

## تعیین مستعدترین مناطق وقوع سیلاب با استفاده از مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی (MaxEnt) در حوزه آبخیز مرزداران، استان تهران

یوسف اسماعیلی، فریبرز یوسفوند\*، سعید شعبانلو و محمدعلی ایزدبخش<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۰)

### چکیده

هدف از انجام این پژوهش پهنه‌بندی مناطق مختلف حوزه مرزداران از نظر خطر وقوع سیل است. از آنجایی که بودجه اختصاص یافته برای انجام کارهای مدیریتی محدود است و امکان انجام عملیات در کل حوزه امکان پذیر نمی‌باشد، بنابراین، داشتن نقشه‌ای با اولویت‌بندی مناطق مختلف از نظر احتمال وقوع سیلاب بسیار مفید و ضروری است. بدین منظور، از مدل معروف و شناخته شده یادگیری ماشین یعنی مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی (MaxEnt) به لحاظ الگوریتم محاسباتی توانمند در زمینه ارزیابی فرایند وقوع سیلاب به‌عنوان بِنچ‌مارک استفاده شد. شواهد سیلاب با استفاده از بازدهی‌های میدانی، گزارش‌ها و اطلاعات سازمانی موجود ثبت و در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در قالب نقشه تهیه شد. همچنین براساس مرور منابع گذشته، لایه‌های مربوط به دوازده عامل کنترل‌کننده به‌عنوان عوامل پیش‌بینی کننده وقوع سیل در منطقه مورد مطالعه در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شدند. به‌منظور ارزیابی نتایج مدل‌سازی، از مقدار مساحت زیر منحنی (AUC) استفاده شد. سپس براساس نقشه تهیه شده مستعدترین مناطق وقوع سیلاب که برای اجرای عملیات مدیریتی در اولویت هستند، شناسایی شدند. بر اساس نتایج حدود ۱۰۰ کیلومترمربع از مساحت منطقه مورد مطالعه جزء مستعدترین مناطق برای انجام عملیات مدیریتی شناسایی شدند. بر اساس نتایج دقت مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی ۹۸ درصد در مرحله آموزش و ۹۵ درصد در مرحله اعتبارسنجی بدست آمد. لایه‌های فاصله از آبراه، تراکم زهکشی و شاخص رطوبت توپوگرافی به ترتیب از مؤثرترین عوامل در وقوع سیلاب شناخته شدند.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، مدل پیشینه‌ی بی‌نظمی، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، سیل

۱. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: fariborzosefvand@gmail.com

## مقدمه

سیل یکی از خطرناک‌ترین و شایع‌ترین خطرات طبیعی است که هر سال باعث هزاران تلفات و خسارت در سراسر جهان می‌شود (۵). در ایران نیز همانند سایر مناطق سیل‌خیز دنیا در دهه‌های اخیر، شدت وقوع سیلاب‌ها و میزان خسارت‌های ناشی از آن به‌طور چشمگیری افزایش یافته است (۵۰). انواع سیل شامل، سیلاب‌های منطقه‌ای (Regional Floods)، سیلاب‌های ناگهانی (Flash floods)، سیلاب‌های ناشی از وجود توده‌های یخ (Ice-Jam floods)، سیلاب‌های ناشی از شکست سد و خاکریز (Dam and levee failure floods) و سیلاب‌های ناشی از زمین لغزه (Debris and landslide and mud flow floods) است (۱۸ و ۱۹). ویژگی‌های فیزیکی حوضه آبریز مانند: شکل، شیب، شبکه آبراه‌ای و ناهمواری زمین، همراه با ویژگی‌های هیدرولوژیکی مانند: بارش، ذخیره و تلفات برگابی و چالابی، تبخیر و تعرق و نفوذپذیری و اقدامات ناشی از فعالیت‌های بشری، در بروز و تشدید سیلاب یا کاهش و افزایش میزان خسارت‌های ناشی از آن دخالت دارند (۳۳).

از آنجایی که سیل خیزی برعکس سیل‌گیری که در شیب‌های کم و مناطق هموار است، مربوط به شیب‌های زیاد و دامنه‌ها بوده است براساس مطالعات انجام شده در کشورهای مختلف برای کاهش آثار زیانبار سیل، اولین مرحله پهنه‌بندی و اولویت‌بندی این مناطق از لحاظ میزان خطر سیل‌گیری است تا براساس نتایج حاصله بتوان در رابطه با نحوه استفاده از اراضی و کاربری‌های مختلف از جمله کشاورزی، شهری و صنعتی تصمیم‌گیری کرد و زیان‌های ناشی از سیل را با انجام عملیات مدیریتی به حداقل ممکن کاهش داد.

به دلیل پیچیدگی فرایند وقوع این خطر و نقش عوامل مختلف در رخداد آن، پیش‌بینی وقوع آن نیز مشکل است. در سال‌های گذشته، پهنه‌بندی میزان حساسیت (Susceptibility) منطقه از نظر وقوع خطر سیل از موضوعات مهم پژوهشی برای جوامع بین‌المللی بوده است. تبیین و استفاده از مدل‌های مختلف برای پهنه‌بندی مناطق مورد مطالعه به‌منظور اولویت‌بندی مکان‌های

مستعد وقوع خطرات طبیعی از موضوعات مهم و ضروری است. پیش‌بینی مکانی و شناسایی مناطق مستعد رخداد خطر از طریق بکارگیری مدل‌هایی که بواسطه داده‌های مکانی موجود آمده، راهکار مناسبی برای برنامه‌ریزی مدیریت اراضی در حوزه‌های آبخیز برای پیشگیری از رخداد این وقایع است (۳۹). مدل‌های ماشین یادگیری به دلیل تکرار زیاد فرایند مدل‌سازی، استفاده از الگوریتم‌های تخمین توزیع و طبیعت داده‌محور، از توانایی بالایی در شناسایی مناطق مستعد وقوع خطر سیل داشته و در مطالعات متعددی برتری نسبی خود را اثبات کرده‌اند. پژوهش‌های مختلفی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین مختلف در بحث سیلاب در نقاط مختلف کشور ایران توسط پژوهشگران متعددی از جمله خیری‌زاده و همکاران (۲۱)، رحمتی و پورقاسمی (۴۰)، رحمتی و همکاران (۴۱ و ۴۲)، مقدم و همکاران (۲۹) و دهمرده‌قلعه‌نو و همکاران (۱۰) صورت گرفته است. همچنین، مطالعات متعددی در خارج از کشور با استفاده از مدل‌هایی مثل شبکه‌ی عصبی مصنوعی و مدل‌های درختی M5 (۴۸)، مدل نسبت فراوانی (۲۴)، مدل ماشین‌بردار پشتیبان (۴۵) و (۴۶)، مدل درخت رگرسیون تقویت‌شده (۲۵)، مدل جنگل تصادفی (۵۶)، درخت تصمیم‌گیری متناوب (Alternating decision tree) (ADTree) (۹) برای پهنه‌بندی و شناسایی مناطق مسعد سیل انجام شده است.

یکی از این مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین، مدل بیشینه بی‌نظمی (MaxEnt) است که به دلیل اینکه مزایا و قابلیت‌های آن در پژوهش‌های مختلف اثبات شده است در این پژوهش نیز مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که یافتن نقاط عدم مستعد برای وقوع سیلاب و اطمینان از این عدم استعداد در مطالعات مشکلات زیادی در پی خواهد داشت بنابراین، استفاده از مدل MAXENT به‌عنوان روشی که فقط وابسته به نقاطی است که مستعد وقوع هستند، می‌تواند منجر به حذف بسیاری از ناکارآمدی‌ها و عدم قطعیت ناشی از نقاط عدم حضور شود (۳۴). (۴۳) به پهنه‌بندی و شناسایی مناطق مستعد سیلاب با استفاده از مدل‌های بیشینه بی‌نظمی و رگرسیون اسپلاین انطباقی (MARS) در بخشی از استان گلستان پرداختند. دقت مدل براساس

مدیران باشد. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش اولویت‌بندی مناطق مختلف حوزه‌های مزداران از نظر خطر وقوع سیل است. از آنجایی که بودجه اختصاص یافته برای انجام کارهای مدیریتی محدود است و امکان انجام عملیات در کل منطقه امکان‌پذیر نیست، بنابراین داشتن نقشه‌ای که مناطق مختلف را از نظر احتمال وقوع اولویت‌بندی کرده است بسیار مفید و لازم خواهد بود. برای اجرای این پروژه‌های مدیریتی اولویت اول به مناطق پرخطری اختصاص داده می‌شود که مناطق مسکونی و باغات منطقه که منبع درآمد مهمی برای مردم منطقه است در آن زیرحوزه‌ها قرار گرفته است. برای این منظور از مدل شناخته شده بیشینه بی‌نظمی با توجه به کارآمدی و توانایی بالای آن به عنوان بنچ‌مارک استفاده شده است. در مطالعه حاضر پس از تهیه نقشه پهنه‌بندی سیلاب، براساس نقشه احتمال وقوع خطر و کاربری اراضی، زیرحوزه‌هایی که هم در پهنه پرخطر بوده و هم دارای کاربری‌های مسکونی، باغ و کشاورزی بودند شناسایی شد تا برای اجرای اقدامات مدیریتی در اولویت قرار بگیرند.

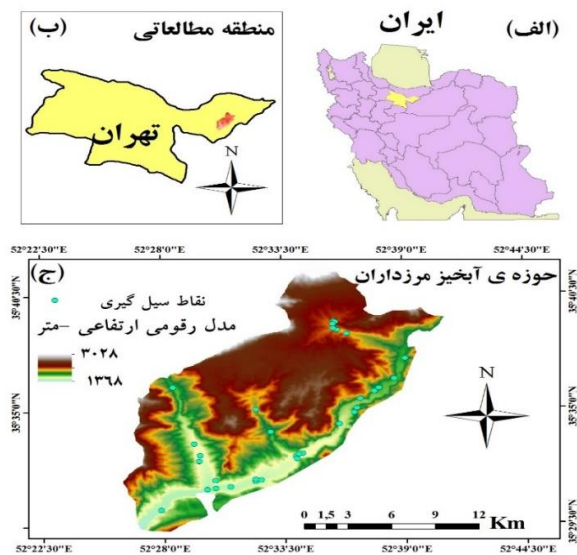
## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعات حوزه آبخیز مزداران به مساحت ۲۳۱۶۵ هکتار و محیط ۱۲۸/۱۹۱ کیلومتر با مختصات جغرافیایی  $26^{\circ}40'52''$  تا  $29^{\circ}03'35''$  طول شرقی و  $50^{\circ}40'59''$  تا  $52^{\circ}40'26''$  عرض شمالی است. بیشترین ارتفاع منطقه ۴۰۵۷ متر و کمترین ارتفاع معادل ۱۴۰۰ متر از سطح دریا است. محدوده مطالعاتی در استان تهران و شهرستان فیروزکوه واقع شده است. این حوزه در امتداد و مجاورت بخش شمالی رودخانه حله‌رود قرار گرفته است که از شمال رودخانه، به روستای خمده و از جنوب به روستای محمودآباد منتهی می‌شود. روستاها و مناطق مسکونی محدوده، مزداران، انزها، حصاربن، مشهد و امین‌آباد هستند (شکل ۱).

شاخص ROC مورد ارزیابی قرار گرفت، و دقت بالا برای هر دو مدل (بالای ۹۰ درصد) محاسبه شد. سیاه‌کمری و همکاران (۴۷) به بررسی کاربرد مدل‌های نسبت فراوانی و بیشینه بی‌نظمی برای تهیه نقشه احتمال وقوع سیل در حوضه آبخیز مادارسو، استان گلستان پرداختند. سرانجام، نقشه پیش‌بینی پتانسیل سیل با استفاده از روش منحنی مشخصه عملکرد گیرنده اعتبارسنجی شد. براساس منحنی ROC دقت مدل نسبت فراوانی و مدل بیشینه بی‌نظمی به ترتیب ۷۴/۳ و ۹۲/۶ درصد تخمین زده است، که نشان می‌دهد مدل بیشینه بی‌نظمی منجر به نتایج بهتر برای ارزیابی پتانسیل سیل در منطقه مورد مطالعه شده است.

با توجه به اینکه در اغلب حوزه‌های آبخیز کشور، وقوع سیل و خسارت‌های ناشی از آن روند افزایشی دارد، تعیین مناطق مولد سیل و اولویت‌بندی منطقه از نظر پروژه‌های کنترل سیل و مدیریت جامع آبخیزها ضرورت دارد. به حداقل رساندن خسارت‌های ناشی از سیل موجب حفظ رفاه و ارتقاء کیفی سطح معیشت ساکنان حوزه آبخیز می‌شود. از طرفی کنترل بلایای طبیعی یکی از ارکان مهم در رسیدن به توسعه پایدار است که توجه به آن موجب پیشرفت پایدار جامعه خواهد بود. حوزه مورد مطالعه به دلیل نوع کاربری‌ها و وجود اراضی شیب‌دار و تجاوز کاربری‌ها به حریم و بستر رودخانه‌ها و مسیل‌ها توان تولید سیل و میزان خسارات جانی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیلاب را چندبرابر کرده است. بنابراین، کنترل و مهار بلای سیلاب در حوزه آبریز مزداران استان تهران یکی از مهم‌ترین اهداف مدیریت این حوزه آبریز بوده که با توجه به سوابق رخداد سیلاب‌های ویرانگر بسیار ضروری خواهد بود. لزوم توجه بسیار جدی به ایجاد ساز و کارهای مؤثر برای کاهش خسارات در سطح منطقه ضرورتی انکارناپذیر است. در نتیجه تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع یکی از راهکارهای مؤثر برای شناسایی و پیش‌بینی مناطق آسیب‌پذیر است که می‌تواند در مدیریت خطر راهنمای



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

### مراحل انجام پژوهش

مراحل انجام این پژوهش دارای مراحل زیر است:

- ۱) آماده کردن لایه‌های پیش‌بینی‌کننده (فاکتورهای مؤثر بر سیل‌گیری)
- ۲) آماده کردن نقاط وقوع خطر سیلاب و تقسیم آن به دو نسبت ۷۰ درصد به ۳۰ درصد
- ۳) اجرای مدل پیشینه بی‌نظمی برای تهیه نقشه مکانی پهنه‌بندی مناطق مستعد سیلاب
- ۴) شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع سیلاب ۵. ارزیابی مدل با استفاده از منحنی ROC-AUC
- ۵) تعیین مناطق اولویت‌دار برای انجام عملیات مدیریتی

### تهیه نقشه پراکنش سیلاب

مرحله اساسی و مهم در تهیه نقشه مکانی پهنه‌بندی احتمال وقوع سیلاب، آماده کردن نقشه پراکنش نقاط وقوع خطر مورد بررسی است (۴۴). این نقاط وقوع توسط روش‌های متعددی از جمله مطالعات ژئومورفولوژی، تصاویر ماهواره‌ای، تفسیر عکس‌های هوایی، وقوع رویدادهای گذشته و پیمایش‌های میدانی (صحرایی) تهیه می‌شود (۱۷). مناطق نزدیک وقایع گذشته

حساسیت بالاتری در برابر جریان سیل دارند (۵۱). ساکنان حوزه‌های آبخیز به‌ویژه افراد روستاها اطلاعات دقیقی از موقعیت رخداد سیل و خسارت‌های آن دارند. داغاب و بقایای اشیایی که آب با خود حمل کرده و در لابه‌لای شاخ و برگ درختان اطراف رودخانه‌ها گیر کرده‌اند، نشان‌دهنده وقوع سیل در آن محل‌ها هستند. حدود ۳۰ نقطه سیلاب براساس گزارش‌های و داده‌های به‌دست آمده از سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری استان تهران (NRWMOTP) شناسایی شد. برای انجام مدل‌سازی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین باید نقاط مورد استفاده برای آموزش مدل (Training) از نقاط اعتبارسنجی (Validation) متفاوت باشند (۲۶). بنابراین الگوریتم تقسیم‌بندی تصادفی (Randomly partition algorithm) (۵۲)، رحمتی و همکاران (۴۲) برای جدا کردن نقاط آموزشی و نقاط اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور آموزش شرایط رخداد گذشته و تعیین ساختار مفهومی مدل، ۷۰ درصد از این نقاط به‌عنوان گروه آموزش مورد استفاده قرار می‌گیرد. اطلاعات گروه اعتبارسنجی (۳۰ درصد از نقاط) در مدل‌سازی استفاده نشده و در مرحله نهایی پس از اتمام مدل‌سازی، به‌منظور تعیین دقت پیش‌بینی مدل به کار برده می‌شود (۴۲).

مقدار جاری شدن سیل تأثیر می‌گذارد، بنابراین از آن برای مدل‌سازی میزان حساسیت به سیل استفاده می‌شود (۳). عامل رطوبت توپوگرافیکی با اثرگذاری بر وضعیت رطوبت خاک و توپوگرافی سطح و پاسخ هیدرولوژیکی در وقوع خطر سیلاب نقش دارد (۵۵)، به طوری که رطوبت خاک یک نقش مهم در ناپایداری دامنه دارد (شکل ۲-ج). کاربری اراضی با کنترل جریان‌های سطحی و رواناب نقش مهمی در عملکرد فرایندهای هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی دارد (۱۲). نقشه کاربری اراضی از اداره منابع طبیعی استان تهران تهیه شد و سپس با استفاده از تصاویر گوگل ارث اصلاح شد. کاربری اراضی این منطقه شامل: باغ، مناطق مسکونی، مرتع و اراضی کشاورزی است (شکل ۲-ج). فاصله از شبکه آبراهه یکی از مهم‌ترین عوامل زمین-محیطی است که روی بزرگی و سرعت سیل تأثیر می‌گذارد و طغیان و جریان رودخانه را کنترل می‌کند (۱۶). شبکه جریان رودخانه مسیرهای اصلی تخلیه سیلاب است و مناطق نزدیک رودخانه مستعد سیلاب هستند (۳۱). نقشه فاصله از شبکه آبراهه با استفاده از تابع Euclidean distance در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 تهیه شد و مقدار آن از ۰-۵۶۸۸ متر متغیر است. بارندگی به‌عنوان یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار در وقوع سیلاب انتخاب شده است (۳۷). نقشه بارندگی سالانه حوزه آبخیز مورد مطالعه با استفاده از اطلاعات بارش ۲۲ ایستگاه‌های اندازه‌گیری مربوط به سال‌های ۱۳۹۱-۱۳۹۹ از اداره آب منطقه‌ای استان تهران جمع‌آوری شد. در این پژوهش از دو روش کریجینگ و روش Inverse Distance Weight (IDW) برای درون‌یابی استفاده شد تا روشی که دقت بالاتری دارد انتخاب شود. مقدار RMSE در روش IDW، ۸۸۰/۳۷ و در روش کریجینگ، ۱۴۰۶ بدست آمد. در روش IDW برای تعیین مقدار ارزش هر نقطه، از ارزش‌های نقاط نمونه‌برداری شده مجاور استفاده کرده و با گرفتن میانگین از آنها، ارزش نقطه مجهول را برآورد می‌نماید. این روش درون‌یابی بر این فرض استوار

تهیه عوامل زمین-محیطی مؤثر بر پیش‌بینی احتمال وقوع سیل ساخت مدل ارزیابی هر خطر نیاز به یک مجموعه‌ای از پارامترهای مربوط به آن خطر دارد (۴۴). تهیه و شناسایی پارامترهای زمین-محیطی اثرگذار بر سیل برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری وقوع سیل ضروری است و جمع‌آوری آنها بخش اصلی و ضروری مدل‌سازی را شامل می‌شود (۲۳). در این پژوهش براساس مرور پژوهش‌های سابق انجام شده (۴۰، ۲۴، ۴۳ و ۵۱) و با بررسی‌های انجام‌شده در منطقه مورد مطالعه حدود دوازده عامل شامل واحدهای سنگ‌شناسی (لیتولوژی)، کاربری اراضی، فاصله از شبکه آبراهه، درصد شیب زمین، بارندگی سالانه، جهت شیب، طبقات ارتفاعی (Digital Elevation Model)، شاخص رطوبت توپوگرافیکی (TWI)، انحنای طولی دامنه، انحنای عرضی دامنه، شاخص ناهمواری‌های زمینی و تراکم شبکه زهکشی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 و System for automated geoscientific analyses (SAGA) با فرمت رستری با اندازه‌های سلولی 30×30 m تهیه شدند (شکل ۲). در این مطالعه بعد از آماده‌سازی لایه‌ها، برای آنالیز این داده‌ها و بررسی هم‌خطی (Multi-collinearity test) آن‌ها از نرم‌افزار SPSS استفاده شد (۱۱). با کنترل‌کردن شاخص‌های آستانه تحمل (Tolerance) و عامل تورم واریانس (Variance Inflation Factor (VIF)) هیچ‌کدام از دارای هم‌خطی نبوده و برای مدل‌سازی استفاده شد. توپوگرافی، پارامتری است که با تغییرات مکانی شرایط هیدرولوژیکی و رطوبت خاک، نقش زیادی در کنترل سیلاب‌ها دارد (۷ و ۱۳). لایه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) منطقه مورد مطالعه از اداره منابع طبیعی استان تهران تهیه شد (شکل ۲-الف). سپس نقشه‌های شیب، جهت شیب، انحنای عرضی و طولی دامنه از روی نقشه DEM تهیه شده است. نقشه درصد شیب (شکل ۲-ب) به‌عنوان یک شاخص اثرگذار سطحی برای تعیین مناطق مستعد سیل، میزان رواناب سطحی و فرصت نفوذ در نظر گرفته می‌شود (۵۷). جهت جغرافیایی (شکل ۲-ب)، عاملی است که تعیین‌کننده جهت جریان آب است و همراه با آن رطوبت خاک را حفظ می‌کند (۹). از آنجا که انحنای

تأثیرگذار در حوادث سیل است که به توپوگرافی محلی حوضه مورد مطالعه بستگی دارد. احتمال بیشتر وقوع سیلاب با مقدار TRI کمتری همراه است (۲۰) شکل (۲-ر). نقشه‌های مربوط به فاکتورهای کنترل‌کننده (لایه‌های پیش‌بینی‌کننده) در شکل ۲ (الف-ر) ارائه شده است.

### مدل مکسنت یا بیشینه بی‌نظمی (Maximum Entropy (ME)

#### فرضیات مدل

- واژه MaxEnt مخفف Maximum Entropy است که به معنای بی‌نظمی حداکثر است.

- مدل maxent بر اساس منطق یادگیری ماشینی machine learning و ایده حداکثر آنتروپی عمل می‌کند.

- نرم‌افزار maxent دارای ورودی‌های مختلفی به صورت فایل‌های csv و لایه‌ها است که قسمتی از ورودی‌ها برای یادگیری (training) و قسمتی برای کالیبراسیون مدل استفاده می‌شود.

- خروجی‌های نرم‌افزار maxent متعدد بوده و شامل تحلیل‌های آماری و نقشه‌های پراکندگی و مطلوبیت است.

- از خروجی‌های نرم‌افزار maxent می‌توان به‌عنوان ورودی نرم‌افزار habitat quality استفاده کرد.

- مدل حداکثر آنتروپی بر اساس "اصل آنتروپی" شبکه ارتباطات بین متغیرهای مستقل و وابسته را تعیین کرده که بر اساس نقش هر متغیر مستقل و وزن تأثیر منحنی پاسخ آن به‌دست می‌آید.

- این مدل قادر است توزیع احتمالاتی داده‌های هر یک از لایه‌های رستری مربوط به عوامل مؤثر بر وقوع خطر را استخراج نماید.

- فقط بر اساس موقعیت نقاط وقوع موجود مدل‌سازی را انجام می‌دهد.

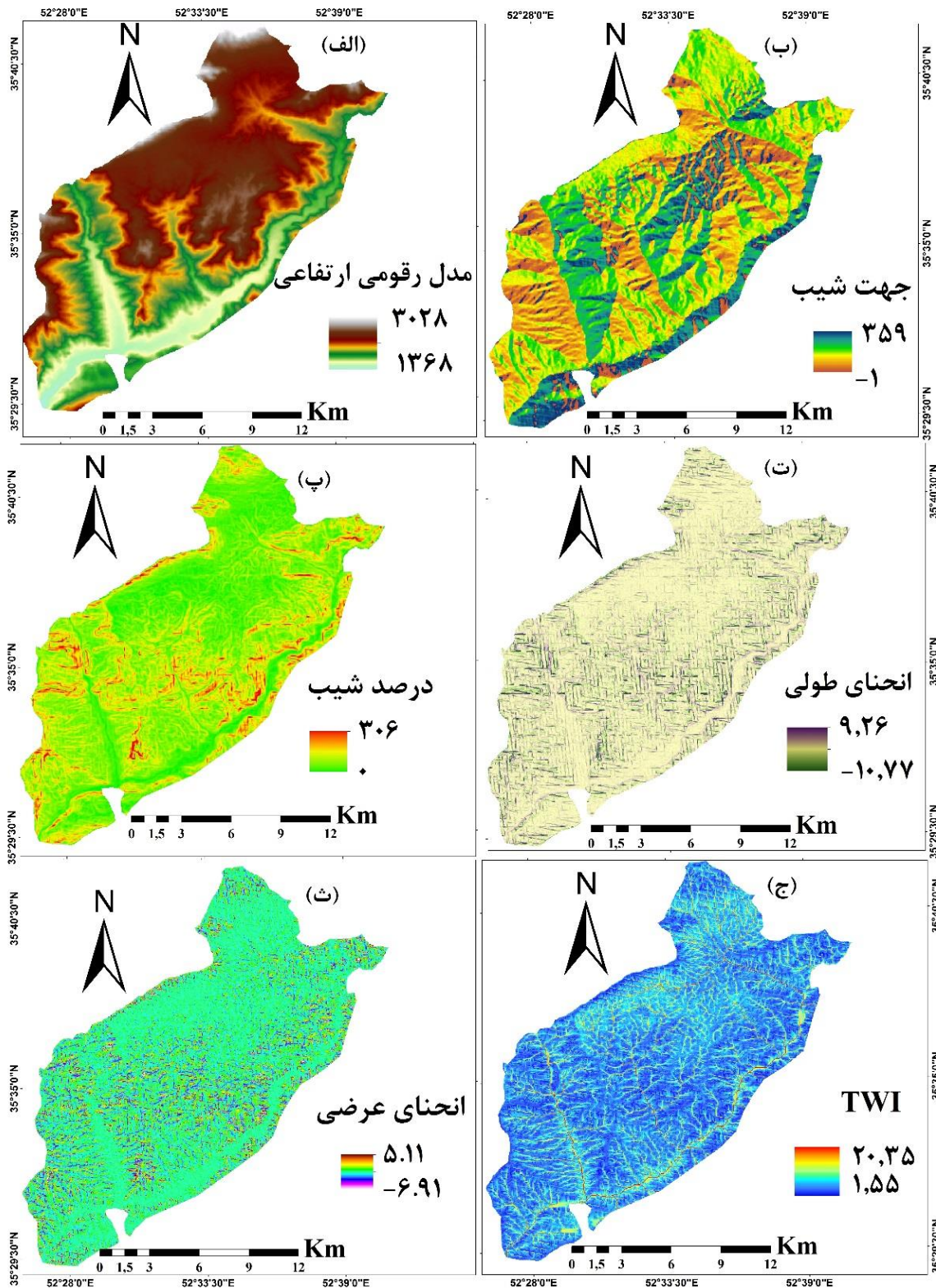
#### تعریف مدل

مدل بیشینه بی‌نظمی یکی از روش‌های یادگیری ماشینی است که قابلیت پیش‌بینی در زمینه‌های مختلف علوم محیطی دارد (۳۲). این مدل فقط بر اساس موقعیت سیلاب‌های

است که در پدیده‌هایی که در حال تهیه نقشه پراکنش مکانی آن هستیم، همگام با زیاد شدن فاصله و دور شدن از یک نقطه نمونه برداری شده، مقدار درصد تأثیر آن نقطه در برآورد نقطه مجهول کاهش می‌یابد. در این روش وزن نقاط نمونه برداری شده بر روی نقطه مجهول براساس فاصله بین نقاط بیان می‌شود. این وزن‌ها توسط توان وزن‌دهی کنترل می‌شود، به طوری که توان‌های بزرگ‌تر، اثر نقاط دورتر از نقطه مورد تخمین را کاهش می‌دهد و توان‌های کوچک‌تر، وزن‌ها را به طول یکنواخت‌تری بین نقاط همسایه توزیع می‌کنند. معادله (۱) چگونگی محاسبه اوزان روش IDW را نشان می‌دهد (۸).

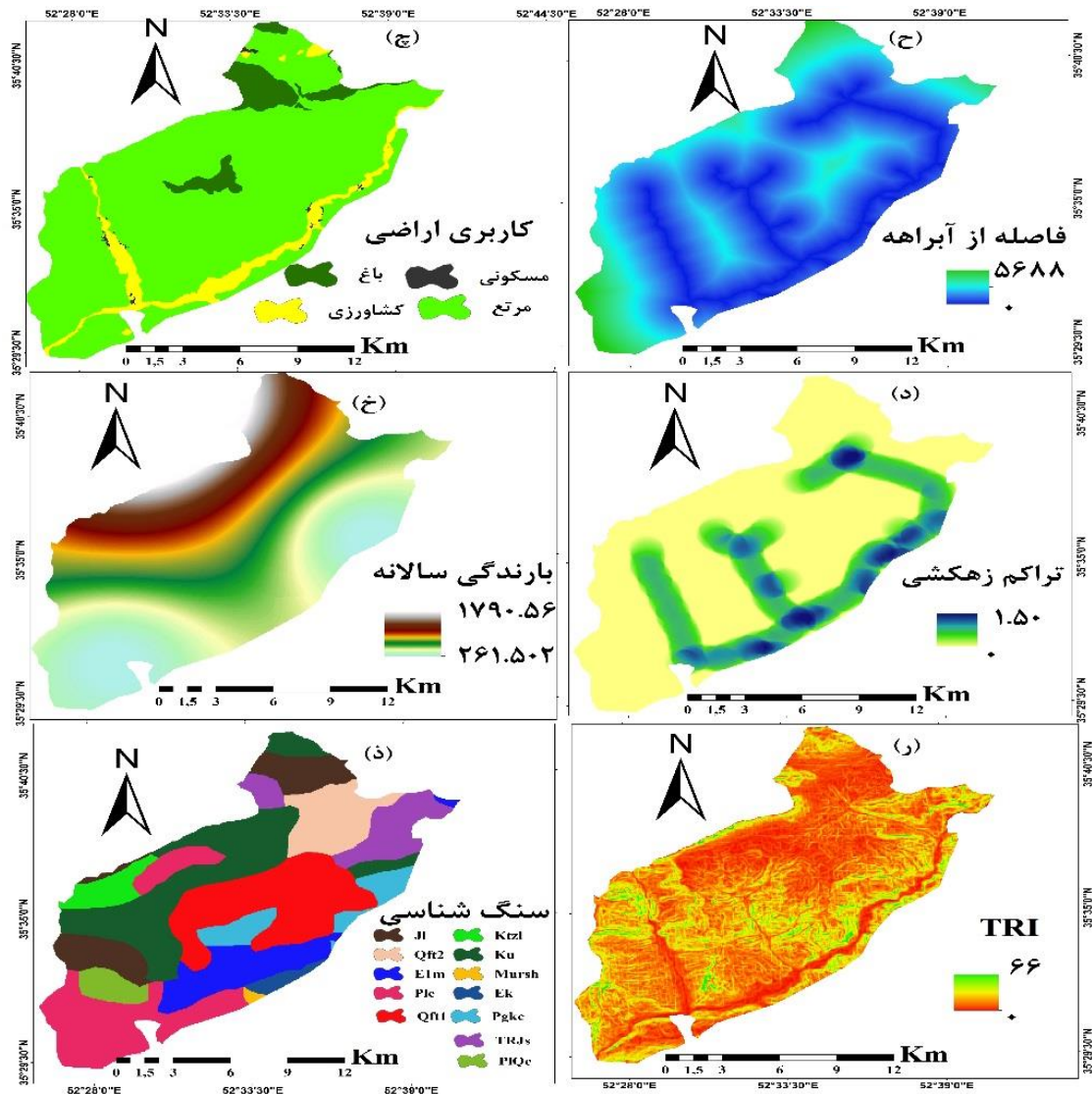
$$W_i = \frac{D_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-\alpha}} \quad (1)$$

که در آن  $W$  وزن نمونه نقطه نام است.  $D_i$  فاصله بین نقطه نمونه  $i$  ام و نقطه مجهول،  $\alpha$  توان وزن‌دهی و تعداد نقاط همسایگی است. بنابراین، با استفاده از روش IDW نقشه بارش تهیه شد. این نقشه از ۲۶۱ تا ۱۷۹۰ میلی‌متر در سال متغیر است شکل (۲-خ) به‌منظور تبدیل شبکه زهکشی به یک کمیت قابل اندازه‌گیری، نقشه تراکم زهکشی با ابزار Line density تهیه شد (شکل ۲-د) که نشان‌دهنده چگونگی جریان شبکه زهکشی حوزه است. سنگ‌شناسی یک عامل کنترل‌کننده حیاتی برای تغییرات مکانی و زمانی هیدرولوژی زهکشی حوضه و تولید رسوب در نظر گرفته می‌شود (۲۸). مناطقی که دارای سنگ‌های مقاوم یا مواد زیرخاک بسیار نفوذپذیر هستند دارای تراکم زهکشی کمی هستند (۴۹). در مطالعه ما، نقشه واحدهای سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی موجود در مقیاس 1:100,000 از بخش مطالعات زمین‌شناسی ایران، تهیه شده است. حوزه آبخیز مورد مطالعه تحت پوشش انواع مختلف سازندهای سنگ‌شناسی قرار دارد که سازندهای کرج، شمشک، لار و تیزکوه از جمله آن هستند (شکل ۲-ذ). شاخص ناهمواری‌های زمینی Terrain Ruggedness Index (TRI) یکی از عوامل مهم



شکل ۲. تهیه عوامل زمین- محیطی مؤثر بر پیش‌بینی احتمال وقوع سیل: (الف) طبقات ارتفاعی، (ب) جهت شیب، (ج) درصد شیب، (ت) انحنا طولی، (ث) انحنا عرضی، (ج) شاخص رطوبت توپوگرافی، (چ) کاربری اراضی، (ح) فاصله از آبراهه، (خ) بارندگی سالانه، (د) تراکم زهکشی، (ذ) سنگ‌شناسی و (ر) شاخص ناهمواری سطح (TRI) (رنگی در نسخه الکترونیکی)





ادامه شکل ۲

موردنظر،  $\ln$  لگاریتم طبیعی،  $x$  مقدار ارزش هر سلول و  $X$  مجموعه‌ای از داده‌های یک لایه رستری است. به‌منظور تعیین رابطه وقایع سیلاب، هریک از عوامل مؤثر بر تولید سیل، باید بسط "اصل آنتروپی" و استخراج منحنی‌های پاسخ یادگیری ماشینی صورت گیرد. در این پژوهش همبستگی پارامترهای مؤثر بر سیل با نقاط مستعد سیل محاسبه و با همبستگی متغیرها با ۱۰۰۰۰ نقطه تصادفی از منطقه به‌عنوان نقاط زمینه یا شبه عدم حضور مقایسه می‌شود و از این طریق بی‌نظمی نسبی میان نقاط مستعد سیل و نقاط تصادفی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر

موجود مدل‌سازی را انجام می‌دهد، درحالی که مدل‌های آماری و سایر روش‌ها علاوه بر موقعیت‌های سیل، نیازمند موقعیت‌های عدم وقوع سیل نیز هستند. این مدل قادر است توزیع احتمالاتی داده‌های هر یک از متغیرهای زمین-محیطی مربوط به عوامل مؤثر بر وقوع سیل را که به‌صورت لایه‌های رستری هستند استخراج نماید. آنتروپی این توزیع‌ها بر اساس رابطه (۲) قابل محاسبه است (۳۴):

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

که در آن  $H(\hat{\pi})$  مقدار آنتروپی توزیع احتمالاتی متغیر



ROC ۶/۷-۰/۰: متوسط و ۰/۶-۰/۵، ضعیف). در واقع منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌ها (Trade off) است. محور X درصد اختصاصیت (Specificity) (احتمال تشخیص صحیح نقاط شبه عدم وقوع) (رابطه ۳) و محور Y حساسیت (Specificity) (احتمال تشخیص صحیح نقاط وقوع) (رابطه ۴) را نشان می‌دهد.

$$Se = \frac{Tp}{Tp + Fn} \quad (3)$$

$$Sp = \frac{Tn}{Tn + Fp} \quad (4)$$

که در آن‌ها، Tp و Tn تعداد پیکسل‌هایی که به درستی به صورت وقوع و عدم وقوع سیلاب طبقه‌بندی شده‌اند. ضرایب Fn و Fp نیز تعداد پیکسل‌هایی هستند که به طور اشتباه به صورت وقوع و عدم وقوع سیلاب طبقه‌بندی شده‌اند.

#### اولویت‌بندی مستعدترین مناطق وقوع سیلاب برای انجام

##### عملیات مدیریتی

به منظور شناخت و بررسی دقیق‌تر حوزه‌های آبخیز و تسهیل در تعیین پتانسیل‌ها و محدودیت‌های هر حوزه و نیز اولویت‌بندی آن‌ها از نظر برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های مدیریت منابع آب و خاک نیاز است تا هر حوزه آبخیز به واحدهای کوچکتری به نام واحدهای هیدرولوژیک تفکیک شود. یک واحد هیدرولوژیک عبارت است از محدوده‌ای از سطح یک حوزه آبخیز که توسط یک آبراه مشخص زهکشی شده و دارای یک خروجی واحد باشد و در عین حال فاقد ورودی به صورت آبراه باشد. در انجام این مطالعه، تقسیم‌بندی حوزه به واحدهای هیدرولوژیک که توسط اداره کل آبخیزداری استان تهران انجام شده است به عنوان مبنا گرفته شد که در این تقسیم‌بندی با توجه به وضعیت توپوگرافی و شبکه آبراه‌های موجود در منطقه و نیز تأمین اهداف مورد مطالعه در بخش آبخیزداری، منطقه مطالعاتی به ۳۲ واحد مستقل (زیرحوزه) و ۱۶ ناحیه داخل حوزه‌ای و غیر مستقل تقسیم شده است.

از آنجا که یافتن نقاط عدم مستعد سیل و اطمینان از این عدم استعداد مشکلات زیادی در مطالعات در پی خواهد داشت، استفاده از مدل MaxEnt به عنوان یک روشی که فقط وابسته به نقاطی هستند که مستعد سیل هستند، می‌تواند منجر به حذف بسیاری از ناکارآمدی‌ها و عدم قطعیت ناشی از نقاط عدم حضور شود. همچنین، یکی از مهم‌ترین مزایای به‌کارگیری الگوریتم پیشینه بی‌نظمی به کمک نرم‌افزار MaxEnt، قابلیت این مدل در شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار و تعیین اهمیت نسبی هر یک از عوامل مؤثر بر شناسایی مناطق سیل و تحلیل حساسیت مدل به روش Jackknife است. در این روش پس از ایجاد مدل کامل با دخالت تمامی متغیرها، مدل‌سازی به تعداد متغیرها تکرار شده و هر بار یکی از متغیرها از روند مدل‌سازی حذف می‌شود. بدین ترتیب میزان تأثیر هر یک از متغیرها در پیش‌بینی نواحی مطلوب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (فیلیپس و همکاران ۳۴).

##### ارزیابی عملکرد پیش‌بینی

در این مرحله، نتایج حاصل از پهنه‌بندی احتمال وقوع خطر سیلاب، بر اساس نقاط وقوع گروه اعتبارسنجی (۳۰ درصد وقایع سیل گذشته) و در قالب روش منحنی مشخصه عامل گیرنده Receiver operating characteristic (ROC) می‌شود و مساحت زیر این منحنی (Area under curve (AUC)) به عنوان معیار کمی برای اعتبارسنجی استفاده می‌شود (۱۴). منحنی ROC یکی از مفیدترین و کارآمدترین و جامع‌ترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیین، شناسایی احتمال و پیش‌بینی سامانه‌هاست که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (۵۳ و ۵۴) که به طور گسترده به منظور آزمون مدل حساسیت‌پذیری خطرات طبیعی استفاده شده است (۳۶).

ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد (۳۰) و مقادیر AUC از ۰/۵ تا ۱ متغیر است. همبستگی کیفی- کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به صورت زیر است (۱-۰/۹: عالی؛ ۰/۹-۰/۸: خیلی خوب؛ ۰/۸-۰/۷: خوب؛

## نتایج و بحث

به طور کلی تعداد ۳۰ نقطه وقوع سیل در حوزه آبخیز مورد مطالعه ثبت شد. ۷۰ درصد از این نقاط برای مدل سازی و بقیه برای ارزیابی مدل به شکل تصادفی انتخاب شدند. بر اساس مرور منابع داخلی و خارج از کشور (۴۰، ۲۵ و ۵۱)، عوامل پیش بینی کننده که برای خطر سیل مورد استفاده قرار گرفت عبارت اند از: طبقات ارتفاعی (متر)، جهت شیب، درصد شیب، انحنای طولی شیب، انحنای عرضی شیب، کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، فاصله از شبکه آبراهه (متر)، تراکم زهکشی، بارندگی سالانه (میلی متر) و سازندهای سنگ شناسی که با استفاده از نرم افزار ArcGIS 10.5 و SAGA به لایه های رستری با اندازه های سلولی  $30 \times 30$  m تبدیل شدند. نتایج حاصل از انجام این پژوهش به شرح ذیل است:

## اجرای مدل

پهنه بندی مناطق مستعد وقوع سیلاب با استفاده از متغیرهای پیش بینی کننده و نقاط وقوع سیلاب در مدل پیشینه بی نظمی اجرا شد و نقشه پهنه بندی تهیه شد. برای ساختن نقشه پهنه بندی مناطق مستعد سیل از روش طبقه بندی شکستن طبیعی (Natural break) (۴) در چهار کلاس کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد استفاده شد (شکل ۳). شکل ۴ توزیع نسبی پهنه های وقوع سیلاب را نشان می دهد. حدود ۱۵/۴۶ درصد و ۱۲/۴۴ از منطقه مورد مطالعه در پهنه وقوع سیل زیاد با احتمال وقوع ۰/۵۳۰-۰/۲۷۸ و بسیار زیاد با احتمال وقوع ۰/۹۵۹-۰/۵۳۰ قرار گرفت. پهنه های واقع در کلاس احتمال وقوع زیاد و بسیار زیاد، در مناطق با درصد شیب کم و نزدیک به رودخانه ها قرار گرفتند. ویژگی های آماری پیش بینی احتمالی نقشه پیش بینی شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

## میزان مشارکت لایه های پیش بینی کننده زمین محیطی در وقوع

## سیلاب

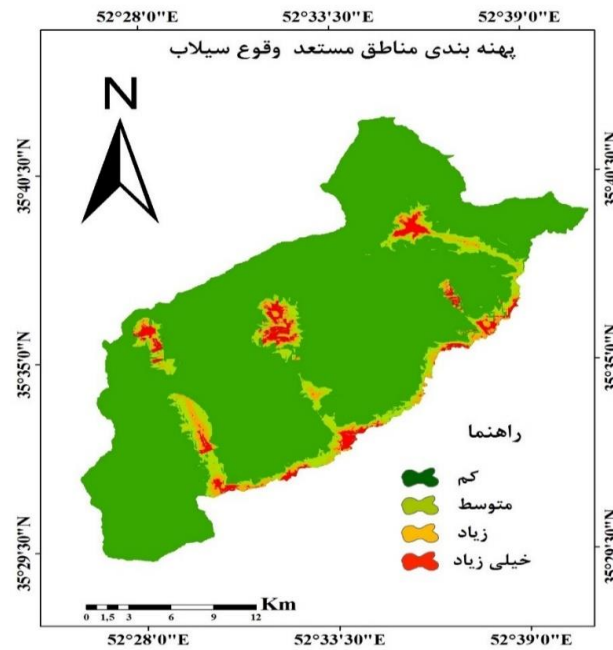
بر اساس آنچه که در روش پژوهش، تجزیه و تحلیل های آزمون

Jackknife مدل پیشینه بی نظمی، میزان اهمیت و مشارکت متغیرهای ورودی در پیش بینی مکانی مناطق مستعد سیل مشخص شد. همان گونه که در جدول ۲ مشاهده می شود، عوامل فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی و شاخص رطوبت توپوگرافی به عنوان مهم ترین عوامل محیطی مؤثر بر پیش بینی مکانی مناطق سیل گیر منطقه مورد مطالعه شناسایی شدند. همچنین، متغیرهای سنگ شناسی، بارندگی سالانه و شیب زمین دارای اهمیت متوسط بودند. شکل ۵ منحنی های پاسخ مربوط به ۳ عامل مؤثر پیش بینی کننده را نشان می دهد.

شبکه جریان رودخانه مسیرهای اصلی تخلیه سیلاب است و مناطق نزدیک رودخانه مستعد سیلاب هستند (۳۱). فاصله از رودخانه، طغیان و جریان رودخانه را کنترل می کند (۱۶). این عامل یکی که تأثیر قابل توجهی در میزان و اندازه سیل دارد (۱۵، ۴۲، ۴۱، ۵۱). وقوع بارش های شدید با افزایش دبی جریان موجب تجمع رسوبات در نواحی اطراف رودخانه های اصلی می شود (۱). رودخانه ها با ایجاد فرسایش و اشباع مناطق کم شیب، بر پایداری شیب اثر می گذارند (۳۵). با افزایش فاصله از آبراهه، احتمال جریان سیل کاهش می یابد (۶) که شکل ۵- الف نشان دهنده این واقعیت است.

تراکم زهکشی به صورت یک کمیت قابل اندازه گیری از روی نقشه شبکه آبراهه در محیط نرم افزار ArcGIS تهیه می شود که نشان دهنده چگونگی جریان شبکه زهکشی حوزه است. این لایه از تقسیم طول آبراهه های زهکشی در یک حوضه آبریز مشخص به کل مساحت حوضه آبریز بدست می آید. در مناطق هموار با تراکم زیاد پوشش گیاهی و نفوذپذیری زیاد، مقدار این عامل کم است. مطابق با شکل ۵- ب، هر چقدر تراکم زهکشی زیادتر باشد، سرعت تجمع رواناب بیشتر شده، نفوذپذیری کاهش یافته و منحنی صعودی هیدروگراف دارای شیب تندتری می شود و وقوع سیلاب افزایش می یابد (۲).

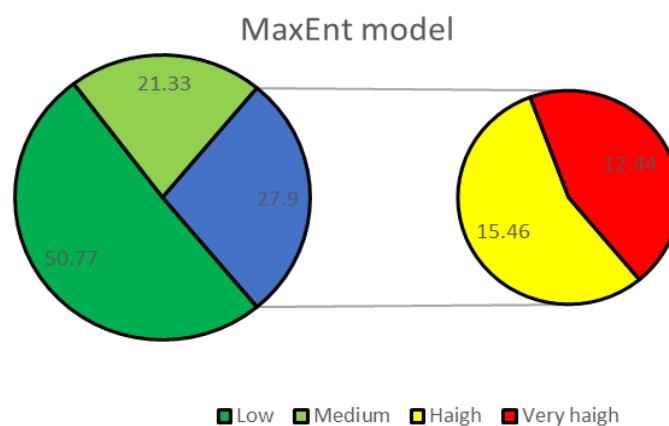
شاخص رطوبت توپوگرافی به عنوان یک خصوصیت توپوگرافی ثانویه، برای کمی کردن اثر توپوگرافی روی سطح اشباع شده جریان استفاده می شود و یکی از فاکتورهای ضروری



شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد سیلاب (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۱. ویژگی‌های آماری پیش‌بینی احتمالی نقشه پیش‌بینی شده

مدل MaxEnt	
ویژگی‌های آماری	میانگین ۰/۰۴۳
	انحراف استاندارد ۰/۱۲۸
	مقدار حداقل ۰
	مقدار حداکثر ۰/۹۵۹



شکل ۴. توزیع نسبی پهنه‌های وقوع سیلاب (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۲. میزان مشارکت لایه‌های پیش‌بینی‌کننده در مدل بیشینه آنتروپی

متغیرها	درصد مشارکت
فاصله از شبکه آبراهه	۳۹/۴
تراکم زهکشی	۲۵/۲
شاخص رطوبت توپوگرافی	۱۰/۸
سنگ شناسی	۵/۷
بارندگی سالانه	۴/۶
درصد شیب	۴/۵
کاربری اراضی	۳/۴
جهت شیب	۲/۸
انحنای طولی	۱/۹
بافت خاک	۰/۷
انحنای عرضی	۰/۶
طبقات ارتفاعی	۰/۳
شاخص زبری سطح	۰/۱

متغیرهای محیطی مؤثر بر وقوع سیل در حوزه آبخیز هراز انتخاب شدند.

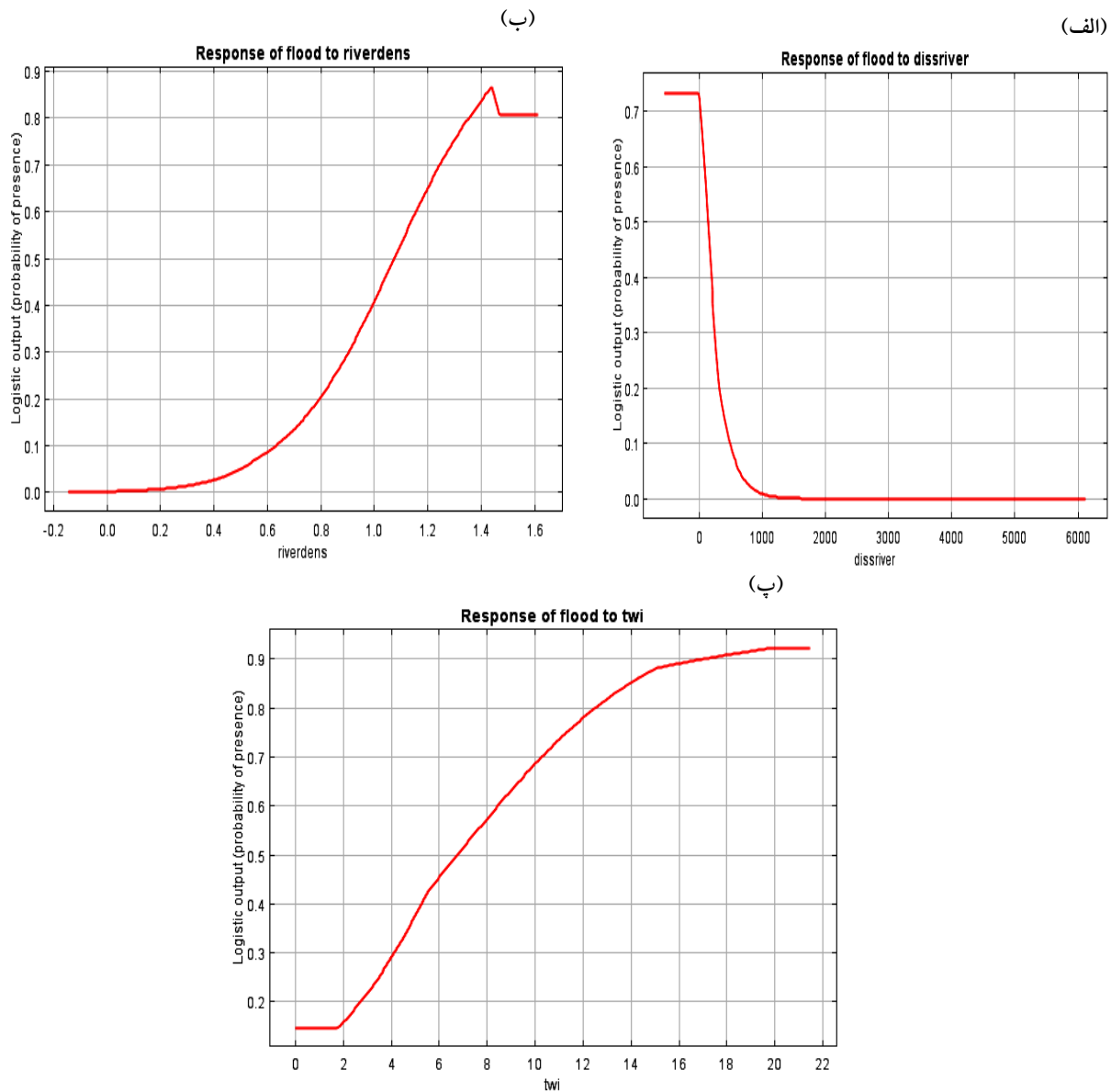
#### ارزیابی نقشه پهنه‌بندی احتمال وقوع سیل

نقشه پهنه‌بندی احتمال وقوع سیل بر اساس منحنی مشخصه عامل گیرنده (ROC) اعتبارسنجی گردید (شکل ۶). همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دقت حدود ۰/۹۸ در مرحله آموزش و حدود ۰/۹۶ در مرحله ارزیابی محاسبه شد. بر اساس منابع علمی در زمینه تحلیل روش منحنی ROC و اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی مکانی می‌توان بیان کرد که کارایی عالی در پیش‌بینی مناطق مستعد سیلاب برای مدل بیشینه بی‌نظمی بدست آمد. نتایج این بخش با مطالعه رجبی و همکاران (۴۳) و سیاهکمری و همکاران (۴۷) که دقت بالای ۹۰ درصد برای مدل بیشینه بی‌نظمی محاسبه شد، همخوانی دارد.

برای تعیین مستعدترین نقاط وقوع سیلاب در حوزه مرزداران طبق نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد سیلاب، واحدهای پرخطری که مناطق مسکونی و باغات در آن‌ها واقع شده بود به‌عنوان اولویت‌های اول برای انجام عملیات مدیریتی در نظر

در ارزیابی سیلاب برای نشان‌دادن توزیع مکانی و اختلاف شرایط رطوبت در حوزه‌های آبخیز است (۲۷). مطابق با شکل ۵- پ با افزایش رطوبت توپوگرافی احتمال وقوع سیل افزایش می‌یابد (۳۸).

بر اساس مطالعه بویی و همکاران (۸) متغیرهای تراکم زهکشی، فاصله از جریان و مدل رقومی ارتفاعی به‌عنوان مؤثرترین متغیرهای محیطی در وقوع خطر سیل از بین سایر عوامل محیطی انتخاب شد. در مطالعه رجبی و همکاران (۴۳) که با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی در بخشی از استان گلستان انجام شد، عوامل تراکم زهکشی (حدود ۴۹ درصد اهمیت) و فاصله از جریان (حدود ۱۵ درصد اهمیت) به‌عنوان مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر سیل‌گیری منطقه مورد مطالعه شناسایی شدند که نتایج مطالعه حاضر را تصدیق می‌کند. در مطالعه لی و همکاران (۲۵) فاصله از رودخانه، سنگ‌شناسی و مدل رقومی ارتفاع از اهمیت زیادی برای پیش‌بینی مکانی نقشه حساسیت به سیلاب برخوردار بودند که تا حدودی با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت دارد. طبق مطالعات خسروی و همکاران (۲۲) مدل رقومی ارتفاعی و فاصله از شبکه جریان به‌عنوان مهم‌ترین

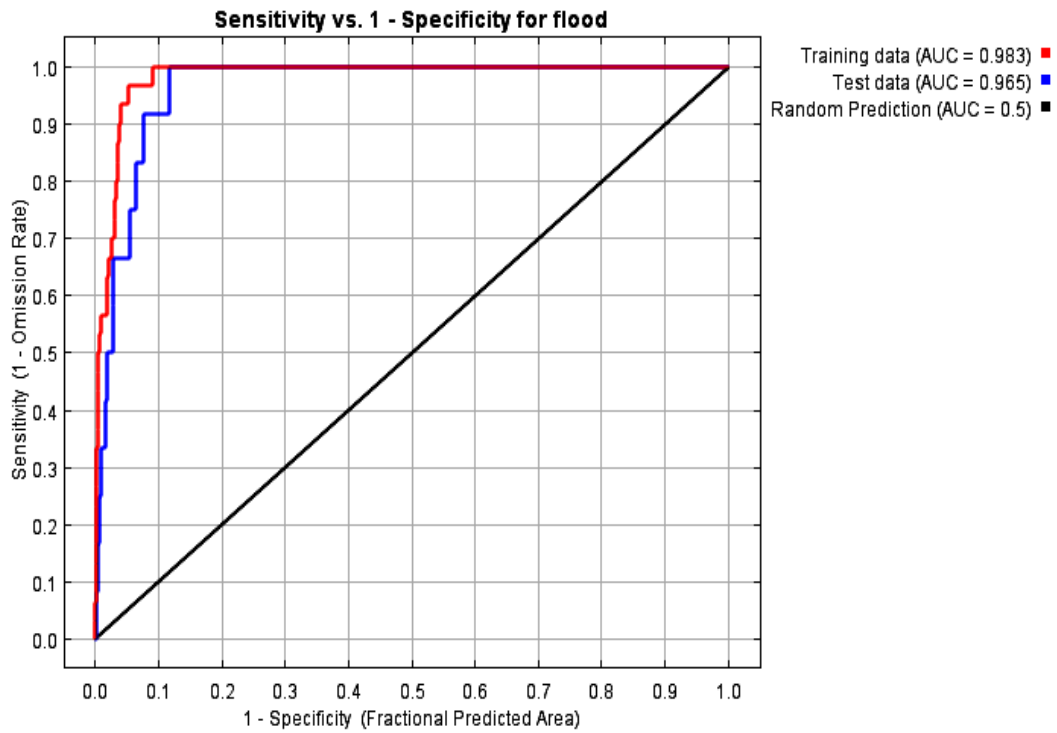


شکل ۵. منحنی‌های پاسخ مربوط به ۳ عامل مؤثر پیش‌بینی‌کننده: الف) فاصله از آبراهه، ب) تراکم زهکشی و پ) شاخص

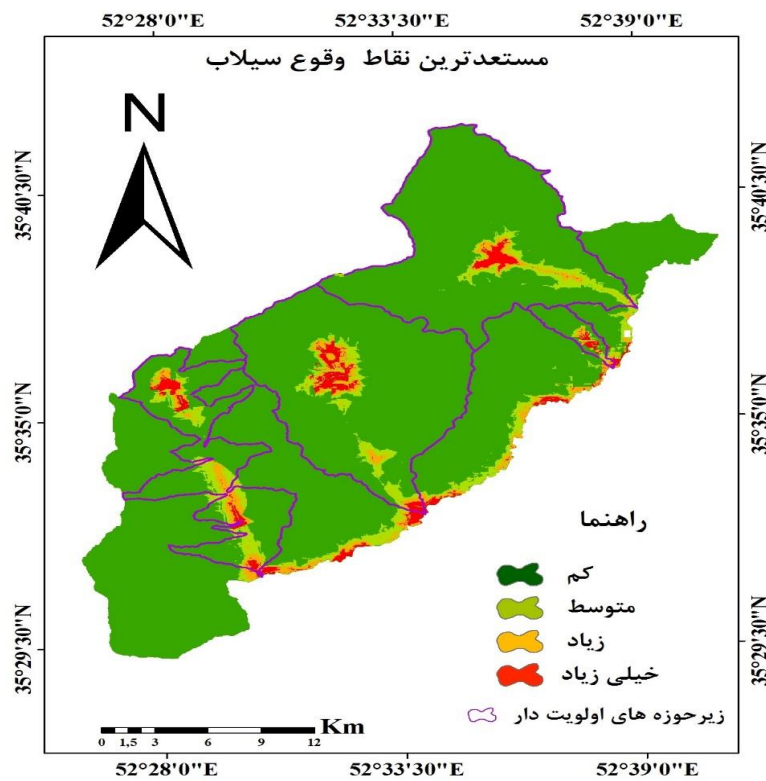
### رطوبت توپوگرافی

حدود صد کیلومتر مربع از منطقه را شامل می‌شود. چرا که با توجه به بودجه‌ای که برای عملیات مدیریتی و کنترل سیلاب در این مناطق اختصاص داده می‌شود، اجرای عملیات برای کل منطقه امکان‌پذیر نخواهد بود. ولی مشخص کردن مناطقی که از نظر این خطر اولویت بالایی دارند و در هنگام وقوع خطر سیل خسارات بیشتری را متحمل می‌شوند از نظر هزینه و زمان کمک خیلی مفیدی به

گرفته شد. یعنی از روی هم‌گذاری نقشه پیش‌بینی‌شده توسط مدل براساس کاربری‌های مسکونی و باغ که در پهنه‌های پرخطر واقع شده بود به‌عنوان اولویت‌های اول برای عملیات مدیریتی کنترل سیلاب قرار گرفت. براساس شکل ۷ مستعدترین مناطق برای عملیات کنترل سیلاب که هم دارای کاربری‌های مسکونی و باغ بوده و هم در پهنه پرخطر قرار گرفته است در اولویت قرار خواهند گرفت که



شکل ۶. ارزیابی نقشه پهنه‌بندی سیلاب بر اساس منحنی مشخصه عامل گیرنده (ROC) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۷. مستعدترین مناطق برای عملیات کنترل سیلاب (رنگی در نسخه الکترونیکی)



است، بنابراین داشتن نقشه‌ای که مناطق مختلف را از نظر احتمال وقوع اولویت‌بندی کرده است بسیار مفید و لازم خواهد بود. برای اجرای این پروژه‌های مدیریتی اولویت اول به مناطق پرخطری اختصاص داده می‌شود که مناطق مسکونی و باغات منطقه که منبع درآمد مهمی برای مردم منطقه است در آن زیرحوزه‌ها قرار گرفته است. بنابراین، پس از تهیه نقشه پهنه‌بندی سیلاب، براساس نقشه پیش‌بینی شده و کاربری اراضی، مستعدترین مناطق از نظر وقوع سیلاب شناسایی شد تا برای اجرای اقدامات مدیریتی در اولویت قرار بگیرند.

نتایج این پژوهش، یک راهنما و بهترین مثال برای مدیریت خطرات طبیعی و برنامه‌ریزی مکانی برای اولویت‌بندی توسعه اقتصادی آینده را ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری بارز برای حفاظت از منابع طبیعی و محیط‌زیست و همچنین برنامه‌ریزی پایدار برای کاربری اراضی در مناطق مستعد سیلاب استان تهران مورداستفاده قرار گیرد و از نظر انتخاب مکان و کاربری اراضی برای سیاست‌گذاران به‌منظور برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های اصلی دولت مهم خواهد بود.

#### محدودیت‌های تحقیق

- به‌منظور شناسایی دقیق‌تر خطرات طبیعی، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای دقیق‌تر و اطلاعات LiDAR برای تجزیه و تحلیل نتایج قابل قبول‌تری ارائه می‌داد.

- استفاده از ترکیب‌های مختلف تعداد داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی هم‌راستا با آن در نظر گرفتن اندازه نمونه‌های مختلف برای عوامل مؤثر و یافتن بهترین ترکیب در جهت مدل‌سازی و ساخت نقشه حساسیت می‌توانست بسیار مفید باشد.

مدیران و تصمیم‌گیرندگان خواهد کرد تا بتوانند با کمترین بودجه زیرحوزه‌های پرخطر و استراتژیک را برای اجرای سازه‌ها و عملیات مدیریتی انتخاب کنند.

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کارایی مدل پیشرفته و پرکاربرد بیشینه بی‌نظمی برای شناسایی مناطق مستعد سیل، در حوزه آبخیز مرزداران و با استفاده از موقعیت مکانی ۳۰ نقطه سیل در منطقه بررسی شد و نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد خطر سیل با استفاده از این مدل به‌دست آمد. بر اساس نقشه خروجی مدل مکسنت توانست با کارایی عالی به پیش‌بینی مناطق مستعد سیل بپردازد. با توجه به ضرورت اولویت‌بندی و تعیین مناطق سیل‌گیر منطقه از نظر پروژه‌های کنترل سیل و مدیریت جامع آبخیزها و برای به حداقل رساندن خسارت‌های ناشی از سیل در جهت حفظ رفاه و ارتقای کیفی سطح معیشت ساکنان حوزه آبخیز پژوهش حاضر انجام شد. حوزه مورد مطالعه به دلیل نوع کاربری‌ها و وجود اراضی شیب‌دار و تجاوز کاربری‌ها به حریم و بستر رودخانه‌ها و مسیل‌ها توان تولید سیل و میزان خسارات جانی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیلاب را چند برابر کرده است. بنابراین، کنترل و مهار بلای سیلاب در حوزه آبریز مرزداران استان تهران یکی از مهم‌ترین اهداف مدیریت این حوزه آبریز بوده که با توجه به سوابق رخداد سیلاب‌های ویرانگر بسیار ضروری خواهد بود. تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع یکی از راهکارهای مؤثر جهت شناسایی و پیش‌بینی مناطق آسیب‌پذیر است که می‌تواند در مدیریت خطر راهنمای مدیران باشد. از طرفی با توجه به اینکه امکان انجام کارهای مدیریتی برای کل منطقه هزینه‌بر

#### منابع مورد استفاده

1. Aalto, R., L. Maurice-Bourgoin, T. Dunne, D. R. Montgomery, C.A. Nittrouer and J. L. Guyot. 2003. Episodic sediment accumulation on Amazonian flood plains influenced by El Nino/Southern Oscillation. *Nature* 425(6957): 493-497.

2. Abdideh, M., M. Qorashi, M. Rangzan and M. Aryan. 2011. Assessment of Relative Active Tectonics using Morphometric Analysis, Case Study of Dez River (Southwestern, Iran). *Scientific Quarterly. Journal of Geosciences* 80: 33-46.
3. Ahmadlou, M., M. Karimi, S. Alizadeh, A. Shirzadi, D. Parvinnejhad, H. Shahabi and M. Panahi. 2019. Flood susceptibility assessment using integration of adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) and biogeography-based optimization (BBO) and BAT algorithms (BA). *Geocarto International* 34(11): 1252-1272.
4. Akgün, A. and F. Bulut. 2007. GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region. *Environment Geology* 51(8): 1377-1387.
5. Bakhtiari, M., S. Kashefipour and S. Asghari Pari. 2012. Evaluation the effect of transverse structures on the flood plain using hydraulic model HEC-RAS in Geographic Information Systems (GIS). *Irrigation Sciences and Engineering* 35(3): 37-46 (In Persian).
6. Binh, P. T., X. Zhu, R. A. Groeneveld and E. C. van Ierland. 2020. Risk communication, women's participation and flood mitigation in Vietnam: An experimental study. *Land Use Policy* 95: 104436-43
7. Bui, Q.T., Q. H. Nguyen, X. L. Nguyen, V. D. Pham, H. D. Nguyen and V.M. Pham. 2020. Verification of novel integrations of swarm intelligence algorithms into deep learning neural network for flood susceptibility mapping. *Journal of Hydrology* 581: 124371-9.
8. Bui, D. T., B. Pradhan, H. Nampak, Q.T. Bui, Q. A. Tran and Q. P. Nguyen. 2016. Hybrid artificial intelligence approach based on neural fuzzy inference model and metaheuristic optimization for flood susceptibility modeling in a high-frequency tropical cyclone area using GIS. *Journal of Hydrology* 540: 317-330.
9. Chen, W., Y. Li, W. Xue, H. Shahabi, S. Li, H. Hong, X. Wang, H. Bian, S. Zhang, B. Pradhan and B. B. Ahmad. 2020. Modeling flood susceptibility using data-driven approaches of naïve Bayes tree, alternating decision tree, and random forest methods. *Science Total Environment* 701: 134979-89.
10. Dahmardeh ghaleno, M., S. G. Meshram and E. Alvandi. 2020. Pragmatic approach for prioritization of flood and sedimentation hazard potential of watershed. *Methodologies and Application* 24: 15701-15714.
11. Daoud, J. I. 2017. Multicollinearity and regression analysis. *Journal of Physics* 949: 012009.
12. Dickie, J. A. and A. J. Parsons. 2012. Eco-geomorphological processes within grasslands, shrublands and badlands in the semi-arid Karoo, South Africa. *Land Degradation Development* 23(6): 534-547.
13. Dodangeh, E., B. Choubin, A. N. Eigdir, N. Nabipour, M. Panahi, S. Shamshirband and A. Mosavi. 2020. Integrated machine learning methods with resampling algorithms for flood susceptibility prediction. *Science of Total Environment* 705: 135983-92
14. Felicísimo, Á., A. Cuartero, J. Remondo and E. Quirós. 2013. Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study. *Landslides* 10: 175-189.
15. Glenn, E. P., K. Morino, P. L. Nagler, R. S. Murray, S. Pearlstein and K. R. Hultine. 2012. Roles of salt cedar (*Tamarix* spp.) and capillary rise in salinizing a non-flooding terrace on a flow-regulated desert river. *Journal of Arid Environments* 79: 56-65.
16. Gupta, A. 2020. *An Introduction to Large Rivers*. John Wiley & Sons.
17. Guzzetti, F., M. Cardinali, P. Reichenbach and A. Carrara. 2000. Comparing landslide maps: A case study in the upper Tiber River Basin, central Italy. *Environmental management* 25(3): 247-263.
18. Hall, A. J. 1981. Flash flood forecasting in Papua, World Meteorological Organization WMO.
19. Hampf, A. C., T. Stella, M. Berg-Mohnicke, T. Kawohl, M. Kilian and C. Nendel. 2020. Future yields of double-cropping systems in the Southern Amazon, Brazil, under climate change and technological development. *Agricultural Systems* 177: 102707-16.
20. Islam, A.R.M.T., S. Talukdar, S. Mahato, S. Kundu, K. U. Eibek, Q. B. Pham, A. Kuriqi and N. T. T. Linh. 2021. Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. *Geoscience Frontiers* 12(3): 101075-86.
21. Kheyrizadeh, M., J. Maleki and H. Amounia. 2012. Flood hazard zoning using ANP model in watershed, case study: Mardaghchay Watershed. *Quantitative Geomorphological Researches* 3: 39- 56. (In Persian).
22. Khosravi, K., E. Nohani, E. Maroufinia and H. R. Pourghasemi. 2016. A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. *Natural Hazards* 83(2): 947-987.
23. Kia, M. B., S. Pirasteh, B. Pradhan, A.R. Mahmud, W.N.A. Sulaiman and A. Moradi. 2012. An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. *Environmental Earth Science* 67: 251-264.

24. Lee, M.J., J. E. Kang and S. Jeon. 2012. Application of frequency ratio model and validation for predictive flooded area susceptibility mapping using GIS. *In: Geoscience and remote sensing symposium (IGARSS)*, IEEE International, Munich, Germany.
25. Lee, S., J. C. Kim, H. S. Jung, M. J. Lee and S. Lee. 2017. Spatial prediction of flood susceptibility using random-forest and boosted-tree models in Seoul metropolitan city, Korea. *Geomatics, Natural Hazards, and Risk* 1-19.
26. Lee, S. and B. Pradhan. 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides* 4: 33-41.
27. Meles, M. B., S. E. Younger, C. R. Jackson, E. Du and D. Drover. 2020. Wetness index based on landscape position and topography (WILT): Modifying TWI to reflect landscape position. *Journal of Environmental Management* 255: 109863.
28. Miller, J. R., D. F. Ritter and R. C. Kochel. 1990. Morphometric assessment of lithological controls on drainage basin evolution in the Crawford Upland, south-central Indiana. *American Journal of Science* 290: 569-599.
29. Moghaddam, D. D., H. R. Pourghasemi and O. Rahmati 2019. Assessment of the Contribution of Geo-Environmental Factors to Flood Inundation in a Semi-Arid Region of SW Iran: Comparison of Different Advanced Modeling Approaches. *In: Natural Hazards GIS-Based Spatial Modeling Using Data Mining Techniques*. Springer, Cham.
30. Nandi, A. and A. Shakoor. 2010. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geological* 110(1-2): 11-20.
31. Opperman, J. J., G. E. Galloway, J. Fargione, J. F. Mount, B. D. Richter and S. Secchi. 2009. Sustainable floodplains through large-scale reconnection to rivers. *Science* 326(5959): 1487-1488.
32. Park, N. W. 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environmental Earth Sciences* 73: 937-949.
33. Parvaresh, E., R. Mahdavi, A. Malekian, Y. Esmaelpour and A. Holisaz 2019. Studying the main factors and prioritizing the flooding potential of sub watersheds using fuzzy tops is and electro III, case study: Sarkhoon Watershed. *Watershed Engineering and Management* 11(2): 493-507 (In Persian).
34. Phillips, S. J., R. P. Anderson and R. E. Schapire 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling* 190: 231-259.
35. Pourghasemi, H. R., A. Gayen, M. Panahi, F. Rezaie and T. Blaschke. 2019. Multi-hazard probability assessment and mapping in Iran. *Science of the Total Environment* 692: 556-571.
36. Pourghasemi, H. R., H. R. Moradi, S. M. Fatemi Aghda, C. Gokceoglu and B. Pradhan. 2013. GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). *Arabian Journal of Geosciences* 7: 18571878.
37. Pourghasemi, H. R., S. V. R. Termeh, N. Kariminejad, H. Hong and W. Chen. 2020. An assessment of metaheuristic approaches for flood assessment. *Journal of Hydrology* 124536-44.
38. Pradhan, B. 2010. Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. *Journal of Spatial Hydrology* 9: 1-18.
39. Rahi, G. 2017. prediction of sensitivity to trench erosion using spatial data-mining methods. Ph.D. thesis, Sari Agricultural and Natural Sciences University, Mazandaran, Iran (In Persian).
40. Rahmati, O. and H. R. Pourghasemi. 2017. Identification of critical flood prone areas in data-scarce and ungauged regions: A comparison of three data mining models. *Water Resources Management* 31(5): 1473-1487.
41. Rahmati, O., H. R. Pourghasemi and H. Zeinivand. 2015. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golestan Province, Iran. *Geocarto International* 31(1): 42-70.
42. Rahmati, O., H. Zeinivand and M. Besharat. 2016. Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 7(3): 1000-1017.
43. Rajabi, A., S. Shabanlou, F. Yosefvand and A. Kiani. 2021. Exploring the sample size and replications scenarios effect on spatial prediction of flood, using MARS and MaxEnt methods case study: saliantape catchment, Golestan, Iran. *Natural Hazards* 1-31.
44. Sarkar, D. and P. Mondal. 2020. Flood vulnerability mapping using frequency ratio (FR) model: a case study on Kulik river basin, Indo-Bangladesh Barind region. *Applied Water Science* 10(1): 17.
45. Shafapour Tehrany, M. S., B. Pradhan and M. N. Jebur. 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology* 512: 332-343.
46. Shafapour Tehrany, M. S., B. Pradhan, S. Mansor and N. Ahmad. 2015. Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena* 125: 91-101.
47. Siahkamari, S., A. Haghizadeh, H. Zeinivand, N. Tahmasebipour and O. Rahmati. 2018. Spatial prediction of flood-susceptible areas using frequency ratio and maximum entropy models. *Geocarto international* 33(9): 927-941.

48. Solomatine, D. P. and Y. Xue. 2004. M5 model trees compared to neural networks: application to flood forecasting in the upper reach of the Huei River in china. *Journal of Hydrologic Engineering* 9(6): 491-501.
49. Srivastava, O. S., D. M. Denis, S.K. Srivastava, M. Kumar and N. Kumar. 2014. Morphometric analysis of a semi urban watershed, trans Yamuna, draining at Allahabad using Cartosat (DEM) data and GIS. *International Journal of Engineering Science* 3: 71-79.
50. Tayefi Nasrabadi, A. and M. Rashidi Mehrabadi. 2008. Flood management in avoiding flood damages and reducing them. *In: Third conference of water resources management, Tabriz, Iran (In Persian).*
51. Termeh, S. V. R., A. Kornejady, H. R. Pourghasemi and S. Keesstra. 2018 Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro fuzzy inference system and metaheuristic algorithms. *Science of the Total Environment* 615: 438-451.
52. Tunusluoglu, M., C. Gokceoglu, H. Nefeslioglu and H. Sonmez. 2008. Extraction of potential debris source areas by logistic regression technique: a case study from Barla, Besparmak and Kapi mountains (NW Taurids, Turkey). *Environmental Geology* 54: 9-22.
53. Van Westen, C. J. 1997. Statistical landslide hazard analysis. *ILWIS* 2: 73-84.
54. Walter, S. D. 2002. Properties of the summary receiver operating characteristic (SROC) curve for diagnostic test data. *Stat Med* 21:1237-1256.
55. Wilson, J. P. and J. C. Gallant. 2000. Terrain analysis: principles and applications. John Wiley and Sons.
56. Woznicki, S. A., J. Baynes, S. Panlasigui, M. Mehaffey and A. Neale. 2019. Development of a spatially complete floodplain map of the conterminous United States using random forest. *Science of the Total Environment* 647: 942-953.
57. Youssef, A.M., B. Pradhan and S. A. Sefry. 2016. Flash flood susceptibility assessment in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) using bivariate and multivariate statistical models. *Environmental Earth Sciences* 75(1): 12-20.

## Determining the Most Susceptible Areas of Flood Occurrence Using MaxEnt Model in Marzdaran Watershed, Tehran Province

Y. Esmaeli, F. Yosefvand\*, S. Shabanlou and M. A. Izadbakhsh<sup>1</sup>

(Received: February 3-2022 ; Accepted: December 31-2022)

### Abstract

The objective of the current study was to zone flood probability in the Marzdaran watershed. Since the allocated budget for management work is limited and it is not possible to carry out operations in the whole area, having a map that has prioritized different areas in terms of the probability of flood occurrence will be very useful and necessary. A well-known data mining model namely MaxEnt (ME) is applied due to its robust computational algorithm. Flood inventories are gathered through several field surveys using local information and available organizational resources, and the corresponding map is created in the geographic information system. The twelve predisposing variables are selected and the corresponding maps are generated in the geographic information system by reviewing several studies. The area under the curve (ROC) is used to evaluate the modeling results. Then, the most prone areas of flood occurrence which are prioritized for management operations are identified based on the prepared map. Based on the results, about 100 km<sup>2</sup> of the study area is identified as the most prone area for management operations. The results showed that the accuracy of the maximum entropy model is 98% in the training phase and 95% in the validation phase. The distance from the river, drainage density, and topographic wetness index are identified as the most effective factors in the occurrence of floods, respectively.

**Keywords:** Zoning, GIS, MaxEnt, Drainage density, Land use, Flood

---

1. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

\*: Corresponding author, Email: fariborzosefvand@gmail.com