطح زیر منحنی مشخصه‌ی عملکرد گیرنده نشان‌دهنده دقت مدل‌سازی در دو مرحله‌ی یادگیری و اعتبارسنجی است. بازه‌ی عددی هوزمر و لمشاو (۲۰۱۳) یک نوع از تقسیم‌بندی‌های پیشنهادشده‌ی این شاخص است. بر این اساس اندازه‌ی سطح زیر منحنی و در حقیقت دقت مدل‌سازی به چهار دسته‌ی عالی (۱-۰/۹)، خوب (۰/۸-۰/۹)، قابل‌قبول (۰/۷-۰/۸)، ضعیف (۰/۶-۰/۷) و خنثی (۰/۵-۰/۶) طبقه‌بندی می‌شود. بر اساس این طبقه‌بندی، مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی نه‌تنها در مرحله‌ی یادگیری بلکه در مرحله‌ی پیش‌بینی نیز عملکرد عالی داشت و قدرت زیادی در تعمیم نتایج به مکان‌های مختلف داشت. این عملکرد عالی را می‌توان نتیجه‌ی انتخاب صحیح عامل‌های ورودی متنوع و فراهم‌کننده حجم داده‌ها و اطلاعات متفاوت برای مدل، تعداد مناسب شواهد سیل و همچنین کارکرد مناسب دستورالعمل محاسبه‌ی مدل و تناسب آن با ماهیت پدیده‌ی مزبور دانست. مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی به‌عنوان یک مدل وابسته به نقاط حضور بر مدل‌های مبتنی بر حضور و حضورنداشتن برتری ویژه‌ای دارد. این برتری هنگام مدل‌سازی پدیده‌های طبیعی به‌ویژه خطرهای طبیعی

دوچندان می‌شود. زیرا حضورنداشتن پدیده همان‌طور که از مفهوم آن پیداست، یک بار معنایی قطعی دارد، یعنی مکانی که احتمال مشاهده‌ی پدیده در آن صفر است. حال آنکه، دانشمندان برای شناسایی مناطق حضور نداشتن خطرهای طبیعی با چالش مواجه‌اند، زیرا ممکن است یک محل به‌سبب حضور عامل‌های زمینه‌ساز، استعداد زیادی برای رخداد پدیده داشته باشد اما به‌دلیل نبودن عامل محرک و ماشه، رخدادی اتفاق نمی‌افتد. همچنین، امروزه یکی از چالش‌های جدید دانشمندان در مدل‌سازی مکانی خطرهای طبیعی رخداد پدیده، ثبت نشدن آن به‌دلیل نبودن ناظر یا سامانه‌ی پایش مناسب است. از این‌رو، به‌نظر می‌رسد قابلیت مبتنی بر نقاط حضور و بهره‌بردن از نقاط پس‌زمینه سبب‌شده است که مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی در مقایسه با مدل‌های حضور-حضورنداشتن در جایگاه بهتری باشد که در این پژوهش نیز این یافته مشخص است. از دیگر علت‌های موفقیت این مدل، قابلیت استفاده همزمان از دو دسته داده با ماهیت کمی پیوسته (مانند شیب، مدل رقومی ارتفاع) و کیفی گسسته (بافت خاک، زمین‌شناسی و کاربری زمین‌ها) بدون نیاز به کمی‌سازی دسته‌ی دوم است.

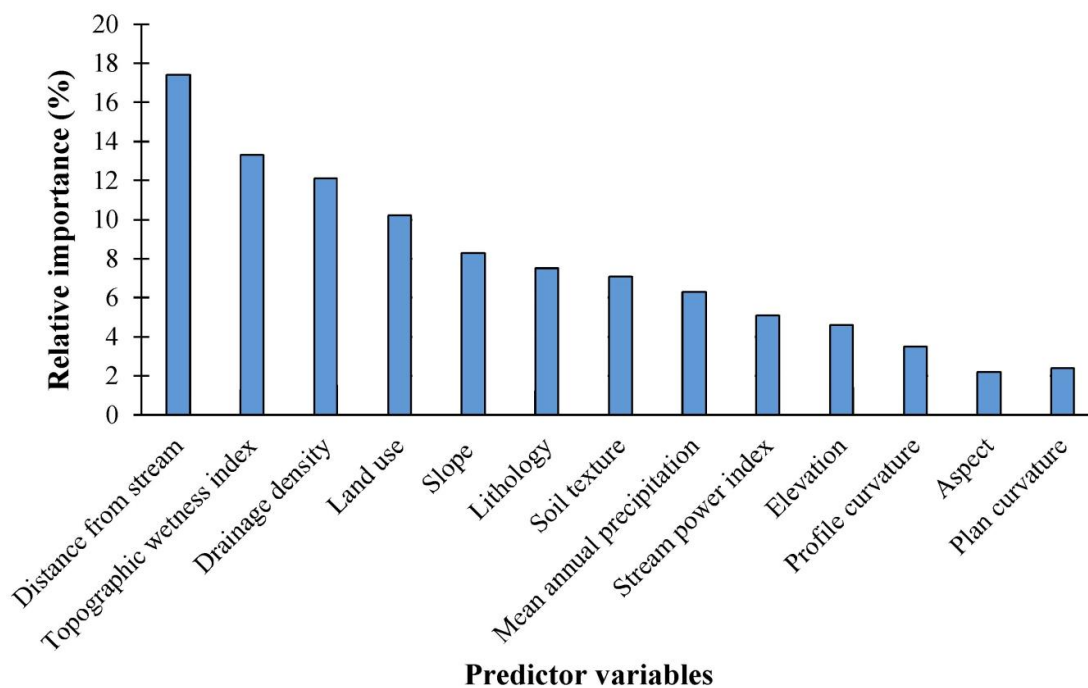


شکل ۴- اندازه‌ی دقت پیش‌بینی مدل براساس معیار مساحت زیر منحنی مشخصه‌ی عملکرد سامانه.

Figure 4- Prediction accuracy of the model using the AUC metric.

کاربری‌های انسان‌ساخت مانند زمین‌های کشاورزی، باغ و مسکونی که در حاشیه‌ی رودها شکل گرفته‌اند اشاره دارد و به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر کاهش ظرفیت آبگذری رودها و افزایش مشاهده‌ی رخدادهای سیل تأثیرگذارند. دیگر عامل‌ها مانند بارندگی، شیب، بلندی و غیره نیز به‌طور مشترک درصد نسبتاً مشابهی از مشارکت را در فرآیند مدل‌سازی سهمیم بودند. باید توجه داشت، این عامل‌ها نیز برای فرآیند مدل‌سازی حیاتی هستند و صرفاً با استفاده از چند عامل با مشارکت زیاد نمی‌توان به یک مدل با قدرت یادگیری و پیش‌بینی زیاد دست یافت. اندازه‌ی دقت پیش‌بینی مدل براساس معیار مساحت زیر منحنی مشخصه‌ی عملکرد سامانه در شکل ۴ نشان داده شده است شکل ۴ به این نکته مهم که دقت زیاد مدل نتیجه‌ی استفاده همزمان از تمام عامل‌های مؤثر مزبور است، اشاره دارد. دو ویژگی مشارکت عامل و درصد اطلاعات خاص نهفته‌شده در عامل ترجیحاً هم‌ارز نیستند؛ یعنی ممکن است با حذف یک عامل با مشارکت نسبتاً پایین مدل بخشی از اطلاعات خاص و مهم برای مدل‌سازی را که در دیگر عامل‌ها یافت نمی‌شود، از دست دهد.

اثرگذاری عامل‌های محیطی بر رخداد سیل‌گیری
درصد اهمیت نسبی عامل‌های مؤثر در رخداد سیل بر اساس رابطه‌های برگشتی تأثیر هر عامل بر معیار سنجش دقت مدل انجام شد. اندازه‌ی اهمیت نسبی عامل‌های مؤثر در رخداد سیل‌گیری در قالب نمودار جک‌نایف در شکل ۵ ارائه شده است. با بررسی‌های اولیه‌ی انجام‌شده بر اساس تفسیر چشمی مشخص شد که نقشه‌ی استعداد سیل‌گیری با نتایج اثرگذاری عامل‌های محیطی بر رخداد سیل‌گیری هم‌راستا است؛ به‌طوری که عامل فاصله از جریان و تراکم زهکشی به‌عنوان یک شاخص آب‌شناختی و رطوبت پستی‌بلندی (TWI) به‌عنوان یک شاخص آب‌شناختی مبتنی بر پستی‌بلندی به‌عنوان اثرگذارترین عامل در فرآیند مدل‌سازی استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان تعیین شدند. این نتیجه به نقش مؤثر شاخص‌های ریخت‌شناختی آب مشتق از مدل رقومی ارتفاع نیز اشاره دارد. این شاخص‌ها حاوی اطلاعاتی بودند که به‌ظاهر در لایه‌ی بلندی پنهان بود و به‌طور غیرمستقیم می‌توانست به فرآیندهای تولید رواناب دلالت داشته باشد. کاربری زمین‌ها نیز به‌عنوان چهارمین عامل مؤثر در رخداد سیل آبخیز مطالعه‌شده معرفی شد که به نقش مؤثر



شکل ۵- اندازه‌ی اهمیت نسبی عامل‌های مؤثر در رخداد سیل‌گیری.
Figure 5 Relative importance of flood-affecting factors in flooding occurrence.

به عامل‌ها و طبقه‌های آن‌ها که در روش‌های آماری و داده‌کاوی وجود داشت، برطرف شده است (رحمتی و پورقاسمی ۲۰۱۷). یافته‌های این پژوهش نشان داد که مدل پیش‌بینی بی‌نظمی بدون نیاز به دخالت کارشناس برای پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری در تعیین وزن و

بحث و نتیجه‌گیری
امروزه به‌شکل گسترده‌ای بهره‌گیری از مدل‌های هوش مصنوعی در مدل‌سازی مکانی خطرهای طبیعی استفاده‌شده است. امروزه با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی مشکلات پیشین در روش طبقه‌بندی و امتیازدهی

است و با یافته‌های این پژوهش هم‌راستا است. بر اساس نتایج بررسی ژاوو و همکاران (۲۰۱۸) مشخص شد که تراکم زهکشی نقش مهمی در توزیع مکانی استعداد سیل‌گیری زمین‌ها در یک آبخیز دارد که با یافته‌های این پژوهش هماهنگی دارد. تراکم زهکشی یک آبخیز نشان‌دهنده‌ی توان تخلیه‌ی آب‌شناختی آن است و هنگامی که تراکم زهکشی یک ناحیه از آبخیز زیاد باشد، جریان‌های زیادی به‌شکل همزمان به یک نقطه (نقطه‌ی تلاقی شبکه‌ی زهکشی) وارد می‌شود و به‌دلیل ظرفیت محدود مسیرهای جریان، احتمال رخداد سیل‌گیری افزایش می‌یابد (محمود و رحمان ۲۰۱۹). در این پژوهش با استفاده از ۱۳ عامل نماینده از فرآیندهای گوناگون محیطی و مؤثر بر رخداد سیلاب، در نهایت می‌توان نتیجه گرفت: (۱) انتخاب بهینه‌ی عامل‌ها، دقت عامل‌های ورودی و به‌ویژه تعداد مناسب شواهد سیل برای یک مدل‌سازی موفق ضروری است که در این پژوهش تحقق یافت؛ (۲) دستورالعمل مبتنی بر حضور شواهد پدیده و بدون نیاز به نقاط حضورنداشتن در مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی یکی از نقاط قوت این مدل و از علت‌های دستیابی آن به قدرت یادگیری و پیش‌بینی عالی است؛ (۳) عامل‌های آب‌شناختی، ریخت‌شناختی آب و محیطی (مشمتمل بر طبیعی و انسان‌ساخت) توأمان در افزایش استعداد محیط به رخداد سیل تأثیر مهمی دارند که خود به نقش تشدید فعالیت‌های انسانی در کنار عامل‌های زمینه‌ساز محیطی تأکید دارد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی قابلیت زیادی هم در پیش‌بینی استعداد رخداد سیل‌گیری و هم در تعیین اندازه‌ی اثرگذاری عامل‌های محیطی در پدیده‌ی سیل‌گیری داشت. نتایج این پژوهش با یافته‌های داودی‌مقدم و حقی‌زاده (۲۰۲۱) در زمینه ارزیابی کارایی مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی در تحلیل الگوی فضایی سیل‌گیری آبخیز تشان استان خوزستان مطابقت دارد.

سپاسگزاری

این مقاله براساس بخشی از نتایج طرح پژوهشی مصوب پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری (کد مصوب ۰۰۰۸۷۰-۰۴۳-۲۹-۵۳-۲۴) که با کمک صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) با شماره‌ی طرح ۹۹۰۱۷۴۴۳ تأمین اعتبار و تدوین شد. نویسندگان از حمایت‌های مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، اداره‌ی کل منابع طبیعی و آبخیزداری، ستاد بحران استانداری و جمعیت هلال احمر استان کردستان برای همکاری در بازدیدهای میدانی و ثبت رخدادهای سیل سپاسگزاری می‌کنند. از داورهای گرامی نیز برای ارائه‌ی نظرات سازنده برای بهبود کیفیت مقاله سپاسگزاری می‌شود.

اهمیت عامل‌های محیطی (متغیرهای مستقل) عملکرد بسیار خوبی داشت. در آبخیز گرگان‌رود سیاه‌کمری و همکاران (۲۰۱۸) کارایی مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی را بررسی کردند. نتایج این پژوهش با یافته‌های این پژوهشگران هم‌راستا است. در زمینه‌ی مطالعه‌ی سیل قابلیت تعیین اهمیت عامل‌های محیطی بر اساس روش جک‌نایف در این مدل بسیار اهمیت دارد. کرنزادی و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که یکی از مزیت‌های مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی در مطالعه‌ی خطرهای طبیعی، بی‌نیازی از کاربرد داده‌های نبودن رخداد بلا (مانند سیل، زمین‌لغزش و غیره) است که با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد. بر اساس نتایج پژوهش کابرا و لی (۲۰۲۰) مشخص شد که مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی ارتباط میان متغیرهای مستقل و وابسته را به خوبی تشخیص می‌دهد و کارشناسان و مدیران می‌توانند در زمینه‌ی اثرگذاری عامل‌های محیطی تحلیل مناسبی داشته باشند. با این وجود، از این توانمندی مدل برای تحلیل اندازه‌ی مشارکت عامل‌های محیطی در رخداد پدیده‌ی سیل‌گیری کمتر استفاده شده است. در این راستا، پژوهش لچوسکا (۲۰۱۸) نشان داد که درک ریسک سیل بدون درک اهمیت عامل‌های محیطی و شناخت نقش آن‌ها در پدیده‌ی سیل‌گیری امکان‌پذیر نیست. در این پژوهش نیز ۱۳ عامل محیطی گوناگون برای پیش‌بینی مکانی استعداد سیل‌گیری در نظر گرفته شد. در آبخیز سیروان فاصله از جریان، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، تراکم زهکشی و کاربری زمین‌ها مهم‌ترین عامل‌های محیطی اثرگذار بر رخداد سیل‌گیری بودند. اهمیت عامل فاصله از جریان در رخداد سیل‌گیری نیز با نتایج پژوهش‌های آرورو و همکاران (۲۰۲۱) و ستارزاده و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد. بر اساس نتایج پژوهش ترمه و همکاران (۲۰۱۸) مشخص شد که شاخص رطوبت پستی‌بلندی نقش بسیار مهمی در فراهم‌سازی اطلاعات مربوط به پستی‌بلندی و آب‌شناختی برای مدل‌سازی استعداد رخداد سیل دارد. در پژوهش وفاخواه و همکاران (۲۰۲۰) اهمیت شاخص رطوبت پستی‌بلندی در پیش‌بینی استعداد سیل نیز تأکید شده است. شاخص رطوبت پستی‌بلندی یک متغیر محیطی ترکیبی است که دو مؤلفه‌ی شیب زمین و مساحت بالادست پیکسل را به‌شکل همزمان تحلیل می‌کند. مساحت بالادست هر نقطه نشان‌دهنده‌ی توان عبور جریان از آن مکان است و احتمال رخداد سیل را افزایش می‌دهد. هرچه اندازه‌ی مساحت بالادست پیکسل بیشتر باشد، استعداد تولید رواناب نیز بیشتر خواهد بود. هنگامی که مساحت بالادست پیکسل زیاد باشد و شیب پیکسل مزبور کم باشد، برای رخداد آب گرفتگی و سیل‌گیری شرایط لازم فراهم می‌شود. برخی از پژوهش‌های پیشین از جمله چوبین و همکاران (۲۰۱۹) اثبات کردند که تراکم زهکشی یکی از عامل‌های محیطی مهم در شناسایی استعداد سیل‌گیری

فهرست منابع

- Abdi P. 2007. Investigating the flood potential of Zanjanrud basin with SCS method and geographic information system. *Iranian Irrigation and Drainage*. 2(17):22–33. (In Persian).
- Affi M. 2020. Evaluating factors affecting flood hazards and preparing a map of sensitivity and probability of its occurrence using Shannon's entropy model (Case study: Firozabad River Watershed). *Environmental Hazards Management*. 6(2):149–167. (In Persian).
- Arabameri A, Pourghasemi H, Shirani K. 2018. Zoning of flood susceptibility using the new combined method of Bayesian theory of hierarchical analysis process (Case study: Neka Watershed, Mazandaran Province). *Ecohydrology*. 4(2):447–462. (In Persian).
- Arora A, Arabameri A, Pandey M, Siddiqui MA, Shukla UK, Bui DT, Mishra VN, Bhardwaj A, 2021. Optimization of state-of-the-art fuzzy-metaheuristic ANFIS-based machine learning models for flood susceptibility prediction mapping in the Middle Ganga Plain, India. *Science of the Total Environment*. 750(1):141565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141565>.
- Avand M, Moradi H, Ramezanzadeh M. 2021. Preparation of flood sensitivity map using generalized Bayesian random forest and linear forest machine learning models. *Journal of Environment and Water Engineering*. 6(1):83–95. (In Persian).
- Azadi F, Sedogh S, Ghahroodi M, Shahabi H. 2021. Flood risk sensitivity zoning in Kashkan River Watershed using two models WOE and EBF. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 9(1):45–60. (In Persian).
- Azadtalab M, Shahabi H, Shirzadi A, Chapi K. 2021. Flood risk zoning in Sanandaj city using combined models of statistical index and definitive evidence function. *Motaleate Shahri*. 9(36):27–40. (In Persian).
- Breiner FT, Guisan A, Bergamini A, Nobis MP. 2015. Overcoming limitations of modelling rare species by using ensembles of small models. *Methods in Ecology and Evolution*. 6(10):1210–1218. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12403>.
- Bubeck P, Botzen WJW, Aerts JC. 2012. A review of risk perceptions and other factors that influence flood mitigation behavior. *Risk Analysis: An International Journal*. 32(9):1481–1495. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01783.x>.
- Cabrera JS, Lee HS. 2020. Flood risk assessment for Davao Oriental in the Philippines using geographic information system based multi criteria analysis and the maximum entropy model. *Journal of Flood Risk Management*. 13(2):12607. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12607>.
- Choubin B, Moradi E, Golshan M, Adamowski J, Sajedi-Hosseini F, Mosavi A. 2019. An ensemble prediction of flood susceptibility using multivariate discriminant analysis, classification and regression trees, and support vector machines. *Science of the Total Environment*. 651(1):2087–2096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.064>.
- Daliranfirooz H, Mokhtarikhosani F, Soltani S, Mosavi A. 2016. Assessment of damages caused by floods in the watersheds of Qamsar and Gharoud. *Journal of Water and Soil Science*. 19(74):63–76. (In Persian).
- Darabi H, Shahedi K, Mardian M. 2017. Preparation of flood risk probability and sensitivity maps using frequency ratio method in Shazand Doab Bridge watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management*. 8(1):68–79. (In Persian).
- Davoudi Moghaddam D, Haghizadeh A. 2021. Detection of Susceptible Areas to Flooding and its Most Important Contributing Factors Using the Maximum Entropy Model in

- the Tashan Watershed, Khuzeestan. Watershed Management Research. 33(4):94-109. (In Persian).
- Ebrahimi L. 2020. Preparing a flood risk management map using the new random forest algorithm (Case study: Lavasanat Watershed). Environmental Hazards Management. 7(2):181-196. (In Persian).
- Elith J, Graham C, Anderson R, Dudík M, Ferrier S, Guisan A, Zimmermann N. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Echography*. 29(2):129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>.
- Elith J, Phillips SJ, Hastie T, Dudík M, Chee YE, Yates CJ. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*. 17(1):43-57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>.
- Entezari M, Jalilian T, Darvishkhatoni J. 2019. Zoning of the flood susceptibility map using the evaluation of the efficiency of the methods of frequency ratio and weight of evidence (Case study: Kermanshah Province). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*. 6(4):143-162. (In Persian).
- Eslaminezhad SA, Eftekhari M, Mahmoodzadeh S, Akbari M, Hajielias A. 2022. Evaluation of tree-based artificial intelligence models in order to predict flood risk in GIS platform. *Iran-Water Resources Research*. 17(2):189-174. (In Persian).
- Esmaili A, Abdolahi K. 2013. Watershed management and soil conservation. Mohaghegh Ardebili Press. 578 p. (In Persian).
- Fratini P, Crosta G, Carrara A. 2010. Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering geology*. 111(1-4):62-72. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.004>.
- Ghasemlounia R, Utlu M. 2021. Flood prioritization of basins based on geomorphometric properties using principal component analysis, morphometric analysis and Redvan's priority methods: A case study of Harshit River Basin. *Journal of Hydrology*. 603 p.127061. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127061>.
- Gholami A, Vafakhah M, Alavi S. 2020. Evaluation of different statistical models in preparation of Golestan province flood map. *Journal of Range and Watershed Management*. 72(4):1011-1022. (In Persian).
- Golshan M, Esmaili Ori A, Khosravi K. 2019. Evaluation of the flood sensitivity of the Talar watershed using the probabilistic frequency ratio model. *Journal of Natural Environmental Hazards*. 7(15):1-16. (In Persian).
- Harrell Jr, Lee KL, Mark DB. 1996. Multi-variable prognostic models: issues in developing models, evaluating assumptions and adequacy, and measuring and reducing errors. *Statistics in Medicine*. 15(4):361-387.
- Hosmer Jr, DW, Lemeshow S. 2013. *Applied logistic regression* (Vol. 398). John Wiley and Sons.
- Khosravi K, Marofinia A, Nohani A, Chapi K. 2017. Evaluating the effectiveness of the logistic regression model in the preparation of the flood sensitivity map. *Journal of Range and Watershed Management*. 69(4):863-876. (In Persian).
- Koehorst BAN, Kjekstad O, Patel D, Lubkowski Z, Knoeff JG, Akkerman GJ. 2005. Work package 6 determination of socio-economic impact of natural disasters. *Assessing Socio-economic Impact in Europe*. 173 p.
- Kornejady A, Ownegh M, Bahremand A. 2017. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena*. 152(1):144-162. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.010>.
- Lechowska E. 2018. What determines flood risk perception? A review of factors of flood risk perception and relations between its basic elements. *Natural Hazards*. 94(3):1341-1366. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3480-z>.
- Mahmood S, Rahman AU. 2019. Flash flood susceptibility modeling using geo-morphometric and hydrological approaches in Pan-

- jkora Basin, Eastern Hindu Kush, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*. 78(43):1-16. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8041-y>.
- Mojededi Reizei H, Habibnejad Roshan M, Shahedi K, Pradhan B. 2021. The effectiveness of the combined model of the frequency ratio of the support vector machine in identifying flood-prone areas of the Kalat watershed. *Ecohydrology*. 7(1):77-95. (In Persian).
- Nohani A, Darabi F, Marofinia E, Khosravi K. 2017. Evaluation of Shannon's entropy model in preparation of flood sensitivity and probability map in Haraz watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*. 5(10):99-116. (In Persian).
- Norani H, Shahedi K, Habibnejad Roshan M, Kaviani A, Faramarzi M. 2020. Studying flood sensitivity in Razavar Watershed using Analytical Hierarchy Method (AHP). *Journal of Natural Environmental Hazards*. 8(19):35-50. (In Persian).
- Oh HJ, Kim YS, Choi JK, Park E, Lee S. 2011. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*. 399(3-4):158-172. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.027>.
- Opolot E. 2013. Application of remote sensing and geographical information systems in flood management: a review.-*Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology*.6(10):1884-1894.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 190(3):231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>.
- Phillips SJ, Dudík M, Schapire RE. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. In *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*. 83 p.
- Phillips SJ, Dudík M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31(2):161-175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>.
- Pontius JR, RG, Schneider LC. 2001. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.85(1-3):239-248. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00187-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00187-6).
- Pourali SH, Arrowsmith C, Chrisman N, Matkan AA, Mitchell D. 2016. Topography wetness index application in flood-risk-based land use planning. *Applied Spatial Analysis and Policy*. 9(1): 39-54. <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2>.
- Rahmati O, Pourghasemi HR. 2017. Identification of critical flood prone areas in data-scarce and ungauged regions: A comparison of three data mining models. *Water Resources Management*. 31(1):1473-1487. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1589-6>.
- Razavi Terme S, Pourghasemi H, Dadganfard F. 2019. Preparation of flood potential map using decision-making methods of hierarchical analysis and event weight statistical model (Case study: Jahrom City, Fars Province). *Journal of Watershed Management Research*. 9(17): 67-81. (In Persian).
- Rogers K, Woodroffe CD. 2016. Geomorphology as an indicator of the biophysical vulnerability of estuaries to coastal and flood hazards in a changing climate. *Journal of Coastal Conservation*. 20(1):127-144. <https://doi.org/10.1007/s11852-016-0424-1>.
- Satarzadeh E, Sarraf A, Hajikandi H, Sadeghian MS. 2022. Flood hazard mapping in western Iran: Assessment of deep learning vis-à-vis machine learning models. *Natural Hazards*. 111(1):1-19. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05098-6>.
- Shahabi H. 2022. Flood sensitivity zoning in the northern regions of Iran using advanced data mining algorithms (Study area: Haraz Watershed). *Journal of Regional Planning*. 11(41):165-182. (In Persian).

- Siahkamari S, Haghizadeh A, Zeinivand H, Tahmasebipour N, Rahmati O. 2018. Spatial prediction of flood-susceptible areas using frequency ratio and maximum entropy models. *Geocarto International*. 33(9):927–941. <https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1316780>.
- Termeh SVR, Kornejady A, Pourghasemi HR, Keesstra S. 2018. Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro fuzzy inference system and metaheuristic algorithms. *Science of the Total Environment*. 615(1):438–451. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.262>.
- Tierney KJ, Lindell MK, Perry RW. 2002. Facing the unexpected: Disaster preparedness and response in the United States. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*. 11(3):222–222. <https://doi.org/10.1108/dpm.2002.11.3.222.1>.
- Vafakhah M, Mohammad Hasani Loor S, Pourghasemi H, Katebikord A. 2020. Comparing performance of random forest and adaptive neuro-fuzzy inference system data mining models for flood susceptibility mapping. *Arabian Journal of Geosciences*. 13(417): 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05363-1>.
- Youssef AM, Pradhan B, Sefry SA. 2016. Flash flood susceptibility assessment in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) using bivariate and multivariate statistical models. *Environmental Earth Sciences*. 75(12):1–12. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4830-8>.
- Zhao G, Pang B, Xu Z, Yue J, Tu T. 2018. Mapping flood susceptibility in mountainous areas on a national scale in China. *Science of the Total Environment*. 615(1):1133–1142. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.037>.



Evaluating the Impact of Environmental Factors on Flood Susceptibility in the Sirwan Watershed Based on Historical Flood Events

Omid Rahmati^{*1}, Aiding Kornejady², Bahram Choubin³, Abolfazl Jaafari⁴, Ata Amini⁵

- 1- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran
- 2- Assistant Professor, Natural Resources Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran
- 3- Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Isfahan, Iran
- 4- Assistant Professor, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization AREEO, Tehran, Iran
- 5- Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Floods cause loss of life and financial losses every year, and their management is one of the essential elements of watershed management. In this research, an attempt is made to determine the flood susceptibility of the Sirwan watershed and finally the importance of various environmental factors in flood susceptibility based on historical flood events.

Materials and Methods

In this research, the maximum entropy model along with 13 topographical, hydrological, morpho-hydrological, geological, and environmental flood-affecting factors were used to model the flood susceptibility of the Sirwan watershed and determine the importance and percentage of participation of various factors in the state of flooding potential. A cellular computing unit (pixel) was chosen as the criterion for preparing the predictive factors and flood susceptibility maps. A total of 123 historical flood inundation events detected in the last decade were used as target variables in the

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: o.rahmati@areeo.ac.ir

Citation: Rahmati, O., Kornejady, A., Choubin, B., Jaafari, A., Amini, A. 2024. Evaluating the impact of environmental factors on flood susceptibility in the Sirwan watershed based on historical flood events. *Watershed Management Research*. 37(1): 80-97.

DOI: 10.22092/WMRJ.2023.361544.1527

Received: 17 February 2023, **Received in revised form:** 05 June 2023, **Accepted:** 21 June 2023,

Published online: 20 March 2024

Watershed Management Research, VOL. 37, No.1, Ser. No: 142, Spring 2024, pp. 80-97.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center ©Author(s)



model, of which 70% were considered for learning and the remaining 30% for validating the model results. To evaluate the performance of the model, the criterion of the area under the receiver operating characteristic curve was also used.

Results

The results indicate that the accuracy of learning and validation were 98.2% and 97.3%, respectively, indicating the excellent performance of the model. Based on the visual interpretation of the flood susceptibility map, streams with a higher order near the watershed outlet, which are the conduits for the passage of the flow with a larger volume and are located in lower areas, often have a higher proneness to flood inundation. Based on the results of the relative importance test, the four factors of distance from the stream, topographic wetness index, drainage density, and land use were introduced as the most important factors in the modeling flood susceptibility, with of 17, 13, 12 and 10% participation, respectively. These results show that natural hydrological, morpho-hydrological and environmental factors (both natural and man-made) have a mutual effect in increasing flooding susceptibility. Based on the quantitative analysis of modeling, about 0.76% (5600 hectares) of the studied area is in the high and very high flood susceptibility class, which requires planning and flood management.

Conclusion and Suggestions

The high classification of flood susceptibility classes in the Sirwan watershed of Kurdistan province and the determination of the importance of environmental factors in the event of flooding make it possible for managers to take an effective preventive approach by planning relief facilities and infrastructure. To reduce the risk of flooding, flood crisis management in the Sirwan watershed should be defined based on the four main factors identified in this study. Application of the maximum entropy model in flood susceptibility analysis is suggested for flood management of watersheds.

Keywords: maximum entropy, Sirwan, risk management, crisis management, receiver operating characteristic curve