



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

# پژوهش‌های آب‌نخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات آموزش ترویج کشاورزی

## پیش‌بینی الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان در آبخیز سیروان

عارف بهمنی<sup>۱</sup>، هیراد عبقری<sup>۲\*</sup>، امید رحمتی<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته دکتری تخصصی علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه

ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان

کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران

### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

هرساله در کشور سیلاب‌ها خسارت‌های مالی و تلفات جانی زیادی را به‌دنبال دارند. اگرچه ارزش علمی داده‌های موقعیت رخدادهای سیل، زیاد است اما در بسیاری از پژوهش‌های سیل، پهنه‌های سیل‌گیری صرفاً بر اساس دیدگاه کارشناسی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، مشخص شده‌اند. در این پژوهش الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان استان کردستان با استفاده از داده‌های مکانی رخداد سیل‌گیری در دهه گذشته پیش‌بینی شد و برای دستیابی به این هدف از مدل ماشین بردار پشتیبان به‌عنوان یک مدل مبتنی بر یادگیری ماشینی، استفاده شد.

#### مواد و روش‌ها

به‌منظور اجرای این پژوهش، نخست یک پایگاه داده در سامانه اطلاعات جغرافیایی برای رخدادهای سیل‌گیری آبخیز سیروان با استفاده از اطلاعات بانک سیل اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان تهیه شد. شمار ۱۰۲ رخداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان در بازه زمانی ده ساله (۱۳۹۵ تا ۱۴۰۴)، تأیید شد. از آنجایی که مدل‌های یادگیری ماشینی نیازمند نقاط با و بدون رخداد سیل‌گیری هستند، بر اساس روش واحدکاری، نقاط بدون رخداد سیل‌گیری نیز انتخاب شدند. این پایگاه داده با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده از مصاحبه حضوری با افراد بومی این منطقه تکمیل شد. بر اساس خصوصیات مختلف آبخیز سیروان و بررسی نتایج پژوهش‌های علمی، شانزده عامل مؤثر بر رخداد سیل‌گیری انتخاب شد و نقشه‌های رقومی آن‌ها تهیه شد.

نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات: h.abghari@urmia.ac.ir

استناد: بهمنی، ع.، عبقری، ه.، رحمتی، ا. ۱۴۰۵. پیش‌بینی الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان در آبخیز سیروان. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۹(۲): ۹۶-۱۱۵.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2025.371438.1645

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۵۱، تابستان ۱۴۰۵، صفحه‌های ۹۶ تا ۱۱۵.

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

© نویسندگان



عامل‌های مؤثر بر سیل‌گیری شامل بلندی، جهت دامنه، درصد شیب، شاخص همگرایی، تراکم زهکشی، کاربری زمین، بیشینه بارندگی ۲۴ ساعته، شمار بارش‌های با اندازه بیشتر از میانگین ایستگاه هواشناسی، شاخص بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی، انحنای سطح، انحنای مقطع، بافت خاک، فاصله از جریان، شاخص موقعیت پستی بلندی، شاخص رطوبت پستی بلندی و فاصله عمودی از آبراهه، بودند که در مدل‌سازی به‌عنوان متغیرهای مستقل، استفاده شدند. داده‌های رخداد و بدون رخداد سیل‌گیری به‌طور تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی با نسبت‌های ۷۰٪ و ۳۰٪ تقسیم شدند. پس از اجرای مدل ماشین بردار پشتیبان در محیط نرم‌افزار R، نقشه استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان تهیه شد و الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری، بررسی شد. دقت نقشه نامبرده با استفاده از آماره مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده، ارزیابی شد.

### نتایج و بحث

نتایج اعتبارسنجی نشان داد که دقت مدل ماشین بردار پشتیبان بر اساس اندازه مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده ( $AUC = 0.921$ ) برابر با ۹۲/۱٪ بود. بر اساس طبقه‌بندی رایج عملکرد مدل‌ها و با توجه به اینکه دقت مدل در پیش‌بینی مناطق مستعد سیل‌گیری بیشتر از ۹۰٪ به‌دست آمد، کارایی مدل ماشین بردار پشتیبان در آبخیز سیروان، بسیار خوب بود. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، درصد استعداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان در طبقه خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۵۱، ۱۰، ۱۷، ۲۰ و ۲٪ بود. برای اقدامات اجرایی و اولویت بندی مناطق در راستای مدیریت سیل بر پایه درصد استعداد سیل‌گیری، مشخص شد از میان ۱۲۷ زیرآبخیز سیروان شمار ۱۵ زیرآبخیز در طبقه استعداد سیل‌گیری زیاد و ۸ زیرآبخیز در طبقه استعداد سیل‌گیری خیلی زیاد است. تراکم جمعیت در تمام زیرآبخیزها در طبقه استعداد سیل‌گیری زیاد (مانند گازرخانه، پالنگان، شویشه، ساوجی، سلین، ساناو، زریبار و غیره) و زیرآبخیزها در طبقه استعداد سیل‌گیری خیلی زیاد (مانند سنندج، باباریز، مریوان، موجش، دولباغ، دورود و خامسان) نسبتاً زیاد است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج این پژوهش، عملکرد مدل ماشین بردار پشتیبان در شناسایی مناطق مستعد سیل‌گیری، بسیار خوب بود. بر اساس کمبود داده‌های تخصصی و منابع مالی در دستگاه‌های اجرایی، کاربرد این مدل در مدیریت و برنامه‌ریزی اقدامات اصلاحی آبخیزداری حائز اهمیت است. در این پژوهش، اولویت‌بندی زیرآبخیزهای اجرایی بر اساس شدت سیل‌گیری انجام شد. زیرا، در شرایط کمبود داده، ضمن صرفه‌جویی در زمان و منابع، موجب بهبود اثربخشی اقدامات اصلاحی آبخیزداری نیز خواهد شد. بر اساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود از مدل ماشین بردار پشتیبان در سطوح کلان‌تر استانی، منطقه‌ای و ملی و همچنین مطالعات تفصیلی-اجرایی آبخیزداری برای مدیریت خطر بهره گرفت.

### واژگان کلیدی

اولویت‌بندی، خطر، سیل، شبیه‌سازی، مدیریت آبخیز

### مقدمه

است و حتی ممکن است سهم زیادی از بارش سالانه در یک یا چند رخداد بارندگی محدود به زمین برسد (نبی‌نژاد و شوترامپف ۲۰۲۳). بخش‌های زیادی از کشور ایران نیز به‌دلیل شرایط اقلیمی و همچنین نابودی پوشش گیاهی و خاک در دهه‌های گذشته،

هرساله سیلاب‌ها موجب خسارت‌های سهمگینی بر زیرساخت‌ها شده و در برخی شرایط تلفات جانی زیادی به‌دنبال دارند (ابگاز و همکاران ۲۰۲۴). وضعیت بارندگی مناطقی از جهان با اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک خاص و از دیدگاه مکانی و زمانی نامنظم

شرایط مساعدی برای شکل‌گیری سیل دارند و هر ساله با بحران‌های ناشی از رخداد سیلاب روبرو هستند. در دهه گذشته با توجه به تغییر کاربری زمین و فشار زیاد بر بوم‌سازگان‌های مرتعی و جنگلی، شدت سیلاب‌ها افزایش چشمگیری داشته است. نابودی زیرساخت‌ها، مناطق مسکونی و عرصه‌های کشاورزی و منابع طبیعی به وسیله سیلاب‌ها از دیدگاه اقتصادی هزینه‌های زیادی را به کشور تحمیل کرده و بر پیشرفت اقتصادی کشور تأثیرگذار است. در این راستا، در فروردین‌ماه ۱۳۹۸ یک سیلاب شدید در استان کردستان رخ داد که خسارت‌های آن ۳۶۵۰ میلیارد ریال برآورد شد (خبرگزاری جمهوری اسلامی، کد خبر ۸۳۲۹۵۱۱۵). از این‌رو، انجام پژوهش‌های سیل در کشور بسیار ضروری است و برنامه‌های حفاظت آب و خاک و مدیریت و مهار سیلاب به تفکیک آبخیزهای کشور نیز باید تدوین شود. این موضوع مستلزم شناسایی پهنه‌های مستعد سیل‌گیری و ارائه نسخه‌های مدیریتی کاربری زمین و آگاه‌سازی جامعه‌های محلی از خطر سیل و دعوت به همکاری با دستگاه‌های اجرایی برای مهار و کاهش خطر سیل است (بابائی و همکاران ۲۰۲۰).

در سال‌های گذشته، پژوهشگران مناطق مستعد سیل‌گیری با استفاده از داده‌های تاریخی سیل را پیش‌بینی کرده‌اند. با توسعه مدل‌های آماری، داده‌کاوی و یادگیری ماشینی همراه با بسترهای تهیه و تفسیر لایه‌های رقومی عامل‌های محیطی مختلف، زمینه پژوهش سیلاب آبخیزها و شناسایی پهنه‌های سیل‌گیر فراهم شده است (خسروی و همکاران ۲۰۱۹، کاظمی و همکاران ۲۰۲۴). در گذشته، تخصیص منابع مالی به طرح‌های مهار سیل و آبخیزداری بدون توجه به نقشه‌های استعداد سیل و محل اجرای این اقدامات و صرفاً بر اساس دیدگاه کارشناسی بوده است. بدیهی است که در چنین شرایطی، بودجه‌های اجرایی غیربهبهینه به بخش‌های مختلف یک استان یا یک آبخیز اختصاص یافته و اندازه اثرگذاری اقدامات مهار سیل کارایی لازم را نداشته است.

بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام‌شده، پژوهشگران از مدل‌های یادگیری ماشینی و داده‌کاوی مختلف برای پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری استفاده کرده‌اند. پیشنهاد این پژوهشگران استفاده از نقشه استعداد سیل در برنامه‌های مدیریت سیلاب است (دودانگه و همکاران ۲۰۲۰، اسلام و همکاران ۲۰۲۱، وهبا و همکاران ۲۰۲۴). همچنین، عابدی و همکاران (۲۰۲۲) با به‌کارگیری داده‌های موقعیت سیلاب‌های گذشته و عامل‌های محیطی مختلف، نقشه استعداد سیل‌گیری را با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی، درخت وایزی تقویت‌شده<sup>۱</sup> و تقویت شیب شدید، تولید کردند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده دقت زیاد مدل جنگل تصادفی بود. در آبخیز کیسر استان مازندران، عرب‌عامری و همکاران (۲۰۲۲) با به‌کارگیری مدل ماشین بردار پشتیبان<sup>۲</sup> مناطق مستعد سیل‌گیری را شناسایی کردند و گزارش کردند که از نقشه به‌دست‌آمده می‌توان برای مدیریت سیلاب در مقیاس آبخیز استفاده کرد. افزون بر محدوده‌های طبیعی (مانند آبخیزها)، سلیم و همکاران (۲۰۲۲) در شهر برلین آلمان برای پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان استفاده کردند. نتایج ایشان بیانگر دقت زیاد مدل‌های یادگیری ماشینی در تجزیه و تحلیل مناطق مستعد سیل‌گیری در محیط‌های شهری بود. بر پایه نتایج این پژوهش‌ها، می‌توان نتیجه گرفت استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی برای پیش‌بینی استعداد سیل رو به گسترش است و آینده خوبی برای مدیریت و مهار سیلاب پیش‌بینی می‌شود. در دهه گذشته اگرچه سیلاب‌های پرشماری در آبخیز سیروان استان کردستان رخ داده است، اما پژوهش‌های محدودی در زمینه سیل انجام شده است (رضائی‌مقدم و همکاران ۲۰۱۶، رحمتی و همکاران ۲۰۲۴). با این وجود، پهنه‌های مستعد سیل‌گیری شناسایی نشده‌اند. از سوی دیگر، در این آبخیز نقشه‌های سیل‌گیری وجود ندارد. از این‌رو، عموماً اقدامات آبخیزداری بدون

1- Boosted regression trees

2- Support vector machine

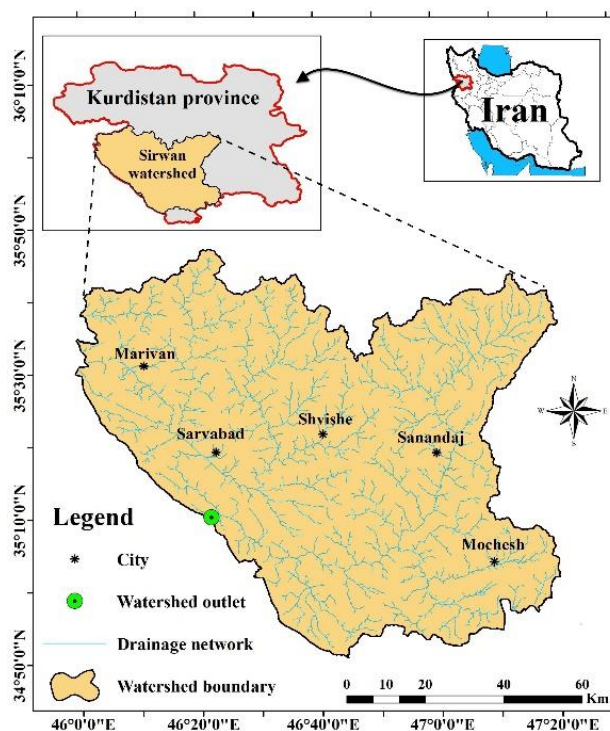
ناهمواری‌های زیادی دارد، به طوری که بلندی زمین در این آبخیز از ۷۰۸ تا ۳۰۱۰ متر متغیر است. کاربری‌های مختلفی در این آبخیز مشاهده شد و بیشترین سطح کاربری مربوط به جنگل، مرتع و زمین مسکونی بود. رودهای این منطقه پریچ و خم و نسبتاً ژرف است. شبکه زهکشی آبخیز سیروان را از بخش‌های مختلف به سمت جنوب‌غربی آبخیز سیروان هدایت می‌کنند. اقلیم این آبخیز از نوع معتدل مدیترانه‌ای است. براساس داده‌های بارندگی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۴، میانگین سالانه بارش آبخیز سیروان از دیدگاه مکانی از ۶۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر است. جریان خروجی این آبخیز به کشور عراق می‌ریزد. سنج، مریوان، سروآباد، شویشه و موجش از مناطق مسکونی شهری این آبخیز به‌شمار می‌آیند.

توجه به پیش‌بینی استعداد سیلاب انجام شده است. در این پژوهش، با در نظر گرفتن نقاط رخداد سیل در گذشته و همچنین تعیین عامل‌های مؤثر بر شکل‌گیری سیل، پهنه‌های مستعد سیلاب با استفاده از مدل یادگیری ماشینی شناسایی شد و دقت پیش‌بینی مدل به‌طور کمی ارزیابی شد. مدل ماشین بردار پشتیبان در شماری از کشورها برای پیش‌بینی مناطق مستعد سیل‌گیری استفاده شده است. اما، کارایی آن در مناطقی با پستی‌بلندی شدید مانند آبخیز سیروان ارزیابی نشده است.

### مواد و روش‌ها

#### معرفی منطقه مطالعه شده

منطقه مطالعه شده آبخیز سیروان در جنوب استان کردستان بود. این آبخیز یکی از پرآب‌ترین مناطق غرب کشور است و از دیدگاه پستی‌بلندی نیز



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز سیروان.

Figure 1- Geographical location of the Sirwan Watershed.

## روش پژوهش

## جمع‌آوری داده‌های سیل‌گیری

اطلاعات موقعیت مکانی رخداد‌های سیل‌گیری ارزشمند هستند و به‌وسیله آنها می‌توان داده‌های مهمی را برای مدل ماشین بردار پشتیبان فراهم آورد. در این پژوهش، داده‌های موقعیت مکانی رخداد سیل‌گیری به‌عنوان متغیر وابسته برای مدل استفاده شد. داده‌های موقعیت مکانی رخداد‌های سیل از بانک‌های اطلاعاتی دستگاه‌های اجرایی استان شامل شرکت آب منطقه‌ای، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری، هلال‌احمر و اداره کل راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای جمع‌آوری شد. ساختار این داده‌ها برداری<sup>۳</sup> بود و نشان‌دهنده موقعیت دقیق پهنه سیل بود. از دیدگاه زمانی، رخداد‌های سیل سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۴ در این پایگاه داده جمع‌آوری شدند. بر اساس بازدیدهای میدانی مستقیم و مصاحبه با افراد بومی هر منطقه (شامل دهیاری‌ها و افراد معتمد روستاها)، صحت داده‌های رخداد سیل‌گیری تأیید شد. افزون بر مصاحبه با جامعه‌های محلی که به‌طور چشمی سیلاب‌های گذشته را مشاهده کرده‌اند، در بازدیدهای میدانی رودهای منطقه مطالعه‌شده نیز آثار رخداد سیل مانند داغاب و بقایای گل و لای در بالای شاخه درختان، شواهد و نشانه‌های علمی مناسبی برای تأیید داده‌های رخداد سیل بودند. دستگاه موقعیت‌یابی جهانی<sup>۴</sup> (GPS) نیز برای ثبت مشاهده‌ها و ارزیابی صحت داده‌های سیلاب استفاده شد.

شمار ۱۰۲ رخداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان در بازه زمانی ده ساله (۱۳۹۵ تا ۱۴۰۴) برای استفاده در این پژوهش انتخاب شد (شکل ۲). از آنجایی که اجرای مدل ماشین بردار پشتیبان عموماً نیازمند داده‌های رخداد و بدون رخداد سیل است، بر اساس تحلیل‌های داده‌های موقعیت مکانی و بازدیدهای میدانی، نقاط بدون رخداد سیل‌گیری شناسایی شدند.

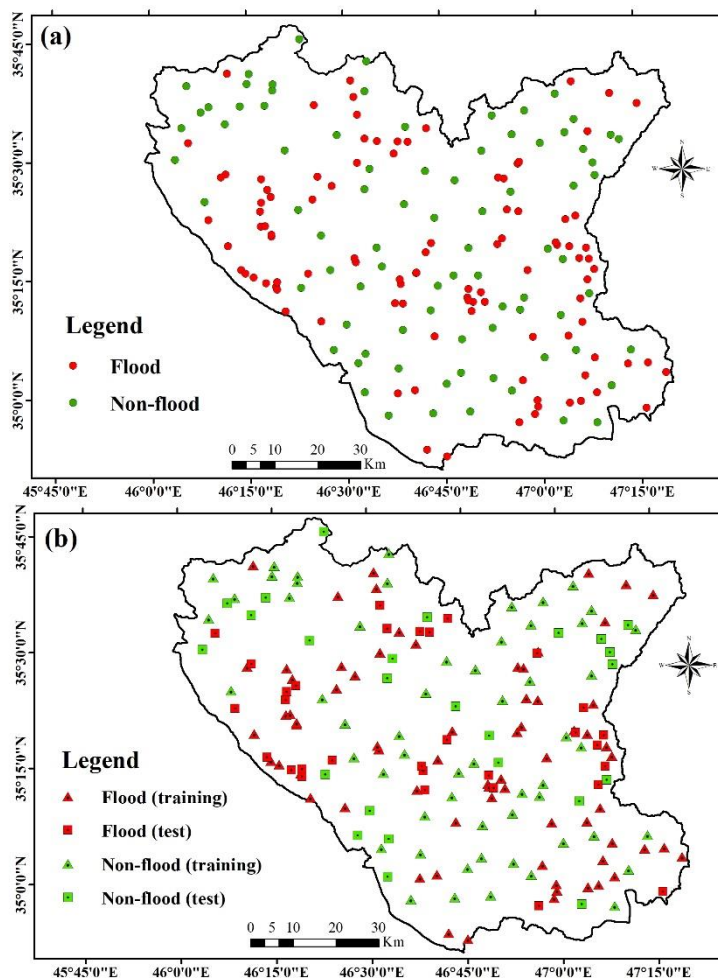
روش‌های مختلفی برای تعیین نقاط بدون رخداد سیل‌گیری وجود دارد. در این پژوهش، نقاط بدون

رخداد سیل‌گیری بر اساس روش واحدکاری انتخاب شدند. به‌منظور شناسایی واحدهای کاری که شرایط رخداد سیل‌گیری را ندارد، از روش پیشنهادی تهرانی و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شد. در این روش، پهنه‌هایی که در مناطق بلند بودند، شرایط لازم برای سیل‌گیری را نداشته و به‌طور واحدکاری شناسایی شدند. سرانجام، نقاط بدون رخداد سیل‌گیری به‌طور تصادفی در پهنه‌های نامبرده انتخاب شدند.

اجرای مدل‌سازی نیازمند دو گروه داده شامل آموزش و اعتبارسنجی است. داده‌های رخداد و بدون رخداد سیل به‌طور تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی (آزمون) تقسیم شدند. در گروه آموزش ۷۰٪ از مجموعه داده‌های رخداد و بدون رخداد سیل استفاده شد و بر اساس آن روابط میان متغیرها شناسایی شد و ساختار مدل ساخته شد. این در حالی است که در گروه داده‌های اعتبارسنجی از ۳۰٪ داده‌های رخداد سیل‌گیری که در مرحله اجرای مدل و آموزش استفاده‌نشده بود و صرفاً پس از اتمام مدل‌سازی و تولید نقشه استعداد سیل‌گیری برای ارزیابی کارایی مدل به‌کار گرفته شد. بدون استفاده از معیارهای ارزیابی و به‌کارگیری داده‌های گروه اعتبارسنجی، اعتبار مدل برای هرگونه پیش‌بینی تأیید نشد. موقعیت داده‌های گروه آموزش و گروه اعتبارسنجی به تفکیک نقاط رخداد و بدون رخداد سیل در شکل ۲ ارائه شده است. شمار ۷۱ رخداد سیل‌گیری در گروه آموزش و شمار ۳۱ رخداد سیل‌گیری در گروه اعتبارسنجی استفاده شد. داده‌های موقعیت سیل‌گیری و بدون سیل‌گیری به‌شکل برداری تهیه شد و برای ورود به مدل آماده شدند. از آنجایی که برای اجرای مدل در این پژوهش از نرم‌افزار R شد، نیازی به تبدیل داده‌های برداری به شکل‌های دیگر نبود و با این نرم‌افزار می‌توان اطلاعات برداری را فراخوانی کرد. از مزیت‌های مهم دیگر این نرم‌افزار، رایگان بودن آن است که فضای مناسبی برای انجام مدل‌سازی (مخصوصاً در کشورهای درحال توسعه) فراهم آورده است.

3- Vector

4- Global Positioning System



شکل ۲- موقعیت رخدادهای سیل‌گیری در آبخیز سیروان:

الف) موقعیت‌های رخداد سیل و بدون رخداد سیل و ب) تقسیم داده‌ها به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی.

Figure 2- Location of the flood inundation events in the Sirwan Watershed: a) locations of occurred flood and non-occurred flood and b) dividing training and validation groups.

در این پژوهش عامل‌های محیطی به‌عنوان متغیرهای مستقل (متغیرهای پیش‌بینی‌کننده) برای فرایند مدل‌سازی، استفاده شدند. متغیرهای محیطی نیز شامل بلندی، جهت شیب، شاخص همگرایی، تراکم زهکشی، کاربری زمین، شاخص بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، بیشینه بارش ۲۴ ساعته، شمار بارش‌های بزرگ‌تر از آستانه، انحنای سطح، انحنای مقطع، شاخص موقعیت پستی‌بلندی، درصد شیب، بافت خاک، فاصله از جریان، شاخص رطوبت پستی‌بلندی و فاصله عمودی از جریان بودند. لایه مدل رقومی ارتفاع زمین (DEM) منطقه پژوهشی از

انتخاب عامل‌های محیطی مؤثر بر رخداد سیل‌گیری اثرات عامل‌های محیطی مختلف آب‌شناختی، پستی‌بلندی، زمین‌ریخت‌شناختی، پوشش گیاهی، کاربری زمین، خاک‌شناسی و زمین‌شناسی بر رخداد سیل‌گیری زیاد است (چاودری و همکاران ۲۰۲۵). در این پژوهش، ۱۶ متغیر محیطی به‌عنوان عامل‌های اثرگذار بر شکل‌گیری سیل و رخداد سیل‌گیری بر اساس پژوهش‌های پیشین در این آبخیز (رضائی‌مقدم و همکاران ۲۰۱۶، رحمتی و همکاران ۲۰۲۴) و همچنین تحلیل‌های کارشناسی در بازدیدهای میدانی، انتخاب شدند.

شمار بارش‌های بزرگ‌تر از آستانه منطقه پژوهشی با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ تولید شد. نقشه بافت خاک نیز بر اساس داده‌های بانک جهانی خاک<sup>۶</sup> از سامانه گوگل ارث انجین تهیه شد. صحت طبقه‌های بافت خاک در بازدیدهای میدانی ارزیابی شد. نقشه‌ها با ماهیت برداری، در نرم‌افزار ArcGIS به شکل رستری و با اندازه سلول ۳۰ متر تبدیل شدند. به‌منظور اجرای مدل در محیط نرم‌افزار R، شکل لایه‌های متغیرهای مستقل به ASCII تبدیل شد.

#### بررسی هم‌خطی چندگانه عامل‌های محیطی

بررسی هم‌خطی چندگانه قبل از اجرای مدل‌ها ضروری است. از دیدگاه آماری، هم‌خطی چندگانه<sup>۷</sup>، هنگامی رخ می‌دهد که میان متغیرهای مستقل همبستگی وجود دارد. هنگامی که بدون توجه به آزمون‌های هم‌خطی چندگانه، مدل‌سازی انجام شود، اعتبار مدل قابل تأیید نیست؛ زیرا درجه اهمیت متغیرهای مستقل در مدل‌سازی صحیح نیست (چان و همکاران ۲۰۲۲). در این پژوهش، از آماره عامل تحمل<sup>۸</sup> برای بررسی وضعیت هم‌خطی چندگانه متغیرهای مستقل استفاده شد.

آماره تحمل با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (سلیمان و همکاران ۲۰۲۱).

$$TOL = R_{ij}^2 - 1 \quad (1)$$

TOL: آماره تحمل و  $R_{ij}^2$  ضریب تعیین دو متغیر  $i$  و  $j$  است.

تمام متغیرهای مستقل دوجه‌دو با یکدیگر در این آزمون سنجیده و آماره تحمل برای آن‌ها محاسبه شد. در شرایطی که اندازه آماره تحمل کمتر از ۰/۱ باشد، مشکل هم‌خطی چندگانه در میان متغیرهای مستقل وجود دارد (دوتا و دکا ۲۰۲۴). در این شرایط، یکی از متغیرها که همبستگی زیادی با دیگر متغیرها دارد، از فهرست متغیرهای مستقل حذف می‌شود.

#### مدل ماشین بردار پشتیبان

پایگاه تصویرهای سنجنده SRTM<sup>۵</sup> دریافت شد. قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع از سنجنده SRTM ۳۰ متر بود. لایه‌های جهت دامنه، شاخص همگرایی، تراکم زهکشی، انحنا سطح، انحنا مقطع، شاخص موقعیت پستی‌بلندی، شیب زمین، فاصله از جریان، شاخص رطوبت پستی‌بلندی و فاصله عمودی از آبراهه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع زمین و در نرم‌افزارهای ArcGIS و SAGA-GIS به شکل رستری، تهیه شدند. به‌منظور یکسان‌سازی لایه‌های عامل‌های محیطی، اندازه سلول لایه‌های رستری ۳۰ متر در نظر گرفته شد. در شرایطی که اندازه سلول لایه‌های عامل‌های محیطی یکسان نبود، مدل ماشین بردار پشتیبان اجرا نشد و کاربرد با خطا روبرو شد. افزون بر اندازه سلول لایه‌های رستری مربوط به عامل‌های محیطی، نوع سامانه مختصات و شمار سطر و ستون لایه‌های رستری باید یکسان باشد. در این پژوهش سامانه مختصات تمام لایه‌های رقومی به متریک (UTM) تبدیل شد.

نقشه کاربری زمین از پایگاه اطلاعاتی نقشه جهانی کاربری زمین شرکت ESRI دریافت شد که با استفاده از روش یادگیری عمیق و بر اساس تصویرهای سنجنده سنتینل ۲ در سال ۲۰۲۰ تهیه‌شده بود (کارا و همکاران ۲۰۲۱). نقشه کاربری زمین بر اساس بازدیدهای میدانی تدقیق شد. شاخص بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) بر اساس تصویرهای سنجنده سنتینل ۲ در بازه زمانی مربوط به رخداد سیل‌ها (میانگین فصل‌های بهار سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۴) در سامانه گوگل ارث انجین تهیه شد.

اندازه بیشینه بارش ۲۴ ساعته هر ایستگاه هواشناسی درون و پیرامون منطقه پژوهشی بر اساس داده‌های بارندگی محاسبه شد. سپس، نقشه بیشینه بارش ۲۴ ساعته آبخیز سیروان با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ تولید شد.

شمار بارش‌های بزرگ‌تر از آستانه هر ایستگاه هواشناسی به گونه‌ای محاسبه شد که اندازه آستانه، میانگین بلندمدت هر ایستگاه باشد. از این‌رو، نقشه

6- Soil Grid  
7- Multicollinearity  
8- Tolerance

5- Space Shuttle Radar Topography Mission

مدل ماشین بردار پشتیبان<sup>۹</sup> یکی از روش‌های قدرتمند یادگیری نظارت‌شده است که برای مسائل طبقه‌بندی و در برخی شرایط برای وایزی به‌کار گرفته می‌شود. ایده اصلی این مدل یافتن یک فرآیند<sup>۱۰</sup> است که بتواند داده‌ها را به بهترین شیوه به دو یا چند دسته مجزا تقسیم کند. شیوه انتخاب این ابرصفحه به‌گونه‌ای است که فاصله آن تا نزدیک‌ترین نقاط هر طبقه که بردارهای پشتیبان نام دارند، بیشترین فاصله باشد. با افزایش حاشیه میان طبقه‌ها به‌وسیله ماشین بردار پشتیبان می‌توان قدرت تعمیم‌دهی مدل را افزایش داد. در حالت خطی، داده‌ها به‌طور مستقیم به‌وسیله یک ابرصفحه جدا می‌شوند، اما در شرایطی که داده‌ها غیرخطی باشند، با استفاده از توابع هسته‌ای<sup>۱۱</sup>، داده‌ها به یک فضای با ابعاد بزرگ‌تر نگاشت می‌شوند تا جداسازی خطی در آن فضا امکان‌پذیر شود. توابع هسته‌ای متداول شامل خطی، چندجمله‌ای و شعاعی هستند. آموزش این مدل معمولاً با حل یک مسئله بهینه‌سازی محدب انجام می‌شود تا ضریب‌های بردار وزن و بایاس تعیین شوند. یکی از ویژگی‌های مهم این مدل، استفاده از زیرمجموعه‌ای از داده‌ها (بردارهای پشتیبان) برای تصمیم‌گیری پایانی است که باعث کاهش پیچیدگی محاسباتی و افزایش کارایی آن می‌شود. در کاربردهای طبقه‌بندی، با استفاده از ماشین بردار پشتیبان می‌توان مرزهای تصمیم بسیار دقیق و پایدار ایجاد کرد، به‌ویژه در داده‌هایی با ابعاد زیاد عملکرد این مدل مناسب است. مدل ماشین بردار پشتیبان کرنل‌های مختلفی شامل خطی، منحنی، تابع پایه شعاعی و چندجمله‌ای دارد. کرنل روی ساختار مدل اثرگذار است. در این پژوهش بر اساس یافته‌های تهرانی و همکاران (۲۰۱۴) مبنی بر دقت زیاد کرنل‌های تابع پایه شعاعی، از کرنل تابع پایه شعاعی استفاده شد. هنگامی که از کرنل تابع پایه شعاعی در مدل ماشین بردار پشتیبان استفاده می‌شود، تنظیم سنج‌های گاما (γ) و هزینه (C) برای ساختار مدل ضروری است. با

سنجه گاما می‌توان اندازه اثرگذاری هر یک از داده‌ها بر شکل تابع تصمیم در ساختار مدل را تعیین کرد. با افزایش سنج گاما در مدل می‌توان بر جزئیات محلی تمرکز کرد و حساسیت مدل به تغییرات را افزایش داد، اما، اندازه زیاد آن نیز سبب افزایش خطر بیش‌برازش می‌شود. سنج هزینه، اندازه حساسیت مدل در برابر خطاهای طبقه‌بندی را مهار می‌کند. با افزایش سنج هزینه در مدل می‌توان روی داده‌های آموزشی بیشتر تمرکز کرد و خطاها را کاهش داد، اما احتمال بیش‌برازش نیز افزایش می‌یابد (واینر و فونسکا ۲۰۲۱). در این پژوهش، برای یافتن ساختار مناسب مدل، اندازه متفاوت این سنج‌ها ارزیابی شد و سرانجام ساختار مدل نهایی شد.

به‌منظور اجرای مدل یادگیری ماشینی در محیط نرم‌افزار R از بسته sdm استفاده شد. به‌منظور استفاده از بسته sdm، باید شکل متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته به‌ترتیب شکل ASCII و Shapefile باشند. بر این اساس در این پژوهش، با توجه به پیچیدگی ارتباط میان عامل‌های محیطی و همچنین غیرخطی بودن پدیده سیل‌گیری، مدل ماشین بردار پشتیبان انتخاب و کارایی آن ارزیابی شد.

#### اعتبارسنجی نتایج مدل

ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل در هنگام مواجه با داده‌های جدید (داده‌هایی که در مرحله آموزش مدل استفاده نشده‌اند) اعتبارسنجی مدل نامیده می‌شود. اعتبارسنجی یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش‌های مدل‌سازی است و بدون انجام آن نتایج مدل‌سازی اعتبار علمی ندارد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، داده‌های رخداد سیل‌گیری (متغیر وابسته) به‌طور تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی تقسیم شدند. آزمون اعتبارسنجی فقط بر اساس داده‌های گروه اعتبارسنجی انجام می‌شود (چوبین و همکاران ۲۰۲۳). در این پژوهش از مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) به‌عنوان معتبرترین آماره ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل استفاده شد (رحمتی و همکاران ۲۰۱۹). ماهیت این آماره مستقل از آستانه است و بدون دخالت دیدگاه

9- Support Vector Machine

10- Hyperplane

11- Kernel Functions

تغییرات بلندی در این آبخیز واضح بود و اندازه بلندی از حدود ۷۰۰ تا ۳۰۱۰ متر متغیر بود (شکل ۳a). تغییرات بلندی در یک آبخیز می‌تواند سرمنشأ بسیاری از ویژگی‌های آب‌شناختی و زمین‌ریخت‌شناختی باشد.

بر اساس نقشه جهت‌های دامنه، در این آبخیز ۹ طبقه مختلف برای جهت‌های دامنه در نظر گرفته شد. هر دامنه از دیدگاه اندازه دریافت انرژی خورشیدی، استقرار پوشش گیاهی، تحول خاک، رطوبت خاک و رفتارهای آب‌شناختی متفاوت بودند (شکل ۳b).

اندازه‌های خیلی کم و خیلی زیاد شاخص همگرایی در این آبخیز مربوط به قسمت‌های گوناگون بود (شکل ۳c). در بخش‌هایی که شاخص همگرایی زیاد است، جریان‌های سطحی به راحتی یکی می‌شوند و به شکل جریان یکپارچه و با آبدهی بیشتر به رودهای آبخیز وارد می‌شوند (ادریس و همکاران ۲۰۲۲). در بخش‌هایی که شاخص همگرایی کمتر است، شرایط ظاهری زمین برای تجمع جریان‌ها فراهم نیست. از این رو، با استفاده از این شاخص می‌توان اطلاعات مناسبی برای درک فرایند شکل‌گیری سیل برای بهره‌گیری کارشناسان فراهم آورد.

تراکم زهکشی آبخیز سیروان از صفر تا ۲/۳ کیلومتر بر کیلومتر مربع متغیر بود. در این آبخیز بیشترین تراکم زهکشی مربوط به بخش‌های شرقی و شمال‌غربی بود (شکل ۳d).

بر پایه نقشه کاربری زمین در آبخیز سیروان هفت کاربری مختلف زمین شامل کاربری کشاورزی، باغ، جنگل، مسکونی، زمین بایر، پهنه‌های آبی و مراتع شناسایی شدند (شکل ۳e). بیشترین سطح کاربری در این آبخیز به ترتیب مربوط به کاربری‌های جنگل و کشاورزی بود.

شاخص بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی نیز نشان‌دهنده وضعیت تراکم پوشش گیاهی بود که در این آبخیز اندازه آن از اندازه‌های منفی تا ۰/۶۱۹ متغیر بود. دلیل اندازه‌های منفی وجود پهنه‌های آبی در این آبخیز است. هرچه اندازه این شاخص بزرگ‌تر باشد، تراکم پوشش گیاهی نیز بیشتر است (شکل -

کارشناسی محاسبه می‌شود (فراتینی و همکاران ۲۰۱۰). برای محاسبه این آماره، ابتدا خروجی مدل به همراه داده‌های گروه اعتبارسنجی وارد نرم‌افزار آماری MedCalc می‌شود و منحنی مشخصه عملکرد گیرنده رسم می‌شود. مساحت زیر این منحنی نشان‌دهنده اندازه دقت مدل است. بر اساس دقت به دست آمده، می‌توان عملکرد مدل را نیز طبقه‌بندی کرد.

#### الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان

در این پژوهش، نتیجه مدل یک نقشه رستری بود که نشان‌دهنده الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان در هر سلول بود. این نقشه به عنوان استعداد رخداد سیل‌گیری نیز معرفی شد. به بیان دیگر، بازه تغییرات اندازه عددی این نقشه از صفر تا یک است و هرچه اندازه آن به عدد یک نزدیک‌تر شود، استعداد سیل‌گیری نیز بیشتر می‌شود. پس از تولید این نقشه، به منظور درک بهتر و استفاده بیشتر آن به وسیله کارشناسان دستگاه‌های اجرایی، نقشه رستری در نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی به پنج طبقه مختلف استعداد سیل‌گیری (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد) طبقه‌بندی شد.

#### نتایج و بحث

عامل‌های محیطی مؤثر بر سیل‌گیری آبخیز سیروان پدیده سیل با فرایندی پیچیده که در اثر مشارکت عامل‌های محیطی مختلف رخ می‌دهد و معمولاً خسارت‌های زیادی را به وجود می‌آورد. در این پژوهش، بر اساس بررسی نتایج پژوهش‌های علمی، مشاهده‌های میدانی و تحلیل‌های کارشناسی ۱۶ عامل محیطی مؤثر بر سیل‌گیری از دیدگاه‌های گوناگون شامل اقلیم، پستی بلندی، کاربری زمین، پوشش گیاهی، خاک‌شناسی، آب‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی انتخاب شدند که نقشه آنها در شکل ۳ ارائه شده است. بر پایه شکل ۳، تغییرات مکانی و تنوع عامل‌های محیطی در آبخیز سیروان از دیدگاه‌های بررسی شده بیانگر آن است که تجسم و تحلیل نقش این عامل‌ها در شکل‌گیری سیل به سادگی امکان‌پذیر نیست.

آبخیز نامبرده مربوط به قسمت‌های جنوب‌غربی بود (شکل-۳۱).

بر پایه نقشه بافت خاک در آبخیز سیروان هشت طبقه گوناگون از بافت خاک شناسایی شد (شکل-۳m). بیشترین سطح از بافت خاک در این آبخیز مربوط به طبقه‌های بافت خاک لومی رسی سیلنتی و لومی سیلنتی بود.

شاخص فاصله از جریان در این آبخیز نشان داد برخی از مناطق به آبراهه‌ها و رودها نزدیک هستند و برخی دیگر فاصله طولی زیادی با مجاری زهکشی دارند. اندازه این شاخص در آبخیز سیروان از صفر تا بیش از دو هزار متر متغیر بود (شکل-۳n).

اندازه شاخص رطوبت پستی‌بلندی نیز در این آبخیز از صفر تا ۲۳ متغیر بود (شکل-۳o). در مناطقی که شاخص رطوبت پستی‌بلندی بیشترین اندازه بود، اندازه جریان آب نیز در بالادست بیشتر بود و شرایط پایین‌دست این مناطق نیز برای ماندابی شدن جریان و رخداد سیل‌گیری مناسب بود. بیشترین اندازه این شاخص در این آبخیز مربوط به قسمت‌های شمال‌غربی، شرقی و جنوبی بود.

اندازه شاخص فاصله عمودی از جریان نیز به‌عنوان یکی از متغیرهای مهم از دیدگاه خروجی جریان از ظرف آبراهه‌ها و رودها و ورود جریان به زمین دشت سیلابی در این آبخیز از صفر تا ۹۷۳ متر متغیر بود (شکل-۳p). این شاخص بیانگر آن بود که مناطقی که فاصله عمودی سطح زمین تا جریان کمتری دارند، در شرایطی که فاصله طولی آن‌ها نسبت به شبکه زهکشی کم باشد، عموماً مستعد رخداد سیل هستند.

۳f). از این‌رو، بیشترین تراکم پوشش گیاهی در قسمت‌های شمال‌غربی آبخیز سیروان بود. نقش تغییرات مکانی تراکم پوشش گیاهی در مقیاس آبخیز به‌نوبه خود در تشکیل رواناب و ایجاد سیل، بسیار مهم است. اندازه این شاخص در قسمت‌هایی از این آبخیز که میان صفر تا ۰/۲۵ بود، پوشش گیاهی خاک نیز مناسب نبود.

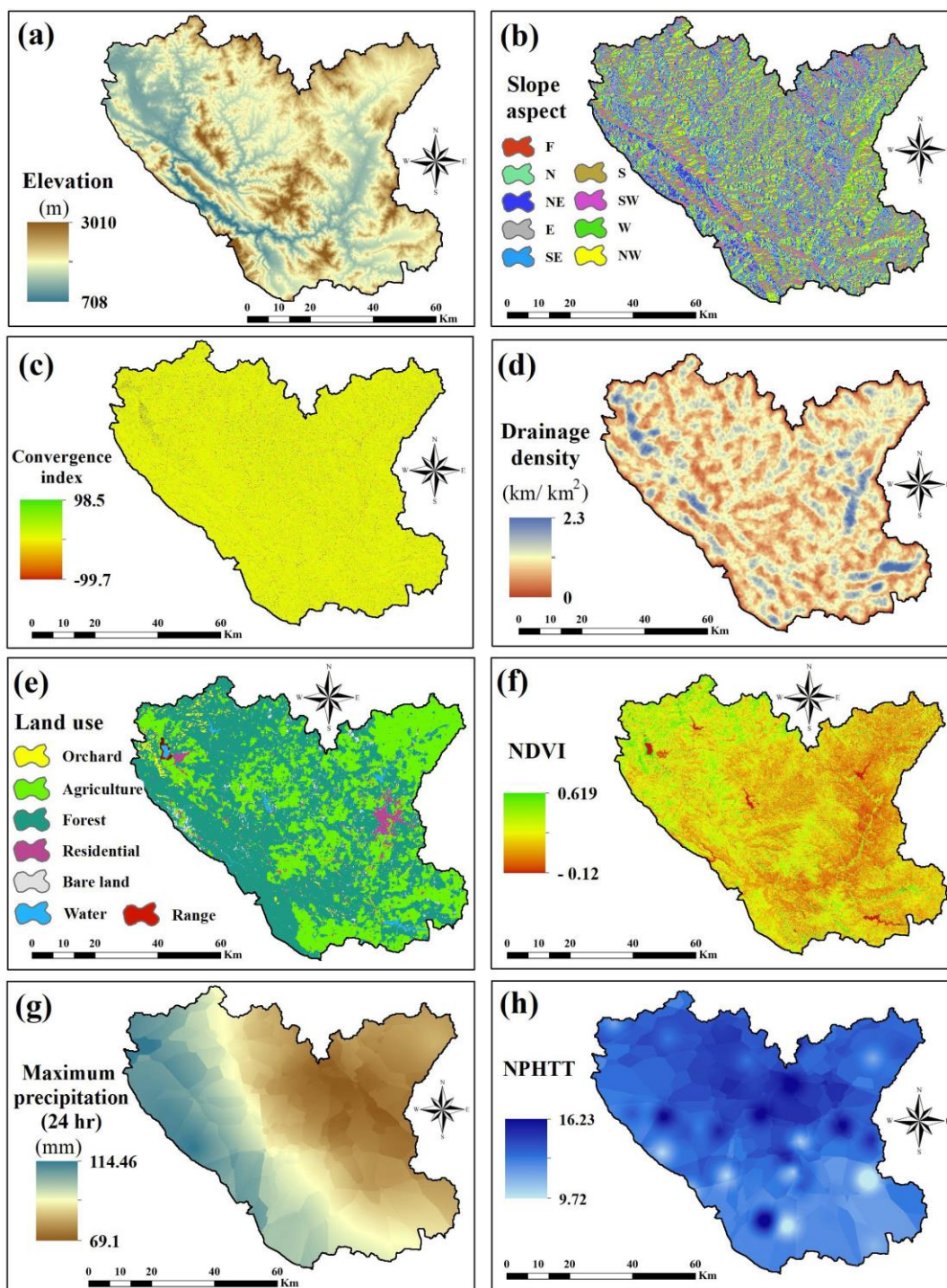
اندازه بیشینه بارش ۲۴ ساعته در آبخیز سیروان از ۶۹/۱ تا ۱۱۴/۴۶ میلی‌متر بر ساعت متغیر بود. بیشترین اندازه این شاخص در مقایسه با دیگر قسمت‌های این آبخیز مربوط به مناطق غربی و شمال‌غربی بود (شکل-۳g).

اندازه شاخص شمار بارش‌های بزرگ‌تر از آستانه در آبخیز سیروان از حدود ۶ تا ۱۶ رخداد متغیر بود (شکل-۳h). این متغیر نشان داد که بارش‌های سنگین که عامل اصلی شکل‌گیری سیلاب‌ها هستند، در کدام قسمت‌های آبخیز بیشتر تکرار شده‌اند.

نقشه‌های انحای سطح و انحای مقطع، نیز به‌ترتیب نشان‌دهنده انحای سطح زمین از دیدگاه‌های افقی و عمودی بودند. بر پایه نقشه‌های انحای سطح و انحای مقطع، دامنه‌ها به طبقه‌های محدب، مقعر و تخت دسته‌بندی شدند (شکل-۳ j i).

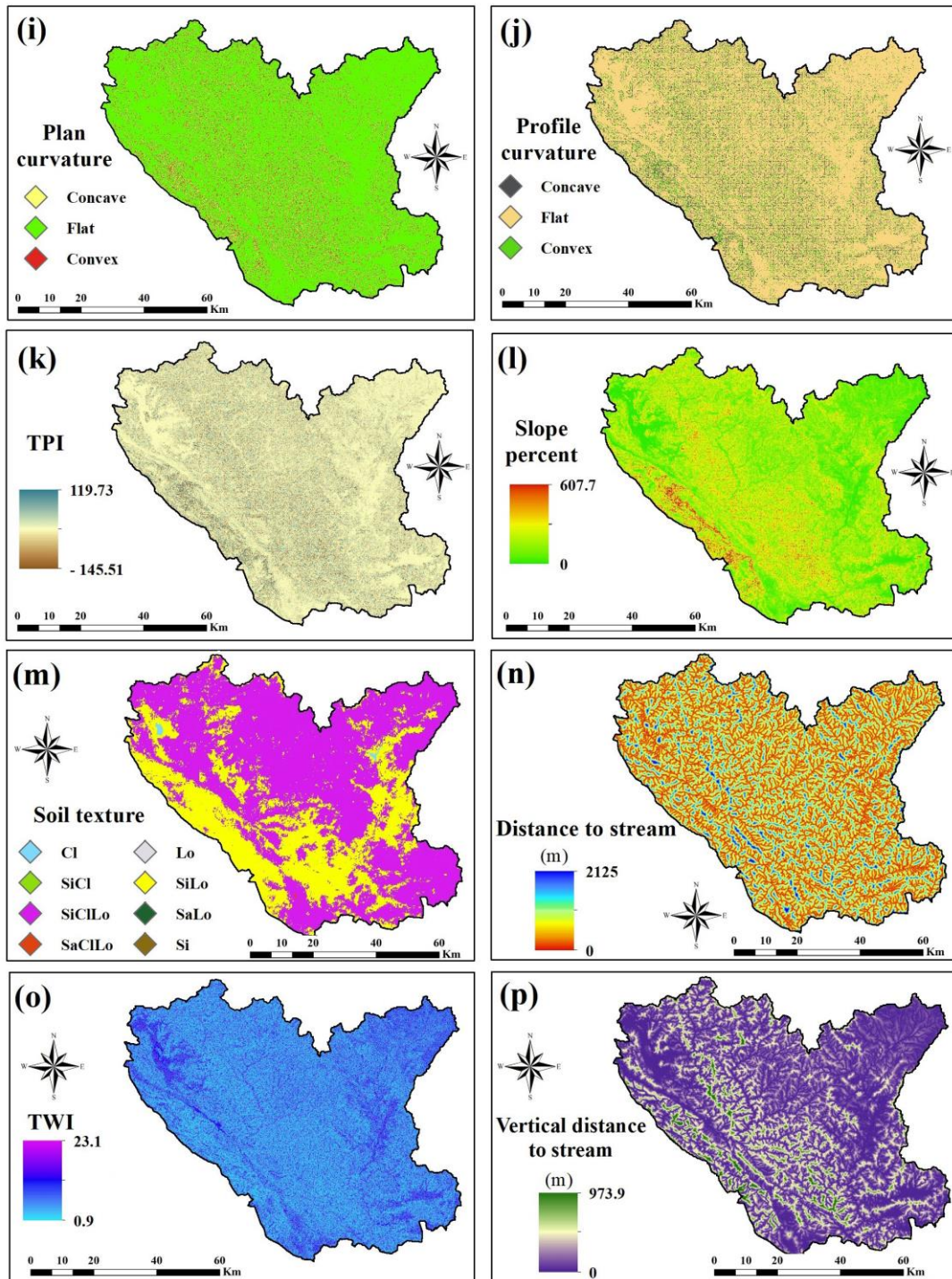
شاخص موقعیت پستی‌بلندی در این آبخیز نشان‌دهنده تغییرات زیاد مکانی پستی‌بلندی در این آبخیز بود و بیشترین اندازه این شاخص مربوط به بخش‌های غربی بود (شکل-۳k).

اندازه شاخص شیب زمین در این آبخیز از صفر تا بیش از ۶۰۰ متغیر بود. بیشترین اندازه این شاخص در



شکل ۳- متغیرهای مستقل برای پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان: (a) بلندی، (b) جهت شیب، (c) شاخص همگرایی، (d) تراکم زهکشی، (e) کاربری زمین، (f) شاخص بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی، (g) بیشینه بارش ۲۴ ساعته، (h) شمار بارش‌های بزرگ‌تر از آستانه، (i) انحنا سطح، (j) انحنا مقطع، (k) شاخص موقعیت پستی‌بلندی، (l) درصد شیب بافت خاک، (m) فاصله از جریان، (n) شاخص رطوبت پستی‌بلندی و (p) فاصله عمودی از جریان.

Figure 3- Independent variables for predicting flood susceptibility in the Sirwan Watershed: a) elevation, b) slope aspect, c) convergence index, d) drainage density, e) land use, f) NDVI, g) maximum precipitation 24hr, h) NPHTT, i) plan curvature, j) profile curvature, k) topographic position index (TPI), l) slope percent, m) soil texture, n) distance from stream, o) topographic wetness index (TWI), and p) vertical distance from stream.



شکل ۳- ادامه.

Figure 3- Continued.

مکانی رخدادهای سیل در این آبخیز تولید شد در شکل ۴ نشان‌داده شده است. اندازه ارزش عددی سلول‌های نقشه به‌دست آمده از مدل‌سازی در حالت

الگوی مکانی استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان نقشه استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان که با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان و بر اساس داده‌های

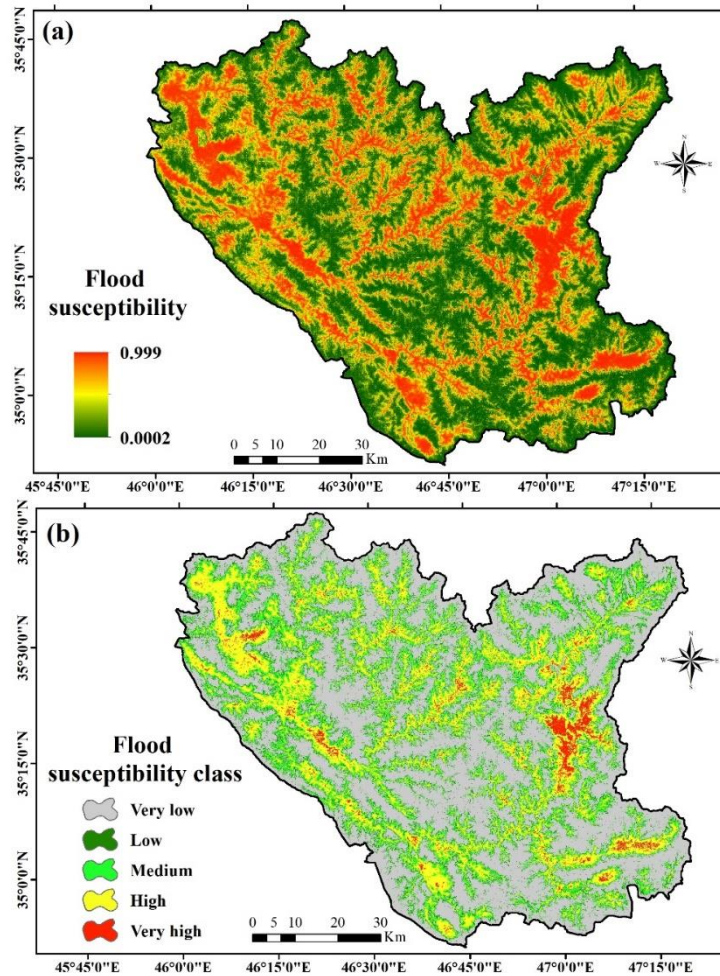
فرایند تشکیل رواناب و سیل را در مناطق بحرانی آبخیز، مهار کرد.

در این پژوهش به‌منظور درک بهتر و استفاده آسان‌تر از نقشه استعداد سیل به‌وسیله کارشناسان و متخصصان، نقشه طبقه‌بندی استعداد سیل‌گیری بر اساس روش گام‌های یکسان در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. بر اساس این نقشه، آبخیز سیروان به پنج طبقه استعداد خیلی‌کم (صفر تا ۰/۲)، کم (۰/۲ تا ۰/۴)، متوسط (۰/۴ تا ۰/۶)، زیاد (۰/۶ تا ۰/۸) و خیلی‌زیاد (۰/۸ تا ۱) تقسیم شد. پهنه‌های مربوط به طبقه استعداد زیاد و خیلی‌زیاد مناطق بحرانی به‌شمار می‌آیند و مهار سیل در این مناطق در اولویت است.

مساحت طبقه‌های استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان در شکل ۵ ارائه شده است. محاسبه‌ها و تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش نشان داد که مساحت طبقه استعداد سیل‌گیری خیلی‌کم ۴۰۳۳۷۷ هکتار، طبقه استعداد سیل‌گیری کم ۷۷۶۴۹ هکتار، طبقه استعداد سیل‌گیری متوسط ۱۳۵۴۲۳ هکتار، طبقه استعداد سیل‌گیری زیاد ۱۵۸۷۶۳ هکتار و طبقه استعداد سیل‌گیری خیلی‌زیاد ۱۸۰۸۸ هکتار، بود. به‌بیان دیگر، از کل مساحت آبخیز سیروان ۵۱٪ مربوط به طبقه خیلی‌کم، ۱۰٪ مربوط به طبقه کم، ۱۷٪ مربوط به طبقه متوسط، ۲۰٪ مربوط به طبقه زیاد و ۲٪ مربوط به طبقه خیلی‌زیاد است. بر پایه مشخص شدن مساحت پهنه‌های استعداد سیل‌گیری، اولویت‌های اجرایی و مدیریت سیل در این پژوهش تعیین شد. بر پایه نتایج این پژوهش در زمان اجرای برنامه‌های عملیاتی و مدیریتی، با آگاهی از موقعیت استقرار جامعه‌های محلی و زیرساخت‌ها می‌توان اطلاعات مهم بیشتری برای تصمیم‌گیری برای اولویت‌بندی مکان‌های اجرای طرح‌ها فراهم آورد. به‌بیان دیگر، در پهنه‌های مربوط به طبقه‌های استعداد سیل‌گیری زیاد و خیلی‌زیاد، مناطق بحرانی‌تر بر اساس وضعیت جامعه‌های محلی و زیرساخت‌های مهم، مشخص می‌شوند.

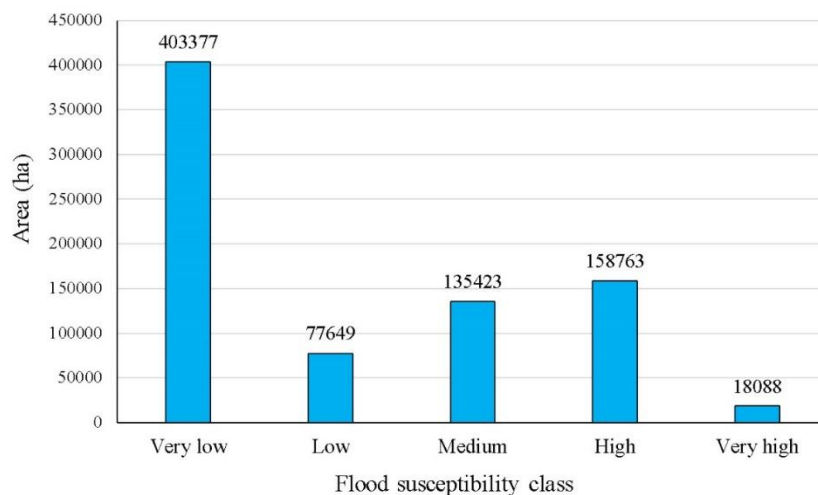
کلی میان صفر تا یک متغیر بود. به‌بیان دیگر ارزش عددی سلول‌ها بیانگر استعداد رخداد سیل بودند. در این پژوهش، اندازه ارزش عددی سلول‌های نقشه استعداد رخداد سیل‌گیری از ۰/۰۰۲ تا ۰/۹۹۹ متغیر بود. اندازه‌های میانگین و انحراف معیار این نقشه رستری به‌ترتیب ۰/۳۸۷ و ۰/۳۷۲ به‌دست آمد. بر پایه شکل ۴، بزرگ‌ترین پهنه‌های مستعد سیل در این آبخیز در بخش‌های شرقی و شمال‌غربی بودند. استعداد سیل‌گیری در قسمت‌هایی از جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی این آبخیز نیز زیاد بود. استعداد سیل‌گیری در بخش‌های مرکزی این آبخیز کم بود. در این پژوهش بر اساس نتایج مدل‌سازی، سیل یک پدیده پیچیده است که با مشارکت عامل‌های محیطی پرشماری رخ می‌دهد. هنگامی که شرایط اقلیمی شروع یک بارش سنگین و به‌دنبال آن رواناب‌های زیاد را پدید می‌آورد، عامل‌های زمینی مانند پوشش گیاهی، خاک، پستی‌بلندی و غیره نقش مهمی در استعداد شکل‌گیری سیل دارند. افزون بر این، در برخی مناطق، شرایط زمینی برای تشکیل سریع رواناب و شکل‌گیری سیل فراهم است، اما شرایط بارندگی با شدت زیاد و سنگین در این مناطق فراهم نیست. از این‌رو، می‌توان گفت حتی یک عامل محیطی هم بر شرایط رخداد سیل‌گیری تأثیرگذار بوده و سبب تشدید یا مهار آن می‌شود.

کارشناسان دستگاه‌های اجرایی با بهره‌گیری از نقشه استعداد رخداد سیل‌گیری به‌عنوان یک ابزار مفید می‌توانند اطلاعات کاربردی در اختیار داشته باشند. در برخی شرایط اجرای عملیات آبخیزداری در آبخیزها بدون توجه به استعداد رخداد سیل‌گیری انجام شده و این موضوع به‌دلیل توجه نداشتن به نقشه‌های سیل‌گیری عموماً موجب هدررفت سرمایه خواهد شد. با بهره‌گیری از نقشه استعداد سیل‌گیری می‌توان اولویت‌های مهم و بحرانی را برای اجرای عملیات آبخیزداری و مدیریت سرزمین تعیین کرد. با اجرای برنامه‌های راهبردی مدیریت جامع آبخیز و در کنار آن انجام اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری می‌توان



شکل ۴- نتایج مدل‌سازی در آبخیز سیروان با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان: (a) نقشه استعداد سیل‌گیری و (b) نقشه پهنه‌بندی استعداد سیل‌گیری.

Figure 4- Modeling results in the Sirwan Watershed using SVM: a) flood susceptibility map, and b) flood susceptibility class map.



شکل ۵- مساحت طبقه‌های استعداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان.

Figure 5- Area of flood susceptibility classes in the Sirwan Watershed.

پشتیبان در آبخیز سیروان در پیش‌بینی مناطق مستعد سیل‌گیری ۹۲٪/۱ است. بر اساس طبقه‌بندی رایج عملکرد مدل‌ها و با توجه به اینکه دقت مدل در پیش‌بینی مناطق مستعد سیل‌گیری بیشتر از ۹۰٪ به‌دست آمد، کارایی مدل ماشین بردار پشتیبان در آبخیز سیروان، بسیار خوب بود. این یافته با نتایج پژوهش‌های تهرانی و همکاران (۲۰۱۵) مبنی بر کارایی مدل ماشین بردار پشتیبان برای شناسایی مناطق مستعد سیل‌گیری یک آبخیز در مالزی، همخوانی دارد.

**ارزیابی کارایی مدل پیش‌بینی‌کننده**  
اعتبارسنجی نتایج مدل مهم‌ترین بخش فرایند مدل‌سازی به‌شمار می‌آید. بدون توجه به دقت پیش‌بینی مدل، نتایج پیش‌بینی بی‌اعتبار است. نتایج ارزیابی عملکرد مدل در جدول ۱ ارائه شده است. در این پژوهش معیار اصلی ارزیابی مدل، مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) بود. در این پژوهش اندازه مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) برابر با ۰/۹۲۱ به‌دست آمد. این اندازه بیانگر آن بود که دقت مدل ماشین بردار

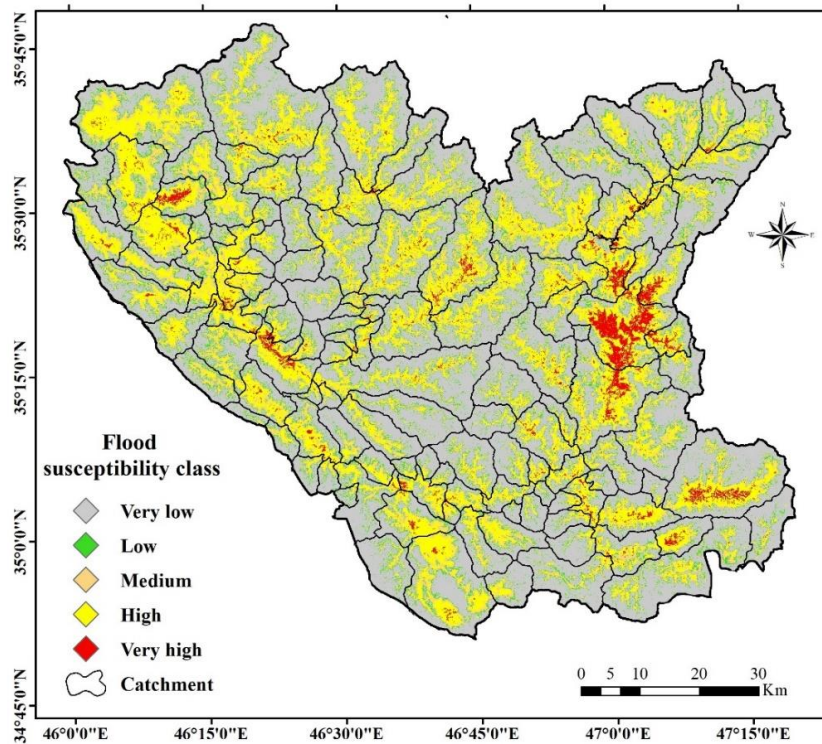
جدول ۱- نتایج اعتبارسنجی مدل برای پیش‌بینی استعداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان.

**Table 1- Results of model validation for flood susceptibility prediction in the Sirwan Watershed.**

Evaluation approach	Evaluation criteria	Value
Cut-off independent threshold	AUC	0.921

تعیین شد. بهترین اندازه سنج‌های گاما و هزینه به‌ترتیب ۰/۴ و ۱۸ به‌دست آمد.

در این پژوهش، اندازه سنج‌های گاما و هزینه در مدل ماشین بردار پشتیبان با استفاده از روش سعی و خطا



شکل ۶- تطبیق پراکنش زیرآبخیزها با نقشه طبقه‌های استعداد سیل‌گیری.

**Figure 6- Overlaying distribution of Sub-watershed with flood susceptibility classes map.**

به دلیل اینکه در آبخیز سیروان پژوهش‌های محدودی در زمینه سیل انجام شده است، امکان مقایسه یافته‌های آن‌ها با نتایج به دست آمده در این پژوهش به سادگی فراهم نیست. در پژوهشی، رحمتی و همکاران (۲۰۲۴) اثرات عامل‌های محیطی بر استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان بر اساس رخدادهای تاریخی سیل و با استفاده از مدل پیشینه بی‌نظمی را بررسی کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که عملکرد مدل نامبرده زیاد بود ( $AUC = 0/921$ ). البته باید گفت افزون بر تفاوت میان نوع مدل به کار گرفته شده، داده‌های موقعیت سیل، شمار و نوع متغیرهای پیش‌بینی کننده نیز در این دو پژوهش یکسان نیست. از سوی دیگر، رحمتی و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر رخداد سیل شامل فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت پستی بلندی، تراکم زهکشی و کاربری زمین است که با یافته‌های این پژوهش مبنی بر استفاده از عامل‌های نامبرده به عنوان متغیرهای مستقل در مدل‌سازی و تأیید اهمیت آن‌ها در زمینه پیش‌بینی و تجزیه و تحلیل مناطق مستعد سیل، هم‌راستا است.

تطبيق زیرآبخیزهای سیروان با نقشه طبقه‌های استعداد سیل‌گیری در شکل ۶ نشان داده شده است. در آبخیز سیروان شمار ۱۲۷ زیرآبخیز در دستگاه اجرایی به عنوان واحدهای کاری مدنظر هستند. بر اساس نتایج این تطبیق، می‌توان گفت اولویت‌پذیری واحدهای اجرایی متفاوت است. مثلاً در این راستا، کمترین شدت سیل‌گیری مربوط به زیرآبخیزهای باینجوب و آسوله بود که به تبع آن کمترین اولویت اجرای اقدامات آبخیزداری نیز مربوط به این زیرآبخیزهاست. به بیان دیگر، ظرفیت این زیرآبخیزها برای طرح‌های توسعه‌ای بیشتر است.

نتایج بررسی موقعیت واحدهای اجرایی با طبقه‌های استعداد سیل‌گیری نشان داد که از میان ۱۲۷ زیرآبخیز شمار ۱۵ زیرآبخیز در طبقه استعداد سیل‌گیری زیاد و ۸ زیرآبخیز در طبقه استعداد سیل‌گیری خیلی زیاد بودند. بر پایه نتایج جدول ۴، مشخص شد زیرآبخیزهای شهری سنندج، شهری مریوان و موجش در طبقه استعداد سیل‌گیری خیلی زیاد هستند که با توجه به تراکم جمعیتی زیاد و زیرساخت‌های شهری مهم نیازمند توجه بیشتری برای انجام طرح‌های اجرایی آبخیزداری و مهار سیلاب هستند.

جدول ۲- چیدمان زیرآبخیزها در طبقه‌های شاخص استعداد سیل‌گیری در آبخیز سیروان.

Table 2- Sub-watershed located in considerable flood susceptibility classes in the Sirwan Watershed.

Class	No. of Sub-watershed	Name of Sub-watershed
High	15	Gazerkhani, Palangan, Shwishe, Sawji, Sleen, Sianaw, Danan, Ghshlagh, Zrivar, Bahramabad, Almaneh, Rokhalan, Mamoukh, Chour, Ghaleji
Very High	8	Sanandaj, Babarez, Marivan, Gholian, Mochesh, Doulbakh, Doroud, Khamsan

سیل و کمبود منابع مالی، برای انجام اقدامات اصلاحی آبخیزداری در زیرآبخیزهای اجرایی، استفاده از نقشه استعداد سیل‌گیری به عنوان ابزار اولویت‌بندی، ضروری است. در زیرآبخیزهایی با استعداد سیل‌گیری زیاد و خیلی زیاد و با توجه به تمرکز سکونت‌گاه‌های جمعیتی و زیرساخت‌های شهری، ضرورت انجام اقدامات اصلاحی و حفاظتی در مناطق بالادست آن‌ها بسیار اهمیت دارد. افزون بر این، می‌توان از ظرفیت

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به خسارت‌ها و پیامدهای سیلاب، پیش‌بینی مناطق مستعد سیل‌گیری ضروری است. در این پژوهش، تحلیل‌های اعتبارسنجی مبتنی بر داده‌های میدانی سیل نشان داد که دقت مدل ماشین بردار پشتیبان برای شناسایی مناطق مستعد سیل، بسیار خوب است. بر پایه یافته‌های این پژوهش و با توجه به کمبود داده‌های تخصصی مکان‌محور رخداد

**سپاس‌گزاری**

از حمایت‌های اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان برای در اختیار قرار دادن اطلاعات و داده‌های سیل و همکاری در بهبود فرایند انجام پژوهش، قدردانی می‌شود.

**تضاد منافع نویسندگان**

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

**دسترسی به داده‌ها**

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسندهٔ مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

**مشارکت نویسندگان**

نویسندهٔ اول: مفهوم‌سازی، پردازش داده، مدل‌سازی، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله

نویسندهٔ دوم: مفهوم‌سازی، مهار نتایج و ویرایش و بازبینی مقاله

نویسندهٔ سوم: مفهوم‌سازی، پردازش داده، مدل‌سازی و تحلیل نتایج

زیرآبخیزهای بدون استعداد سیل‌گیری یا سیل‌گیری کم، در آمایش سرزمین و برنامه‌های توسعه‌ای زیرساخت‌ها بهره برد. بر اساس یافته‌های این پژوهش می‌توان گفت با بررسی عامل‌های بلندی، جهت شیب، شاخص همگرایی، تراکم زهکشی، کاربری زمین، شاخص بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی، بیشینهٔ بارش ۲۴ ساعته، شمار بارش‌های بزرگ‌تر از آستانه، انحنای سطح، انحنای مقطع، شاخص موقعیت پستی‌بلندی، درصد شیب، بافت خاک، فاصله از جریان، شاخص رطوبت پستی‌بلندی و فاصله عمودی از جریان، می‌توان داده‌های مهمی برای مدل‌سازی سیل در مدل‌سازی با ماشین بردار پشتیبان فراهم آورد. با توجه به اهمیت ثبت داده‌های رخداد سیل و کاربرد آن‌ها در مدل‌سازی، پیشنهاد می‌شود به تهیه و تکمیل بانک داده سیل در سطوح استانی و ملی و همچنین آبخیزهای فرامرزی توجه بیشتری شود. همچنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده اهمیت عامل‌های محیطی در پیش‌بینی فرایند سیل‌گیری در آبخیز سیروان بررسی شود. زیرا می‌توان فرایند شکل‌گیری سیل در مقیاس آبخیز و مدیریت عامل‌های محیطی برای کاهش استعداد سیل را بهتر تحلیل کرد.

**فهرست منابع**

- Abedi R, Costache R, Shafizadeh-Moghadam H, Pham QB. 2022. Flash-flood susceptibility mapping based on XGBoost, random forest and boosted regression trees. *Geocarto International*. 37(19): 5479-5496. DOI: 10.1080/10106049.2021.1920636
- Abegaz R, Xu J, Wang F, Huang J. 2024. Impact of flooding events on buried infrastructures: A review. *Frontiers in Built Environment*. 10: p.1357741. DOI: 10.3389/fbuil.2024.1357741
- Arabameri A, Seyed Danesh A, Santosh M, Cerda A, Chandra Pal S, Ghorbanzadeh O, Chowdhuri I. 2022. Flood susceptibility mapping using meta-heuristic algorithms. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 13(1): 949-974. DOI: 10.1080/19475705.2022.2060138
- Babai B, Mohammadi A, Seyedian M, Tomaj A. 2020. The role of flood management approach on the resilience of local communities Case study: Flooded villages of the Gorganrood watershed. *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*. 10(36): 63-73.
- Chan JYL, Leow SMH, Bea KT, Cheng WK, Phong SW, Hong ZW, Chen YL. 2022. Mitigating the multicollinearity problem and its machine learning approach: A review. *Mathematics*. 10(8): p. 1283. DOI: 10.3390/math10081283
- Choubin B, Hosseini FS, Rahmati O, Youshanloei MM. 2023. A step toward considering the return period in flood spatial modeling. *Natural Hazards*. 115(1): 431-460. DOI: 10.1007/s11069-022-05561-y
- Chowdhury ME, Islam AS, Zaman RU, Khadem S. 2025. A machine learning-based approach for flash flood susceptibility mapping considering rainfall extremes in the northeast region of Bangladesh. *Advances in Space Research*. 75(2):1990-2017. DOI: 10.1016/j.asr.2024.10.047

- Dodangeh E, Choubin B, Eigdir AN, Nabipour N, Panahi M, Shamshirband S, Mosavi A. 2020. Integrated machine-learning methods with resampling algorithms for flood susceptibility prediction. *Science of the Total Environment*, 705 :135983. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135983
- Dutta P, Deka S. 2024. A novel approach to flood risk assessment: Synergizing with geospatial based MCDM-AHP model, multicollinearity, and sensitivity analysis in the Lower Brahmaputra Floodplain, Assam. *Journal of Cleaner Production*. 467: p. 142985. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142985
- Fratini P, Crosta G, Carrara A. 2010. Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology*. 111(1-4): 62-72. DOI: 10.1016/j.enggeo.2009.12.004
- Idrees MO, Olateju SA, Omar DM, Babalola A, Ahmadu HA, Kalantar B. 2022. Spatial assessment of accelerated surface runoff and water accumulation potential areas using AHP and data-driven GIS-based approach: the case of Ilorin metropolis, Nigeria. *Geocarto International*. 37(27): 15877-15895. DOI: 10.1080/10106049.2022.2102236
- Islam ARMT, Talukdar S, Mahato S, Kundu S, Eibek KU, Pham QB, Kuriqi A, Linh NTT. 2021. Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. *Geoscience Frontiers*. 12(3): p.101075. DOI: 10.1016/j.gsf.2020.09.006
- Karra K, Kontgis C, Statman-Weil Z, Mazzariello JC, Mathis M, Brumby SP. 2021. Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning. In 2021 IEEE international geoscience and remote sensing symposium (IGARSS). pp. 4704-4707. IEEE. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499
- Kazemi M, Mohammadi F, Nafooti MH, Behvar K, Kariminejad N. 2024. Flood susceptibility mapping using machine learning and remote sensing data in the Southern Karun Basin, Iran. *Applied Geomatics*. 16(3): 731-750. DOI: 10.1007/s12518-024-00582-7
- 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*. Elsevier. pp. 419-434. DOI: 10.1016/B978-0-12-815998-9.00033-6
- Nabinejad S, Schüttrumpf H. 2023. Flood risk management in arid and semi-arid areas: A comprehensive review of challenges, needs, and opportunities. *Water*. 15(17): p. 3113. DOI: 10.3390/w15173113
- Rahmati O, Kornejady A, Choubin B, Jaafari A, Amini A. 2024. Evaluating the Impact of Environmental Factors on Flood Susceptibility in the Sirwan Watershed Based on Historical Flood Events. *Watershed Management Research*. 37(1):80-97. DOI: 10.22092/wmrj.2023.361544.1527
- Rahmati O, Kornejady A, Samadi M, Deo RC, Conoscenti C, Lombardo L, Dayal K, Taghizadeh-Mehrjardi R, Pourghasemi HR, Kumar S, Bui DT. 2019. PMT: New analytical framework for automated evaluation of geo-environmental modelling approaches. *Science of the Total Environment*. 664: 296-311. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.017
- Rezai Moghadam MH, Nikjou MR, Mokhtari D, Hoseinzadeh R, Maleki H. 2016. Estimating the discharge and flood levels of past Sirwan River floods using geomorphological and flood evidence. *Natural Geography*. 9(33): 1-18.
- Seleem O, Ayzel G, de Souza ACT, Bronstert A, Heistermann M. 2022. Towards urban flood susceptibility mapping using data-driven models in Berlin, Germany. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 13(1): 1640-1662. DOI: 10.1080/19475705.2022.2097131
- Sulaiman MS, Abood MM, Sinnakaudan SK, Shukor MR, You GQ, Chung XZ. 2021. Assessing and solving multicollinearity in sediment transport prediction models using principal component analysis. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 27(1):343-353. DOI: 10.1080/09715010.2019.1653799
- Tehrany MS, Pradhan B, Jebur MN. 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of hydrology*. 512: 332-343. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.008
- Tehrany MS, Pradhan B, Mansor S, Ahmad N. 2015. Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena*. 125: 91-101. DOI: 10.1016/j.catena.2014.10.017
- Wahba M, Sharaan M, Elsadek WM, Kanae S, Hassan HS. 2024. Examination of the efficacy of machine learning approaches in the generation of flood susceptibility maps. *Environmental Earth Sciences*. 83(14): p. 429. DOI: 10.1007/s12665-024-11696-x
- Wainer J, Fonseca P. 2021. How to tune the RBF SVM hyperparameters? An empirical evaluation of 18 search algorithms. *Artificial Intelligence Review*. 54(6): 4771-4797. DOI: 10.1007/s10462-021-10011-5



## Predicting the Spatial Pattern of Flood Susceptibility Using Support Vector Machine Model in the Sirwan Watershed

Aref Bahmani<sup>1</sup>, Hiran Abghari<sup>2\*</sup>, Omid Rahmati<sup>3</sup>

1- Ph.D. in Watershed Management Science and Engineering, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

2- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

3- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

Floods cause significant financial losses and loss of life in the country every year. Although information on the location of flood events is of high scientific value, in many flood studies, flood zones have been determined solely based on expert's opinion and multi-criteria decision-making methods. This study predicts the spatial pattern of flood susceptibility in the Sirwan watershed of Kurdistan province using spatial information on flood events in the last decade, and to achieve this objective, a support vector machine model, as a machine learning-based approach, was employed.

#### Materials and Methods

In order to carry out this research, first a database in the geographic information system was prepared for flooding events in the Sirwan watershed using bank flood data from the Main Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Kurdistan Province. The number of 102 flooding events in the Sirwan watershed was confirmed in the ten-year period (2015-2015). Since machine learning models require points of occurrence and non-occurrence of flooding, points of non-occurrence of flooding were also selected based on the homogeneous-unit method. This database was completed using information obtained from face-to-face interviews with local communities in this area. Based on the various characteristics of the Sirwan watershed and a review of scientific sources, sixteen factors affecting flooding events were selected and their digital maps were prepared. Factors affecting flooding included elevation, slope aspect, slope percentage, convergence index, drainage density, land use, maximum 24-hour precipitation, number of rainfalls higher than the average of the meteorological station, normalized vegetation difference index, plan curvature, profile curvature, soil texture, distance from the stream, topographic position index, topographic

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Authors' E-mail:** h.abghari@urmia.ac.ir

**Citation:** Bahmani, A., Abghari, H., Rahmati, O. 2026. Predicting the Spatial Pattern of Flood Susceptibility Using Support Vector Machine Model in the Sirwan Watershed. *Watershed Management Research*. 39(2): 96-115.

**DOI:** 10.22092/WMRJ.2025.371438.1645

**Received:** 16 November 2025, **Received in revised form:** 10 December 2025, **Accepted:** 21 December 2025

**Published online:** 22 June 2026

*Watershed Management Research*, Vol. 39, No. 2, Ser. No. 151, Summer 2026, pp. 96-115.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



wetness index, and vertical distance from the stream, which were used as independent variables in the modeling. Flooding occurrence and non-occurrence data were randomly divided into two training and validation groups with proportions of 70% and 30%. After implementing the support vector machine model in the R software environment, a flood susceptibility map of the Sirwan watershed was prepared and the spatial pattern of flood susceptibility was examined. The accuracy of the aforementioned map was evaluated using the area under the curve (AUC) statistic of the receiver operating characteristic.

### **Results and Discussion**

After validation, the results showed that the support vector machine model with an area under the receiver operating characteristic curve (AUC) of 0.921 (92.1%) has a high capability to predict flood-prone areas. Given that the model's prediction accuracy is reported to be more than 90%, based on the common classification of model efficiency, the performance of the support vector machine model in the Sirwan watershed is considered excellent. Based on the analyses, the very low, low, medium, high, and very high flood susceptibility classes include 51, 10, 17, 20, and 2% of the Sirwan watershed, respectively. Given the identification of flood-prone areas, the implementation priorities for the flood management plan have been clearly identified for implementing measures. Out of the 127 sub-watersheds of the Sirwan sub-watershed, 15 sub-watersheds are in the high flood-prone class and 8 sub-watersheds are in the very high flood-prone class. Population density is relatively high in all sub-watersheds in the high flood susceptibility category (such as Gazrokhani, Palangan, Shwishe, Sawji, Sleen, Sianaw, Danan, Zaribar, etc.) and in sub-watersheds in the very high flood susceptibility category (such as Sanandaj, Babarez, Marivan, Gholian, Mochesh, Doulbakh, Doroud, and Khamsan).

### **Conclusions and Suggestions**

Based on the results of this study, the performance of the support vector machine model in identifying areas prone to flooding was very good. Based on the lack of specialized data and financial resources in the executive agencies, the application of this model in the management and planning of watershed improvement measures is important. In this study, prioritization of operational watersheds was performed based on the severity of flooding. Because, in conditions of data scarcity, it will not only save time and resources, but also improve the effectiveness of watershed management remedial measures. According to the results of this study, it is suggested that the support vector machine model be used at larger provincial, regional, and national levels, as well as in detailed-implementation studies of watershed management for risk management.

**Keywords:** Flood, hazard, prioritization, simulation, watershed management

**Article Type:** Research Article

### **Acknowledgement**

We would like to appreciate the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Kurdistan Province and Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center for providing flood information and data and collaborating in improving the research process is appreciated.

### **Conflicts of Interest**

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

### **Data Availability Statement**

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

### **Authors' Contribution**

Author 1: Conceptualization, data analysis, modeling, writing - original draft preparation

Author 2: Conceptualization, results controlling, manuscript editing

Author 3: Conceptualization, data analysis, modeling, results interpretation