

کارایی مدل ترکیبی نسبت فراوانی - ماشین بردار پشتیبان در شناسایی مناطق مستعد سیل آبخیز کلات

حمزه مجددی ریزه‌ئی^۱، محمود حبیب‌نژاد روشن^۲، کاکا شاهدی^{۳*}، بیسواجیت پرادهان^۴

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲. استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۳. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۴. استاد، مرکز مدل‌سازی پیشرفته و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده مهندسی و فناوری اطلاعات، دانشگاه

تکنولوژی سیدنی، NSW، استرالیا

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۵/۱۶؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۱۱/۲۰)

چکیده

جاری شدن سیل آثاری منفی بر محیط زیست، اقتصاد، جوامع انسانی و صنعت دارد. امروزه، کاربرد مدل‌های پیشرفته سیلاب برای شناسایی مناطق حساس و بهبود سیستم مدیریت سیل رشد چشمگیری داشته است. در این میان، تعدادی از محققان با ترکیب برخی مدل‌ها به نتایج قابل قبولی برای شناسایی مناطق مستعد سیل دست یافتند. از آنجا که آبخیز کلات از منظر سیلاب به خصوص سیلاب‌های اخیر سال ۱۳۹۸ جزء مناطق پرخطر استان خراسان رضوی محسوب می‌شود و تا کنون نیز در آن از تکنیک‌های پیشرفته برای برآورد احتمال وقوع سیل استفاده نشده است، بنابراین مدل ترکیبی نسبت فراوانی - ماشین بردار پشتیبان FR-SVM برای مدل‌سازی سیلاب انتخاب شده و با مدل مستقل SVM مقایسه شد. پس از بررسی‌های صورت گرفته ۷۳ نقطه سیل‌گیر ثبت شده و ۱۵ عامل مؤثر بر وقوع سیل شامل بارش سالانه، زمین‌شناسی، کاربری اراضی/پوشش زمین، طول شیب، فاصله از رودخانه، تحلیل سایه پستی و بلندی‌ها، ارتفاع، شاخص همگرایی، تحدب و تعقر طولی و عرضی، شیب، شاخص قدرت جریان، شاخص زبری توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی و عمق دره، در نظر گرفته شد. ارزیابی مدل‌ها توسط معیارهای مختلف سنجش دقت از جمله ضریب کاپا، ریشه میانگین مربعات خطا، منحنی مشخصه عملکرد سیستم و منحنی میزان پیش‌بینی، صورت گرفت. مدل FR-SVM با منحنی میزان پیش‌بینی ۰/۸۸۶۲، دقت زیاد و کارایی بهتری را نسبت به SVM نشان داد. این نتایج می‌تواند برای مدیریت مناطق آسیب‌پذیر سیل و سایر کاربردهای منابع طبیعی استفاده شود.

کلیدواژگان: آبخیز کلات، احتمال وقوع سیل، ماشین بردار پشتیبان، مدل ترکیبی سیلاب، نسبت فراوانی.

مقدمه

خطرهای طبیعی مانند سیل، زمین لغزش، زلزله، و غیره هر ساله سبب تلفات جانی و مالی در زندگی و دارایی انسان‌ها می‌شود. در این میان، سیل به عنوان یک خطر جدی طبیعی با خسارت‌های زیاد محسوب می‌شود. سیل زمانی اتفاق می‌افتد که جریان آب از حالت عادی خود در بستر رودخانه سرریز شود و دیواره‌های رودخانه و زمین‌های اطراف آن را تحت تأثیر قرار دهد و موجب بروز تأثیرات منفی اجتماعی و اقتصادی درخور توجهی در زندگی انسان‌ها شود. از این‌رو، مدل‌سازی این فاجعه طبیعی پرخطر، بسیار حیاتی است. بی‌توجهی به مناطق حساس و مستعد سیلاب یک حوزه، می‌تواند وقوع و شدت سیل را افزایش دهد [۱].

سیلاب به طور کلی تحت تأثیر چندین پارامتر مورفولوژیکی و هواشناسی مانند کاربری اراضی/پوشش زمین (LULC)، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی، ارتفاع، تراکم زهکشی، شیب و... قرار دارد [۲]. بنابراین، تعیین سهم هر یک از پارامترها بر میزان بروز سیل مهم است. در حال حاضر، با ارتقای پیشرفت سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، روش‌های سنجش از دور (RS) و یادگیری ماشین (ML)، می‌توان مدل‌سازی بسیار دقیقی از احتمال وقوع سیلاب انجام داد. با این‌وجود، ساخت این مدل‌ها نیازمند دانش دقیق و اصولی از فرایند وقوع سیل، بررسی پارامترهای مؤثر در شکل‌گیری سیل، درک چگونگی تأثیر هر پارامتر بر ایجاد سیل و انتخاب و توسعه مدل مناسب و ارزیابی آن است [۳].

مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی سنتی نیز برای طراحی مدل‌های سیلاب استفاده می‌شوند. اگرچه دقت زیاد این روش‌ها نیز بر متخصصان پوشیده نیست، اما این مدل‌ها به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ، زمان‌بر و پرهزینه می‌تواند باشد. از این‌رو، دانشمندان از راهکارهای جدیدی مانند GIS، تکنیک‌های آماری، مدل‌های ML و داده‌های RS برای ارزیابی احتمال وقوع سیل استفاده کرده‌اند. به‌تازگی، روش‌های ML به علت توانایی آنها در شناخت الگوها از مجموعه داده‌های موجودی و شناسایی رابطه غیر خطی در میان پارامترهای نسبی توسط بسیاری از محققان در مطالعات سیل استفاده شده است [۴].

ارزیابی احتمال وقوع سیلاب برای مطالعات متعددی

در سراسر جهان، از مقیاس حوزه تا مقیاس ملی، با استفاده از تکنیک‌ها و الگوریتم‌های مختلف ML، از جمله (BRT)، ماشین بردار پشتیبانی (SVM)، شبکه‌های عصبی (NNS)، رگرسیون لجستیک (LR)، جنگل تصادفی (RF)، مدل خطی تعمیم و نسبت فرکانس (FR) به کار گرفته شده است [۵-۸].

قربانی و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی، فرایند بارش-رواناب ماهانه آبخیز سیمینه‌رود واقع در استان آذربایجان غربی را طی دوره آماری ۱۳۷۷-۱۳۹۰ با استفاده از مدل‌های ماشین بردار پشتیبانی (SVM)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، شبکه بیزی (BN) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) بررسی کردند و نتایج آنها را مورد مقایسه قرار دادند. از پارامترهای ضریب همبستگی (CC)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) برای ارزیابی صحت مدل‌ها استفاده شد. نتایج اختلاف‌های جزئی بین این مدل‌ها گویای عملکرد قابل قبول هر چهار مدل مقایسه‌شده بود. بنابراین، می‌توان این مدل‌ها را در بخش‌های مختلف هیدرولوژی به کار بردند و با توجه به ماهیت مسئله، تطابق‌ها و یا اختلاف‌ها را مشاهده کرده و دلیل آن را بررسی کردند [۹].

تهرانی و همکاران (۲۰۱۴) طی تحقیقی، نقشه حساسیت سیل را با استفاده از ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین روش شواهدی وزنی (WoE) و روش ماشین بردار پشتیبانی (SVM) در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه کردند. آنها از پارامترهای مختلفی همچون شیب، شاخص قدرت جریان (SPI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، ارتفاع، تحدب و تعفر دامنه‌ها، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی، بارش، پوشش و کاربری زمین (LULC) و نوع خاک استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها کارایی مناسب مدل SVM را در تهیه نقشه حساسیت سیل نشان داد. سپس، چهار نوع مختلف هسته در مدل ماشین بردار پشتیبانی، هسته خطی (LN)، هسته چندجمله‌ای (PL)، تابع شعاعی پایه (RBF) و هسته سیگنویید (SIG) را بررسی کردند. در تابع RBF-SVM- WoE سطح زیرمنحنی (AUC) برای میزان موفقیت و پیش‌بینی به ترتیب ۹۶/۴۸ درصد و ۹۵/۶۷ درصد است که کارایی مدل ترکیبی SVM و WoE را تأیید می‌کند [۱۰].

مواد و روش‌ها

حوضه آبخیز کلات یک منطقه کوهستانی و مستعد سیلاب است که در شمال شرق کشور ایران، در شهرستان کلات استان خراسان رضوی و در ۱۵۰ کیلومتری شهر مشهد واقع است. موقعیت آن از طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۵۴ دقیقه و ۲۰ ثانیه تا ۵۹ درجه و ۳۳ دقیقه و ۸ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۱ دقیقه و ۲۸ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۳ دقیقه و ۲۴ ثانیه شمالی امتداد دارد. رودخانه کلات یکی از رودخانه‌های مهم آبخیز قره‌قوم است که از دامنه‌های مرتفع شمالی هزارمسجد سرچشمه گرفته و انشعابات خط الرأس‌های قره‌سو، ژرف و کلات طی مسیر رودخانه آن را تغذیه می‌کند. این رودخانه پس از عبور از روستاهای ژرف، قره‌سو، حمام‌قلعه، جلیل‌آباد و شهر کلات، در خروجی از روستاهای نفته و خلیج سفلی عبور می‌کند و در نهایت، از مرز ایران خارج و به کشور ترکمنستان سرازیر می‌شود.

محدوده این آبخیز ۳۰۰ کیلومترمربع وسعت دارد. ارتفاع بلندترین نقطه آن از سطح دریا ۲۶۹۸ متر و کمترین آن ۶۲۱ متر است. متوسط بارش سالانه ۲۱۳/۸ میلی‌متر، متوسط دمای سالانه ۱۵/۳ درجه سانتی‌گراد و حجم رواناب سالانه ۷۲/۵ میلیون مترمکعب است [۱۲]. جمعیت آن ۴۵۱۶۷ نفر است که بیش از ۳۷ هزار نفر آنها در شهر کلات و باقی در روستاهای اطراف منطقه سکونت دارند (مرکز آمار ایران، نتایج تفصیلی سرشماری سال ۱۳۹۵) (شکل ۱).

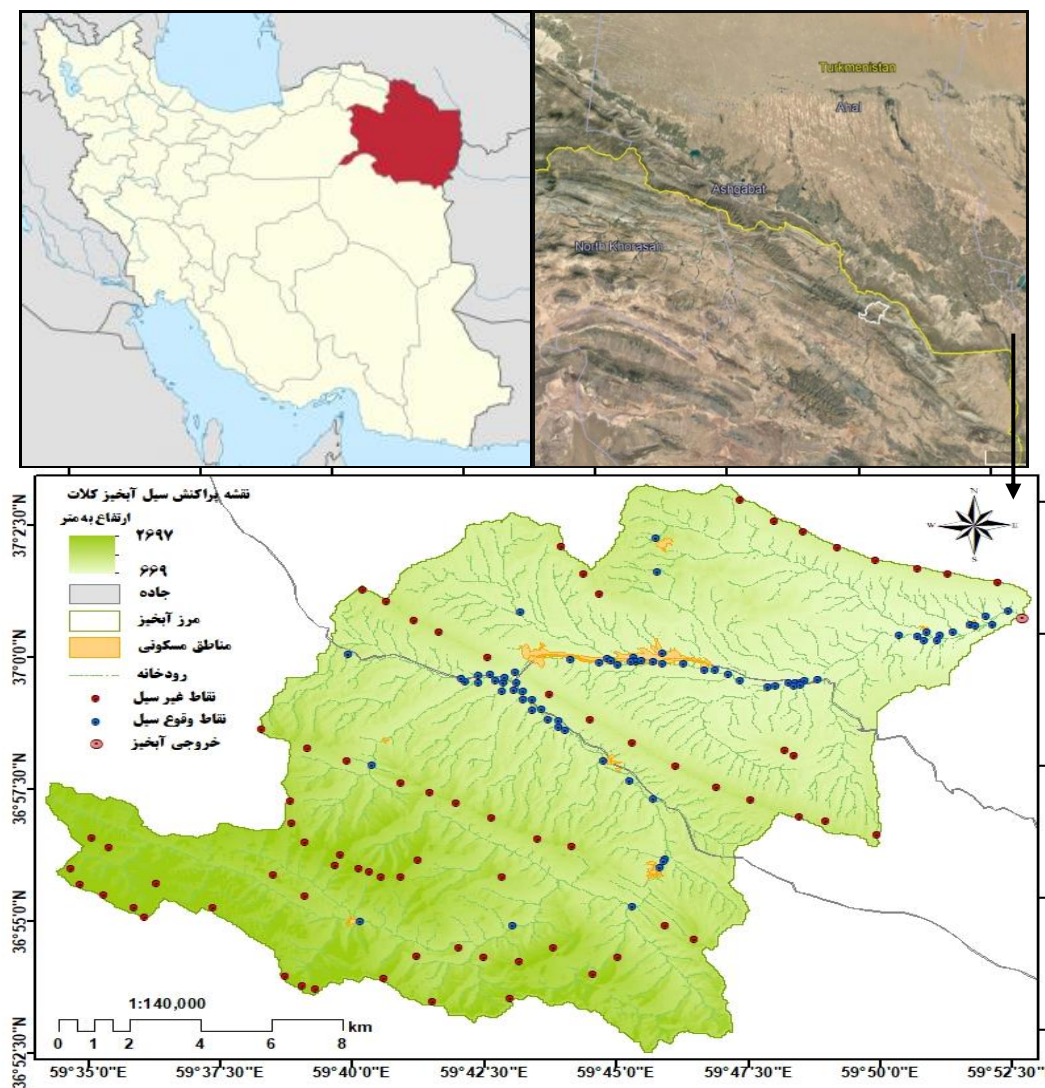
این حوزه در منطقه نیمه‌معتدل کوهستانی با زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم و دارای آب‌وهوایی معتدل در کوهپایه‌هاست. از لحاظ زمین‌شناسی در سازندهای ضخیم لایه آهکی که از واحدهای چینه‌شناسی مهم کپه‌داغ است، قرار دارد و رودخانه کلات بر اثر فرسایش رودخانه‌ای و پدیده‌ی تحمیل، کانیون کلات نادری را به وجود آورده است. همچنین، برخی قسمت‌ها از مارن و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. از لحاظ خاک‌شناسی در بالادست آبخیز که بیشتر ارتفاعات کوهستانی و پرشیب هستند، خاک‌های انتی سول شکل می‌گیرند و از میانه به سمت خروجی خاک‌های انسپتی سول دیده می‌شوند [۱۳].

تهرانی و همکاران (۲۰۱۵) طی تحقیقی در آبخیز رودخانه کلانتان در شمال شرق مالزی به مقایسه مدل درخت تصمیم‌گیری (DT) و مدل ترکیبی (FR-SVM) به منظور تجزیه و تحلیل حساسیت سیل پرداختند. به این منظور، ۱۱۵ منطقه سیل‌گیر و ۱۰ عامل مؤثر در وقوع سیل ارزیابی شد. نتایج میزان موفقیت و پیش‌بینی مدل ترکیبی را به ترتیب ۸۸/۷ و ۸۵/۲ درصد نشان داد که ۱/۷۱ و ۳/۲۱ درصد کاراتر از مدل درخت تصمیم‌گیری بود [۲].

مجددی و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی با استفاده از روش ترکیبی FR-SVM، ریسک سیل را در آبخیز دامانسرای مالزی ارزیابی کردند. ایشان طی شناسایی ۱۱۰ منطقه سیل‌گیر، ۱۳ پارامتر مؤثر بر وقوع سیل را بررسی کردند. نتایج ارزیابی سطح زیرمنحنی، کارایی این روش را به ترتیب با میزان موفقیت و پیش‌بینی ۸۹/۷ درصد و ۷۸/۹ درصد نشان داد [۵].

در بیشتر موارد، مدل‌های آماری و ML خوب عمل می‌کنند؛ با این حال، هنگامی که نمونه‌های آموزشی مدل‌ها کافی نباشند، نتایج این روش‌ها در مقایسه با نتایج واقعی، تا حدودی تحریف شده و یا اغراق‌آمیز است. در مدل‌سازی سیل منابع مختلف عدم قطعیت، مربوط به فرایند مدل‌سازی، پارامترهای ورودی و روش نمونه‌گیری است. از این رو، دانشمندان تلاش کرده‌اند تا مدل‌های ترکیبی را از تلفیق یک تنظیم آموزش‌محور و یک الگوریتم اولیه ایجاد کنند و در پی آن، به منظور دستیابی به مدل‌های توانمند و قوی، آنها را توسعه دهند. این مدل‌های ترکیبی را می‌توان در مناطقی که تعداد نمونه‌های آموزشی کافی نیست، استفاده کرد. شایان یادآوری است که این مدل‌ها باید در مناطق مختلف بررسی شوند تا بتوان قابلیت و کاربرد آنها را شناسایی کرد و در نهایت، مدل بهینه بسیار دقیق، قوی و حساس به کمبود اطلاعات را ارائه کرد [۱۱].

هدف اصلی مطالعه حاضر، بررسی سیل‌های اخیر آبخیز کلات و عوامل مؤثر در وقوع آنها و در نهایت، شناسایی مناطق مستعد سیلاب با استفاده از مدل هوشمند ML ترکیبی FR-SVM است. شایان یادآوری است که این مدل برای نخستین بار و به منظور شناسایی مناطق حساس و مستعد سیل در کلات استفاده شده و سپس به منظور اثبات کارایی بیشتر مدل‌های ترکیبی نسبت به مدل‌های مستقل، با مدل SVM مقایسه شد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده و پراکنش نقاط سیل گیر

سیلاب‌های شهریور ۱۳۸۰ و مرداد ۱۳۹۶ به ترتیب با دبی های ۳۱۷ و ۲۲۳ مترمکعب بر ثانیه، علاوه بر صدمات درخور توجه به مزارع شالیکاری، باغ ها و منازل مسکونی، چندین کشته نیز بر جای گذاشت. در اواخر ۱۳۹۷ و اوایل امسال، با وقوع سیل های مکرری همچون سیل اردیبهشت ۱۳۹۸ با حجم سیلاب ۹۸۰ هزار مترمکعب، ساکنان آبخیز کلات بار دیگر شاهد از دست دادن تعدادی از هموطنان، قطعی آب شرب، تخریب و آب گرفتگی منازل مسکونی، از بین رفتن اراضی کشاورزی، تلفات دام‌ها، تخریب پل ها و مسدود شدن جاده های مواصلاتی روستاها به ویژه محور کلات به مشهد، بودند [۱۳ و ۱۵]. شکل های ۲ و ۳ بخشی از آثار سیلاب های اخیر را در منطقه مطالعه شده نشان می دهد.

در کشور سه دوره بارندگی شدید پی در پی در اوایل سال ۱۳۹۸، موجب طغیان ۱۴۰ رودخانه شد. بر اثر این طغیان ها ۷۸ نفر از هموطنان کشته شده و بیش از ۲ هزار شهر و روستای ایران آسیب دید. در این اتفاق ها ۲۶ استان از ۳۱ استان ایران تحت تأثیر رخداد سیل قرار گرفت که حدود ۱۶/۶ میلیون نفر غیرمستقیم و ۲/۵ میلیون نفر به طور مستقیم آسیب دیدند [۱۴].

در این بحران فراگیر ملی، یکی از مناطق آسیب دیده، آبخیز کلات بود. البته، شایان یادآوری است که این خسارت ها فقط مربوط به سیلاب های اخیر نیست و درحقیقت این حوزه، با توجه به موقعیت خاص توپوگرافی و زمین شناسی خود، همواره از گذشته تا به امروز با سیلاب های متعددی روبه رو بوده است. برای مثال،



شکل ۲. سیلاب مورخ ۱۳۹۸/۱/۲۰ و آثار مخرب آن در ورودی روستای خلیج سفلی



شکل ۳. سیلاب مورخ ۱۳۹۸/۲/۲۸ - ۲۶، آب‌گرفتگی و تخریب منازل در شهر کلات

مربعات خطا RMSE^۳، ضریب کاپا KC^۴، منحنی مشخصه عملکرد سیستم ROC^۵ و منحنی میزان پیش‌بینی PRC^۶ اعتبارسنجی شد. در نهایت، نتایج مدل‌ها با یکدیگر مقایسه و مدل بهینه معرفی شد [۱۶]. در ادامه، مراحل پژوهش به تفکیک و مرحله‌به‌مرحله بیان شده است.

وقایع گذشته سیل

بین محل وقوع سیل و تغییرات پارامترهای مورفولوژیکی و هواشناسی، رابطه و همبستگی وجود دارد. برای مدل‌سازی احتمال وقوع سیلاب، رویدادهای سیل گذشته باید ارزیابی شود. بنابراین، اطلاعات موجود از وقایع سیل نشان‌دهنده مهم‌ترین بخش برای محاسبه احتمال سیل است. پرواضح است که اتفاق‌های قبلی کلید پیش‌بینی وقوع خطر است. نقشه پراکنش سیل باید با اطلاعات به‌روز شده، مکان دقیق سیلاب و تعداد کافی از وقایع رخ‌داده در یک منطقه خاص و در دوره زمانی معین تهیه شود [۶]. در تحقیق حاضر پس از بررسی سیلاب‌های ثبت‌شده، شواهد سیلاب، بازدیدهای میدانی، کسب اطلاع از افراد آگاه منطقه، اخبار انتشاریافته در جراید و رسانه‌ها در اواخر سال ۱۳۹۷ و اوایل سال ۱۳۹۸ و همچنین بررسی گزارش‌های قبلی صورت‌گرفته توسط اداره منابع طبیعی خراسان رضوی و مشاوران مربوط به آن برای

به رغم تمامی مطالعات و طرح‌هایی که در آبخیز کلات به‌منظور جلوگیری از وقوع سیل و حفظ اراضی کشاورزی، باغ‌ها، تأسیسات و تلفات جانی صورت گرفته، اما همچنان سیلاب‌های زیادی در این منطقه رخ می‌دهد. به همین منظور، پژوهش حاضر به بررسی دقیق مناطق مستعد سیلاب می‌پردازد تا مسئولان مربوط به آن بتوانند در کارهای مدیریتی خود، با تمرکز بیشتر روی مناطق حساس، ضمن صرفه‌جویی در زمان و هزینه از خروجی‌های تحقیق حاضر برای کاهش خسارت‌ها و تلفات سیل‌های آتی استفاده کنند.

روش پژوهش

در مطالعه حاضر، مدل ترکیبی نسبت فراوانی - ماشین بردار پشتیبان FR-SVM^۱ و مدل مستقل ماشین بردار پشتیبان SVM^۲ برای تهیه نقشه مناطق مستعد سیلاب آبخیز کلات با استفاده از مراحل زیر واسنجی و اعتبارسنجی شد. ۷۳ نقطه سیلابی پس از بررسی سیلاب‌های اخیر شناسایی و ثبت شد. به طور تصادفی، ۷۰ درصد نقاط برای واسنجی و ۳۰ درصد برای ارزیابی تقسیم شد. در ادامه، عوامل مؤثر در وقوع سیل انتخاب شدند. سپس، احتمال وقوع سیل با استفاده از مدل‌های نامبرده مدل‌سازی شد. پس از آن، مدل‌ها با استفاده از نقاط سیلی که در اجرا و واسنجی مدل شرکت داده نشده، توسط معیارهای مختلف ارزیابی همچون مجموع میانگین

3. Root Mean Squares Errors
4. Kappa Coefficient
5. Receiver Operating Characteristic
6. Prediction Rate Curve

1. Frequency Ratio-Support Vector Machine
2. Support Vector Machine

آزیموت، زاویه شیب و تابش سبب تشخیص بهتر پستی و بلندی‌های منطقه مطالعه شده می‌شود و از DEM و در محیط نرم‌افزار SAGA 7.0.0 قابل محاسبه است. ارتفاع می‌تواند به عنوان یکی از عوامل مؤثر در مطالعات سیل در نظر گرفته شود. تقریباً غیرممکن است که سیلاب‌ها در مناطق با ارتفاع زیاد رخ دهند. مناطق مسطح پتانسیل زیادی برای وقوع سیل دارند. آب از دامنه کوه‌ها جریان می‌یابد و در رودخانه‌های پایین‌تر، موجب سیل می‌شود [۱۹].

فاکتور تحدب و تعقر دامنه‌ها می‌تواند در قالب انحنای طولی (PIC) و عرضی (PrC) بررسی شود، به طوری که تأثیرات خود را با ننگه داشت آب در دامنه‌های مقعر و مسطح و تسریع رواناب در دامنه‌های محدب نشان می‌دهد. معمولاً در عمل این پارامتر از مقادیر منفی به مثبت در سه دسته تقسیم می‌شود. مقادیر مثبت به مناطق محدب، اعداد منفی به دامنه‌های مقعر و پیکسل‌هایی با مقدار صفر به مناطق مسطح گفته می‌شود. در اصل، مناطق مقعر و صاف مستعد ایجاد سیل هستند. عمق دره نیز از عواملی است که می‌تواند بر کاهش یا شدت سیل تأثیرگذار باشد [۵].

شیب منطقه و نیم‌رخ طولی رودخانه به طور کلی می‌توانند اطلاعات مفیدی مانند سرعت حرکت آب، قدرت فرسایشی رودخانه و زمان تمرکز را در اختیار محقق قرار دهند. شیب را می‌توان با زاویه بین زمین و یک نقطه افقی اندازه‌گیری کرد. این عامل اغلب در تحلیل حساسیت سیل استفاده می‌شود. عامل طول شیب (رابطه ۱) ترکیبی از گرادیان شیب و طول دامنه در یک فاکتور واحد است که بر تولید رواناب تأثیر می‌گذارد [۲۰]. شاخص توان آبراهه (SPI) که در رابطه ۲ آمده است، قدرت جریان آب از نظر فرسایش را نشان می‌دهد. شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) نیز به طور ویژه، اثر توپوگرافی را روی محل و اندازه مناطق اشباع‌شده مستعد تولید رواناب، نشان می‌دهد. شاخص TWI مقدار تجمع جریان را در هر مکان آبخیز و همچنین روند حرکت آب به سوی پایین‌دست تحت تأثیر نیروی گرانش را نشان می‌دهد. این شاخص در رابطه ۳ نشان داده شده است.

$$LS = \left(\frac{A_x}{22.13} \right)^{0.4} \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^{1.3} \quad (1)$$

$$SPI = A_s \tan \beta, \quad (2)$$

$$TWI = \ln \left(\frac{A_s}{\tan \beta} \right), \quad (3)$$

دید بهتر از منطقه مطالعه شده، تعداد ۷۳ واقعه سیلاب به صورت نقطه‌ای جمع‌آوری و ثبت شد. در پایان، نقشه‌ای با عنوان «نقشه پراکنش سیل‌گیری» تهیه شد (شکل ۱). در واقع، این نقشه، اساس و مبنایی برای تجزیه و تحلیل احتمال وقوع سیل است. هنگام اجرای مدل، داده‌ها به‌طور تصادفی به دو گروه آموزش و ارزیابی تقسیم شدند. داده‌های آموزشی برای اجرای مدل به منظور محاسبه وزن‌های هر یک از عوامل مؤثر در وقوع سیل و داده‌های آزمایشی به منظور بررسی کارایی مدل اجرا شده، استفاده شد [۱۷]. بر اساس مرور منابع، ۷۰ درصد از داده‌ها (۵۱ نقطه) به عنوان آموزش و ۳۰ درصد (۲۲ نقطه) برای ارزیابی مدل استفاده شد. مدل‌سازی براساس دو مجموعه از مقادیر (صفر و یک)، که در آن صفر، نبود سیل و یک نشان‌دهنده حضور این رویداد است، انجام شد. هم‌زمان مناطقی با تعداد نقاط مشابه به عنوان مناطق غیر سیل‌گیر طبقه‌بندی شد که هیچ حادثه سیلابی در آن ثبت نشده است و امکان سیلاب نیز وجود ندارد.

پارامترهای مؤثر بر وقوع سیل

شکل‌گیری پدیده سیل در هر منطقه بستگی به تعدادی از عوامل مؤثر مختلف هیدرولوژیکی و ژئومورفیکی در وقوع سیل دارد. این عوامل با توجه به خصوصیات حوزه می‌تواند تغییر کند. این نکته بسیار حائز اهمیت است که در این میان باید معقول‌ترین و مهم‌ترین پارامترها انتخاب شوند. بنابراین، بهینه‌سازی عوامل مؤثر بر وقوع سیل باید به منظور بهبود نتایج و کاهش هزینه پروژه صورت گیرد. در این میان، با توجه به مرور منابع و مطالعات صورت‌گرفته [۵، ۶، ۱۶ و ۱۸] و آمار و اطلاعات موجود از آبخیز کلات، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع سیل برای بررسی عبارت‌اند از: بارش سالانه، نوع زمین‌شناسی، کاربری اراضی/پوشش زمین (LULC)، طول شیب (LS)، فاصله از رودخانه، تحلیل سایه پستی و بلندی‌ها (AH)، ارتفاع، شاخص همگرایی (CI)، تحدب و تعقر طولی (PIC)، تحدب و تعقر عرضی (PC)، شیب، شاخص قدرت جریان (SPI)، شاخص زبری توپوگرافی (TRI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و عمق دره (VD)، که اندازه‌گیری آنها برای مدل‌سازی سیلاب و تهیه نقشه‌های مربوط به آن ضروری است.

تحلیل سایه پستی و بلندی‌ها (AH) در واقع شاخصی است که با تولید سایه و روشنی از طریق جابه‌جایی و تغییرات

مختلفی تأثیر می‌گذارد. برای مثال، از بین بردن پوشش گیاهی و یا تغییر در نوع و چگونگی کشت گیاهانی که تلفات برگ‌آبی زیادی ندارند، سبب افزایش حجم جریان و فزونی دبی سیلاب می‌شود. مناطق با پوشش زیاد به دلیل رابطه منفی بین سیل و تراکم پوشش گیاهی کمتر مستعد سیلاب هستند. از سوی دیگر، مناطق مسکونی که بیشتر توسط سطوح نفوذناپذیر و زمین‌های بدون پوشش ساخته می‌شوند، رواناب را افزایش می‌دهند. عامل زمین‌شناسی و ساختار متنوع آن اغلب سبب اختلاف در پایداری و مقاومت سنگ‌ها و همچنین تنوع جنس خاک می‌شود [۷]. نقشه کاربری اراضی و زمین‌شناسی از اداره کل منابع طبیعی استان خراسان رضوی تهیه شد.

بارندگی یکی از عوامل مهم در وقوع سیل است، چرا که اغلب پس از بارش‌های سنگین، سیل‌های ناگهانی رخ می‌دهد. داده‌های بارش از ایستگاه‌های باران‌سنجی به دست می‌آیند. در پژوهش حاضر، اطلاعات هواشناسی با دوره آماری مشترک ۲۰ ساله، از ۱۰ ایستگاه باران‌سنجی در نزدیکی محدوده مطالعه شده، برای محاسبه میانگین سالانه بارندگی جمع‌آوری شد که در جدول ۱ آمده است. نقشه توزیع مکانی بارش سالانه توسط روش میان‌یابی IDW در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1، تهیه شد [۲۳].

مدل رقومی ارتفاعی از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و Aster سال ۲۰۱۸ دریافت شده و در پی آن، نقشه شاخص‌های مورفولوژیکی مؤثر در وقوع سیل از DEM استخراج و همراه نقشه‌های بارش، زمین‌شناسی و کاربری اراضی به محیط نرم‌افزارهای SAGA 7.0.0 و GIS 10.4.1 Arc برای ادامه مراحل پژوهش منتقل شد (شکل ۴).

که در آن، As مساحت ویژه حوزه بر حسب مترمربع بر متر و β زاویه شیب به درجه است.

شاخص زبری توپوگرافی TRI یکی دیگر از پارامترهای مورفولوژیکی است که به طور گسترده‌ای در تجزیه و تحلیل سیلاب استفاده می‌شود و در واقع تأثیرات خود را در قالب نگاه‌داشت و یا تسریع رواناب نشان می‌دهد (رابطه ۴).

$$TRI = \sqrt{Abs(max^2 - min^2)}, \quad (4)$$

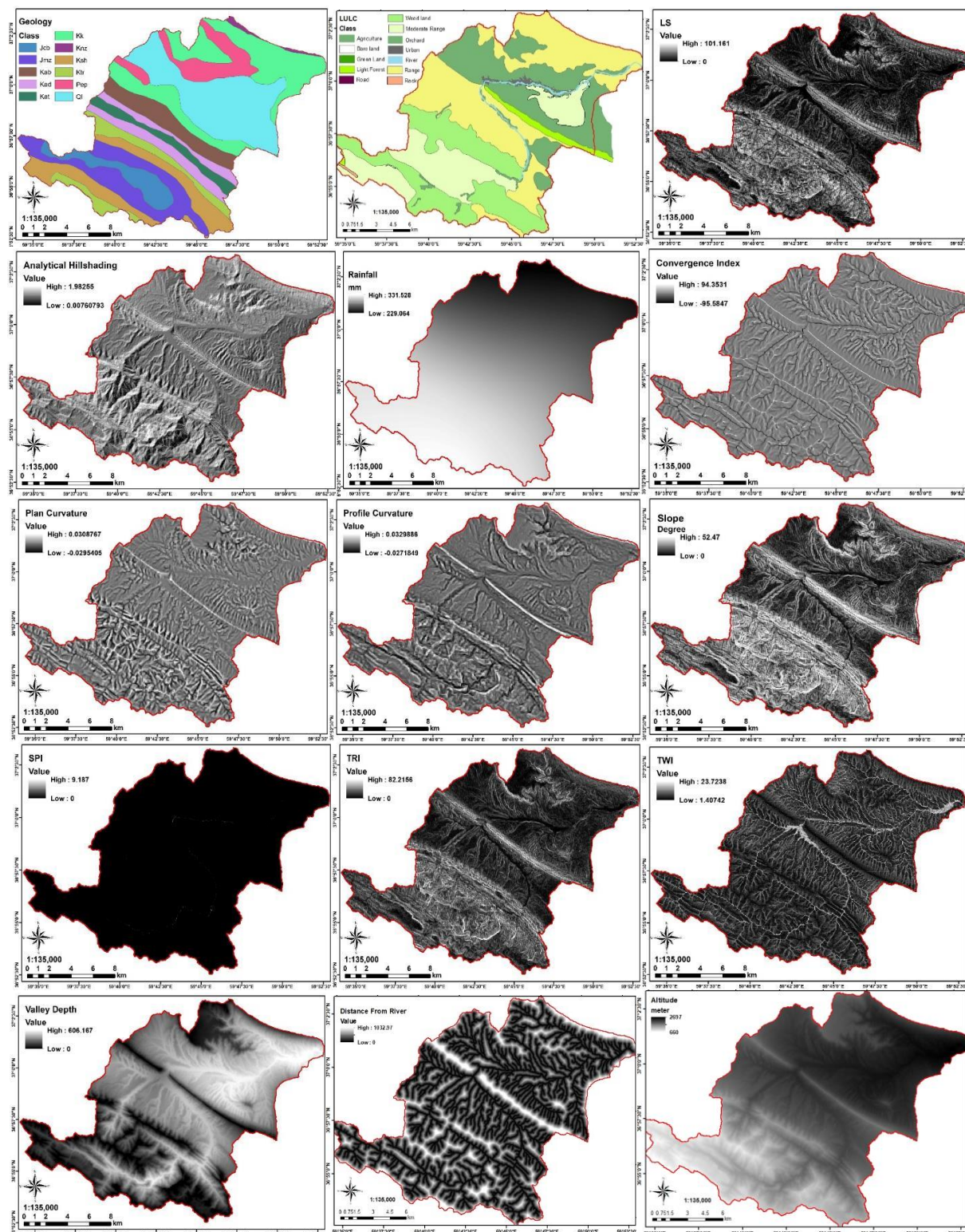
که در آن Abs سطح ویژه حوزه بر حسب مترمربع بر متر و min و max به ترتیب نشان‌دهنده بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین مقادیر ارتفاعی پیکسل‌ها در پنجره 3×3 سلول‌های ۹ تایی همسایه خود هستند [۲۱].

شاخص همگرایی با توجه به جهت جریان محاسبه می‌شود. این شاخص مانند پارامتر تحدب و تعقر سه طبقه دارد، اما در مقایسه با آن نتایج بسیار دقیق‌تر و واضح‌تری را نشان می‌دهد. در صورتی که میانگین جهات نسبی در هر پیکسل یک پنجره 3×3 برابر ۹۰، صفر و ۱۸۰ درجه شود، به ترتیب شاخص همگرایی صفر، ۹۰- و ۹۰ درجه می‌شود که در سه دسته جدا به نام‌های مسطح، همگرا و واگرا طبقه‌بندی می‌شوند. این شاخص برای تجزیه و تحلیل‌های خطی به‌ویژه تشخیص سیستم‌های زهکشی، خط الرأس‌ها و دره‌ها کاربرد زیادی دارد [۲۲].

فاصله از رودخانه تأثیر درخور توجهی بر گسترش و میزان سیلاب در منطقه مطالعه شده دارد. این رابطه نسبت معکوس دارد و هرچه فاصله از رودخانه بیشتر شود، احتمال وقوع سیل کمتر می‌شود. کاربری اراضی و پوشش زمین روی جریان رودخانه و وقوع سیلاب به روش‌های

جدول ۱. آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی محدوده مطالعاتی

کد ایستگاه	نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	طول (UTM)	عرض (UTM)	سال شروع	سال پایان	بارش سالانه (میلی‌متر)
۶۶-۰۱۱	ارچنگان	۷۵۷	۷۳۱۰۹۲	۴۱۱۰۷۳۲	۱۳۷۰	تا کنون	۳۰۴
۶۵-۰۰۲	چشمه شور	۴۷۷	۸۲۱۲۳۱	۴۰۴۷۹۱۹	۱۳۴۶	۱۳۶۹	۲۳۴
۶۵-۰۰۱	چهچه	۴۸۶	۷۶۱۳۹۰	۴۰۵۸۲۴۰	۱۳۷۱	تا کنون	۲۴۷
۶۷-۰۰۱	حاتم قلعه	۴۹۳	۷۰۹۶۲۱	۴۱۳۱۹۴۰	۱۳۴۵	تا کنون	۲۲۴
۶۷-۰۰۷	حصار درگز	۲۸۹	۷۱۱۷۶۸	۴۱۴۶۱۴۶	۱۳۷۴	تا کنون	۱۸۸
۶۶-۰۱۰	در بند کلات	۹۶۰	۷۴۲۶۳۴	۴۰۹۸۰۰۷	۱۳۷۰	تا کنون	۳۲۵
۶۶-۰۰۱	سنگ‌دیوار	۷۶۴	۷۲۴۹۶۶	۴۱۱۵۰۴۳	۱۳۶۴	تا کنون	۳۲۸
۶۶-۰۰۳	قره تیکان	۵۲۷	۷۴۹۵۸۶	۴۰۷۸۲۰۳	۱۳۵۴	تا کنون	۲۰۷
۶۷-۰۰۳	کیکان	۱۴۳۷	۶۶۹۳۴۷	۴۱۲۴۳۵۳	۱۳۵۸	تا کنون	۲۷۷
۶۶-۰۱۹	لایین نو	۸۵۹	۷۲۱۴۸۱	۴۱۱۲۷۶۶	۱۳۷۶	تا کنون	۲۴۵



شکل ۴. نقشه عوامل مؤثر بر وقوع سیل آبخیز کلات

هنگام همپوشانی لایه‌ها می‌توانند مشکلاتی را ایجاد کنند. از این رو، قبل از اینکه با یکدیگر ادغام شوند، تمامی عوامل باید به یک مقیاس یکسان و واحد تبدیل شوند. در واقع،

سیس، نقشه‌های مربوط به هر یک از این عوامل مؤثر به نقشه‌های رستری با پیکسل‌های ۲۸ متر × ۲۸ متر تبدیل شد. در اصل، این فاکتورها دامنه اعداد متغیری دارند که

اصلی همهٔ این تحقیقات، تجزیه و تحلیل و تبدیل عوامل ورودی به یک مدل خروجی واحد با استفاده از وزن‌گذاری، محاسبات و تکنیک‌های درون‌یابی و داده‌کاوی است [۲۷]. در میان مدل‌های مختلف مبتنی بر GIS، مدل‌های کیفی و کمی شامل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، نسبت فراوانی (FR)، رگرسیون لجستیک (LR)، منطق فازی (FL)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، شبکهٔ عصبی مصنوعی (ANN)، جنگل تصادفی (RF) و درخت تصمیم‌گیری (DT) پرکاربردترین و رایج‌ترین مدل‌های استفاده شده در سیلاب هستند [۱۶]. همچنین، برخی محققان برای بهبود بازدهی مدل‌سازی سیلاب از ترکیب مدل‌ها بهره گرفته‌اند [۲، ۵، ۶، ۷، ۱۰، ۲۱، ۲۸، ۲۹ و ۳۰]. مدل‌های ترکیبی بر مبنای تلفیق صحیح بین الگوریتم‌های آماری و خروجی طبقه‌کننده‌های چندگانه شکل می‌گیرند. این مدل‌ها روش‌های تجربی رایجی‌اند که نسبت به مدل‌های ساده و مستقل نتایج صحیح‌تر و معتبرتری را ارائه می‌دهند [۱۰]. همچنین، ابزارهای قدرتمندی برای بهبود و ارتقای اعتبار نتایج در تهیهٔ نقشه‌های خطر سیل هستند [۲۹].

روش SVM

ماشین بردار پشتیبان (SVM) یکی از مدل‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده است که به منظور طبقه‌بندی و تفکیک داده‌ها به کار می‌رود. به بیان دیگر، پس از مشخص شدن داده‌های ورودی مدل (متغیرهای مستقل) و داده‌های هدف (متغیر وابسته)، مدل ماشین بردار پشتیبان پس از تجزیه و تحلیل بین متغیرهای مستقل و وابسته (واسنجی)، داده‌ها را به گروه‌های متمایزی تقسیم می‌کند. به طور کلی، مدل یادشده مزایایی دارد که عبارت‌اند از: ۱. طبقه‌بندی داده‌های مربوط به شرایط محیطی با حداکثر قابلیت تعمیم؛ ۲. رسیدن به نقطهٔ بهینهٔ تفکیک داده‌های مربوط به عوامل تأثیرگذار (سنگ‌شناسی، شیب و غیره) بر وقوع خطرات مختلف؛ ۳. تعیین خودکار ساختار بهینه برای طبقه‌بندی‌کنندهٔ عوامل تأثیرگذار بر وقوع خطرات مختلف؛ ۴. امکان مدل کردن داده‌های غیرخطی عوامل تأثیرگذار بر وقوع لندفرم‌های مختلف با استفاده از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی.

ماشین بردار پشتیبان الگوریتمی است که نوع خاصی از

نرمال‌سازی (استانداردسازی) برای تغییر مقادیر پیکسل‌ها در نقشه‌های رستری است، به طوری که بتوان محاسبات رستری را در یک مقیاس واحد انجام داد. پس از استانداردسازی کلیهٔ نقشه‌ها، نقاط موجود در نقشهٔ پراکنش سیل با استفاده از نقشه‌های استانداردشده، ارزش‌گذاری شد. نتایج به دست آمده برای تجزیه و تحلیل‌های آماری به محیط نرم‌افزار Weka 3.8 منتقل شد [۵].

نرمال‌سازی داده‌ها

گام مهم قبل از وارد کردن داده‌ها به مدل، نرمال‌سازی داده‌هاست. این کار به‌ویژه زمانی که دامنهٔ تغییرات پارامترهای ورودی زیاد باشد، کمک شایانی به آموزش بهتر و سریع‌تر مدل می‌کند. در اصل، وارد کردن داده‌ها به صورت خام سبب کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود [۵۲]. برای نرمال‌سازی داده‌های پژوهش حاضر از رابطهٔ ۵ استفاده شد.

$$X_n = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5)$$

که در این رابطه، X_n مقدار نرمال‌شدهٔ ورودی X_{ij} و X_{\max} و X_{\min} به ترتیب مقادیر بیشترین و کمترین داده‌ها هستند [۶].

مدل‌سازی سیلاب

سیلاب از شایع‌ترین بلایای طبیعی است؛ بنابراین تجزیه و تحلیل، پیش‌بینی و مدل‌سازی سیل در سناریوهای مختلف زمانی و مقیاس‌های مکانی اهمیت زیادی دارد. مدل‌سازی سیلاب و طغیان سیل می‌تواند اطلاعات درخور توجهی را در خصوص احتمالات دقیق‌تر در مواقع اضطراری به منظور کاهش خسارت و آسیب به زندگی و اموال مردم فراهم کند [۲۴].

پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های GIS و RS تحولی را در بخش هیدرولوژی به‌ویژه مدیریت سیلاب ایجاد کرده است که می‌تواند کلیهٔ نیازهای مربوط به پیش‌بینی، تمهیدات، جلوگیری و ارزیابی خسارت سیل را برآورده کند [۲۵]. تحقیقات تاون سند و والش (۱۹۹۸) یکی از مطالعات پیشگامی است که امکان پیش‌بینی سیل را از طریق مدل‌سازی با کمک RS در محیط GIS نشان داد [۲۶]. پس از تحقیق یادشده دانشمندان زیادی از این تکنیک‌ها در مدل‌سازی سیلاب استفاده کردند. مبنای

جایی که در آن، $g(x)$ ، خروجی رابطه و $K(x_i, x_j)$ تابع کرنل است. انتخاب نوع هسته بهینه یک مرحله مهم از مدل SVM است، زیرا می‌تواند تأثیر زیادی بر افزایش دقت مدل داشته باشد [۳۱]. توابع کرنل (هسته) استفاده شده در ماشین‌های بردار پشتیبان معمولاً به چهار گروه کرنل خطی، کرنل چندجمله‌ای، کرنل پایه شعاعی و کرنل حلقوی تقسیم می‌شوند. در این مطالعه از کرنل چندجمله‌ای استفاده شد [۳۲].

روش FR

نسبت فراوانی FR، احتمال ظهور یک ویژگی یا پدیده‌ای خاص است یا به بیان دیگر، این روش سطح همبستگی بین موقعیت‌های سیلاب‌ها را مشخص می‌کند. هر چقدر مقدار این نسبت در یک طبقه یا کلاس یک عمل مشخص بزرگ‌تر باشد، بیانگر اهمیت یا نقش بیشتر آن کلاس در عامل مؤثر در وقوع سیل است. نسبت فراوانی برای یک طبقه یا کلاس مشخص از یک عامل معین با استفاده از رابطه ۱۰ قابل محاسبه است.

$$FR = \frac{A/B}{C/D} \quad (10)$$

که در اینجا FR همان نسبت فراوانی است که میزان تأثیر هر کلاس از هر عامل را بیان می‌کند. A، تعداد سیلاب‌ها در کلاس مد نظر؛ B، تعداد کل سیلاب‌های موجود در منطقه؛ C، تعداد پیکسل‌های کلاس مد نظر و D، تعداد کل پیکسل‌های مربوط به عامل مربوطه هستند.

شاخص استعداد وقوع سیل برای یک پیکسل، برابر مجموع نسبت فراوانی آن پیکسل در تمام عوامل مؤثر است. اگر تعداد M عامل مؤثر وجود داشته باشد، شاخص احتمال وقوع سیل (FPI) از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود [۳۳].

$$FPI_{FR} = \sum_{i=1}^M FR_i \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (11)$$

روش ترکیبی FR-SVM

مدل نسبت فراوانی (FR) می‌تواند آنالیزهای آماری دومتغیره را انجام دهد و ارتباط بین سیلاب و طبقه‌بندی‌های هر پارامتر مؤثر در وقوع سیل را ارزیابی کند. وزن‌های به‌دست‌آمده از روش FR می‌تواند به هر عامل مؤثر در وقوع سیل اختصاص داده شود و در نهایت، عوامل مؤثر وزن گرفته در تجزیه و تحلیل‌های SVM به کار می‌رود. SVM یک طبقه‌بندی‌کننده زوجی و یک الگوریتم

مدل‌های خطی را که حداکثر حاشیه ابرصفحه را تولید می‌کنند، می‌یابد. حداکثر کردن حاشیه ابرصفحه به حداکثر شدن تفکیک بین طبقات منجر می‌شود. نزدیک‌ترین نقاط آموزشی به حداکثر حاشیه ابرصفحه را بردارهای پشتیبان می‌نامند. البته، فقط از این بردارها (نقاط) برای مشخص کردن مرز بین طبقات استفاده می‌شود.

در تعریف ساده، SVM را می‌توان الگوریتمی دانست که طی آن دو کلاس به وسیله یک ابرصفحه جداکننده که روی داده‌های آموزشی تعریف می‌شود، از هم جدا و مشخص می‌شوند.

در مدل SVM، x یک بردار فضایی برای هر عامل مؤثر بر وقوع سیل است. SVM در صورتی که بالای ابرصفحه باشد، ارزش یک و زمانی که در پایین ابرصفحه قرار داشته باشد، ارزش -۱ می‌گیرد. هدف از مدل SVM تشخیص فاصله ابرصفحه جداکننده ایده‌آل است. جداسازی ابرصفحه توسط رابطه ۶ برای مجموعه داده‌های مجزای خطی تعریف می‌شود:

$$y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 - \xi_i \quad (6)$$

$$\text{Minimise} \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) \quad (7)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0, 0 \leq \alpha_i \leq c \quad (8)$$

W ، نشان‌دهنده بردار نرمال ابرصفحه بهینه، b ، بردار اربیبی که فاصله ابرصفحه تا مبدأ را نشان می‌دهد و ξ_i نشان‌دهنده پارامترهای کاهنده مؤثر است. مجموع این ضرایب می‌تواند ابرصفحه را بهینه‌سازی کند که در روابط ۷ و ۸ نشان داده شده است. C پارامتر جریمه یا تنظیم‌کننده است که بین کم شدن خطا و پیچیدگی‌های مدل تعادل برقرار می‌کند. α_i ، نشان‌دهنده ضریب تعیین‌کننده ابرصفحه است و ξ_i پارامتر کاهنده‌ای است که می‌تواند به کاهش جریمه و خطا کمک کند. اگر ابرصفحه نتواند توسط تابع کرنل خطی تفکیک و جداسازی شود، مجموعه داده‌های ورودی باید توسط توابع کرنل غیرخطی به یک فضای ترکیبی با ابعاد بالاتر تغییر کند که در نهایت، طبقه‌بندی پیچیده‌ای با عملکرد تصمیم‌گیری در رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$g(x) = \text{sign}(\sum_{i=1}^n y_i \alpha_j K(x_i, x_j) + b) \quad (9)$$

کمتری در سیل دارد. در انتها، وزن‌های به‌دست‌آمده برای هر کلاس با استفاده از روش نسبت فراوانی و همچنین وزن‌های به‌دست‌آمده از روش SVM در محیط Arc GIS 10.4.1 برای هر یک از لایه‌های عوامل مؤثر اعمال شده و در نهایت، نقشه احتمال وقوع سیل آبخیز کلات با روش ترکیبی FR-SVM تهیه شد [۵].

نتایج و بحث

در ادامه کار، پس از رستری شدن و نرمال‌سازی کلیه نقشه‌ها، نقاط موجود در نقشه پراکنش سیل با استفاده از نقشه‌های نرمال‌شده ارزش‌گذاری و نتایج به‌دست‌آمده برای تجزیه و تحلیل‌های آماری به محیط نرم‌افزار Weka 3.8 منتقل شد. سپس، لایه‌های مختلف، با استفاده از مدل‌های SVM و FR-SVM وزن‌دهی شدند. نتایج به‌دست‌آمده از وزن‌دهی مدل‌ها، در جدول ۲ آمده است.

یادگیری ماشین است که بر اساس روش یادگیری نظارت‌شده جدید و مفهوم کاهش ریسک ساختاری برنامه‌نویسی شده است.

در مدل ترکیبی FR-SVM، به‌جز فاکتورهای مانند کاربری اراضی و زمین‌شناسی که طبقه‌بندی مشخصی دارند، سایر پارامترهای مؤثر بر وقوع سیل مطابق با روش quantile در ۱۰ کلاس طبقه‌بندی شدند. سپس، با اجرای مدل FR، همبستگی همه کلاس‌ها محاسبه شد. نسبت حضور حوادث سیلاب به مساحت هر کلاس بیانگر مقدار FR برای هر کلاس از پارامترهاست. اگر مقدار FR فقط در یک یا دو کلاس زیاد باشد و کلاس‌های باقی‌مانده تقریباً صفر باشد، پارامتر مد نظر تأثیر بسیار زیادی روی سیل می‌گذارد. هنگامی که مقدار FR تقریباً بین تمامی کلاس‌های یک پارامتر توزیع شود، یعنی حالتی که سیل کم و بیش در تمام طبقات رخ داده باشد، آن پارامتر تأثیر

جدول ۲. وزن‌های اختصاص‌یافته برای هر کلاس از عوامل مؤثر در مدل‌های استفاده‌شده

عامل	کلاس	درصد کلاس	درصد سیل	وزن FR	وزن SVM	عامل	کلاس	درصد کلاس	درصد سیل	وزن FR	وزن SVM
AH	۱/۱۱۵۳۱۴-۱/۹۸۲۵۵۲	۱۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۱	CI	-۹۵/۵۸۴۷۰-۸/۷۲۳۰۷	۹/۴۷	۲۳/۵۸	۲/۴۹۲	۰/۰۰۰۹
	۱/۰۰۷۶۱۹-۱/۱۱۵۳۱۴	۱۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰			-۸/۷۲۳۰۷۷-۵/۰۱۱۰۴۱	۸/۳۷	۸/۴۹	۱/۰۱۴	
	۰/۹۳۳۷۵۴-۱/۰۰۷۶۱۹	۱۰/۰۹	۱/۸۹	۰/۱۸۷			-۵/۰۱۱۰۴۱-۲/۷۸۳۸۲	۱۰/۶۶	۱۰/۳۸	۰/۹۷۳	
	۰/۸۷۳۹۸۸-۰/۹۳۳۷۵۴	۱۰/۰۰	۶/۶۰	۰/۶۶۰			-۲/۷۸۳۸۲-۱/۲۹۹۰۰۶	۱۱/۴۶	۱۰/۳۸	۰/۹۰۶	
	۰/۸۲۲۸۸۴-۰/۸۷۳۹۸۸	۹/۹۸	۸۴/۹۱	۸/۵۰۴			-۱/۲۹۹۰۰۶-۰/۱۱۵۸۰	۱۴/۷۶	۱۲/۲۶	۰/۸۳۱	
	۰/۷۸۱۷۳۸-۰/۸۲۲۸۸۴	۱۰/۰۳	۴/۷۲	۰/۴۷۰			۰/۱۱۵۸۰-۱/۶۷۰۶۲۳	۱۲/۹۹	۱۰/۳۸	۰/۷۹۹	
	۰/۷۲۴۵۹۰-۰/۷۸۱۷۳۸	۹/۹۶	۰/۹۴	۰/۰۹۵			۱/۶۷۰۶۲۳-۳/۱۵۵۴۳۷	۹/۲۸	۸/۴۹	۰/۹۱۵	
	۰/۶۵۴۹۴۸-۰/۷۲۴۵۹۰	۹/۹۸	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۳/۱۵۵۴۳۷-۵/۳۸۲۶۵۸	۸/۵۳	۹/۴۳	۱/۱۰۶	
	۰/۵۴۲۵۱۸-۰/۶۵۴۹۴۸	۹/۹۵	۰/۹۴	۰/۰۹۵			۵/۳۸۲۶۵۸-۹/۸۳۷۱۰۱	۷/۵۸	۴/۷۲	۰/۶۲۳	
	۰/۰۰۷۶۰۸-۰/۵۴۲۵۱۸	۹/۹۴	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۹/۸۳۷۱۰۱-۹/۴۷۱۵۱۲	۶/۹۱	۱/۸۹	۰/۲۷۳	
VD	-۳۹/۸۸۴۴۵۵	۹/۵۷	۰/۰۰	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۰۹	Distance from river	-۲/۰۸۸۱۳۹	۸/۵۶	۷۸/۳۰	۹/۱۴۷	-۰/۰۰۲۴
	۳۹/۸۸۴۴۵۵-۸۵/۰۸۶۸۳۸	۹/۹۵	۱/۸۹	۰/۱۹۰			۲/۰۸۸-۱/۴۶۱	۱۲/۰۴	۱۶/۹۸	۱/۴۱۰	
	۸۵/۰۸۶۸۳۸-۱۳۵/۶۰۷۱۴۸	۱۰/۲۱	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۱/۴۶۱-۲/۷۱۴۵	۱۰/۷۹	۰/۹۴	۰/۰۸۷	
	۱۳۵/۶۰۷۱۴۸-۱۹۹/۴۲۲۲۷۶	۱۰/۲۷	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۲/۷۱۴۵-۴/۱۷۶۲	۱۰/۸۱	۲/۸۳	۰/۱۶۲	
	۱۹۹/۴۲۲۲۷۶-۲۶۳/۲۲۲۴۰۴	۹/۹۶	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۴/۱۷۶۲-۶/۰۵۵۶	۱۰/۶۰	۰/۹۴	۰/۰۸۹	
	۲۶۳/۲۲۲۴۰۴-۳۱۳/۷۵۷۷۱۴	۱۰/۲۴	۹/۴۳	۰/۹۲۱			۶/۰۵۵۶۹-۸۵/۶۱۳	۱۰/۲۲	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
	۳۱۳/۷۵۷۷۱۴-۳۵۸/۹۶۰۰۹۷	۱۰/۱۲	۱۲/۲۶	۱/۲۱۲			۸۵/۶۱۳-۱۱۹/۰۲۳	۹/۳۸	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
	۳۵۸/۹۶۰۰۹۷-۴۱۲/۱۳۹۳۷	۱۰/۱۰	۱۰/۳۸	۱/۰۲۸			۱۱۹/۰۲-۱۶۴/۹۶۸	۹/۳۴	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
	۴۱۲/۱۳۹۳۷-۴۸۱/۲۷۲۴۲۶	۹/۸۵	۹/۴۳	۰/۹۵۸			۱۶۴/۹۶۸-۲۳۳/۸۷۱	۹/۱۴	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
۴۸۱/۲۷۲۴۲۶-۶۸۰/۶۹۴۷۰۲	۹/۷۳	۵۶/۶۰	۵/۸۱۶	۲۳۳/۸۷۱-۵۳۴/۵۶۳	۹/۱۲	۰/۰۰	۰/۰۰۰				
TWI	۱/۴۰۷۴۱۷-۴/۱۹۶۹۶۴	۹/۶۱	۰/۰۰	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۳۲	Rainfall	۳۸۱/۸۸-۴۲۰/۴۲۸	۹/۶۹	۱۷/۹۲	۱/۸۵۰	۰/۰۰۰۳
	۴/۱۹۶۹۶۴-۴/۶۳۲۸۳	۱۰/۳۷	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۴۲۰/۴۲۸-۴۳۲/۰۴	۹/۸۴	۲۲/۶۴	۲/۳۰۲	
	۴/۶۳۲۸۳-۴/۹۸۱۵۲۴	۱۰/۳۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۴۳۲/۰۴-۴۴۱/۰۱	۹/۹۹	۱۲/۲۶	۱/۲۲۸	
	۴/۹۸۱۵۲۴-۵/۳۳۰۲۱۷	۱۰/۴۸	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۴۴۱/۰۱-۴۴۹/۴۶	۹/۸۵	۲/۸۳	۰/۲۸۷	
	۵/۳۳۰۲۱۷-۵/۷۶۶۰۸۴	۱۱/۸۵	۰/۹۴	۰/۰۸۰			۴۴۹/۴۶-۴۵۸/۹۷۲	۹/۹۱	۳۷/۷۴	۳/۸۰۸	
	۵/۷۶۶۰۸۴-۶/۳۰۱۹۵	۹/۶۰	۱/۸۹	۰/۱۹۷			۴۵۸/۹۷۲-۴۶۷/۹۴۵	۱۰/۰۱	۱/۸۹	۰/۱۸۹	
	۶/۳۰۱۹۵-۶/۸۱۲۱۶۴	۱۰/۰۵	۱/۸۹	۰/۱۸۸			۴۶۷/۹۴-۴۷۶/۳۹	۱۰/۰۱	۰/۹۴	۰/۰۹۴	
	۶/۸۱۲۱۶۴-۷/۶۸۳۸۹۷	۹/۴۵	۲/۸۳	۰/۲۹۹			۴۷۶/۳۹-۴۸۵/۸۹	۱۰/۵۴	۳/۷۷	۰/۳۵۸	
	۷/۶۸۳۸۹۷-۹/۳۴۰۱۹۱	۹/۱۹	۸/۴۹	۰/۹۲۴			۴۸۵/۸۹-۴۹۶/۹۸۵	۱۰/۵۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
۹/۳۴۰۱۹۱-۱۰/۲۳۷۲۳۷۹۱	۹/۱۰	۸۳/۹۶	۹/۲۲۷	۴۹۶/۹۸۵-۵۱۷/۰۴۳	۹/۶۷	۰/۰۰	۰/۰۰۰				

ادامه جدول ۲. وزن‌های اختصاص‌یافته برای هر کلاس از عوامل مؤثر در مدل‌های استفاده‌شده

عامل	کلاس	درصد سیل	درصد سیل	وزن FR	وزن SVM	عامل	کلاس	درصد سیل	درصد سیل	وزن FR	وزن SVM
SPI	۰	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰۰		TRI	۰-۲/۱۹۰۸۹	۹/۹۲	۵/۰۰	۵/۰۴۲	
	۰-۳۵۸۱۷۲۹۰	۹/۲۴	۹۵۲۸	۰/۹۶۰			۲/۱۹۰۸۹-۳/۱۶۲۲۷۸	۹/۹۳	۱۱/۳۲	۱/۱۴۰	
	۳۵۸۱۷۲۹۰-۷۱۷۷۴۵۸۱	۰/۳۴	۰/۹۴	۳/۸۵۸			۳/۱۶۲۲۷۸-۴/۱۳۳۱۰۶	۹/۹۳	۱۵/۰۹	۱/۵۲۰	
	۷۱۷۷۴۵۸۱-۱۰۷۶۶۱۸۷۱	۰/۱۱	۰/۹۴	۸/۹۱۶			۴/۱۳۳۱۰۶-۵/۰۹۹۰۲	۱۰/۰۱	۷/۵۵	۰/۷۵۴	
	۱۰۷۶۶۱۸۷۱-۱۷۹۴۳۶۴۵	۰/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۸		۵/۰۹۹۰۲-۶/۱۶۴۴۱۴	۱۰/۰۲	۳/۷۷	۰/۳۷۷	۰/۰۰۲۵
	۱۷۹۴۳۶۴۵-۲۵۱۲۱۱۰۳۴	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۶/۱۶۴۴۱۴-۷/۳۶۲۰۶۵	۱۰/۰۱	۵/۶۶	۰/۵۶۰	
	۲۵۱۲۱۱۰۳۴-۳۵۸۱۷۲۹۰۶	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۷/۳۶۲۰۶۵-۸/۷۷۴۹۶۴	۹/۹۹	۲/۸۳	۰/۲۸۳	
	۳۵۸۱۷۲۹۰۶-۵۷۴۱۹۶۶۵	۰/۰۵	۰/۹۴	۱۸۷۲			۸/۷۷۴۹۶۴-۱۰/۵۷۳۵۵۲	۹/۹۹	۰/۹۴	۰/۰۹۴	
	۵۷۴۱۹۶۶۵-۱۰۴۰۷۳۱۴۲۸	۰/۰۵	۰/۹۴	۲۰/۶۸			۱۰/۵۷۳۵۵۲-۱۳/۴۶۸۴۸	۱۰/۰۹	۲/۸۳	۰/۲۸۱	
۱۰۴۰۷۳۱۴۲۸-۹۱۸۱۷۱۴۶۴	۰/۰۴	۰/۹۴	۲۵۰۲		۱۳/۴۶۸۴۸-۱۷/۵۲۳۲۷۲	۱۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰			
Slope	۰-۰/۰۸۸	۱۰/۰۱	۹۳/۴۰	۹/۳۳۵		LS	۰-۰/۹۲۱۰۸	۸/۰۴	۸/۹۶۲	۱/۱۱۴	
	۰/۰۸۸۹۸۹-۰/۱۳۸۵۷۵	۱۰/۱۳	۴/۷۲	۰/۴۶۶			۰/۹۲۱۰۸-۱/۹۸۰۲۷	۱۳/۲۰	۸/۴۹	۰/۶۴۳	
	۰/۱۳۸۵۷۵-۰/۱۹۰۰۰۷	۱۰/۲۳	۰/۹۴	۰/۰۹۲			۱/۹۸۰۲۷-۲/۱۶۸۴۳۲	۱۳/۶۵	۰/۹۴	۰/۰۷۵	
	۰/۱۹۰۰۰۷-۰/۲۴۳۱۷	۹/۹۵	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۲/۱۶۸۴۳۲-۳/۳۵۶۵۹۴	۱۱/۱۹	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
	۰/۲۴۳۱۷-۰/۲۹۶۱۶۸	۹/۹۹	۰/۹۴	۰/۰۹۴	۰/۰۰۰۲۶		۳/۳۵۶۵۹۴-۴/۵۴۴۷۵۶	۹/۸۵	۰/۹۴	۰/۰۹۶	۰/۰۰۰۹
	۰/۲۹۶۱۶۸-۰/۳۵۸۱۷۱	۹/۹۹	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۴/۵۴۴۷۵۶-۵/۷۱۸۹۷۱	۱۱/۳۴	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
	۰/۳۵۸۱۷۱-۰/۴۲۴۲۶۳	۹/۹۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۵/۷۱۸۹۷۱-۸/۷۱۳۱۸۷	۹/۳۸	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
	۰/۴۲۴۲۶۳-۰/۵۰۵۸۰۱	۱۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۸/۷۱۳۱۸۷-۱۰/۹۳۴۵۷	۹/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
	۰/۵۰۵۸۰۱-۰/۶۱۸۰۲۴	۹/۹۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۱۰/۹۳۴۵۷-۱۳/۰۶۹۷	۷/۵۹	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
۰/۶۱۸۰۲۴-۱/۳۳۲۱۷۳	۹/۸۴	۰/۰۰	۰/۰۰۰		۱۳/۰۶۹۷-۱۰/۱۳۸۹	۷/۶۷	۰/۰۰	۰/۰۰۰			
PtC	۰-۰/۲۷۷۴۶۰۰۰۴۲۵۹	۹/۳۳	۷/۵۵	۰/۸۱۸		LULC	Rock	۰/۲۱	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
	۰/۰۰۴۲۵۹-۰/۰۰۲۵۹۸	۱۰/۱۴	۱/۶۰۴	۱/۵۸۲			Wood land	۲۰/۶۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
	۰/۰۰۲۵۹۸-۰/۰۰۱۶۴۹	۹/۸۹	۱۱/۳۲	۱/۱۴۵			Moderate Range	۱۳/۸۴	۱/۸۳	۰/۱۳۳	
	۰/۰۰۱۶۴۹-۰/۰۰۰۹۳۷	۱۰/۰۴	۲۰/۷۵	۲/۰۶۶			Light Forest	۱/۹۴	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
	۰/۰۰۰۹۳۷-۰/۰۰۰۳۲۵	۱۲/۳۲	۱/۹۸۱	۱/۶۰۷	۰/۰۰۰۹		Range	۴۰/۰۴	۴۴/۰۴	۱/۱۰۰	
	۰/۰۰۰۳۲۵-۰/۰۰۰۴۸۶	۱۲/۲۰	۳۳/۵۸	۱/۸۵۷			Agriculture	۲۰/۱۷	۱۰/۰۹	۰/۵۰۰	۰/۰۰۱۸
	۰/۰۰۰۴۸۶-۰/۰۰۱۴۳۵	۱۱/۱۲	۰/۹۴	۰/۰۸۵			Urban	۰/۴۹	۲/۷۵	۵/۶۱۸	
	۰/۰۰۱۴۳۵-۰/۰۰۲۶۲۱	۸/۷۷	۰/۰۰	۰/۰۰۰			Bare land	۰/۲۰	۰/۹۲	۴/۳۷۶	
	۰/۰۰۲۶۲۱-۰/۰۰۴۷۵۷	۸/۴۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰			Road	۰/۱۶	۰/۰۰	۰/۰۰۰	
۰/۰۰۴۷۵۷-۰/۰۳۲۹۸۹	۷/۳۹	۰/۰۰	۰/۰۰۰		Orchard	۱/۹۹	۳۸/۵۳	۱۹/۳۴			
Geology	Qsw-IX	۲۰/۷۵	۱۴/۱۵	۰/۶۸۲		River	۰/۳۳	۱/۸۳	۵/۶۱۸		
	Jch and Kab-VII	۱۳/۱۰	۲/۸۳	۰/۳۱۶		Altitude	۶۲۱-۸۹۳	۱۰/۰۷	۵۲/۸۳	۵/۲۴۴	
	Kad,Kat,JKSj and Knz-VI	۲۰/۴۴	۳/۷۷	۰/۱۸۵	۰/۰۰۰۴		۸۹۳-۱۰۰۵	۱۰/۰۲	۱۱/۳۲	۱/۱۲۹	
	Jmz-III	۱۲/۷۵	۰/۰۰	۰/۰۰۰			۱۰۰۵-۱۱۱۱	۱۰/۰۳	۲۶/۴۲	۲/۶۳۴	
	Ktr and Peps-IV	۱۴/۰۳	۰/۹۴	۰/۰۶۷			۱۱۱۱-۱۲۰۰	۱۰/۰۳	۰/۹۴	۰/۰۹۴	
Kk-V	۱۸/۹۴	۲۵/۳۰	۱/۱۳۵		۱۲۰۰-۱۲۷۴		۱۰/۰۰	۲/۸۳	۰/۲۸۳		
PIC	۰-۰/۲۹۵۴۱۰۰۰۳۸۱۶	۹/۶۸	۱/۸۹	۰/۱۹۵		۱۲۷۴-۱۳۶۹	۱۰/۰۱	۴/۷۲	۰/۴۷۱	۰/۰۰۰۵	
	۰/۰۰۳۸۱۶-۰/۰۰۲۱۶۴	۱۰/۵۱	۲/۸۳	۰/۲۶۹		۱۳۶۹-۱۶۱۰	۹/۹۶	۰/۹۴	۰/۰۹۵		
	۰/۰۰۲۱۶۴-۰/۰۰۱۲۲	۱۰/۶۵	۹/۴۳	۰/۸۸۶		۱۶۱۰-۱۹۳۴	۹/۹۹	۰/۰۰	۰/۰۰۰		
	۰/۰۰۱۲۲-۰/۰۰۰۵۱۲	۱۱/۰۳	۱۰/۳۸	۰/۹۴۰		۱۹۳۴-۲۲۱۳	۹/۹۶	۰/۰۰	۰/۰۰۰		
	۰/۰۰۰۵۱۲-۰/۰۰۰۰۴	۹/۶۸	۶۲/۲۶	۶/۴۳۴	۰/۰۰۱۲	۲۲۱۳-۲۶۹۸	۹/۹۱	۰/۰۰	۰/۰۰۰		
	۰/۰۰۰۰۴-۰/۰۰۰۰۶۶۸	۱۱/۸۹	۱۱/۳۲	۰/۹۵۲							
	۰/۰۰۰۶۶۸-۰/۰۰۱۳۷۶	۹/۱۰	۱/۸۹	۰/۳۰۷							
۰/۰۰۱۳۷۶-۰/۰۰۲۵۵۶	۱۰/۵۹	۰/۰۰	۰/۰۰۰								
۰/۰۰۲۵۵۶-۰/۰۰۴۴۴۴	۹/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰								
۰/۰۰۴۴۴۴-۰/۰۰۳۰۸۷۷	۷/۸۳	۰/۰۰	۰/۰۰۰								

پایین‌تر، کمترین تأثیر را بین پارامترهای موجود داشت که با مطالعات مجددی و همکاران ۲۰۱۷ مطابق بود [۵]. طول شیب در کلاس ۰-۰/۷۹۲۱۰۸ بیشترین تأثیر را با مقدار ۱۱/۱۴ دارد. اما وزن مدل SVM با مقدار ۰/۰۰۰۹- تأثیر کمی دارد که در مجموع، تأثیر این فاکتور را در مدل ترکیبی کاهش می‌دهد. از طرفی، شاخص همگرایی CI وزن‌های نسبتاً کمی را در طبقات مختلف نسبت فراوانی و همچنین SVM به خود اختصاص داد. شاخص TRI با مقدار

مقدار نسبت فراوانی در طبقه میانی AH ۰/۸۷۳۹۸۸-۰/۸۲۲۸۸۴ برابر با ۸/۵۰۴ بود و با توجه به صفر بودن اکثریت دیگر طبقات و نیز وزن ۰/۰۰۱-SVM، تأثیر زیادی بر وقوع سیل داشت. اما عمق دره VD در واقع با پراکنش نسبتاً برابر و مقدار کم نسبت فراوانی و وزن SVM ارتباط چندانی با مناطق مستعد سیل نداشت. زمین‌شناسی هم به همین دلایل با مقدار نسبت فراوانی

می‌افند، می‌تواند اثبات مناسبی برای این نتایج باشد که مؤید پژوهش‌های خیری‌زاده و همکاران (۱۳۹۲) و معروفی‌نیا و همکاران (۱۳۹۵) است [۳۵ و ۳۶].

در فاکتور میانگین بارش سالانه بیشترین مقدار در کلاس ۴۴۹/۴۶۶-۴۵۸/۹۷۲ قرار داشت و باقی وزن‌ها در طبقات بارش کلاس‌های پایین‌تر، پخش شدند که تأثیر بارش را در احتمال وقوع سیل کمتر کرد. البته، وزن SVM با مقدار ۰/۰۰۳ تا حدی مقدار تأثیر بارش را در احتمال وقوع سیل برای مدل ترکیبی جبران کرد که با مطالعات پرادهان (۲۰۱۰) و یوسف و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد [۱۶ و ۳۷].

تأثیر طبقات نخستین در عامل فاصله از رودخانه با توجه به نزدیک بودن آنها به رودخانه بیشتر از باقی کلاس‌ها بود. از طرفی، این تأثیر در وزن SVM نیز مشهود بود که مطابق یافته‌های ماندهار (۲۰۱۰) و لی و همکاران (۲۰۱۲) است [۳۸ و ۳۹].

در کاربری اراضی بیشترین مقدار نسبت فراوانی مربوط به طبقه باغ‌ها و پس از آن، اراضی مسکونی بود. در واقع، این طبقات کاربری به دلیل نزدیک بودن به حاشیه رودخانه‌ها و قرار گرفتن در شیب‌های کم مستعد سیل‌گیری هستند که با مطالعات نوحانی و همکاران (۱۳۹۵) و دارابی و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد [۴۰ و ۴۱].

به طور خلاصه، نتایج نشان داد در مدل FR-SVM، مؤثرترین پارامتر در مدل‌سازی احتمال وقوع سیل، شاخص TWI است. AH و SPI فاکتورهای مؤثر بعدی در مدل‌سازی سیل هستند. این عوامل به طور درخور توجهی بر رفتار رواناب تأثیر می‌گذارند و همچنین مناطق تجمع سیل را مشخص می‌کنند. سایر عوامل هیدرولوژیکی و مورفولوژیکی از جمله شیب، ارتفاع، بارندگی، فاصله از رودخانه، TRI و LS نیز در مناطق بالقوه سیل تأثیر دارند. با این حال، مدل FR-SVM زمین‌شناسی را به عنوان پایین‌ترین عامل تأثیرگذار در این منطقه مطالعه‌شده نشان داد.

در مدل مستقل SVM، کم‌تأثیرترین و مؤثرترین پارامترها همانند مدل FR-SVM زمین‌شناسی و TWI با وزن‌های ۰/۰۰۰۴ و ۰/۰۰۳۲ بود، اما ترتیب تأثیرگذاری سایر پارامترها تفاوت داشت. در این میان، ضریب برخی عوامل همچون AH، فاصله از رودخانه، شیب، طول شیب، ارتفاع و تحدب و تعقر طولی منفی است که تأثیر معکوس

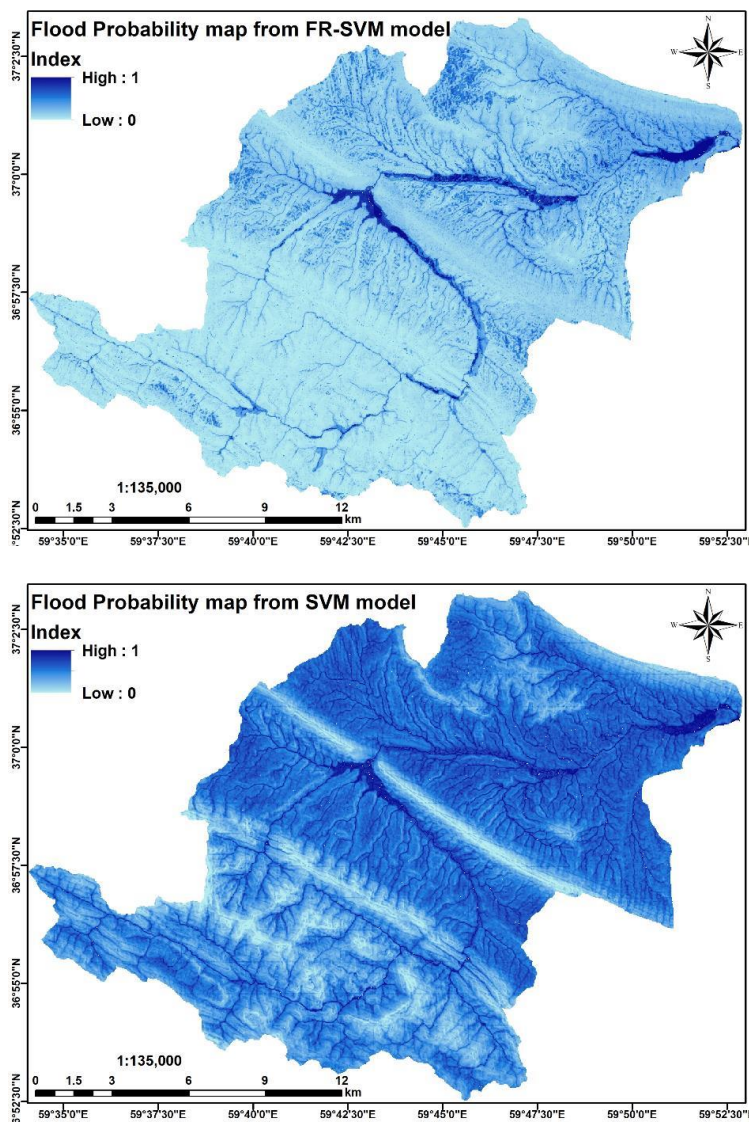
وزن ۵/۰۴۲ در طبقه خود (۰-۲/۱۹۰۸۹) و مقدار وزن SVM ۰/۰۰۲۳ جزء فاکتورهای نسبتاً مؤثر بود. با توجه به عامل انحنای عرضی نیز اعداد مثبت (کلاس‌های محدب) مشارکتی در مناطق سیل‌گیر نداشت، اما وزن کلاس‌های مقعر در تمامی طبقات تقسیم شد که در واقع همبستگی را با مناطق مستعد سیل‌گیری کاهش داد که هم‌راستا با یافته‌های تهرانی و همکاران (۲۰۱۵) است [۲].

در منطقه مطالعه‌شده، از لحاظ خصوصیات فیزیکی، تغییرات در ارزش شاخص TWI می‌تواند به طور مستقیم پتانسیل سیل را افزایش یا کاهش دهد. در اصل، با افزایش مقدار این شاخص، احتمال وقوع سیل بیشتر می‌شود. در مدل ترکیبی استفاده‌شده، بالاترین کلاس TWI (۹/۳۴۰ تا ۲۳/۷۲۴) بیشترین مقدار FR (۹/۲۲۷) را گرفت، در حالی که سایر کلاس‌های TWI مقدار بسیار کمی از FR (کمتر از یک تا صفر) را به دست آورد که نشان‌دهنده بیشترین همبستگی این کلاس با وقوع سیل است. مقدار وزن SVM هم ۰/۰۰۳۲ بود که بیشترین ارزش بین فاکتورها به حساب می‌آید. بنابراین، مقدار این شاخص در هر دو مدل ترکیبی FR-SVM و مستقل SVM بیشترین تأثیر را بر وقوع سیلاب آبخیز کلات دارد که با نتایج خسروی و همکاران (۱۳۹۵) و تهرانی و همکاران (۲۰۱۳) مطابق است [۶ و ۳۴].

در عامل انحنای طولی، دامنه‌های مثبت که دامنه‌های محدب به شمار می‌روند، وزن‌های صفر گرفتند که در حقیقت مستعد سیل‌گیری نیستند، در حالی که بیشترین وزن را یکی از کلاس‌های انحنای مقعر و پس از آن، کلاس انحنای مسطح به خود اختصاص داد که نشان می‌دهد این دامنه‌ها مستعد سیل‌گیر هستند. مقادیر زیادی از FR به کلاس‌های مختلف SPI اختصاص یافت، که نشان می‌دهد جریان‌های قدرتمند، مستعد سیل هستند. در عامل شیب بیشترین مقدار FR به کمترین طبقه شیب (صفر تا ۰/۰۸۸) درجه، با مقدار ۰/۴۴ اختصاص یافت. مقدار وزن SVM نیز ۰/۰۰۲۶- بود که نشان‌دهنده رابطه معنادار و معکوس شیب با سیل است و تأثیر زیاد این فاکتور را نشان می‌دهد. برای پارامتر طبقات ارتفاعی نیز بیشترین وزن مربوط به کمترین طبقه ارتفاعی منطقه (۶۲۱-۸۹۳) بود که در واقع نشان‌دهنده وقوع سیل در ارتفاعات پایین‌تر منطقه است. به طور کلی، رفتار طبیعی سیل نیز که به جای مناطق بسیار مرتفع، بیشتر در مناطق مسطح اتفاق

۰/۰۰۲۶ و -۰/۰۰۲۴ در شکل‌گیری سیل مؤثر بودند که با نتایج بوی و همکاران (۲۰۱۶) و هانگ و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد [۴۲ و ۴۳]. نقشه‌های احتمال وقوع سیل به دست آمده توسط SVM و FR-SVM، برای حوضه کلات در شکل ۵ نشان داده شده است.

این پارامترها در وقوع سیل را نشان می‌دهد. در بین ضرایب منفی، فاکتور شیب بیشترین تأثیر را دارد. به گونه‌ای که در شیب‌های کمتر احتمال وقوع سیل افزایش می‌یابد. پس از TWI پارامترهای بارش باران، TRI، شیب و فاصله از رودخانه به ترتیب با وزن‌های ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۰۳،



شکل ۵. نقشه‌های احتمال وقوع سیلاب خروجی مدل‌های SVM و FR-SVM

مشترک است. نقشه مدل FR-SVM نشان می‌دهد مناطق با بیشترین احتمال وقوع سیل بیشتر در نزدیکی کنار رودخانه نزدیک به خروجی منطقه مطالعه شده و به عکس، مناطقی با پتانسیل بسیار کم سیلاب در مناطق مرتفع بخش جنوبی آبخیز کلات واقع شده‌اند (شکل ۵).
به طور کلی، تجزیه و تحلیل پارامترهای محیطی و مناطق آسیب‌دیده در سیل‌های گذشته روشی بسیار

نقشه احتمال وقوع سیل بر اساس احتمال مدل شده که از صفر تا یک متغیر است. مقدار صفر بدون پیکسل احتمالی و مقدار یک، نشان‌دهنده ۱۰۰ درصد احتمال وقوع سیل است. مناطق با پتانسیل بالا در نزدیکی مناطق با شیب کم و نزدیک بستر رودخانه واقع شده است، در حالی که مناطق با پتانسیل کم در مناطق مرتفع با شیب زیاد قرار دارند. این یافته در همه نقشه‌های احتمال سیل

استفاده شد، در حالی که از داده‌های آزمایشی که طی فرایند مدل سازی (۳۰ درصد موجودی) درگیر نشده، برای فرایند اعتبارسنجی استفاده شد. ضریب k ، معیارهای ROC و PRC نشان دهنده رابطه معنادار بین واقعیت و مدل‌های آموزش دیده است. نتایج ارزیابی مدل‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

همان‌طور که از نتایج ارزیابی مدل‌ها در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقدار RMSE هم در واسنجی و هم در اعتبارسنجی برای مدل ترکیبی FR-SVM، کمتر از مدل مستقل SVM است که خطای کمتر این مدل را نشان می‌دهد. نتایج همچنین بیان کننده عملکرد بیشتر FR-SVM، هم در واسنجی و هم در اعتبارسنجی، در مقایسه با SVM بر اساس سایر معیارهای سنجش یعنی ضریب کاپا، ROC و PRC است. نتایج ارزیابی یکی از معیارها (ROC) برای نمونه به صورت نمودار در شکل ۶ آمده است.

مناسب در ارزیابی خطر سیل و شناسایی مناطق دارای پتانسیل سیل‌گرفتگی است که با نتایج پژوهش عرب عامری و همکاران (۱۳۹۶)، پالارد و همکاران (۲۰۰۹) و اپلت (۲۰۱۳) مطابقت دارد [۳۰، ۴۴ و ۴۵].

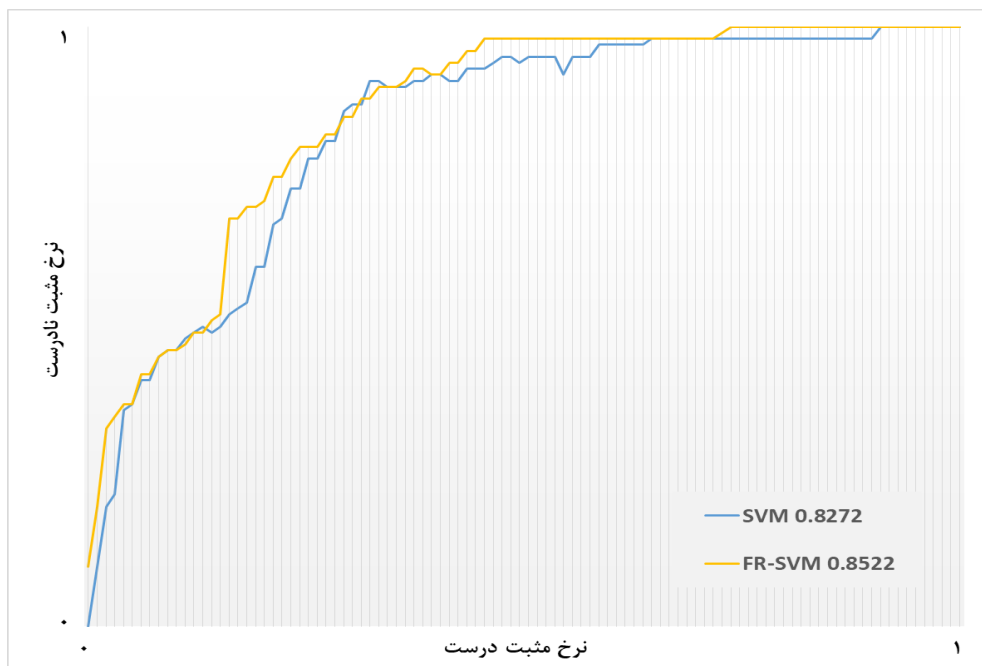
ارزیابی مدل‌های احتمال وقوع سیل

ارزیابی، گامی اساسی در مدل‌سازی است و بدون انجام آن، مدل‌ها و نتایج آنها اعتبار علمی نخواهند داشت. فرایند ارزیابی به وسیله مقایسه داده‌های موجود سیل با نقشه احتمال وقوع سیل تهیه شده، انجام شد. مدل‌های استفاده شده در مطالعه حاضر، با چهار معیار ارزیابی دقت RMSE، KC، ROC و PRC که نشان دهنده کارایی، صحت و اعتبار نقشه‌های احتمال سیل هستند، بررسی شدند [۱۶].

ارزیابی به دو بخش تقسیم شد: واسنجی و اعتبارسنجی. از نمونه‌های آموزشی نقاط سیل که ۷۰ درصد از کل داده‌های موجود است، برای واسنجی مدل

جدول ۳. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها

مدل	واسنجی				اعتبارسنجی			
	RMSE	Kappa	ROC	PRC	RMSE	Kappa	ROC	PRC
FR - SVM	۰/۲۶۲۵	۰/۸۳۳۳	۰/۹۳۱۲	۰/۹۴۵۲	۰/۳۱۴۵	۰/۷۹۵۶	۰/۸۵۲۲	۰/۸۸۶۲
SVM	۰/۳۲۶۱	۰/۶۹۹۵	۰/۸۴۸۲	۰/۸۹۷۲	۰/۳۳۵۹	۰/۶۴۳۰	۰/۸۲۷۲	۰/۸۰۵۲



شکل ۶. نمودار محدوده زیرمنحنی ROC

جلیل آباد در قسمت های جنوبی و مرکزی، شهر کلات در مرکز، و روستاهای خلج سفلی و نفته در خروجی آبخیز کلات و همچنین باغها در معرض خطر سیل قرار دارند. از آنجا که در آبخیز کلات در زمینه شناسایی مناطق مستعد سیلاب با استفاده از روش های هوشمند و مدل های ترکیبی سیلاب مطالعه ای صورت گرفته است، مطالعه حاضر می تواند بیان کننده وضعیت پتانسیل مناطق سیل گیر در آبخیز کلات باشد. نتایج و نقشه های تولید شده در مطالعه حاضر می تواند با در نظر گرفتن جنبه های مختلف مورفولوژیکی سیل همراه با تقویت پتانسیل مدل سازی سیلاب، برای ارزیابی و توسعه سیستم مدیریت سیل به منظور تصمیم گیری های بهتر آتی، مدیریت آب های سطحی و مقابله با شرایط نامطلوب کنونی، ارزشمند باشد. جلوگیری از ساخت وسازهای غیرقانونی در حریم بستر رودخانه کلات، راه اندازی سیستم هشدار سیل و استفاده از سیل بندها به خصوص در حاشیه رودخانه در شهر کلات، از جمله پیشنهادهایی است که می تواند تأثیر زیادی بر کاهش سیل و خسارت های ناشی از آن داشته باشد.

از آنجا که تهیه نقشه مناطق مستعد سیل به منظور مدیریت بهتر حوضه های آبخیز امری حیاتی و اجتناب ناپذیر است، ارزیابی مناطق حساس به سیل توسط بسیاری از محققان انجام شده است. در بین این تحقیقات نیاز به یک روش جامع و قابل اعتماد برای شناسایی مناطق مستعد سیل بیش از پیش احساس می شود. هرچند که مدل ساده SVM و ترکیبی FR-SVM در حوضه آبخیز کلات نتایج رضایت بخشی را به همراه داشت، اما استفاده از سایر روش های رایج هوشمند همچون روش رگرسیون لجستیک، تحلیل سلسله مراتبی، منطق فازی، شواهد وزنی، درخت تصمیم گیری و... در تعامل با تکنیک سنجش از دور به صورت مستقل و تلفیقی به منظور شناخت مناطق مستعد سیل در مطالعات آینده پیشنهاد می شود تا نتایج با اطمینان بیشتری در کارهای مدیریتی و اجرایی استفاده شود. همچنین، برای تحقیقات آتی، پیشنهاد می شود علاوه بر اجرای مدل ترکیبی قدرتمند پیشنهادی FR-SVM در سایر مناطق، برای آزمون قابلیت انتقال و اطمینان مدل، ارزیابی آسیب پذیری، خطر و ریسک سیل نیز صورت گیرد.

هرچه منحنی ترسیم شده از خط مرجع دورتر و سطح زیر نمودار بیشتر باشد، آزمون انجام شده دقیق تر است [۳۲]. به طور کلی، هر دو مدل، خطای قابل قبول و دقت زیادی از میزان واسنجی و اعتبارسنجی را نشان دادند. نتایج تأیید می کند که مدل ترکیبی FR-SVM با تنظیم بهتر، دقت بیشتری برای مدل کردن احتمال وقوع سیل در منطقه کلات دارد که با نتایج تهرانی و همکاران (۲۰۱۵) و مجددی و همکاران (۲۰۱۷) همخوانی دارد [۲ و ۵].

نتیجه گیری

با وجود تلاش های مختلف دولت ها برای مدیریت سیل، برخی شرایط مانند وضعیت توپوگرافی منطقه، افزایش جمعیت و تغییر کاربری اراضی، سیلاب را تشدید می کند. وقوع سیل های مخرب اخیر در آبخیز کلات، سبب بروز بسیاری از آسیب های جانی و مالی شد. مدیریت پایدار سیل، نیاز به اطلاعات صحیح و دقیقی برای مدل سازی احتمال وقوع سیل قابل اعتماد دارد. در مطالعات مختلف، روش های متعددی برای تهیه نقشه مناطق مستعد سیل پیشنهاد شده است. در مطالعه حاضر، دو مدل مستقل و ترکیبی با هم مقایسه شد. در این بررسی ها هرچند دقت هر دو روش در شناسایی مناطق مستعد سیلاب قابل قبول بود، اما سرانجام مدل ترکیبی FR-SVM با توجه به خطای کم، و دقت واسنجی و اعتبارسنجی بیشتر برای آبخیز کلات پیشنهاد شد. دلیل بیشتر بودن دقت در روش نسبت فراوانی - ماشین بردار پشتیبان نسبت به روش ماشین بردار پشتیبان مستقل، استفاده از نتایج روش نسبت فراوانی در این مدل و ترکیبی بودن آن است که با نتایج مطالعاتی که از تلفیق مدل ها بهره برده اند همچون تهرانی و همکاران (۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵)؛ خسروی و همکاران (۲۰۱۶)؛ بوی و همکاران (۲۰۱۶)؛ مجددی و همکاران (۲۰۱۷)؛ چپی و همکاران (۲۰۱۷)؛ هانگ و همکاران (۲۰۱۸) و بوی و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد [۲، ۵، ۶، ۷، ۱۰، ۲۱، ۲۸، ۴۲ و ۴۳].

با توجه به نتایج پژوهش، مناطق مستعد وقوع سیلاب در نزدیکی مناطق کم ارتفاع خروجی حوزه و دره های رودخانه کلات قرار داشت، در حالی که مناطق با پتانسیل کم سیل، در مناطق مرتفع با شیب زیاد در بخش های جنوبی منطقه قرار داشت. در این میان روستاهای ژرف، حمام قلعه و

منابع

- [1]. Rizeei HM, Azeez OS, Pradhan B, and Khamees HH. Assessment of groundwater nitrate contamination hazard in a semi-arid region by using integrated parametric IPNOA and data-driven logistic regression models. *Environmental monitoring and assessment*. 2018; 190(633): 1-17.
- [2]. Tehrany MS, Pradhan B, and Jebur MN. Flood susceptibility analysis and its verification using a novel ensemble support vector machine and frequency ratio method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2015; 29: 1149-1165.
- [3]. Rizeei HM, Pradhan B, and Saharkhiz MA. An integrated fluvial and flash pluvial model using 2D high-resolution sub-grid and particle swarm optimization-based random forest approaches in GIS. *Complex and Intelligent Systems*. 2019; 5: 283-302.
- [4]. Khosravi Kh, Pham BT, Chapi K, Shirzadi A, Shahabi H, Revhaug I, and et al. A comparative assessment of decision trees algorithms for flash flood susceptibility modeling at Haraz watershed, northern Iran. *Science of the Total Environment*, 2018. 627: p. 744-755.
- [5]. Mojaddadi H, Pradhan B, Nampak H, Ahmad N, and Ghazali AHB. Ensemble machine-learning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2017; 8(2): 1080-1102.
- [6]. Tehrany MS, Pradhan B, and Jebur MN. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of Hydrology*. 2013; 504: 69-79.
- [7]. Chapi K, Singh VP, Shirzadi A, Shahabi H, Bui DT, Pham BT, and et al. A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Environmental modelling and software*. 2017; 95: 229-245.
- [8]. Cao C, Xu P, Wang Y, Chen J, Zheng L, Niu C. Flash flood hazard susceptibility mapping using frequency ratio and statistical index methods in coalmine subsidence areas. *Sustainability*. 2016; 8: 948-964.
- [9]. Ghorbani MA, Azani A, and Naghipour N. A Comparison of Support Vector Machine Performance with Other Intelligent Models in Rainfall-Runoff Simulation. *Watershed Management*. 2016; 7(13): 99-103. [Persian].
- [10]. Tehrany MS, Pradhan B, and Jebur MN. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support-vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*. 2014; 512: 332-343.
- [11]. Rahmati O, Pourghasemi HR, Zeinivand H. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan province, Iran. *Geocarto Int*. 2016; 31: 42-70.
- [12]. Hoseinzadeh SR, Khanehbad M, and Khosravi A. Urban Flood Risk Zoning Using Paleo-flood Hydrology Data (Case Study: Kalat Naderi City, Khorasan Razavi). *Quantitative Geomorphology Research*. 2013; 3(1): 20-36. [Persian].
- [13]. Hoseinzadeh SR, Khanehbad M, and Khosravi A. Study of enormous floods in Kalat River using old level evidences. *Geographical studies of arid regions*. 2014; 5(17): 1-16. [Persian].
- [14]. Zare M. March, April and May 2019 Floods and Climate changes in Iran, with special sight to Khuzestan Province floods. 2019. The Academy of Sciences Islamic Republic of Iran. <http://www.ias.ac.ir/index.php/2015-09-21-08-02-04/1431-mehdi-zare-flood>. [Persian].
- [15]. Iranian Students' News Agency (ISNA). Khorasan, 20 April 2019, News Cod: 981-13190-5, Reporter Cod: 15043. <https://khorasan.isna.ir/default.aspx?NSID=5andSSLID=46andNID=145439>. [Persian].
- [16]. Pradhan B. Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. *Journal of Spatial Hydrology*. 2010; 9: 1-18.
- [17]. Merz B, Thielen AH, and Gocht M. Flood risk mapping at the local scale: concepts and challenges. In: *Flood risk management in Europe: innovation in policy and practice*. Advances in Natural and Technological Hazards Research. 2007; 25: 231-251.
- [18]. Shafizadeh Moghadam H, Valavi R, Shahabi H, Chapi K, and Shirzadi A. Novel forecasting approaches using combination of machine learning and statistical models for flood susceptibility mapping. *Journal of environmental management*. 2018; 217: 1-11.
- [19]. Botzen W, Aerts J, and Van den Bergh J. Individual preferences for reducing flood risk to near zero through elevation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2013; 18(2): 229-244.

- [20]. Maier HR, Jain A, Dandy GC, and Sudheer KP. Methods used for the development of neural networks for the prediction of water resource variables in river systems: Current status and future directions. *Environmental Modelling Software*. 2010; 25: 891-909.
- [21]. Khosravi K, Nohani E, Maroufinia E, and Pourghasemi HR. A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multicriteria decision-making technique. *Natural hazards*. 2016; 83(2): 947-987.
- [22]. Pike RJ. Diversity in quantitative surface analysis progress in *Physical Geography*. *Geomorphology*. 2000; 24:1-20.
- [23]. Ghanavati A, Saffari A, Beheshti A, and Mansourian A. Flood potential mapping using ensemble Hydrologic model CN-AHP in GIS. Case study: Balkholu River Basin. *Natural Geography Journal*. 2014; 7(52): 67-80. [Persian].
- [24]. Sarhadi A, Soltani S, and Modarres R. Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. *Journal of Hydrology*. 2012; 458: 68-86.
- [25]. Solaimani K. *Urban Flood Hydrology and Quantitative Modeling in GIS and SWMM Environment*. 1st ed. Mazandaran. Haraz University. 2015: p 322. [Persian].
- [26]. Townsend PA, and Walsh SJ. Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing. *Geomorphology*. 1998; 21: 295-312.
- [27]. Meyer V, Scheuer S, and Haase D. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde River, Germany. *Natural Hazards*. 2009; 48: 17-39.
- [28]. Bui DT, Panahi M, Shahabi H, Singh VP, Shirzadi A, Chapi A, and et al. Novel Hybrid Evolutionary Algorithms for Spatial Prediction of Floods. *Scientific Reports*. 2018; 8:(15364) 1-14.
- [29]. Rokach L. Ensemble-based classifiers. *Artificial Intelligence Review*. 2010; 33(1-2): 1-39.
- [30]. Arabameri A, Pourghasemi HM, and Shirani K. Flood susceptibility Zonation using a novel ensemble Bayesian-AHP model. Case study: Neka Basin, Mazandaran, Iran. *Ecology*. 2017; 4(2): 447-462. [Persian].
- [31]. Chapelle O, Vapnik V, Bousquet O, and Mukherjee S. Choosing multiple parameters for Support Vector Machines. *Machine Learning*. 2002; 46(1-3): 131-159.
- [32]. Samui P. Slope stability analysis: a support vector machine approach. *Environmental Geology*. 2008; 56(2): 255-267.
- [33]. Golshan M, Esmaeely A, and Khosravi Kh. Flood susceptibility evaluation of Talar Basin using FR model. *Natural Environment Hazards*. 2018; 7(15): 1-16. [Persian].
- [34]. Khosravi Kh, Maroufinia E, Nohani E, and Chapi K. Efficiency evaluation of Logistic Regression Model in flood susceptibility mapping. *Iranian Natural resources, Watershed Management*. 2016; 69(4): 863-876. [Persian].
- [35]. Kheyrizadeh M, Maleki J, and Amunia H. Flood hazard zonation in Mardagh Chay Basin using ANP Model. *Quantitative Geomorphology Researches*. 2013; 1(3): 56-71. [Persian].
- [36]. Maroufinia E, Nohani E, Khosravi Kh, and Chapi K. Evaluation of Statistical Index Method in Flood Susceptibility Mapping. *Water and Soil Science*. 2016; 26(2): 201-214. [Persian].
- [37]. Youssef AM, Pradhan B, and Hassan AM. Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery. *Environmental Earth Sciences*. 2011; 62: 611-623.
- [38]. Manandhar B. Flood plain analysis and risk assessment of Lothar Khola. MSc Thesis, Tribhuvan University, Phokara, Nepal. 2010. P 65.
- [39]. Lee MJ, Kang JE, and Jeon S. Application of frequency ratio model and validation for predictive flooded area susceptibility mapping using GIS. 32nd IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Munich, Germany. 2012; 895-898.
- [40]. Nohani E, Darabi F, Maroufinia E, and Khosravi Kh. Evaluation of Entropy Shannon model producing Flood probability and susceptibility mapping in Haraz Basin. *Natural Environment Hazards*. 2016; 5(10): 99-116. [Persian].
- [41]. Darabi H, Shahedi K, and Mardian M. Flood probability and susceptibility mapping using Frequency Ration Model in Pol Doaab Shazand Basin. *Journal of Watershed Engineering and Management*. 2016; 8(1): 68-79. [Persian].
- [42]. Bui DT, Pradhan B, Nampak H, Bui QT, Tran QA, and Nguyen QP. Hybrid artificial intelligence approach based on neural fuzzy inference model and metaheuristic optimization for flood susceptibility modeling in a highfrequency tropical cyclone area using GIS. *Journal of Hydrology*. 2016; 540: 317-330.
- [43]. Hong H, Tsangaratos P, Ilia I, Liu J, Zhua

- AX, and Chen W. 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*. 2018; 625: 575–588.
- [44]. Pallard B, Castellarin A, and Montanari A. A look at the links between drainage density and flood statistics. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009; 13(1): 1019–1029.
- [45]. Opolot E. Application of remote sensing and geographical information systems in flood management: a review. *Research Journal of Applied Science Engineering and Technology*. 2013; 6: 1884-1984.