



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مجله تحقیقات آموزش و پژوهش کشاورزی

مدل‌سازی توان سیل‌خیزی در آبخیز زرينه‌رود با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی

مهدي اعلمي^۱، مجتبی اردستاني^{۲*}، بهرام ملك‌محمدی^۳

۱ - دانشجوی دکتری محیط‌زیست گرایش منابع آب، پردیس بین‌الملل کیش دانشگاه تهران

۲ - استاد دانشکده‌ی مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران

۳ - دانشیار دانشکده‌ی مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران

چکیده‌ی مبسوط

مقدمه و هدف

در میان خطرهای طبیعی، بدون تردید سیل به‌عنوان ناگوارترین خطر در جهان شناخته شده است. یکی از راه‌کارهای اساسی برای کاهش خسارت‌های ناشی از سیل تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت سیل است. پیش‌بینی مکانی احتمال رخداد سیل با استفاده از مدل‌هایی که براساس داده‌های مکانی و تاریخی به وجود آمده‌اند، در نهایت منجر به تهیه‌ی نقشه‌های حساسیت‌پذیری سیلاب می‌شود، از راه‌کارهای مناسب برای برنامه‌ریزان مدیریت زمین‌ها در مناطق مختلف برای پیشگیری از رخداد این پدیده است. در این پژوهش، به‌منظور تعیین مناطق مستعد رخداد سیل از مدل ترکیبی (هیبریدی) استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه‌سازی فراکاوشی رقابت امپراتوری (ANFIS-ICA) و مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه‌سازی فراکاوشی ازدحام ذرات (ANFIS-PSO) استفاده شد.

مواد و روش‌ها

آبخیز زرينه‌رود در شمال غربی استان کردستان و میان طول جغرافیایی $30^{\circ} 48' 45''$ و $20^{\circ} 48' 46''$ شرقی و عرض جغرافیایی $20^{\circ} 42' 35''$ و $15^{\circ} 23' 36''$ شمالی است. مساحت این آبخیز $4485/2$ کیلومتر مربع است. اقلیم منطقه معتدل مرطوب است و میانگین بارندگی سالانه‌ی آن 480 میلی‌متر است. موقعیت رخدادهای سیل به‌طور تصادفی به دو گروه آموزش (۷۰٪) و اعتبارسنجی (۳۰٪) تقسیم شد. عامل‌های محیطی مختلف (بلندی، جهت، شیب، انحنای سطح، کاربری زمین، سنگ‌شناسی،

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ardestan@ut.ac.ir

استناد: اعلمي، م.، اردستاني، م.، ملك‌محمدی، ب. ۱۴۰۳. مدل‌سازی توان سیل‌خیزی در آبخیز زرينه‌رود با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۱): ۱۷-۲.

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2023.360973.1513

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۱/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره‌ی ۳۷، شماره‌ی ۱، شماره‌ی پیاپی ۱۴۲، بهار ۱۴۰۳، صفحه‌های ۲ تا ۱۷.

©نویسندگان

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



ارتباطی اصلی و فرعی استان ۷۴۰ میلیارد و ۲۰۰ میلیون ریال خسارت زد. خسارت بهره‌برداران در اثر این بلاهای طبیعی از ۱۰۹۶۹ هکتار زمین زراعی به اندازه‌ی ۵۰۶ میلیارد و ۷۶ میلیون ریال و از ۹۹۹۱ هکتار باغ به اندازه‌ی یک هزار و ۵۹۶ میلیارد و ۴۵۲ میلیون ریال بود. دیگر خسارت‌های وارد شده به کشاورزان در این استان در اثر سیلاب و سرمازدگی شامل تلف شدن ۵۳۵ رأس دام به ارزش ۱۱ میلیارد و ۵۵۰ میلیون ریال بود. خسارت سیلاب به برخی از زیرساخت‌های کشاورزی استان در بخش‌های آبی‌پروری، جاده‌های میان مزارع، سامانه‌ی آبیاری تخت فشار، کانال‌ها و لوله‌های انتقال آب، بندها و سازه‌های آبخیزداری و صنایع کشاورزی، ۹۶۰ میلیارد و ۵۸ میلیون ریال بود (خبرگزاری ایرنا، کد خبر: ۸۳۷۲۵۴۶۲). پیش‌بینی رخداد سیل در آبخیزها و تعیین مناطق مستعد آب‌گرفتگی به دلیل کافی نبودن آمار و اطلاعات ایستگاه‌های آب‌سنجی دشوار است و این مسئله در کشورهای در حال توسعه به‌وفور مشاهده می‌شود. بنابراین تهیه‌ی نقشه‌ی مناطق مستعد سیل و آب‌گرفتگی این آبخیز، مهار کردن بلای سیل را آسان‌تر می‌کند و می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مهار سیل مفید باشد. در این پژوهش، به‌منظور تعیین مناطق مستعد رخداد سیل از مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه‌سازی فراکوشی رقابت امپراتوری (ANFIS-ICA) و مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه‌سازی فراکوشی ازدحام ذرات (ANFIS-PSO) استفاده شد.

مواد و روش‌ها

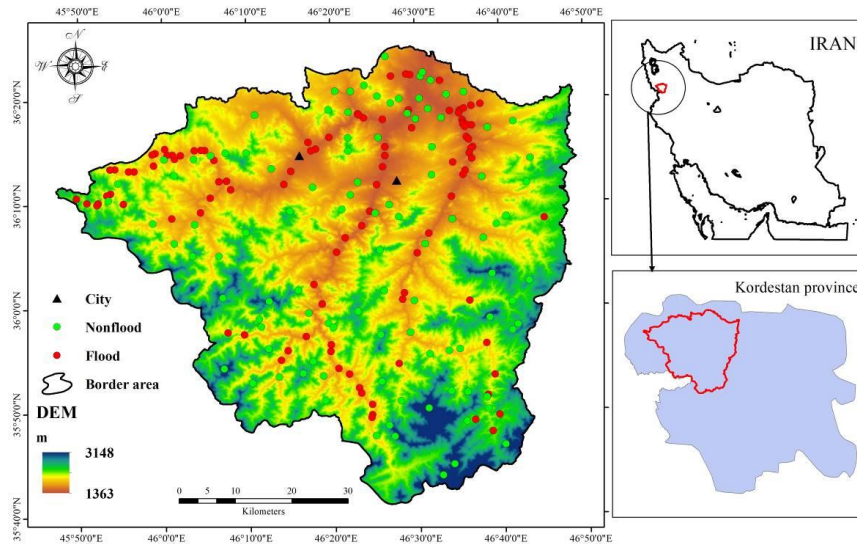
آبخیز زرينه‌رود در شمال‌غربی استان کردستان است و جریان خروجی این آبخیز به دریاچه‌ی ارومیه در استان آذربایجان غربی می‌ریزد. این آبخیز میان طول جغرافیایی $30^{\circ} 48' 45''$ و $36^{\circ} 48' 20''$ شرقی و عرض جغرافیایی $35^{\circ} 20' 42''$ و $35^{\circ} 23' 15''$ شمالی است (شکل ۱). این آبخیز با مساحت $4485/2$ کیلومتر مربع به‌عنوان یک آبخیز کوهستانی در کشور شناخته شده است. از شهرهای مهم این آبخیز می‌توان به سفر و صاحب اشاره کرد. شبکه‌ی زهکشی آبخیز درختی است و جریان آب از بخش‌های جنوبی و جنوب‌غربی آن سرچشمه می‌گیرند و به شمال آبخیز منتقل می‌شوند. در این آبخیز تغییرات بلندی قابل مشاهده‌ای وجود دارد. کمترین بلندی ۱۳۶۳ متر و بیشترین بلندی ۳۱۴۸ متر از سطح دریا است. اقلیم منطقه معتدل مرطوب است و اندازه‌ی میانگین بارندگی سالانه‌ی آن ۴۸۰ میلی‌متر است. در این آبخیز با توجه به اندازه‌ی بارندگی سالانه و ویژگی‌های پستی‌بلندی، و از آنجایی که اکثر بارندگی‌ها در زمین‌های بدون پوشش گیاهی یا با پوشش گیاهی کم اتفاق می‌افتد، سیل‌های زیادی همراه با خسارت و تلفات رخ می‌دهد. تنوع واحدهای سنگ‌شناسی مربوط به دوره‌های مختلف از ویژگی‌های بارز این آبخیز است که تأثیر زیادی بر فرایندهای آب‌شناختی و

جنگل تصادفی (RF) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) را اجرا کردند. با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل انجام‌شده به‌وسیله‌ی این پژوهشگران، مدل فازی WofE-SVM بیشترین عملکرد پیش‌بینی ($AUC=0/98$) را داشت. ایسلام و همکاران (۲۰۲۱)، در آبخیز رود تستا بنگلادش با استفاده از مدل‌های داگینگ و فضای تصادفی همراه با مدل‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان، حساسیت سیلاب در آبخیز رود تستا را مدل‌سازی کردند. در این پژوهش اندازه‌ی سطح زیر منحنی (ROC (AUC برای همه مدل‌ها بیشتر از $0/8$ محاسبه شد. برای مدل‌سازی حساسیت به سیلاب، روش داگینگ عملکرد بهتری داشت و در رتبه‌های بعدی توانایی SVM، ANN، RF و RS بودند. شریفی گرم‌دره و همکاران (۲۰۱۸) فراوانی سیل منطقه‌ای در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران را بررسی و تحلیل کردند. در این بررسی متغیرهای مستقل، شامل متغیرهای گیتاشناسی، هواشناسی، زمین‌شناسی و کاربری زمین، استخراج شد و با استفاده از سه راهبرد آزمون گاما GT، (GT) مثبت طبقه‌بندی و نظر کارشناسان، بهترین ترکیب ورودی انتخاب شد. در این پژوهش، از روش‌های وایزای برداری (SVR)، ساختار استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS)، شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) و وایزای غیرخطی (NLR) برای پیش‌بینی اوج تخلیه سیل استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های ترکیبی GT + ANFIS و GT + SVR عملکرد بهتری در مقایسه با مدل‌های ANN و NLR داشتند. یکی از راه‌کارهای اساسی برای کاهش خسارت‌های ناشی از سیل تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت سیل در آبخیزها است. امروزه با فن‌های نوین داده‌کاوی و با کاربرد تابع‌ها و دستورالعمل‌های پیشرفته‌ی ریاضی، میان دو دسته از داده ارتباط برقرار می‌کنند و امکان رخ دادن یک نتیجه در آینده را پیش‌بینی می‌کنند (چوبین و همکاران ۲۰۱۹). بنابراین پیش‌بینی مکانی احتمال رخداد خطرهای طبیعی با استفاده از مدل‌هایی که براساس داده‌های مکانی و تاریخی به وجود آمده‌اند، در نهایت منجر به تهیه‌ی نقشه‌های حساسیت‌پذیری به برخی از پدیده‌های طبیعی مانند سیلاب می‌شود، از راه‌کارهای مناسب برای برنامه‌ریزان مدیریت زمین‌ها در مناطق مختلف برای پیش‌گیری از رخداد این پدیده‌ها است.

در استان کردستان در مارس سال ۲۰۱۹، در نیمه‌ی اول سال در ۲ نوبت، بارش‌های متناوب باران و سیلابی شدن مسیل‌ها و رودها رخ داد و به‌طور میانگین ۸۴ میلی‌متر بارندگی در این استان ثبت شد. بارش‌ها در این استان سه هزار و ۶۵۰ میلیارد ریال به زیرساخت‌ها و بهره‌برداران بخش کشاورزی خسارت وارد کرد. همچنین در این استان بارش‌های سیل‌آساموجب آسیب‌دیدگی ۹۹۹ واحد مسکونی شدند که ۸۷۶ واحد آن ویران شد و به بازسازی کامل نیازمند است. همچنین به زیرساخت‌های راه در سه بخش راه‌ها، پل‌ها و ساختمان‌های راهداری، راه‌های

اخیر وضعیت آن رو به نابودی است و به عنوان یکی از مهم ترین عامل های محیطی در رخداد سیل شناخته شده است.

زمن ریخت شناسی دارد. در این منطقه کاربری های مختلف زمین شامل مرتع، کشاورزی دیم، کشاورزی آبی، مسکونی و باغ ها از کاربری های غالب هستند. تراکم پوشش گیاهی مراتع در این آبخیز متوسط تا ضعیف است و در دهه های



شکل ۱- محدوده مطالعه شده در پژوهش.

Figure 1- The area studied in the research.

مهم و مهارکننده سیلاب است (بویی و همکاران ۲۰۲۰). عامل بلندی مهارکننده حرکت جریان آب است. جاری شدن سیل ارتباط مستقیمی با شیب دارد و این عامل یک ویژگی مهم گیتاشناسی است که برای تعیین رواناب سطحی و مناطق مستعد سیلاب استفاده می شود (بویی و همکاران ۲۰۱۶). شیب به طور مستقیم بر سرعت رواناب سطحی و نفوذ عمودی آن اثر می گذارد و حساسیت سیل را تحت تأثیر قرار می دهد (استیوکس و همکاران ۲۰۲۰). جهت جغرافیایی، عاملی است که بر جهت جریان های آب تأثیر می گذارد (چن و همکاران ۲۰۲۰). بسیاری از فرایندها مانند هوازدگی، تبخیر و تعرق، گسترش ریشه و رشد پوشش گیاهی تحت تأثیر جهت جغرافیایی است (سیدل و اوچیائی ۲۰۰۶). انحنای سطح بیان گر شکل پستی بلندی است. سطحی که پیکسل ها در آن به شکل محدب باشند، تقعر مثبت است، سطحی که پیکسل ها در آن به شکل مقعر باشند، تقعر منفی است. در نهایت سطحی که به شکل مستقیم باشد، تقعر صفر است. بنابراین، انحنای سطح مناطق واگرا و همگرای رواناب را از هم متمایز می کند (تورسیویا و لویز ۲۰۲۰). شاخص رطوبت پستی بلندی نشان دهنده تغییرات مکانی رطوبت در آبخیز است (چوبین و همکاران ۲۰۱۹). این شاخص یک عامل مهم و یک ویژگی پستی بلندی ثانویه است که به طور یک اندازه ای مشخص اثر پستی بلندی را روی سطح اشباع شده ی جریان نشان می دهد (ملس و همکاران ۲۰۲۰). این ویژگی اندازه ی رطوبت موجود در پیکسل را با هر اندازه پیکسل نشان

روش تحقیق

رخدادهای تاریخی سیل به عنوان پایه ای برای پیش بینی سیل در آینده در نظر گرفته می شود (سرکار و موندال ۲۰۲۰). در این مرحله، موقعیت رخداد های گذشته ی سیل منطقه ی مطالعه شده، از اداره های مختلف مانند بخش مدیریت بحران جهاد کشاورزی، دفتر مدیریت بحران استانداری، بخش آبخیزداری اداره ی کل منابع طبیعی و دفترهای بیمه جمع آوری شد. توازن و تعادل حضور و حضورنداشتن (۱:۱) پراکندگی کمتری در نتایج ایجاد می کند. بنابراین، انتخاب نقاط بدون حضور به همان اندازه ی نمونه های حضور، اهمیت دارد (تانگ و همکاران ۲۰۲۰). براساس نتایج پژوهش خسروی و همکاران (۲۰۱۹)، در این پژوهش برای انجام مدل سازی با استفاده از مدل های یادگیری ماشین و با استفاده از روش دستورالعمل تقسیم بندی تصادفی، نقاط حضور و بدون حضور به دو گروه آموزش مدل و اعتبارسنجی به نسبت ۷۰ به ۳۰ تقسیم شدند. در این پژوهش بر اساس نتایج بررسی های رحمتی و پورقاسمی ۲۰۱۷؛ لی و همکاران ۲۰۱۷؛ خسروی و همکاران ۲۰۱۹؛ ترمه و همکاران ۲۰۱۸؛ سیاه کمری و همکاران ۲۰۱۸، بلندی، جهت جغرافیایی، شیب زمین، انحنای سطح، کاربری زمین، سنگ شناسی، بارندگی، شاخص توان جریان، فاصله از جریان، شاخص رطوبت پستی بلندی به عنوان مهم ترین عامل های پیش بینی کننده ی سیل در نظر گرفته شدند. پستی بلندی با تغییرات مکانی رطوبت خاک و شرایط آب شناختی، از عامل های

مدل‌سازی سیل

مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه‌سازی فراکاوشی رقابت امپراتوری (ANFIS-ICA)

با این دستورالعمل و با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، دستورالعملی برای حل مسئله‌های ریاضی بهینه‌سازی می‌توان ارائه داد. این دستورالعمل از لحاظ کاربرد، در دسته‌ی دستورالعمل‌های بهینه‌سازی تکاملی (مانند دستورالعمل‌های ژنتیک، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات، دستورالعمل زنبورها و غیره) است (آتاسپاز و لوکاس ۲۰۰۷). دستورالعمل رقابت استعماری، مجموعه‌ای از جواب‌های اولیه از جواب‌های احتمالی را تشکیل می‌دهد. جواب‌های اولیه در دستورالعمل ژنتیک با عنوان کروموزوم، در دستورالعمل ازدحام ذرات با عنوان ذره و در دستورالعمل رقابت استعماری نیز با عنوان کشور شناخته می‌شوند. دستورالعمل رقابت استعماری با روند خاصی، جواب‌های اولیه (کشورها) را به تدریج بهبود می‌دهد و در نهایت جواب مناسب مسئله‌ی بهینه‌سازی (کشور مطلوب) را در اختیار پژوهشگر می‌گذارد. پایه‌های اصلی این دستورالعمل، سیاست همسان‌سازی و رقابت استعماری است. این دستورالعمل با تقلید از روند تکامل اجتماعی، اقتصادی و سیاسی کشورها و با مدل‌سازی ریاضی بخش‌هایی از این فرایند، عملگرهایی را در قالب منظم به شکل دستورالعمل فراهم می‌آورد که می‌تواند به حل مسئله‌های پیچیده‌ی بهینه‌سازی کمک کند. در واقع این دستورالعمل جواب‌های مسئله‌ی بهینه‌سازی را در قالب کشورها نگریسته و سعی می‌کند در طی فرایندی تکرار شونده این جواب‌ها را رفته‌رفته بهبود دهد و در نهایت به جواب بهینه‌ی مسئله برسد (بویی و همکاران ۲۰۱۸).

مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه‌سازی فراکاوشی ازدحام ذرات (ANFIS-PSO)

روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک روش سراسری کمینه‌سازی است که با استفاده از آن می‌توان با مسئله‌هایی که جواب آن‌ها یک نقطه یا سطح در فضای n بعدی باشد، روبرو شد. در چنین فضایی، فرضیه‌هایی مطرح می‌شوند و به آن‌ها یک سرعت ابتدایی داده می‌شود. همچنین، میان ذرات کانال‌های ارتباطی در نظر گرفته می‌شود. سپس این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌کنند و نتایج به دست آمده بر مبنای یک ملاک شایستگی پس از هر بازه‌ی زمانی محاسبه می‌شوند. با گذشت زمان، ذرات به سمت ذراتی که ملاک شایستگی بیشتری دارند و در گروه ارتباطی یکسانی هستند، شتاب می‌گیرند. به‌رغم اینکه هر روش در محدوده‌ای از مسئله به‌خوبی کار می‌کند، این روش در حل مسئله‌های بهینه‌سازی پیوسته موفقیت‌آمیز است.

می‌دهد. فرسایش‌پذیری بستر جریان و ظرفیت انتقال رسوب آن SPI نامیده می‌شود که به‌عنوان قدرت فرساینده‌ی رواناب است و ناپایداری دامنه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (چن و همکاران ۲۰۲۰). برای تعریف این ویژگی فرض بر این است که آب‌دهی با مساحت ویژه‌ی آبخیز (AS) متناسب است. مسیرهای اصلی تخلیه‌ی سیلاب شبکه‌ی جریان رود است و مناطق نزدیک رود مستعد سیلاب است (اوپرمن و همکاران ۲۰۰۹). فاصله از رود، طغیان و جریان رود را مهار می‌کند (گوپتا ۲۰۲۰). این عامل تأثیر قابل توجهی در حجم و اندازه‌ی سیل دارد (ترمه و همکاران ۲۰۱۸).

در این پژوهش لایه‌ی تراکم زهکشی به‌شکل یک کمیت قابل اندازه‌گیری با استفاده از دستور (تراکم خط) از روی نقشه‌ی شبکه‌ی آبراهه در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد که نشان‌دهنده‌ی چگونگی جریان شبکه‌ی زهکشی آبخیز است. هر چه تراکم زهکشی زیادتر شود، سرعت تجمع رواناب نیز بیشتر می‌شود و نفوذپذیری کاهش می‌یابد و شیب منحنی صعودی آب‌نگار نیز بیشتر می‌شود. کاربری زمین با تأثیر بر عامل‌هایی مانند جریان‌های سطحی، نفوذ، حمل و نقل رسوب، یک عامل مهم در مدل‌سازی جریان سیل است و مستقیماً بر فراوانی سیل اثر می‌گذارد (دیکی و پارسون ۲۰۱۲). سطوح کاربری زمین‌های مسکونی، عمدتاً با مواد غیرقابل نفوذ پوشانده شده است و رواناب و طغیان سیل را افزایش می‌دهد. در این مناطق ظرفیت نفوذ کاهش می‌یابد و حتی به صفر می‌رسد و جریان سطحی این مناطق به‌طور کامل به کل رواناب افزوده می‌شود (رحمتی و همکاران ۲۰۱۶). بارندگی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عامل‌های تأثیرگذار در رخداد سیلاب انتخاب شده است (پورقاسمی و همکاران ۲۰۲۰). در یک بارندگی شدید، آب به خاک نفوذ می‌کند، مکش مواد به تدریج کاهش می‌یابد و از این رو مقاومت برشی مواد کاهش می‌یابد (هونگ و همکاران ۲۰۱۶). بنابراین بارندگی با شدت زیاد در یک دوره‌ی کوتاه مدت می‌تواند باعث جاری شدن سیل شود. در این پژوهش داده‌های بارندگی از ایستگاه هواشناسی منطقه‌ی مطالعه شده جمع‌آوری شد. سپس روش‌های گوناگون درون‌یابی انجام شد و روش کریجینگ با بیشترین دقت به‌عنوان روش درون‌یابی برای تهیه‌ی نقشه‌های بارندگی در محیط ArcGIS انتخاب شد. این روش یکی از مهم‌ترین روش‌های درون‌یابی است. سنگ‌شناسی به‌عنوان یک عامل مهم برای تغییر مکانی و زمانی اندازه‌ی زهکشی و تولید رسوب در نظر گرفته می‌شود (میلر و همکاران ۱۹۹۰). تراکم زهکشی مناطقی که سنگ‌های مقاوم یا مواد زیرخاک بسیار نفوذپذیر دارند، کم است. افزون بر این، سازندهای آبرفتی، از نظر فرسایش‌پذیری و نفوذپذیری، از عامل‌های طبیعی برای تعیین خطر سیل هستند.

نتایج

بر اساس نقشه‌ی بلندی کمترین و بیشترین بلندی منطقه به ترتیب ۱۳۶۳ و ۳۱۴۸ متر از سطح دریا است. در این آبخیز بلندترین نقاط در جنوب، غرب و شرق آبخیز هستند و پست‌ترین نقاط در شمال شرقی آبخیز مشاهده می‌شوند. بر اساس نقشه‌ی شیب زمین، کمترین و بیشترین اندازه‌ی شیب به ترتیب صفر و ۴۲۰/۹٪ محاسبه شد. در این آبخیز مناطق با شیب تند در بخش‌های جنوبی، غربی و مرکزی هستند. بخش زیادی از منطقه با شیب کم در وضعیت سیل‌گیری و آب‌گرفتگی زمین‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کند. تغییرات جهت شیب در این آبخیز زیاد بود و فراوانی طبقه‌های جهت‌های شیب نیز توزیع فراوانی نسبتاً مشابهی داشتند. فراوانی طبقه‌ی بدون جهت کمتر از دو درصد بود. منطقه‌ی مطالعه‌شده بر اساس تحلیل‌های انحنای سطح عمودی، به سه طبقه‌ی محدب، تخت و مقعر تقسیم شد. بخش اعظم منطقه در طبقه‌ی تخت بود. با توجه به اینکه طبقه‌ی انحنای تخت توان بیشتری برای آب‌گرفتگی زمین‌ها دارد، باید به وضعیت سیل‌گیری منطقه توجه ویژه شود. انحنای سطح نیم‌رخ نیز به سه طبقه تقسیم شد. از نظر انحنای سطح نیم‌رخ، بخش زیادی از منطقه‌ی مطالعه‌شده در طبقه‌ی تخت بود. یکی از عامل‌های اصلی در شکل‌گیری رواناب زیرقشری، انحنای سطح نیم‌رخ است. این عامل موجب کاهش نفوذپذیری خاک، افزایش ضریب رواناب سطحی و آب‌گرفتگی خواهد شد. در سطح این آبخیز اندازه‌ی بارندگی از ۳۵۵/۶ میلی‌متر تا ۶۱۸/۵ میلی‌متر از سمت شمال غربی به سمت جنوب شرقی متغیر بود. در این آبخیز شیب بارندگی آشکار بود و این عامل می‌تواند در تغییرات توان سیل‌گیری نقش مهمی داشته باشد. اندازه‌ی شاخص رطوبت پستی‌بلندی آبخیز مطالعه‌شده از ۰/۸۴ تا ۲۲/۹ متغیر بود. از آنجایی که رطوبت خاک بر سرعت تولید رواناب مؤثر است، این عامل می‌تواند به‌خوبی بر وضعیت نفوذپذیری خاک و سیل‌گیری مؤثر باشد. شرایط آب‌گرفتگی در بخش‌هایی از آبخیز که شاخص رطوبت پستی‌بلندی دارند، بیشتر بود، زیرا اندازه‌های زیاد این شاخص نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی زیاد جریان آب و شیب کم زمین بود که شرایط را برای سیل‌گیری فراهم می‌کرد. بر اساس نقشه‌ی بافت خاک، سطح بیشتر آبخیز، بافت خاک لومی-رسی و لومی داشت. از آنجایی که آبراهه‌ها شریان‌های یک آبخیز هستند، فاصله از آن‌ها یک معیار مهم در شرایط بوم‌شناختی و آب‌شناختی به‌شمار می‌آید. در این آبخیز اندازه‌ی فاصله از آبراهه صفر تا ۳۶۹۲ متر متغیر بود. لازم به ذکر است که بیشترین اندازه‌ی فاصله از آبراهه در شمال آبخیز بود و در سایر مناطق توزیع فاصله از آبراهه به‌شکل پراکنده بود. فاصله‌ی بخش‌های مرکزی، شمالی، غربی، شرقی و جنوبی آبخیز از آبراهه دور بود. بنابراین این عامل وضعیت پیچیده‌ای (از لحاظ در معرض قرارگیری سیل) فراهم کرده است و نمی‌توان به‌سادگی توان سیل‌گیری را برای بخش‌های مختلف آبخیز مشخص کرد.

دستورالعمل PSO یک دستورالعمل جستجوی جمعی است که از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان تهیه شده است. در ابتدا این دستورالعمل برای کشف الگوهای حاکم بر پرواز هم‌زمان پرندگان، تغییر ناگهانی مسیر آن‌ها و تغییر شکل بهینه به‌کار گرفته شد. در PSO، ذرات در فضای جستجو جاری می‌شوند. تغییر مکان ذرات در فضای جستجو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگان‌شان است؛ بنابراین موقعیت دیگر توده‌های ذرات روی چگونگی جستجوی یک ذره اثر می‌گذارد. نتیجه‌ی مدل‌سازی این رفتار اجتماعی فرایند جستجویی است که ذرات به سمت نواحی موفق میل می‌کنند. ذرات از یکدیگر می‌آموزند و بر مبنای دانش به‌دست‌آمده به سمت بهترین همسایگان خود می‌روند. اساس کار PSO بر این اصل استوار است که در هر لحظه هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن بوده است و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند (حقی‌زاده و همکاران ۲۰۱۹).

ارزیابی دقت مدل‌ها و عملکرد پیش‌بینی

در این پژوهش دقت مدل‌ها بر اساس دو روش منحنی مشخصه‌ی عامل گیرنده (ROC) و آماره‌ی مهارت صحیح (TSS) ارزیابی شد. نتایج مدل‌سازی رخداد سیلاب، بر اساس نقاط اعتبارسنجی (۳۰٪ رخداد‌های سیل پیشین) و در قالب روش ROC انجام شد. همچنین، مساحت زیر منحنی (AUC) به‌عنوان معیار کمی برای اعتبارسنجی استفاده شد (فیلیسimo و همکاران ۲۰۱۳). در روش منحنی مشخصه‌ی عامل گیرنده، احتمال تشخیص صحیح نقاط حضور مدل با احتمال تشخیص صحیح نقاط شبه نبودن حضور مقایسه می‌شود (فیلیس و همکاران ۲۰۰۶). سطح زیر منحنی به‌دست‌آمده به‌عنوان معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقاط حضور از نبودن حضور است. اندازه‌ی سطح زیر نمودار (AUC) در مدل با دقت پیش‌بینی بسیار کم ۰/۵ است و در مدل با دقت پیش‌بینی بسیار زیاد یک است. افزون بر این در این پژوهش، از شاخص امتیاز مهارت صحیح (TSS) نیز استفاده شد و نتایج اعتبارسنجی مقایسه شد. برای اندازه‌گیری توانایی یک اندازه‌ی پیش‌بینی شده برای تمایز میان نبودن رخداد و رخداد سیل از TSS و تمام عناصر ماتریس احتمالی استفاده می‌شود (رحمتی و همکاران ۲۰۲۰).

۱: $TSS = TPF - FPF$
 TPF: حساسیت و FPF: تشخیص است. اندازه‌های TSS میان ۱ و ۱- متفاوت است. اندازه‌های کمتر از ۰/۴ نشان‌دهنده‌ی ناکارآمدی مدل در تشخیص و ایجاد تمایز میان مکان‌های رخداد و نبودن رخداد سیل است. پس از تعیین دقت کمی مدل‌ها، اندازه‌ی کارایی مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شد و مناسب‌ترین مدل بر اساس عملکرد پیش‌بینی تعیین شد. در نهایت مدل برتر (با بیشترین دقت) به‌عنوان ابزار مناسب مدیریت سیل آبخیز معرفی شد.

در این پژوهش بر اساس نتایج مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه سازی فراکاوشی ازدحام ذرات، مناطقی که توان سیل خیزی زیاد داشتند بیشتر در بخش های میانی و شمالی آبخیز بودند. الگوی پیش بینی مکانی این مدل در مقایسه با مدل ترکیبی مبتنی بر دستورالعمل بهینه سازی فراکاوشی رقابت امپراتوری متفاوت بود.

در این پژوهش بر اساس نتایج پیش بینی توان تولید سیل به وسیله مدل ANFIS-PSO، ۷۰/۲۱٪، از مساحت آبخیز در طبقه ی توان خیلی کم، ۲۴/۱۶٪ در طبقه ی توان کم، ۷/۹٪ در طبقه ی توان متوسط، ۲/۶٪ در طبقه ی توان زیاد و ۳٪ در طبقه ی توان خیلی زیاد بود. بنابراین، بر اساس نتایج نشان داده شده در جدول ۱ بیش از ۵٪ از مساحت آبخیز (۲۵۳۰۰ هکتار) در شرایط حساس است و به انجام اقدام های مدیریتی و مهندسی مهار سیل نیازمند است. بر اساس نتایج پیش بینی توان تولید سیل به وسیله مدل ANFIS-ICA، ۷۸/۵۹٪، از مساحت آبخیز در طبقه ی توان خیلی کم، ۹/۹۳٪ در طبقه ی توان کم، ۵/۲۵٪ در طبقه ی توان متوسط، ۲/۱۸٪ در طبقه ی توان زیاد و ۴٪ در طبقه ی توان خیلی زیاد بود. مناطقی که در طبقه ی توان خیلی زیاد بودند بیشتر در بخش های شمالی و شمال غربی آبخیز بودند (جدول ۱). با در نظر گرفتن سهم طبقه های توان سیل گیری زیاد و خیلی زیاد، نتایج این مدل نشان داد که مساحتی بیش از ۲۷۸۰۰ هکتار از آبخیز نیازمند توجه ویژه و برنامه ریزی جدی برای مدیریت سیل است.

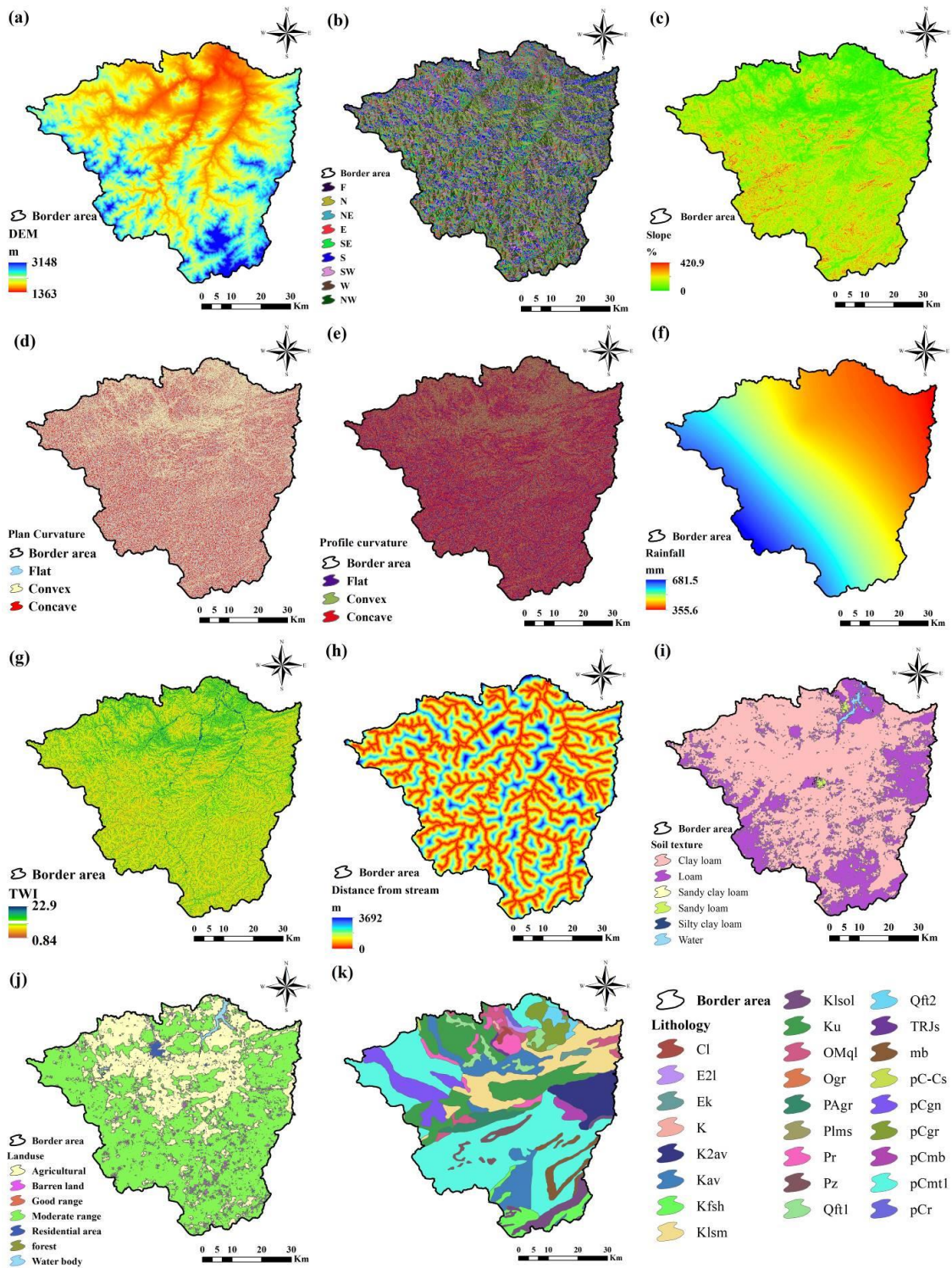
تنوع واحدهای سنگ شناسی از نظر ویژگی ها و زمان تشکیل باعث شده است که فرایندهای آب شناختی و آب زمین شناختی گسترده و عمیقی در این آبخیز رخ دهد. در این آبخیز بر اساس تحلیل ها و بررسی های زمین شناسی، ۲۶ واحد سنگ شناسی مجزا شناسایی شد.

سنگ های متامورفیک (رخساره های آمفیبولیت) (pCmt1) با مساحت بیش از ۳۴/۹۸٪ به عنوان گسترده ترین واحد سنگ شناسی منطقه ی مطالعه شده شناخته شدند. سنگ های کرتاسه فوقانی تمایز نیافته (Ku) و دولومیت و آهک شنی همراه با شیل و مارن (Klsm) به ترتیب ۱۲/۵۷٪ و ۹/۹۸٪ از مساحت منطقه را شامل شده اند. از سازندهای مهم آبخیز می توان به کرج، شمشک، لالون و سلطانیه اشاره کرد. از نظر کاربری زمین، مراتع بیشترین مساحت را داشتند و زمین های کشاورزی در رتبه ی دوم بودند. زمین های کشاورزی بیشتر در مرکز و شمال آبخیز بودند (شکل ۲). بر اساس نتایج این پژوهش اندازه ی توان سیل خیزی بر اساس مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه سازی فراکاوشی رقابت امپراتوری (ANFIS-ICA) از صفر تا یک متغیر بود (شکل ۳). بر اساس نتایج خروجی مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه سازی فراکاوشی رقابت امپراتوری، مناطقی که توان سیل خیزی زیاد داشتند در بخش های میانی و شمالی آبخیز (خروجی آبخیز) و بیشتر منطبق بر آبراهه ها بودند. اندازه ی توان سیل خیزی بر اساس مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه سازی فراکاوشی ازدحام ذرات (ANFIS-PSO) از صفر تا یک متغیر بود. (شکل ۳).

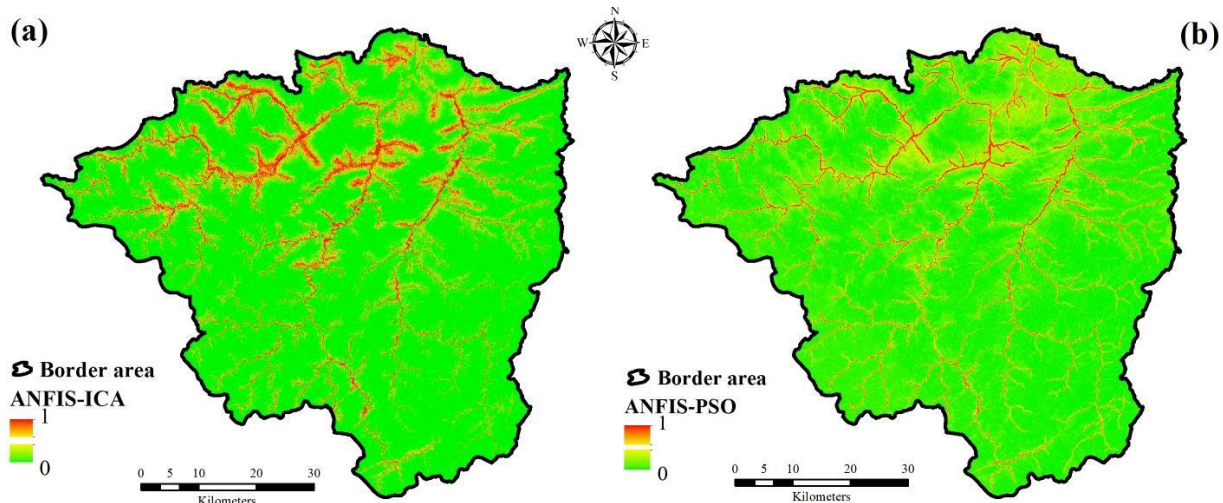
جدول ۱- مساحت طبقه های توان سیل گیری بر اساس نتایج مدل ها.

Table 1- The area of flood potential classes based on the results of the models.

Model	Flood potential class	Area (ha)	Area (%)
ANFIS-ICA	Very low	352527.12	78.59
	Low	44577.36	9.93
	Moderate	23570	5.25
	High	9820.8	2.18
	Very high	18025.56	4
ANFIS-PSO	Very low	314936.82	70.21
	Low	728291.2	16.24
	Moderate	35423.2	7.9
	High	11694.6	2.6
	Very high	13639.2	3



شکل ۲- نقشه‌ی عامل‌های استفاده‌شده در پژوهش.
Figure 2- Map of the factors used in the research.



شکل ۳- نقشه‌ی توان سیل‌خیزی بر اساس مدل‌های استفاده‌شده در پژوهش.
Figure 3- Flood potential map based on the models used in the research.

از معیار مهارت صحیح (TSS) نیز بهره‌گرفته شد. رتبه‌بندی مساحت زیرمنحنی راک به‌وسیله‌ی این معیار تأیید شد. مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه‌سازی فراکوشی ازدحام ذرات (ANFIS-PSO) با دقت ۸۹٪ بیشترین کارایی را در پیش‌بینی داشت. همچنین آماره‌ی مهارت صحیح نشان داد که مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه‌سازی فراکوشی رقابت امپراتوری (ANFIS-ICA) با دقت ۸۴٪ در رتبه‌ی دوم کارایی بود.

نتایج ارزیابی پیش‌بینی کارایی مدل‌ها بر اساس داده‌های گروه اعتبارسنجی در جدول ۲ نشان‌داده شده است. آماره‌ی مساحت زیرمنحنی راک که اصلی‌ترین معیار ارزیابی دقت مدل است، نشان داد که مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه‌سازی فراکوشی ازدحام ذرات (ANFIS-PSO) با دقت ۹۸٪ بیشترین کارایی را در پیش‌بینی توان سیل‌گیری داشت. همچنین، مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه‌سازی فراکوشی رقابت امپراتوری (ANFIS-ICA) با دقت ۹۴٪ در رتبه دوم بود. برای اطمینان از ارزیابی کارایی مدل‌ها،

جدول ۲- دقت پیش‌بینی مدل‌ها بر اساس معیارهای ارزیابی عملکرد در مرحله‌ی اعتبارسنجی.

Table 2- Prediction accuracy of models based on performance evaluation criteria in the validation.

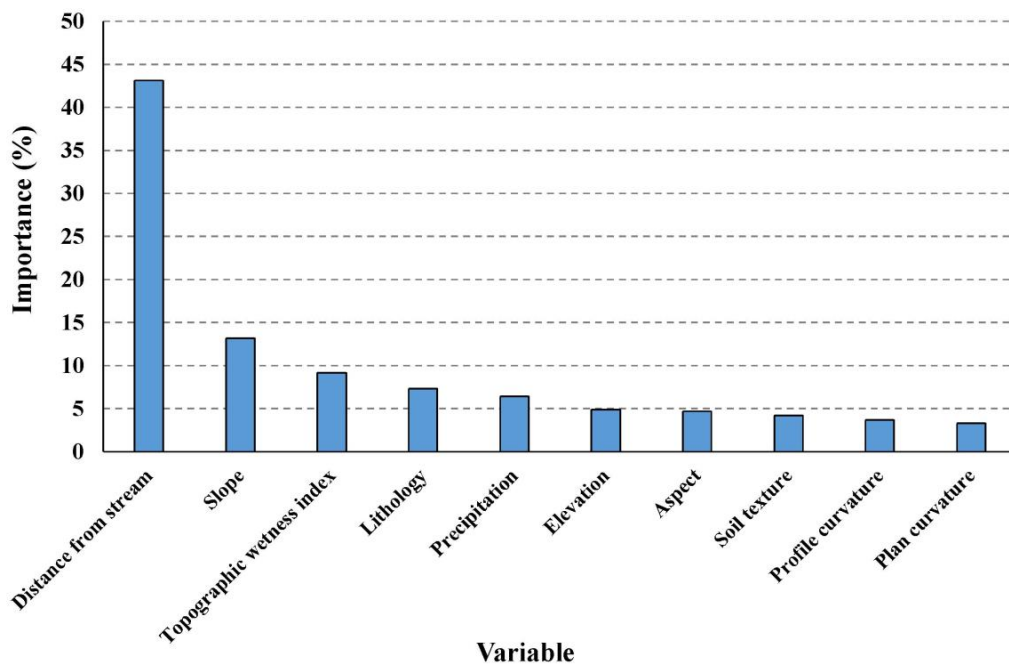
Model	AUC	TSS
ANFIS-ICA	0.94	0.84
ANFIS-PSO	0.98	0.89

انحنای سطح نیم‌رخ و انحنای سطح عمودی با ۳/۷٪ و ۳/۳٪ در انتهای فهرست اهمیت عامل‌های محیطی بودند. در نهایت، می‌توان گفت که رخداد پدیده‌ی سیل پیچیده بود و مدل‌سازی توان سیل‌گیری نیازمند در نظر گرفتن عامل‌های محیطی پرشماری است و در نظر گرفتن تمام عامل‌های محیطی، حتی با کمترین اهمیت، ضروری است.

بحث و نتیجه‌گیری

امروزه یکی از مهم‌ترین ارکان مدیریت بحران سیل، تعیین مناطق سیل‌گیر قبل از رخداد سیل است. درگذشته این موضوع با استفاده از نظرهای کارشناسی و بازدیدهای میدانی انجام می‌شد و پس از آن با پدید آمدن سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، توان سیل‌گیری با استفاده از روی هم گذاری لایه‌های عامل‌های محیطی در این سامانه‌ها بررسی شد. اگرچه از روش‌های تحلیل چندمعیاره برای تعیین وزن عامل‌های

بر اساس نتایج این پژوهش، مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه‌سازی فراکوشی ازدحام ذرات (ANFIS-PSO) بیشترین دقت پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری را داشت. سپس اندازه‌ی اهمیت عامل‌های محیطی در رخداد این پدیده بررسی شد. اندازه‌ی اهمیت عامل‌های محیطی بر اساس نتایج مدل ANFIS-PSO در شکل ۴ نشان داده شده است. این مدل، عامل فاصله از جریان را با سهم مشارکت ۴۳/۱٪ در مدل‌سازی توان سیل‌گیری، به‌عنوان مهم‌ترین عامل محیطی شناسایی کرد. افزون بر این، شیب زمین با ۱۳/۲٪ و شاخص رطوبت پستی‌بلندی با ۹/۲٪ به‌ترتیب در جایگاه‌های دوم و سوم اهمیت بودند. اندازه‌ی اهمیت عامل سنگ‌شناسی و عامل بارندگی به‌ترتیب ۷/۳٪ و ۶/۴٪ تعیین شد. اهمیت عامل‌های بلندی، جهت جغرافیایی و بافت خاک به‌ترتیب ۴/۹، ۴/۷ و ۴/۲٪ به‌دست آمد. همچنین،



شکل ۴- اندازه‌ی اهمیت عامل‌های محیطی بر اساس نتایج مدل ANFIS-PSO.

Figure 4- The importance of environmental factors based on the results of the ANFIS-PSO model.

مدل‌های ترکیبی عملکرد بهتری در مقایسه با مدل انفرادی داشت. در این پژوهش نتایج نشان داد که فاصله از جریان و شیب زمین مهم‌ترین عامل‌های مؤثر در سیل‌گرفتگی بودند. در این راستا، به‌تازگی نتایج میرزایی و همکاران (۲۰۲۱) اثبات کرد که فاصله از جریان مهم‌ترین عامل محیطی در رخداد سیل‌گیری است و تأییدکننده‌ی یافته‌های این پژوهش است. نتایج پژوهش چوبین و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان داد که شیب زمین اصلی‌ترین عامل در رخداد سیل‌گرفتگی است و با یافته‌های این پژوهش همخوانی دارد. همچنین در پژوهش ایشان فاصله از جریان نیز یکی از سه عامل مهم در رخداد سیل‌گیری بود. افزون بر این، نتایج ساها و همکاران (۲۰۲۱) در مدل‌سازی توان سیل‌گیری تأییدکننده‌ی این یافته است که فاصله از جریان مهم‌ترین عامل محیطی مؤثر در رخداد سیل‌گیری است. بر اساس نتایج و تحلیل‌های انجام‌شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل‌های یادگیری ماشینی قابلیت زیادی در پیش‌بینی توان سیل‌گیری دارند. مدل ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دستورالعمل بهینه‌سازی فراکاووشی ازدحام ذرات (ANFIS-PSO) در پیش‌بینی توان سیل‌گیری بیشترین دقت را داشت. در این پژوهش نقشه‌های توان سیل تهیه شده می‌تواند برای مدیران و کارشناسان بسیار کاربردی بوده و در برنامه‌ریزی اقدام‌های مهارکردن سیل استفاده‌ی عملی داشته باشد. توجه کردن به امکانات و اقدام‌های مهارکردن سیل در موقعیت‌هایی که توان سیل‌گیری زیادی دارند، موجب افزایش مدیریت سیل از نظر اقتصادی و فنی می‌شود.

محیطی در شناسایی مناطق مستعد سیل بهره‌گرفته شده است، اما این روش در بیشتر مواقع قطعیت ندارد و با تغییر کارشناس، نتایج به دست‌آمده از این روش کاملاً تغییر می‌یابد. این یافته در پژوهش دهری و آبیدا (۲۰۱۷) آشکار و قابل مشاهده بود. استفاده از روش‌های گوناگون مانند مونت‌کارلو برای غلبه بر نبودن قطعیت و ثبات نداشتن نتایج روش‌های چندمعیاره پیشنهاد شده است. با ورود مدل‌های هوش مصنوعی در مدل‌سازی مخاطره‌های طبیعی مانند سیل تحول بزرگی رخ داد. بر پایه‌ی گزارش چپی و همکاران (۲۰۱۷) و فام و همکاران (۲۰۲۱)، مدل‌های هوش مصنوعی نیازی به دخالت کاربر برای تعیین اندازه‌ی اهمیت عامل‌های محیطی در رخداد سیل ندارند و مدل‌سازی بر اساس اطلاعات رخداد سیل گذشته انجام می‌شود. افزون بر این، بویی و همکاران (۲۰۱۶) تأیید کردند که سرعت پردازش اطلاعات مکانی شامل داده‌های رخداد سیل و لایه‌های رقمی عامل‌های محیطی گوناگون، امری دشوار است و مدل‌های هوش مصنوعی در این زمینه فرصت مناسبی برای پشتیبانی از مدل‌سازی و مدیریت سیل فراهم آورده‌اند. بر اساس یافته‌های کمی این پژوهش، رویکرد ترکیبی که به ترکیب مدل‌های یادگیری ماشینی و دستورالعمل‌های بهینه‌سازی فراکاووشی است، موجب افزایش قدرت یادگیری و همچنین توان پیش‌بینی مدل شد. در این راستا، احمدلو و همکاران (۲۰۱۹) به‌منظور پیش‌بینی توان سیل‌گیری از مدل‌های ترکیبی استنتاج عصبی و فازی تطبیقی و دو دستورالعمل بهینه‌سازی جغرافیای زیستی و خفاش استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که

فهرست منابع

- Ahmadlou M, Karimi M, Alizadeh S, Shirzadi A, Parvinnejhad D, Shahabi H, Panahi M. 2019. Flood susceptibility assessment using integration of adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) and biogeography-based optimization (BBO) and BAT algorithms (BA). *Geocarto International*. 34 (11):1252-1272.
- Atashpaz-Gargari E, Lucas C. 2007. Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*. pp. 4661-4667.
- Bubeck P, Botzen W, Aerts J. 2012. A review of risk perceptions and other factors that influence flood mitigation behavior. *Risk Analysis*. 32(9):1481-1495.
- Bui DT, Pradhan B, Nampak H, Bui QT, Tran QA, Nguyen QP. 2016. Hybrid artificial intelligence approach based on neural fuzzy inference model and metaheuristic optimization for flood susceptibility modeling in a high-frequency tropical cyclone area using GIS. *Journal of Hydrology*. 540:317-330. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.027>.
- Bui QT, Nguyen QH, Nguyen XL, Pham VD, Nguyen HD, Pham VM. 2020. Verification of novel integrations of swarm intelligence algorithms into deep learning neural network for flood susceptibility mapping. *Journal of Hydrology*. 581, 124379. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124379>.
- Bui TD, Panahi M, Shahabi H, Singh VP, Shirzadi A, Chapi K, Khosravi K, Chen W, Panahi S, Li S, Ahmad B. 2018. Novel Hybrid Evolutionary Algorithms for Spatial Prediction of Floods. *Scientific Reports*. 8:15364. DOI:10.1038/s41598-018-33755-7.
- Chapi K, Singh VP, Shirzadi A, Shahabi H, Bui DT, Pham BT, Khosravi K, 2017. A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Environmental modelling and software*. 95:229-245. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.012>.
- Chen W, Li Y, Xue W, Shahabi H, Li S, Hong H, Ahmad BB. 2020. Modeling flood susceptibility using data-driven approaches of naïve bayes tree, alternating decision tree, and random forest methods. *Science of the Total Environment*. 701: 134979. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134979>.
- 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(2): 2087-2096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.064>.
- Dahri N, Abida H. 2017. Monte Carlo simulation-aided analytical hierarchy process (AHP) for flood susceptibility mapping in Gabes Basin (southeastern Tunisia). *Environmental Earth Sciences*. 76(7):1-14.
- Darabi H, Choubin B, Rahmati O, Haghghi A, Pradhan B, Klove B. 2019. Urban flood risk mapping using the GARP and QUEST models: A comparative study of machine learning techniques. *Journal of Hydrology*. 569:142-154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.002>.
- Dickie JA, Parsons AJ. 2012. Eco-geomor-

- phological processes within grasslands, shrublands and badlands in the semi-arid Karoo, South Africa. *Land Degradation Development*. 23(6):534-547.
- Feliciísimo Á, Cuartero A, Remondo J, Quirós E. 2013. Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: A comparative study. *Landslides*. 10:175-189. <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0320-1>.
- Gupta A. 2020. *An Introduction to Large Rivers*. John Wiley and Sons. Hampf A.C, Stella T, Berg-Mohnicke M, Kawohl T, Kilian M, Nendel C. 2020. Future yields of double-cropping systems in the Southern Amazon, Brazil, under climate change and technological development. *Agricultural Systems*. 177: 102707. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102707>.
- Haghizadeh A, Yousefi H, Yarahmadi Y, Ebrahimian T. 2019. Comparison of Hybrid Model (ANFIS-PSO) and Tork Experimental Model in Reference Estimation of Evapotranspiration (Case study: Poldokhtar-Lorestan). *Iranian Journal of ECO Hydrology*. 6(3):685-694. (In Persian).
- Hong H, Pradhan B, Jebur MN, Bui DT, Xu C, Akgun A. 2016. Spatial prediction of landslide hazard at the Luxi area (China) using support vector machines. *Environmental Earth Science*. 75: 40. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4866-9>.
- Hong H, Tsangaratos P, Ilia I, Liu J, Zhu AX, Chen W. 2018. Application of fuzzy weight of evidence and data mining techniques in construction of flood susceptibility map of Poyang County, China. *Science of the total environment*. 625:575-588. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.256>.
- Islam ARMT, Talukdar S, Mahato S, Kundu S, Eibek KU, Pham QB, Linh NTT. 2021. Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. *Geoscience Frontiers*. 12(3):101075.
- Khosravi K, Melesse AM, Shahabi H, Shirzadi A, Chapi K, Hong H. 2019. Flood susceptibility mapping at Ningdu catchment, China using bivariate and data mining techniques. In *Extreme Hydrology and Climate Variability*. pp. 419-434. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00033-6>.
- Lee S, Kim JC, Jung HS, Lee MJ, Lee S. 2017. Spatial prediction of flood susceptibility using random-forest and boosted-tree models in Seoul metropolitan city, Korea. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. pp. 1-19.
- Meles MB, Younger SE, Jackson CR, Du E, Drover D. 2020. Wetness index based on landscape position and topography (WILT): Modifying TWI to reflect landscape position. *Journal Environmental Management*. 255: 109863. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109863>.
- Miller JR, Ritter DF, Kochel RC. 1990. Morphometric assessment of lithologic controls on drainage basin evolution in the Crawford Upland, south-central Indiana. *American Journal of Science*. 290:569-599.
- Mirzaei S, Vafakhah M, Pradhan B, Alavi SJ. 2021. Flood susceptibility assessment using extreme gradient boosting (EGB), Iran. *Earth Science Informatics*. 14(1):51-67.
- Moghaddam DD, Pourghasemi HR, Rahmati O. 2019. Assessment of the contribution of Geo-environmental Factors to Flood Inundation in a Semi-arid Region of SW

- Iran: Comparison of Different Advanced Modeling Approaches. In *Natural Hazards GIS-Based Spatial Modeling Using Data Mining Techniques*. pp. 59-78.
- Opperman JJ, Galloway GE, Fargione J, Mount JF, Richter BD, Secchi S. 2009. Sustainable floodplains through large-scale reconnection to rivers, *Science*. 326(5959):1487–1488.
- Pham BT, Lu C, Van Phong T, Nguyen HD, Van Le H, Tran TQ, Ta HT, Prakash I. 2021. Flood risk assessment using hybrid artificial intelligence models integrated with multi-criteria decision analysis in Quang Nam Province, Vietnam. *Journal of Hydrology*. 592: 125815. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125815>.
- Phillips SJ, Anderson, RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*. 190(3-4):231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>.
- Pourghasemi HR, Termeh SVR, Kariminejad N, Hong H, Chen W. 2020. An assessment of metaheuristic approaches for flood assessment. *Journal of Hydrology*. 582: 124536. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124536>.
- Rahmati O, Panahi M, Ghiasi SS, Deo RC, Tiefenbacher JP, Pradhan B, Bui DT. 2020. Hybridized neural fuzzy ensembles for dust source modeling and prediction. *Atmospheric Environment*. 224:117320. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117320>.
- Rahmati O, Pourghasemi HR, Zeinivand H. 2016. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golestan Province, Iran. *Geocarto International*. 31(1):42–70.
- 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 Resource Management*. 31:1473–1487. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1589-6>.
- Saha A, Pal SC, Arabameri A, Blaschke T, Panahi S, Chowdhuri I, Chakraborty R, Coştache R, Arora A. 2021. Flood susceptibility assessment using novel ensemble of hyperpipes and support vector regression algorithms. *Water*. 13(2):241.
- Sampson CC, Smith AM, Bates PD, Neal JC, Alfieri L, Freer JE. 2015. A high-resolution global flood hazard model. *Water Resources*. 51(9):7358-7381. <https://doi.org/10.1002/2015WR016954>.
- Sarkar D, Mondal P. 2020. Flood vulnerability mapping using frequency ratio (FR) model: a case study on Kulik river basin, Indo-Bangladesh Barind region. *Applied Water Science*. 10(1):17. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1102-x>.
- Sharifi Garmdareh E, Vafakhah M, Eslamian SS. 2018. Regional flood frequency analysis using support vector regression in arid and semi-arid regions of Iran. *Hydrological Sciences Journal*. 63(3):426-440.
- 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.
- Sidel RC, Ochiai H. 2006. *Landslides: Processes, Prediction, and Land use*. Water Resource Monograph: 18, AGU books, Print ISBN: 9780875903224 |Online ISBN: 9781118665954 |DOI:10.1029/WM018. 312 p.
- Stevaux JC, de Azevedo Macedo H, Ass-

- ine ML, Silva A. 2020. Changing fluvial styles and backwater flooding along the Upper Paraguay River plains in the Brazilian Pantanal wetland. *Geomorphology*. 350:106906. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106906>.
- Tang X, Li J, Liu M, Liu W, Hong H. 2020. Flood susceptibility assessment based on a novel random Naïve Bayes method: A comparison between different factor discretization methods. *Catena*. 190:104536. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104536>.
- 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*. 615:438-451. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.262>.
- Torcivia CEG, López NNR. 2020. Preliminary Morphometric Analysis: Río Talacasto Basin, Central Precordillera of San Juan, Argentina. *Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina*. Cham. pp. 158–168.



Flood Potential Modeling in Zarineh Rood Watershed Using Artificial Intelligence Models

Mehdi Aalami¹, Mojtaba Ardestani^{*2}, Bahram Malekmohammadi³

1- Ph.D. Student in Environmental Engineering, Water Resources, Kish International Campus,
University of Tehran

2- Professor, Faculty of Environment, University of Tehran

3- Associate Professor, Faculty of Environment, University of Tehran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Among natural disasters, flood is undoubtedly the most catastrophic hazard in the world. One of the basic strategies for reducing the damage caused by floods is to prepare a flood sensitivity map. Spatial prediction of the flooding probability using models created from spatial and historical data, which ultimately leads to the preparation of flood sensitivity maps is an appropriate solution for land management planners in different areas to prevent the occurrence of this phenomenon. In this research, in order to determine flood-prone areas, the hybrid model of adaptive neural and fuzzy inference and the metaexploratory optimization algorithm of imperial competition (ANFIS-ICA) and the hybrid model of adaptive neural and fuzzy inference and the metaexploratory optimization algorithm of particle swarm (ANFIS-PSO) are used.

Materials and Methods

The Zarine River watershed has an area of 4485 km² and is located in the northwest of Kurdistan province between the longitude of 45°48'30" and 46°48'20" east and the latitude of 35°42'20" and 36°23'15" north. The climate of the region is humid and the average annual rainfall is 480 mm. Locations of flood events were randomly divided into two groups: training (70%) and

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: ardestani@ut.ac.ir

Citation: Aalami, M., Ardestani, M., Malekmohammadi, B. 2024 Flood potential modeling in Zarineh Rood watershed using artificial intelligence models. *Watershed Management Research*. 37(1): 2-17.

DOI: 10.22092/WMRJ.2023.360973.1513

Received: 27 December 2022, **Received in revised form:** 06 May 2023, **Accepted:** 21 June 2023,

Published online: 20 March 2024

Watershed Management Research, VOL. 37, No.1, Ser. No: 142, Spring 2024, pp. 2-17.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center

©Author(s)



validation (30%). Various environmental factors (height, direction, slope, surface curvature, land use, lithology, rainfall, flow power index, distance from river and topographic wetness index) were selected as independent variables in the modeling and their digital layers were prepared. The ANFIS-ICA and ANFIS-PSO models were used in this research and their prediction results were evaluated based on the criterion (AUC) and the true skill statistic (TSS).

Results and Discussion

On the basis of these findings, in the validation stage, the model (ANFIS-PSO) with an AUC of 0.98 and a true skill statistic (TSS) of 0.89 had the highest accuracy. The results also showed that the factor of distance from the stream was identified as the most important environmental factor. In addition, ground slope and TWI were ranked second and third in importance, respectively.

Conclusion and Suggestions

Based on the results, the hybridization approach, which combines machine learning models and meta-exploratory optimization algorithms, improves the learning power as well as the predictive power of the model. The results of this research showed that the distance from the stream and the slope of the land are the most important factors affecting flooding. Based on the results and analysis, it can be concluded that machine learning models have a high capability for predicting flood potential. The flood potential maps prepared in this research can be very useful for managers and experts and can be used in planning flood prevention measures. Directing flood control facilities and measures in situations with a high flood potential will improve flood management from an economic and technical point of view.

Keywords: Flood, land management, modeling, natural hazards, risk