نشریه علمی علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۱۶، شماره ۱، صفحه ۴۹ تا ۶۲، شهریور ماه ۱۴۰۵ – مقاله پژوهشی

مدلسازی خطر سیل استان تهران با استفاده از روش یادگیری ماشین

یاسمن اسدی[۱]، نجمه نیسانی سامانی*[۲]، آرا تومانیان[۳]، علی درویشی بلورانی[۴]، مجید فخری[۵]

[۱-۴] گروه سنجش از دور وسیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

yasaman.asadi@ut.ac.ir[۱]

nneysani@ut.ac.ir[۲]

a.toomanian@ut.ac.ir[۳]

ali.darvishi@ut.ac.ir[۴]

[۵] گروه سنجش از دور وسیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده سازمان جغرافیایی، وزارت دفاع، ایران

ma.fakhri@chmail.ir[۵]

(دریافت: اسفند ۱۴۰۴، تصویب: مرداد ۱۴۰۵)

چکیده

پدیده سیلاب گسترده ترین و مخرب ترین سانحه در بین حوادث طبیعی است که خسارات جانی و مالی زیادی بر کشورها و مناطق در سرا سر جهان تحمیل می کند. در استان تهران حوضه های آبخیز مهمی وجود دارند که بویژه در فصول بارندگی پتانسیل بالایی برای تولید رواناب و سیلاب دارند. در این تحقیق از ابزارهای ArcGIS و مدل یادگیری ماشین حداکثر آنتروپی (MaxEnt) برای ارزیابی مناطق با خطر سیل استان تهران استفاده شده است، بدین منظور، با بهره‌گیری از داده‌های هیدرولوژیکی، توزیع گامبل و متغیرهای مؤثر محیطی (شامل ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و ضریب زبری) مدل MaxEnt برای تهیه نقشه خطر سیلاب توسعه یافته است.در ادامه جهت ارزیابی نتایج مدل از مقدار مساحت زیر منحنی تشخیص عملکرد نسبی خطر سیل برای اعتبارسنجی استفاده شده است. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از منحنی ROC انجام شد و مقدار AUC برابر با ۰/۹۶۸ به دست آمده که بیانگر دقت بالای مدل در تفکیک مناطق دارای خطر سیل می باشد. AUC بالاتر نشان می‌دهد که مدل MaxEnt در تمایز بین وقایع مثبت و منفی بهتر عمل می‌کند که این می‌تواند منجر به پیش‌بینی‌های قابل اعتمادتری از مناطق خطر سیل شود. براساس نتایج حاصل از نمودار جک نایف از بین پارامترهای انتخاب شده در فرآیند مدلسازی به ترتیب شیب و ارتفاع، حداکثر دبی ها، ضریب زبری و فاصله از رودخانه بیشترین مشارکت و تاثیر را در وقوع سیل استان تهران داشته اند. براساس نتایج مدل MaxEnt، حدود ۶ درصد از استان تهران در پهنه خطر زیاد و خیلی زیاد قرارگرفته است شناسایی مناطق پرخطر و تعیین عوامل موثر بر رخداد سیلاب در این حوضه ها می تواند در امر کاهش خسارتهای احتمالی بسیار کارآمد باشد.

واژگان کلیدی: حداکثرآنتروپی، سیلاب. مدلسازی، یادگیری ماشین

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

در سراسر جهان، فجایع طبیعی تهدید بزرگی برای اموال و جان انسان‌ها محسوب می‌شوند. اگرچه جلوگیری از خطرات طبیعی غیرممکن است، اما می‌توان با ایجاد استراتژی‌های برنامه‌ریزی مؤثر و تکنیک‌های کاهش، تأثیر منفی آنها را کاهش داد [۳،۲،۱]. سیل یک فاجعه طبیعی رایج است که می‌تواند خسارات و تلفات گسترده‌ای را به مناظر مختلف وارد کند و منجر به مشکلات جدی مانند رسوب بیش از حد و تخریب اکوسیستم‌ها شود [۵،۴]. در میان خطرات مختلف، سیل به عنوان شایع‌ترین و مخرب‌ترین خطر شناسایی شده است. بسیاری از نویسندگان تلاش‌های زیادی برای ارزیابی مناطق سیل‌خیز در سراسر جهان انجام داده‌اند [۷،۶]. سیلاب به پدیده‌ای اطلاق می‌شود که در اثر افزایش حجم و دبی جریان، آب از ظرفیت طبیعی رودخانه یا مجرای زهکشی فراتر رفته و اراضی اطراف را تحت تأثیر قرار دهد [۸]. وقوع سیلاب معمولاً نتیجه برهم‌کنش عوامل مختلفی از جمله بارش‌های شدید یا طولانی‌مدت، ویژگی‌های توپوگرافی، خصوصیات زمین‌شناسی، کاربری اراضی، ظرفیت زهکشی و شرایط هیدرولوژیکی حوضه آبریز است. در میان این عوامل، بارش عامل مهم و محرک ایجاد رواناب و افزایش دبی رودخانه‌ها محسوب می‌شود. با این حال، شدت سیلاب تنها تابع میزان بارش نیست و به نحوه پاسخ هیدرولوژیکی حوضه نیز وابسته است [۹،۱۰]. در این پژوهش، به‌جای استفاده مستقیم از داده‌های بارش، اثر هیدرولوژیکی آن از طریق حداکثر دبی ثبت شده در ایستگاههای هیدرومتری و برآورد دبی متناظر با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله لحاظ شده است. به بیان دیگر، دبی حداکثر حاصل تجمع اثر بارش و سایر ویژگی‌های حوضه بوده و بنابراین نقش بارش به‌صورت غیرمستقیم در فرآیند مدل‌سازی سیلاب وارد شده است. ایجاد نقشه‌های خطر سیل و نظارت بر دشت‌های سیلابی برای توسعه پایدار در مناطق رودخانه‌ای مهم است. افزایش سیل در سراسر جهان، نشان دهنده نیاز به تهیه نقشه های بهتر از خطر سیل و پهنه‌بندی آن می باشد. تکنیک های سنجش از دور ماهواره ای و GIS ابزارهای قدرتمندی برای مدیریت سیل هستند. آنها به پیشگیری، هشدار، آمادگی و تلاش‌های امدادی در برابر سیل کمک می‌کنند. با توجه به اهمیت رودخانه های استان تهران از لحاظ سیل خیزی هدف این پژوهش، مدل‌سازی و تهیه نقشه خطر سیلاب ناشی از رودخانه‌های استان تهران با استفاده از مدل MaxEnt و متغیرهای محیطی و هیدرولوژیکی به‌منظور شناسایی مناطق دارای خطر وقوع سیلاب است. تهیه نقشه پهنه بندی خطر سیل رودخانه های استان تهران و شناسایی مناطق با خطر وقوع سیل در این استان جهت مدیریت و برنامه ریزی راهکارهای حفاظتی برای کاهش خطرات و خسارات ناشی از سیل می باشد. GIS به دلیل توانایی‌اش در ادغام داده‌ها از منابع مختلف، مانند نقشه‌ها و مدل‌های دیجیتال، اغلب برای ایجاد نقشه‌های خطر سیل استفاده می‌کند. علاوه بر این، GIS به طور ویژه برای تهیه نقشه از مناطق خطر سیل ارزشمند می باشد، زیرا اطلاعات را از نظر جغرافیایی سازماندهی کرده و آن را به صورت بصری ارائه می‌دهد. بدون شک داده‌های جغرافیایی، تخصیص منابع را در طول وقایع سیل بیشتر بهبود می بخشد مدل حداکثرآنتروپی را می‌توان برای تهیه نقشه های خطر سیل نیز به کار برد [۱۱]. توجیه استفاده از MaxEnt در تطبیق‌پذیری آن نهفته است در حالی که در درجه اول برای مدل‌سازی توزیع گونه‌ها طراحی شده است، قابلیت‌های پیش‌بینی MaxEnt به طور مؤثر با تهیه نقشه خطر سیل گسترش می‌یابد. قدرت این مدل در توانایی آن در پیش‌بینی توزیع‌های مکانی بر اساس متغیرهای محیطی می باشد که آن را برای شناسایی مناطق دارای خطر سیل مناسب می‌کند. قدرت آن در مدیریت تعاملات پیچیده بین متغیرها و ارائه درک دقیقی از خطرات سیل نهفته است. ارتفاع و شیب بر جریان آب تأثیر می‌گذارند، در حالی که کاربری زمین بر میزان رواناب و نفوذ تأثیر می‌گذارد، پوشش گیاهی مستقیماً با پتانسیل سیل مرتبط است ضریب زبری بیانگر میزان اصطکاک بین سطح زمین و جریان آب است هرچه ضریب زبری بیشتر باشد جریان آب کندتر حرکت می کند. MaxEnt بینش‌های ارزشمندی در مورد تهیه نقشه خطر سیل، درک منطق روش‌شناختی و آگاهی از محدودیت‌های آنها ارائه می‌دهد. این رویکرد، تصمیم‌گیری قابل اعتماد و آگاهانه در ارزیابی خطر سیل را تضمین می‌کند.

MaxEntقادر به مدیریت داده‌های ناقص یا پراکنده است که اغلب در تهیه نقشه خطر سیل وجود دارد [۷]. ممکن است رویدادهای سیل به طور یکنواخت در سراسر یک

منطقه ثبت نشده باشند، اما مدل MaxEnt همچنان می‌تواند با استفاده بهینه از داده‌های موجود، پیش‌بینی‌های قابل اعتمادی ایجاد کند [۱۱]. وجود شبکه‌ای از رودخانه‌های دائمی، از جمله کرج، جاجرود، کن، حبله‌رود، شور و سرخه‌حصار، در کنار شرایط توپوگرافی و اقلیمی استان تهران، زمینه وقوع سیلاب را در بخش‌هایی از منطقه فراهم می‌کند [۱۲]. مطالعات نشان داده‌اند که MaxEnt در تهیه نقشه های آسیب‌پذیری سیل عملکرد خوبی دارد. به عنوان مثال، در مطالعه ای که در سال ۲۰۲۶ توسط آنجلیک و همکاران انجام شد با استفاده از مدل MaxEnt به ارزیابی خطر سیل در کیگالی، رواندا پرداخته شد. عملکرد مدل قوی بود شاخص (۹۶/ AUC=۰) و شیب تأثیرگذارترین عامل (با سهم ۸۴.۹٪) است و پس از آن بافت خاک، تراکم زهکشی و کاربری/پوشش زمین قرار دارند این سطح بالای دقت، مدل MaxEnt را به عنوان ابزاری قابل اعتماد برای تهیه نقشه های خطر معرفی می‌کند[۱۳]. زرهودی و همکاران در سال ۲۰۲۶ برای ارزیابی سیل در برکان دو رویکرد مکمل، خطر و حساسیت سیل را با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره و MaxEnt مقایسه کرد و MaxEnt تشخیص بهتری برای مناطق با خطر بسیار بالا داشت[۱۴]. لوآن و همکاران در سال ۲۰۲۵مدل (MaxEnt)را با مدل PLUS ترکیب کردند تا تغییرات کاربری زمین و خطرات سیل شهری در شنژن را برای سال‌های ۲۰۴۰، ۲۰۶۰، ۲۰۸۰ و ۲۱۰۰ تحت سه سناریو بر اساس عوامل کلیدی مشتق‌شده از مدل‌های جهانی آب و هوا(GCMs)، پیش‌بینی کند[۱۵]. هو و همکاران در سال ۲۰۲۵ تحلیل خطر سیل شهری را با استفاده از رویکرد یادگیری ماشینی انجام دادند یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که خاک لوم رسی بالاترین احتمال وقوع سیل را در شهر هاربین داشته و مدل MaxEnt عملکرد پیش‌بینی قوی شاخص‌های (۸۷۱/ AUC=۰) را نشان داده است [۱۶]. عفیفی در سال۱۴۰۲ به تهیه نقشه حساسیت سیلاب و احتمال وقوع آن با استفاده از مدل آنتروپی شانون در حوزه فیروز پرداخت بر اساس نتایج منحنیROC برای میزان پیش بینی مقدار سطح زیر منحنی با ۳۵ درصد داد ه های اعتبارسنجی برابر ۹۱ درصد و برای میزان موفقیت با ۶۵ درصد داد ه های آموزش برابر۹۲ درصد می باشد [۱۷]. قاسمی و همکاران در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۴بر روی رودخانه کوکچا انجام شد، با استفاده از مدل‌هایMaxEnt و نسبت فراوانی، حساسیت سیلاب را در زیرحوضه رودخانه کوکچا در حوضه آبریز آمودریا ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل MaxEnt با دقت ۹۷ درصد عملکرد بهتری نسبت به مدل نسبت فراوانی داشته و بارش، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه و نوع خاک به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر سیل شناسایی شدند [۱۸]. هرشاسیما و همکاران در سال ۲۰۲۳، به تهیه نقشه آسیب‌پذیری سیل با استفاده از یادگیری ماشین MaxEnt و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)[۱] در منطقه شهری کامروپ، آسام پرداختند.طبق یافته‌های این مطالعه، AUC نقشه سیل تولید شده توسط MaxEntبرابر با ۸۳٪ در حالی که AUC نقشه سیل تولید شده توسط AHP برابر با ۷۶٪ است، به این معنی که نقشه سیل تولید شده توسط MaxEnt بهتر بوده است [۱۱]. یافته‌های مشابهی از رودخانه‌های مختلف و در مناطق مختلف جهان، از جمله واشیست و همکاران حوضه رودخانه کریشنا در سال ۲۰۲۴، یاسین رودخانه گنگ در سال ۲۰۲۴، دبناس و همکاران رودخانه جیا بهارالی در سال ۲۰۲۴، دبناس و همکاران حوضه رودخانه برهماپوترا در سال ۲۰۲۳، خان و همکاران رودخانه راپتی در سال ۲۰۲۳، داس رودخانه سوبارناراخا در سال ۲۰۲۱، پارسیان حوزه آبخیز پل دختر در سال ۲۰۲۱و سنیها رودخانه یامونا درسال ۲۰۱۸، گزارش شده است. شناسایی مناطق پرخطر و تعیین عوامل مؤثر بر وقوع سیل در این حوضه می‌تواند در کاهش خسارات احتمالی بسیار کارآمد باشد. انعطاف پذیری بالا، بهره گیری کامل از داده های موجود و مدلسازی بهتر داده های پیچیده و غیرخطی در مدل بیشینه آنتروپی منجر شد که از این مدل به منظور تهیه نقشه خطر سیلاب در استان تهران استفاده شود. با وجود انجام پژوهش‌های متعدد در زمینه پهنه‌بندی خطر سیلاب، تلفیق درونیابی مکانی حداکثر دبی ایستگاه‌های هیدرومتری، تحلیل فراوانی دبی و برآورد دبی متناظر با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله با استفاده از توزیع گامبل، و مدل‌سازی مکانی با استفاده ازMaxEnt ، به‌ویژه برای پهنه‌بندی یکپارچه خطر سیلاب در رودخانه‌های دائمی استان تهران، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. نوآوری

۱ Analytic Hierarchy Process

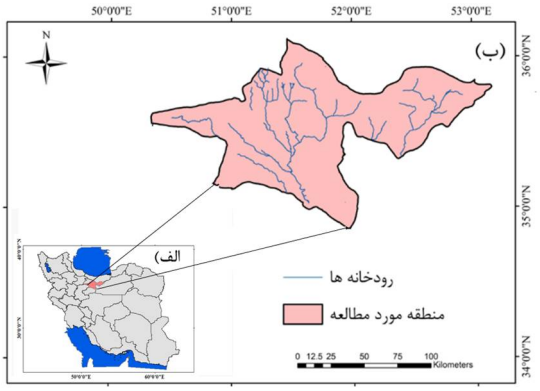
این پژوهش در تلفیق داده‌های حداکثر دبی، تحلیل فراوانی گامبل و Q200 با مدل MaxEnt است. در این رویکرد، داده‌های نقطه‌ای دبی ابتدا به یک لایه مکانی پیوسته تبدیل شده و سپس اطلاعات دبی حدی در کنار متغیرهای محیطی برای تهیه نقشه خطر سیلاب به کار گرفته می‌شود. این چارچوب ارتباط میان اطلاعات هیدرومتری و مدل‌سازی مکانی خطر سیلاب را برقرار می‌کند. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف تهیه نقشه خطر سیلاب و شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع آن در استان تهران انجام شده است.

۲- روش تحقیق

این پژوهش به ارزیابی خطر سیلاب در استان تهران می‌پردازد که روند اجرای آن در شکل (۲) ارائه شده است. در ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای انجام شد و سپس با مراجعه به سازمان‌ها و ارگان‌های ذی‌ربط از جمله شهرداری مرکزی تهران و شرکت آب منطقه‌ای استان تهران، داده‌های مورد نیاز شامل اطلاعات رودخانه‌ها، کانال‌ها و حداکثر دبی ایستگاه‌های هیدرومتری جمع‌آوری گردیده و به‌منظور استخراج خودکار شبکه آبراهه و شاخص‌های هیدرولوژیکی، از ابزارهای Hydrology در افزونه ArcGIS Spatial Analystاستفاده شده است. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب در منطقه شامل شیب، ارتفاع، توزیع مکانی حداکثر دبی، ضریب زبری، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی و پوشش گیاهی در نظر گرفته شده است. ارتفاع و شیب منطقه از مدل رقومی ارتفاع ASTER با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استخراج و مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM) ابتدا به‌منظور حذف فرورفتگی‌های مصنوعی پردازش شده تا از پیوستگی مسیر جریان اطمینان حاصل شود [۱۹]. سپس با استفاده از رستر اصلاح‌شده، جهت جریان (Flow Direction) و پس از آن رستر تجمع جریان (Flow Accumulation) در محیط ArcGIS 10محاسبه گردیده است. رستر تجمع جریان بیانگر تعداد سلول‌های بالادست مؤثر بر هر سلول بوده و به‌عنوان یکی از شاخص‌های اصلی هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته است[۷]. برای تولید لایه پیوسته دبی، ابتدا رابطه رگرسیونی بین مقادیر حداکثر دبی ایستگاه‌های هیدرومتری و مقادیر رستر تجمع جریان متناظر برقرار شده و بر اساس معادله حاصل با$R^2 = 0.81$ با استفاده از دستور Raster Calculater روی جریان تجمعی اعمال و توزیع مکانی دبی در سطح منطقه برآورد گردیده است. در ادامه، به‌منظور شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی متناظر با یک رخداد حدی، توزیع گامبل بر داده‌های حداکثر دبی ایستگاه‌های هیدرومتری برازش شده و مقدار دبی متناظر با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله (Q200) محاسبه شده است. سپس مقدار Q200 به‌عنوان آستانه هیدرولوژیکی بر لایه توزیع مکانی حداکثر دبی، که بر پایه رابطه رگرسیونی بین جریان تجمعی و حداکثر دبی تولید شده بود، اعمال شده است. داده‌های وقوع سیلاب مورد استفاده این پژوهش از شرکت آب منطقه‌ای استان تهران دریافت شده است. این داده‌ها شامل نقاط ثبت‌شده وقوع سیلاب در بازه زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۰ در محدوده مطالعه بوده و از نظر مکانی، مناطق سیلابی در سراسر محدوده استان تهران را پوشش می دهد. به‌منظور کنترل کیفیت داده‌های حضور، نقاط تکراری شناسایی و حذف شدند و نقاط نهایی به‌عنوان داده‌های حضور (Presence) برای مدل MaxEnt مورد استفاده قرار گرفته است. پراکنش مکانی نقاط وقوع سیلاب در شکل ۶ ارائه شده است. این لایه به‌همراه سایر متغیرهای محیطی شامل ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، ضریب زبری به‌عنوان ورودی مدل MaxEnt در محیط پایتون مورد استفاده قرار گرفته است همچنین نقاط پس‌زمینه (Background) به‌صورت تصادفی از کل منطقه مطالعه انتخاب شده اند. به این ترتیب، به‌جای استفاده از رستر دبی خام، لایه‌ای وارد مدل شده که علاوه بر توزیع مکانی دبی، شرایط هیدرولوژیکی متناظر با سیلاب با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله را نیز منعکس می‌کند و در کنار سایر متغیرهای محیطی برای تولید نقشه نهایی خطر سیلاب به کار رفته است.جهت مدل‌سازی خطر سیلاب، نقاط وقوع سیلاب به‌صورت تصادفی به دو مجموعه آموزش و اعتبارسنجی تقسیم شده‌اند؛ به‌طوری‌که ۷۰ درصد از نقاط برای آموزش مدل و ۳۰ درصد باقیمانده برای اعتبارسنجی عملکرد آن مورد استفاده قرار گرفته است. سپس نقشه خطر سیلاب با استفاده از هفت پارامتر مؤثر بر وقوع سیلاب و به کمک الگوریتم یادگیری ماشین بیشینه آنتروپی (MaxEnt) تهیه شده است. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل، از منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) مقدار سطح زیر منحنی (AUC) و ضریب کاپا استفاده شده است.

۲-۱-منطقه مورد مطالعه

استان تهران در جنوب شرقی مرکز رشته کوه البرز قرار دارد و پرجمعیت‌ترین استان ایران با جمعیت حدود ۱۹ میلیون نفر و مساحتی کمتر ۱۳۰۰۰ کیلومتر مربع است و از نظر مساحت پس از استان‌های البرز و قم، سومین استان کوچک ایران است. این استان (شکل ۱) از شمال به استان مازندران، از جنوب به استان قم، از جنوب‌غربی به استان مرکزی، از غرب و شمال‌غرب به استان البرز و از شرق و جنوب‌شرق به استان سمنان محدود می شود. با وجود اینکه استان تهران تنها ۰/۷۸ درصد مساحت ایران را دربرگرفته است اما ۱۶ درصد جمعیت کشور را در خود جای داده‌است شمال این استان اقلیم سرد کوهستانی و جنوب آن اقلیم معتدل نیمه بیابانی دارد بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر ایران، مرکز این استان است.



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

۲-۲ -داده ها و معیارهای مورد استفاده

فاکتورهای مختلفی توسط محققان در پدیده سیلاب به کار گرفته می شود و رخداد های سیلاب توسط فاکتورهای متنوعی تاثیر می پذیرد[۲۰]. بسته به ویژگی های زیست محیطی منطقه، نقش فاکتور های سیلاب در نقاط مختلف جهان متفاوت است و ضابطه از پیش تعریف شده ای برای انتخاب فاکتور ها سیلاب برای تولید نقشه های خطر پذیری سیلاب وجود ندارد. انتخاب مناسب فاکتورهای سیلاب یک گام کلیدی در تهیه نقشه های خطر پذیری سیلاب است زیرا به طور قابل توجه ای دقت و عملکرد مدلها را تحت تاثیر قرار می دهد [۲۱]. معیارهای مورد استفاده پژوهش حاضر بر اساس مبانی هیدرولوژیکی، ویژگی‌های منطقه مطالعه و مطالعات پیشین [۳۰-۲۲] انتخاب شدند (شکل۲). ارتفاع یکی از مهمترین فاکتور های سیلاب است که روی رخداد های سیلاب تاثیر می گذارد [۳۱]. سیل و ارتفاع ماهیتی متقابل دارند که در بسیاری از مطالعات قبلی مورد توجه قرار گرفته است [۳۴-۳۲]. نواحی با ارتفاع پایین بیشتر از مناطقی با ارتفاع بالا دارای خطر وقوع سیل است. شیب: شیب نسبت فاصله قائم (با اختلاف ارتفاع) دو نقطه با فاصله ی افقی میان همان دو نقطه تعریف می شود. نقشه شیب زمین به دلیل تأثیر رابطه ی مستقیم بر فرصت نفوذ و رواناب سطحی، یکی از عوامل مهم در وقوع سیل به شمار می رود [۳۵]. پوشش گیاهی: این شاخص معیاری است که برای مطالعه سبزینگی سطح زمین و وجود بدنه های آبی استفاده می شود تغییرات در این شاخص منعکس کننده میزان پوشش گیاهی و پوشش آب سطحی در طول زمان است و می تواند رابطه بین سیلاب و پوشش گیاهی در یک حوضه را نشان دهد. تراکم پوشش گیاهی بالا نمایانگر کاهش جریان زمینی است پوشش گیاهی بالاتر احتمال وقوع سیلاب در منطقه را کاهش می‌دهد [۳۶]. کاربری زمین می تواند بر نفوذ و در نتیجه بر رواناب ناشی از سیلاب تاثیر گذارد و جریان سطحی زمین را افزایش دهد [۳۸،۳۷]. حداکثر دبی به‌عنوان شاخصی از بزرگی و شدت هیدرولوژیکی سیلاب، در این پژوهش برای نمایش تغییرات مکانی توان بالقوه جریان در شبکه آبراهه‌ها به کار گرفته شد. [۱۰و۹]. فاصله از رودخانه: رودخانه های موجود در حوضه آبریز بطور کلی عملیات تخلیه جریانهای سطحی را نشان می دهد فاصله تا رودخانه تاثیر قابل توجه ای روی سیلاب در یک ناحیه مشخص دارد [۳۹] با فاصله گرفتن از رودخانه ها سیل خیزی کاهش می یابد. ضریب زبری یکی از عوامل مؤثر بر رفتار جریان و گسترش سیلاب است و بیانگر میزان مقاومت سطح زمین در برابر حرکت رواناب است. این ضریب تحت تأثیر ویژگی‌هایی نظیر نوع و تراکم پوشش گیاهی، ناهمواری سطح و موانع موجود در مسیر جریان قرار دارد. در پژوهش حاضر، ضریب زبری با توجه به نوع پوشش گیاهی منطقه و بر اساس مقادیر ارائه‌شده در نشریه شماره ۶۸۸، راهنمای تعیین ضریب زبری هیدرولیکی رودخانه‌ها تعیین شده است [۴۱،۴۰].

۲-۳ -مدل یادگیری ماشین

کاربرد هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در مدلسازی مخاطرات زمین در سالهای اخیر به سرعت در حال رشد

بوده است الگوریتمهای رویکردهای یادگیری ماشین اخیراً به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته و به تکامل سیستم‌های پیش‌بینی کمک کرده است و عملکرد بهبود یافته، غنی‌شده و راه‌حل‌های کارآمدی را ارائه می‌دهند [۴۲]. یادگیری ماشین این قابلیت را دارند که رفتار سیستم اساسی را از مجموعه داده های آموزشی بدون نیاز به دانش قبلی موجود در میان مجموعه داده ها یاد بگیرند [۴۳]. روش‌های یادگیری ماشین به طور مداوم پیشرفت کرده‌اند و مناسب بودن خود را برای ارزیابی مخاطرات طبیعی با دقت بهتر در مقایسه با رویکردهای سنتی نشان داده‌اند. رویکردهای مختلف یادگیری ماشین برای تهیه نقشه مخاطرات طبیعی مانند سیل، رانش زمین و آتش‌سوزی‌های جنگلی استفاده شده‌اند [۴۵،۴۴،۳۵].

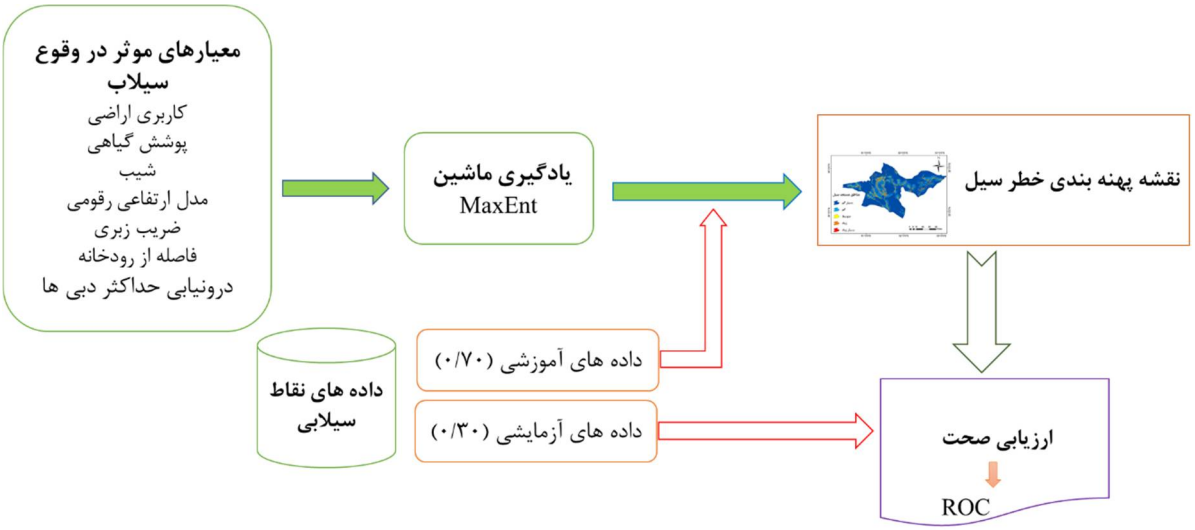
با این حال، شواهد قابل توجهی وجود ندارد که یک رویکرد یادگیری ماشین خاص برای ارزیابی یک خطر خاص مناسب باشد، زیرا این امر کاملاً به داده‌های موجودی و عوامل مؤثر انتخاب شده برای منطقه مورد مطالعه بستگی دارد. به دلیل توانایی مدل‌های یادگیری ماشین در شناسایی روابط غیرخطی میان متغیرهای محیطی و وقوع سیلاب، در پژوهش حاضر از مدل MaxEnt برای پهنه‌بندی خطر سیلاب استفاده شده است.

۲-۴-مدل بیشینه آنتروپی

روش MaxEnt یکی از روشهای یادگیری ماشینی است که قابلیت پیش بینی مکانی بالایی در زمینه های مختلف محیطی دارد [۴۶]. مدل‌سازی MaxEnt مبتنی بر نظریه آنتروپی است که عدم قطعیت را در فرآیندهای تصادفی اندازه‌گیری می‌کند و نحوه تغییر را در طول زمان و مکان منعکس می‌کند. این مدل به طور گسترده در زمینه‌هایی مانند بوم‌شناسی، جغرافیای شهری،باستان‌شناسی، مدل‌سازی بارندگی و طراحی سیستم‌های پایش آب کاربرد دارد [۴۷]. MaxEnt یک مدل آماری است که با انجام تخمین‌های کم‌سویه از داده‌های موجود، به پیش‌بینی رویدادهای ناشناخته کمک می‌کند. این مدل توزیع‌های احتمال را تخمین می‌زند و داده‌های خام محیطی را به ویژگی‌های قابل استفاده تبدیل می‌کند. این مدل می‌تواند به طور خودکار بهترین ویژگی‌ها را برای بهبود دقت انتخاب کند.فرمول MaxEnt رابطه (۱) مورد استفاده در MaxEnt به شرح زیر است:

$$P * (z(x_i)) = \exp(z(x_i)\lambda) / \sum i\exp(z(x_i)\lambda) \qquad (۱)$$

در این معادله، z نشان دهنده برداری از متغیرهای محیطی در مکان x_i و λ برداری از ضرایب رگرسیون اختصاص داده شده به ویژگی‌ها است. P احتمال حضور گونه ها در مکان x_i است. مدل MaxEnt [۷] از یادگیری ماشینی MaxEnt برای تخمین توزیع گونه‌ها بر اساس داده‌های محیطی استفاده می‌کند و به طور گسترده در مدل‌سازی توزیع گونه‌ها استفاده می‌شود.

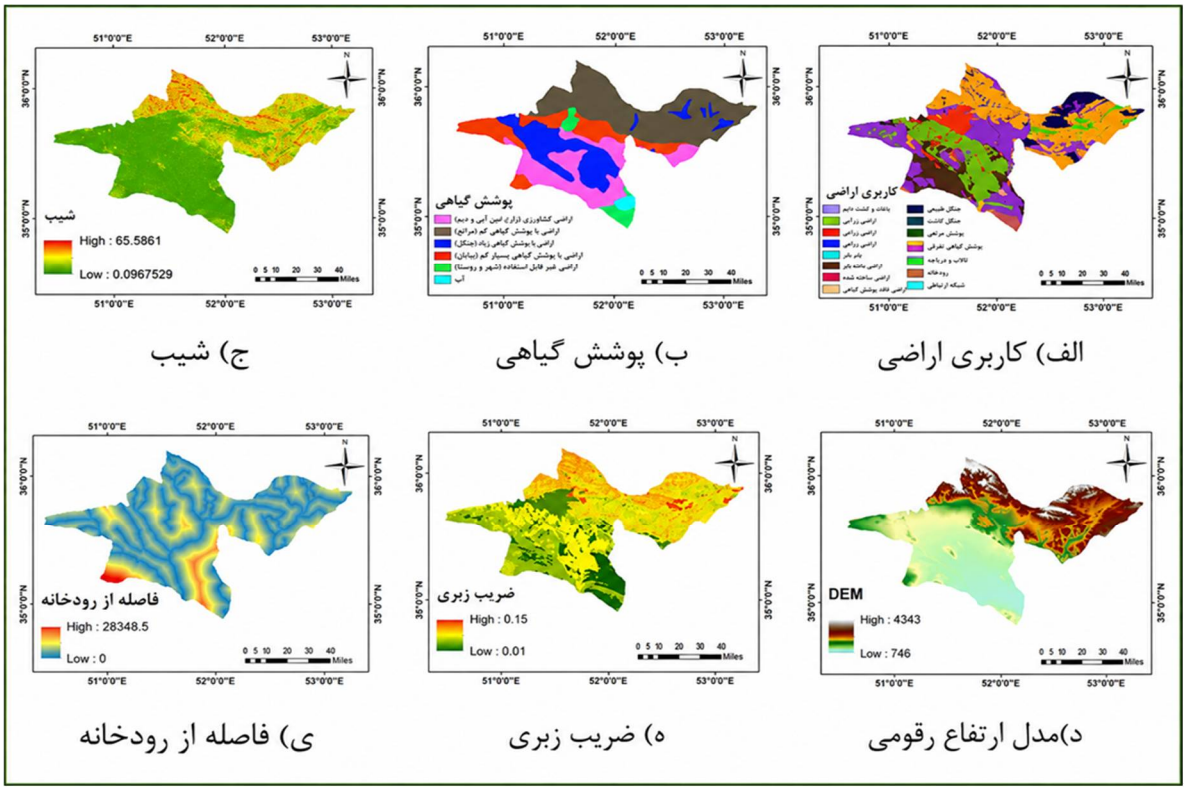


شکل ۲- روش تحقیق

۳- نتایج

روش های متنوعی در سراسر جهان برای پیش بینی مکانی خطرات طبیعی همچون سیلاب توسعه داده شده است ولی تقریبا تمام آنها برای رسیدن به هدفی واحد ایجاد شده اند. تهیه نقشه های خطرپذیری مخاطرات طبیعی با دقت بالا مسئله ای چالش برانگیز است که محققان همچنان بر روی آن تحقیق می کنند. این پژوهش با هدف مدل‌سازی و تهیه نقشه خطر سیلاب ناشی از رودخانه‌های استان تهران، با استفاده از مدل MaxEnt و متغیرهای محیطی و هیدرولوژیکی به‌منظور شناسایی مناطق دارای خطر سیل انجام شده است. شیب زمین و ارتفاع بر سرعت و جهت جریان رواناب مؤثرند و مطالعات پیشین نیز نقش شیب را در تغییر رفتار رواناب و الگوی خطر سیلاب مورد تأکید قرار داده‌اند [۴۸] با این حال، اثر شیب بر احتمال وقوع سیلاب می‌تواند با توجه به موقعیت توپوگرافی و فرایند غالب جریان متفاوت باشد. مناطق کم‌شیب معمولاً با کاهش سرعت جریان و افزایش تجمع و ماندگاری آب همراه هستند که می‌تواند احتمال آب‌گرفتگی و تداوم سیلاب را افزایش دهد. در مقابل، مناطق شیب‌دار با افزایش سرعت رواناب و کاهش زمان تمرکز، می‌توانند در مناطق بالادست و کوهستانی زمینه‌ساز شکل‌گیری سیلاب‌های ناگهانی شوند و در عین حال خطر فرسایش را افزایش دهند. بنابراین، درک پویایی شیب برای مدیریت مؤثر ریسک سیل و استراتژی‌های کاهش آن بسیار مهم است.نقشه شیب (شکل ۳) نشان می‌دهد که به‌جز بخش‌هایی از شمال و شرق، بیشتر منطقه مورد مطالعه دارای شیب کم است. در این مناطق، کاهش سرعت جریان و افزایش تجمع رواناب می‌تواند پتانسیل وقوع آب‌گرفتگی را افزایش دهد. این موضوع با نتایج مطالعات انجام‌شده در حوضه‌های ایران که نقش عوامل توپوگرافی و ژئومحیطی را در کنترل الگوی آب‌گرفتگی و سیلاب مورد تأکید قرار داده‌اند، همخوانی دارد [۵۰،۴۹] نتایج آزمون جک‌نایف نیز نشان داد که شیب مهم‌ترین عامل مؤثر در پیش‌بینی خطر سیلاب در منطقه مورد مطالعه است. همچنین، نواحی واقع در امتداد آبراهه‌ها و مناطق کم‌شیب، حساسیت بیشتری نسبت به وقوع و ماندگاری سیلاب نشان می‌دهند. در مقابل، در مناطق کوهستانی و بالادست، شیب زیاد می‌تواند از طریق افزایش سرعت و تمرکز رواناب، در شکل‌گیری سیلاب‌های ناگهانی نقش داشته باشد. این الگوی مکانی با مطالعات انجام‌شده در حوضه‌های آبریز استان تهران، از جمله حوضه کن، که بر نقش ترکیبی شیب، ویژگی‌های توپوگرافی و شرایط هیدروژئومورفولوژیک در شکل‌گیری مناطق مستعد سیلاب تأکید کرده‌اند، سازگار است[۵۱،۵۰]. دومین عامل مؤثر، لایه توزیع مکانی حداکثر دبی بود. از آنجا که دبی تابع ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه آبریز است و توزیع مکانی آن با روش‌های معمول درونیابی قابل برآورد نیست، از رابطه رگرسیونی بین جریان تجمعی استخراج‌شده از DEMو مقادیر حداکثر دبی ایستگاه‌های هیدرومتری برای برآورد توزیع مکانی حداکثر دبی در امتداد شبکه آبراهه‌ها استفاده شد. این نتیجه با پژوهش جهانگیر و همکاران[۵۰] در حوضه رودخانه کن همخوانی دارد، در آن مطالعه نیز از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی همراه با متغیرهایی مانند شیب، جریان تجمعی و بارش برای مدل‌سازی سیلاب استفاده شد و مدل شبکه عصبی توانست دبی را با عملکرد مناسب پیش‌بینی کند. در پژوهش حاضر نیز استفاده از رابطه بین جریان تجمعی استخراج‌شده از DEM و حداکثر دبی ایستگاه‌های هیدرومتری، امکان ایجاد یک لایه مکانی از حداکثر دبی را فراهم کرده است. ضریب تعیین $R^2=0.81$ نشان‌دهنده توان مناسب جریان تجمعی در تبیین تغییرات مکانی حداکثر دبی است. بنابراین، برخلاف رویکردهایی که تنها بر عوامل توپوگرافی و محیطی تکیه دارند، وارد کردن یک متغیر هیدرولوژیکی مکانی‌شده می‌تواند اطلاعات مرتبط با شدت جریان را مستقیماً وارد فرایند مدل‌سازی کند.سومین عامل مؤثر، ضریب زبری بود که بر اساس دستورالعمل نشریه شماره ۶۸۸ محاسبه شد(شکل ۳). نتایج نشان داد که مقادیر بالاتر ضریب زبری در بخش هایی از شمال و شرق منطقه موجب کاهش سرعت جریان، افزایش زمان تمرکز و استهلاک انرژی رواناب می‌شوند، در حالی که مقادیر پایین‌تر، به‌ویژه در بخش‌های مرکزی و جنوبی منطقه، با افزایش سرعت جریان و گسترش سیلاب همراه هستند. در مجموع، یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که خطر سیلاب در استان تهران حاصل اثر یک عامل منفرد نیست، بلکه از برهم‌کنش عوامل توپوگرافی، هیدرولوژیکی و محیطی شکل می‌گیرد. در این میان، اهمیت بالای شیب و حداکثر دبی نشان می‌دهد که ترکیب

اطلاعات مربوط به ویژگی‌های سطح زمین با اطلاعات مربوط به شدت جریان می‌تواند در شناسایی دقیق‌تر پهنه‌های مستعد سیلاب مؤثر باشد. این نتیجه با مطالعات پیشین که بر اهمیت ترکیبی عوامل ژئومحیطی و هیدرولوژیکی در مدل‌سازی سیلاب تأکید کرده‌اند، همخوانی دارد [۵۰،۴۹] تفاوت در اهمیت نسبی عوامل میان مطالعات مختلف نیز می‌تواند ناشی از تفاوت در شرایط اقلیمی و توپوگرافی، مقیاس مکانی، نوع داده‌های وقوع سیلاب و روش مدل‌سازی باشد. همچنین، ارزیابی عملکرد مدل MaxEnt با استفاده از منحنی ROC و شاخص‌های AUC و ضریب کاپا نشان داده شد که مقادیر AUC و کاپا به‌ترتیب برابر با ۰/۹۶ و ۰/۸۱ برآورد شده و بیانگر عملکرد بسیار مطلوب مدل در شناسایی و پیش‌بینی مناطق مستعد سیلاب است (شکل ۵).



شکل ۳- پارامترهای موثر در وقوع سیل: الف) کاربری اراضی ب) پوشش گیاهی ج) شیب د) مدل ارتفاعی رقومی ه) ضریب زبری ی) فاصله از رودخانه

جدول ۱- ماتریس ضرایب همبستگی بین متغیرهای محیطی

لایه‌ها		پوشش گیاهی	کاربری اراضی	فاصله از رودخانه	ضریب زبری	شیب	ارتفاع
۱	پوشش گیاهی	۱/۰۰۰	-۰/۰۹۲	-۰/۰۴۰	-۰/۴۹۳	-۰/۴۱۷	-۰/۶۲۷
۲	کاربری اراضی	-۰/۰۹۲	۱/۰۰۰	-۰/۰۹۵	۰/۱۹۸	۰/۴۱۴	۰/۴۱۹
۳	فاصله ازرودخانه	-۰/۰۴۰	-۰/۰۹۵	۱/۰۰۰	-۰/۱۳۲	-۰/۰۷۶	-۰/۱۳۵
۴	ضریب زبری	-۰/۴۹۳	۰/۱۹۸	-۰/۱۳۲	۱/۰۰۰	۰/۶۶۷	۰/۵۹۷
۵	شیب	-۰/۴۱۷	۰/۴۱۴	-۰/۰۷۶	۰/۶۶۷	۱/۰۰۰	۰/۷۰۲
۶	ارتفاع	-۰/۶۲۷	۰/۴۱۹	-۰/۱۳۵	۰/۵۹۷	۰/۷۰۲	۱/۰۰۰

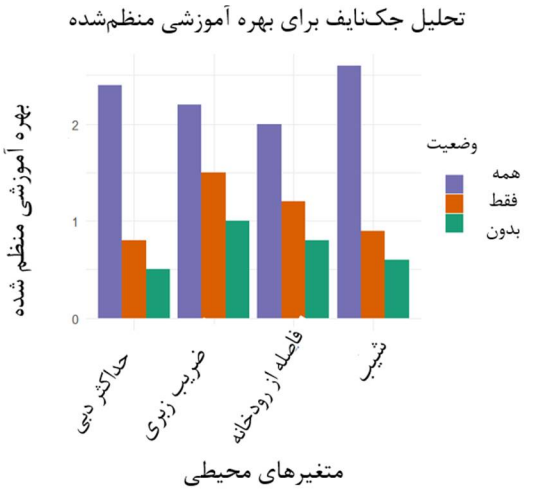
۳-۱- بررسی همبستگی بین لایه‌های ورودی

نتایج بررسی همبستگی بین متغیرهای محیطی (جدول ۱) نشان داد که ضرایب همبستگی بین متغیرهای مورد مطالعه در دامنه ۰/۶۲۷- تا ۰/۷۰۲ قرار دارند. بیشترین ضریب همبستگی مثبت بین متغیرهای ارتفاع و شیب (۰/۷۲۰) و پس از آن بین شیب و ضریب زبری (۰/۶۶۷) مشاهده شد. همچنین بیشترین همبستگی منفی بین ارتفاع و پوشش گیاهی (۰/۶۲۷-) به دست آمد. سایر ضرایب

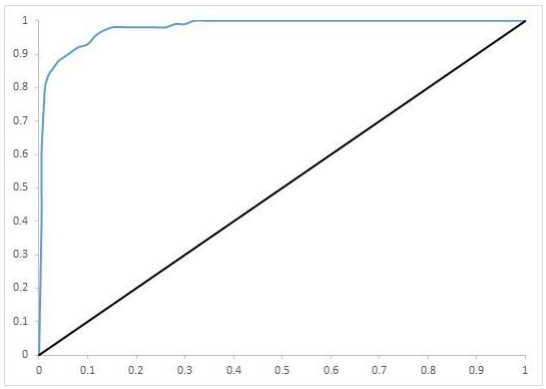
همبستگی در محدوده ضعیف تا متوسط قرار داشتند بنا بر نتایج حاصل قدرمطلق هیچ‌یک از ضرایب همبستگی از ۰/۸ فراتر نرفته و هم‌خطی قابل توجهی بین متغیرهای مورد استفاده مشاهده نشد. بنابراین، تمامی متغیرهای مورد استفاده از استقلال نسبی برخوردار بوده و قابلیت استفاده در فرایند مدل‌سازی خطر سیلاب را داشتند (جدول ۱).

۳-۲- کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل بیشینه آنتروپی

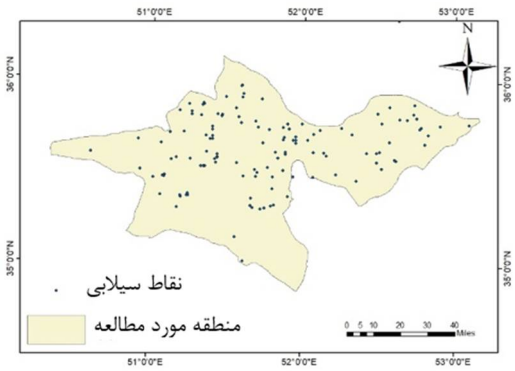
MaxEnt یک الگوریتم یادگیری ماشینی است که مناطق با خطرسیل را بر اساس داده‌های صرفاً موجود پیش‌بینی می‌کند و تعاملات پیچیده بین متغیرها را بیشتر با تکیه بر شواهد تجربی مدیریت می‌کند. مدل حداکثرآنتروپی در شناسایی الگوها و پیش‌بینی خطرات بر اساس داده‌های موجود برتری دارد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، مناطق در معرض خطر عمدتاً در نزدیکی رودخانه واقع شده‌اند. ۱۲۰ مورد سیل و آب گرفتگی در منطقه مورد مطالعه ثبت شد جهت مدلسازی خطر سیل از ۷۰ درصد نقاط سیل برای آموزش مدل و ۳۰ درصد داده های سیل برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده است. اعتبارسنجی مدل با استفاده از شاخص‌های (AUC=۰ /۹۶) و ضریب کاپا (۰/۸۱) انجام شده (شکل۵) که بیانگر قابلیت بسیار خوب مدل در پهنه‌بندی و شناسایی مناطق مستعد سیلاب در استان تهران است. همچنین، آزمون جک‌نایف (شکل ۴) برای ارزیابی میزان اهمیت متغیرهای مؤثر در مدل به‌کار گرفته شد. AUC نماینده عملکرد مدل است که در آن مقدار ۱ برای مدل با عملکرد عالی، مقادیر مساوی یا نزدیک به ۰/۵ نشان دهنده یک مدل خنثی است که نتایج آن از شانس تصادفی خالص مشتق شده است همچنان مقادیر کمتر از ۰/۵ نشان دهنده عدم قطعیت مدل می باشد [۴۹] در مجموع،AUC بالاتر نشان‌دهنده قابلیت اطمینان و استحکام بیشتر است. نمودار جک‌نایف بیانگر این است که هر کدام از متغیرهای محیطی چه تاثیری بر مدل‌سازی سیلاب دارند براساس این نمودار زمانی که تمام متغیرها فعال باشند شیب، ارتفاع و حداکثر دبی بیشترین تاثیر و ضریب زبری و فاصله از رودخانه کمترین تاثیر را در این مدلسازی دارد. مدل MaxEntبه دلایل مختلف، عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل ها در تهیه نقشه خطر سیل دارد، این مدل برای مدیریت داده‌های موجود طراحی شده است که اغلب در مطالعات خطر سیل به راحتی در دسترس و قابل اعتمادتر هستند مدل MaxEnt از یک رویکرد یادگیری ماشینی استفاده می‌کند که می‌تواند روابط پیچیده بین متغیرها را به طور مؤثرتری مدل‌سازی کند. این امر به MaxEnt اجازه می‌دهد تا ظرافت‌های دینامیک سیل را بهتر ثبت کند این مدل می‌تواند طیف گسترده‌ای از متغیرهای محیطی و تعاملات آنها را در بر بگیرد و آن را با شرایط جغرافیایی و اقلیمی مختلف سازگارتر کند. مدل MaxEnt که به دلیل ظرفیتش در پیش‌بینی توزیع گونه‌ها و مناسب بودن محیط شناخته شده است، می‌تواند به ویژه در سناریوهایی با داده‌های محیطی دقیق مفید باشد. مدل MaxEnt در پیش‌بینی دقیق خطرات بسیار عالی است. این امر برای استراتژی‌های خاص مدیریت سیل و واکنش اضطراری مهم است [۷].



شکل ۴- نمودار جک‌نایف برای ارزیابی اهمیت نسبی متغیرهای محیطی



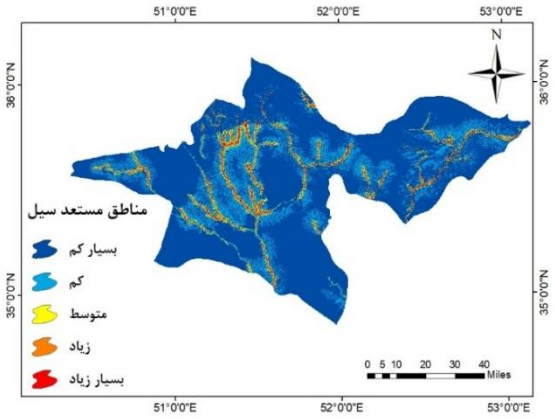
شکل ۵- نمودار ROC



شکل ۶- نقشه نقاط سیل

بر اساس نتایج۷۷۸ کیلومترمربع از منطقه مورد مطالعه (۶ درصد)، که عمدتاً در مجاورت رودخانه‌ها قرار دارد، در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد واقع شده است. نقشه خطر سیل حاصل (شکل ۷) نشان می‌دهد مناطقی که در معرض خطر سیل‌خیزی قرار دارند و به عنوان مناطق با خطر متوسط طبقه بندی می شوند، تقریبا ۴ درصد از کل منطقه را تشکیل می‌دهند. بنابراین ۵۱۹ کیلومترمربع از منطقه در طبقه خطر متوسط و ۲۳۳۶ کیلومترمربع در طبقه خطر کم قرار دارد در مقابل، ۹۳۴۶ کیلومترمربع از منطقه مورد مطالعه در طبقه خطر بسیار کم قرار گرفته و از نظر وقوع سیلاب، نسبتاً ایمن ارزیابی شده است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که در شمال و شمال‌شرق استان تهران، به‌ویژه در حوضه آبریز حبله‌رود، احتمال وقوع سیلاب نسبتاً بالا است. این وضعیت را می‌توان به وجود رودخانه دائمی و پرآب حبله‌رود، تراکم بالای آبراهه‌ها، بارش سالانه نسبتاً زیاد در سرشاخه‌های آن (بیش از ۵۰۰ میلی‌متر) و شیب زیاد ارتفاعات البرز نسبت داد. همچنین در شمال‌غرب استان، به‌ویژه در حوضه آبریز رودخانه کن، بارندگی‌های شدید، شیب زیاد دامنه‌ها و ریزش سنگ، همراه با جریان سیلاب، می‌تواند موجب طغیان رودخانه و تشدید خسارات ناشی از سیلاب شود. ازاین‌رو، بیشترین خطر سیلاب در خارج از شهر تهران عمدتاً در پیرامون مسیل‌ها و نواحی شمال‌غربی، به‌ویژه در حوضه‌های بالادست درکه تا کن، مشاهده می‌شود [۵۲-۵۰].

همچنین در قسمت غرب و جنوب غرب استان تهران وجود رودخانه شور و رودخانه کرج خطر وقوع سیل را افزایش می دهد. رودخانه شور در جنوب غرب استان تهران واقع است و از ارتفاعات اطراف تغذیه می شود احتمال بیشتر وقوع سیلاب در این حوضه می‌تواند به ویژگی‌های توپوگرافی، شبکه زهکشی و شرایط هیدرولوژیکی این حوضه نسبت داده شود. رودخانه کرج، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های حوضه آبخیز مرکزی، در شمال‌غرب استان تهران قرار دارد و نقش مهمی در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت استان ایفا می‌کند [۵۳]. نتایج نشان می‌دهد که در حوضه این رودخانه، به‌ویژه در مسیر جاده چالوس، به دلیل شیب زیاد، تمرکز رواناب و وقوع بارش‌های شدید، احتمال وقوع سیلاب نسبتاً بالا است. شاخه اصلی رودخانه جاجرود از کوه‌های البرز مرکزی و کولون‌بستک سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه یکی از رودخانه‌های دائمی و مهم استان تهران است که به سد لتیان وارد می‌شود و در نهایت، به همراه رودخانه کرج، به رودخانه شور و سپس به دریاچه نمک قم می‌ریزد. سد لتیان حدود ۳۰ درصد از نیاز آبی ۱۱ میلیون نفر در شهر تهران را تأمین می‌کند و حوضه آبخیز این رودخانه در شرق دماوند و شمال‌شرق تهران واقع شده است [۵۴،۵۳]. در پایین‌دست، سامانه رودخانه‌های جاجرود و کرج به رودخانه شور متصل می‌شود [۵۵].



شکل ۷- نقشه خطر سیل

رودخانه جاجرود به دلیل وقوع سیلاب‌های ناگهانی، طغیان در فصل بارندگی و نزدیکی به مناطق پرجمعیت، موجب خسارات قابل توجه ناشی از سیلاب می‌شود. همچنین وجود شاخه‌های متعدد در حوضه آبریز جاجرود، تمرکز رواناب را در زمان وقوع بارش‌های شدید افزایش داده و احتمال طغیان رودخانه را بیشتر می‌کند. در بازه شمالی رودخانه، به دلیل فاصله بیشتر بستر رودخانه از دامنه‌های اصلی، فعالیت‌ها و ساخت‌وسازهای انسانی بیشتر به چشم می‌خورد [۵۶]. ساخت‌وسازهای غیرمجاز، تغییر کاربری اراضی و تصرف بستر و حریم رودخانه، ظرفیت طبیعی عبور

جریان را کاهش داده و موجب تشدید خسارات ناشی از سیلاب می‌شوند. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که مدل MaxEnt در مدیریت خطر سیل مفید است و به سیاست‌گذاران و ذینفعان کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری برای توسعه پایدار و پیشگیری از بلایا بگیرند.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پهنه بندی مناطق با خطر سیل در بحث مدیریت سیلاب و مهندسی رودخانه نقش بسزایی ایفا می کند در فصل های خاص مثل بهار و پاییز بارش های رگباری و شدید باعث افزایش سریع حجم آب در رودخانه ها و مسیل ها می شود، بسیاری از رودخانه ها و مسیل های استان تهران ظرفیت کافی برای عبور حجم زیاد آب را ندارند از سوی دیگر ساخت و سازهای زیاد و از بین رفتن جنگل ها و مراتع باعث کاهش جذب آب در زمین شده و آب باران به سرعت روانه رودخانه ها می شود همچنین ناکافی بودن سازه های مهندسی مانند سد، کانالهای دفع آب و مخازن کنترل سیلاب باعث شده آب بصورت کنترل نشده حرکت کند و قدرت تخریب سیلاب افزایش یابد. نتایج این پژوهش نشان داد که در محدوده مورد مطالعه، بخش‌هایی که تحت تأثیر پیوستن رودخانه‌های متعدد قرار دارند و در آن‌ها حداکثر دبی و شرایط توپوگرافی نقش مهمی دارند، از خطر آب‌گرفتگی بیشتری برخوردارند. همچنین، با افزایش دوره بازگشت، میزان دبی افزایش یافته و در نتیجه، وسعت پهنه‌های سیلابی نیز افزایش می‌یابد. بر اساس نقشه نهایی پهنه‌بندی، نواحی اطراف رودخانه‌های استان تهران در دوره بازگشت ۲۰۰ ساله از خطر سیلاب بیشتری برخوردارند. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که مدل MaxEnt رویکرد مناسبی برای مدل‌سازی مناطق دارای خطر وقوع سیل است و نقشه حاصل می‌تواند در شناسایی مناطق پرخطر و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت سیلاب و برنامه‌ریزی کاربری اراضی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به محدودیت داده‌های مورد استفاده، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از داده‌های هیدرولوژیکی با دوره زمانی طولانی‌تر و متغیرهای محیطی و اقلیمی بیشتر استفاده شود. همچنین، بررسی پویایی زمانی خطر سیلاب و مقایسه عملکرد مدل MaxEnt با سایر روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند به ارزیابی جامع‌تر و افزایش قابلیت کاربرد نتایج کمک کند.

مراجع

[۱] Kelarestaghi, A. and Ahmadi, H. (2009), "Landslide susceptibility analysis with a bivariate approach and GIS in Northern Iran," *Arabian Journal of Geosciences*, 2(2), pp. 95–10.[DOI:10.1007/s12517-008-0022-0]

[۲] Castillo, C and Gómez, J. A. (2016). "A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches," Earth-Sci. Rev., vol. 160, pp. 300–319. [DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.07.009]

[۳] Achour, Y and Pourghasemi, H. R. (2020). "How do machine learning techniques help in increasing accuracy of landslide susceptibility maps," Geosci. Front., vol. 11, pp. 871–883. [DOI: 10.1016/j.gsf.2019.10.001]

[۴] Armenakis, C., Du, E. X., Natesan, S., Persad, R. A. and Zhang, Y. (2017), "Flood risk assessment in urban areas based on spatial analytics and social factors," *Geosciences*, 7(4), Article 123. [DOI: 10.3390/geosciences7040123]

[۵] Das, B. (2022). "Flood hazard mapping and road network vulnerability analysis of Kamrup and Kamrup Metropolitan Districts: Case study of Assam flood," *Int. J. Sci. Res.*, vol. 11, no. 5, pp. 314–324. [DOI: 10.21275/SR22501092926]

[۶] Ajin, R. S., Krishnamurthy, R. R., Jayaprakash, M. and Vinod, P. G. (2013), "Flood hazard assessment of Vamanapuram River Basin, Kerala, India: An approach using remote sensing and GIS techniques," *Advances in Applied Science Research*, 4(3), pp. 263–274

[۷] Kalita, N., Bora, A. K., Sarmah, R., Sahariah, D and Nath, M. J. (2025). "Comparative Flood Hazard Assessment in Assam's Belsiri River Basin Using AHP and MaxEnt Models". *Revue Internationale de Geomatique*, *34*(1). [DOI: 10.32604/rig.2024.058265]

[۸] Itodo, I. N and Daudu, J. O. (2003). "A study of soil properties relevant to the design of yam harvesters in the Benue flood plain of Nigeria," *Agric. Mechaniz. Asia Afr. Latin Am.*, vol. 34, no. 4, pp. 30–34.

[۹] Chow, V. T., Maidment, D. R. and Mays, L. W. (1988), *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, USA

[۱۰] Dingman, S. L. (2015), *Physical Hydrology*, 3rd ed., Waveland Press, Long Grove, IL, USA.

[۱۱] Harshasimha, A. C and Bhatt, C. M. (2023). "Flood vulnerability mapping using MaxEnt machine learning and analytical hierarchy process (AHP) of Kamrup Metropolitan District, Assam," *Environ. Sci. Proc.*, vol. 25, no. 1, Art. no. 73. [DOI: 10.3390/ECWS-7-14301]

[۱۲] Afsari, R., Nadizadeh Shorabeh, S., Kouhnavard, M., Homaee, M. and Arsanjani, J. J. (2022). A spatial decision support approach for flood vulnerability analysis in urban areas: A case study of Tehran. ISPRS International Journal of Geo-Information, 11(7), 380. [DOI: 10.3390/ijgi11070380]

[۱۳] Angelique, N., Xiaoping, R., Ouyang, N., Ferreira, V., Aimable, D. and Hyacinthe, N. (2026), "Flood Susceptibility Mapping and Climate Change Impact Prediction Using Probabilistic Machine Learning and Statistical Analysis: A Case Study of Kigali, Rwanda," *Journal of Flood Risk Management*, 19(1), e70191.[DOI: 10.1111/jfr3.70191]

[۱۴] Zerhoudi, I., Chourak, M., El Baida, M., Boushaba, F. and Louhibi, S. (2026), "Multi-criteria decision making and presence-only maximum entropy modeling for flood hazard assessment in greater Berkane," *Journal of African Earth Sciences*, 240, Article 106179. [DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2026.106179]

[۱۵] Luan, B., Luo, J., Ye, X., Huang, W., Yu, L. and Yu, G. (2025), "Urban Flood Risk Prediction and Influencing Factors Analysis Based on the MaxEnt–PLUS Model," *Landscape Architecture Frontiers*, 13(6), p. 80. [DOI: 10.15302/J-LAF-1-020095]

[۱۶] Hu, J., Pang, A. and Deng, C. (2025), "Urban flood risk analysis using presence-only machine learning approach: An integrated MaxEnt-cloud model framework in Harbin, China," *Natural Hazards*, 121(14), pp. 16827–16856. [DOI: 10.1007/s11069-025-07452-4]

[۱۷] Afifi, Mohammad Ibrahim. (2018). Evaluation of factors affecting flood risks and preparation of a map of sensitivity and probability of its occurrence using Shanun entropy model (case study: Firozabad River watershed). Natural Hazards Management, 6(2): pp.167-149. (In persian).

[۱۸] Qasimi, A. B., Isazade, V. and Berndtsson, R. (2024), "Flood susceptibility prediction using MaxEnt and frequency ratio modeling for Kokcha River in Afghanistan," *Natural Hazards*, 120(2), pp. 1367–1394. [DOI: 10.1007/s11069-023-06232-9]

[۱۹] Chang, K. T. (2008), Introduction to Geographic Information Systems, 4th ed., McGraw-Hill, Boston, MA, USA]

[۲۰] Pradhan, B. (2009). *Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing*. Journal of Spatial Hydrology, 9(2), 1–18. Available at: Journal of Spatial Hydrology.

[۲۱]Kia, M. B., Pirasteh, S., Pradhan, B., Mahmud, A. R., Sulaiman, W. N. A. and Moradi, A. (2012), "An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia," *Environmental Earth Sciences*, 67(1), pp. 251–264. [DOI: 10.1007/s12665-011-1504-z]

[۲۲] Arabameri, A., Rezaei, K., Pourghasemi, H. R., Lee, S. and Yamani, M. (2018), "GIS-based gully erosion susceptibility mapping: A comparison among three data-driven models and AHP knowledge-based technique," *Environmental Earth Sciences*, 77(17), Article 628. [DOI: 10.1007/s12665-018-7808-5]

[۲۳] Tehrany, M. S., Pradhan, B. and Jebur, M. N. (2014), "Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS," *Journal of Hydrology*, 512, pp. 332–343. [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.00]

[۲۴]Khosravi, K., Pham, B. T., Chapi, K., Shirzadi, A., Shahabi, H., Revhaug, I. and Bui, D. T. (2018), "A comparative assessment of decision trees algorithms for flash flood susceptibility modeling at Haraz watershed, northern Iran," *Science of the Total Environment*, 627, pp. 744–755. [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.266]

[۲۵] Al-Abadi, A. M. and Pradhan, B. (2020), "In flood susceptibility assessment, is it scientifically correct to represent flood events as a point vector format and create flood inventory map?," *Journal of Hydrology*, 590, Article 125475. [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020]

[۲۶] Panahi, M., Jaafari, A., Shirzadi, A., Shahabi, H., Rahmati, O., Omidvar, E., Asadi, S. and Bui, D. T. (2021), "Deep learning neural networks for spatially explicit prediction of flash flood probability," Geoscience Frontiers, 12(3), Article 101076. [DOI: 10.1016/j.gsf.2020.101076]

[۲۷]_Linh, N. T. T., Pandey, M., Janizadeh, S., Bhunia, G. S., Norouzi, A., Ali, S., Pham, B. T., Avand, M. and Ahmadi, K. (2022), "Flood susceptibility modeling based on new hybrid intelligence model: Optimization of XGBoost model using GA metaheuristic algorithm," *Advances in Space Research*, 69(9), pp. 3301–3318. [DOI: 10.1016/j.asr.2022.02.027]

[۲۸] Prasad, P., Loveson, V. J., Das, B. and Kotha, M. (2021), "Novel ensemble machine learning models in flood susceptibility mapping," *Geocarto International*, 38(1), pp. 1–23. [DOI: 10.1080/10106049.2021.1892209]

[۲۹]Pham, Q. B., Abba, S. I., Pham, Q. T., Shahid, S., Nguyen, D. N., Mohammadi, B., Bui, D. T. and Quan, N. H. (2021), "Evaluation of various boosting ensemble algorithms for predicting flood hazard susceptibility areas," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), pp. 2607–2628. [DOI: 10.1080/19475705.2021.1968510]

[۳۰] Hosseini, F. S., Choubin, B., Mosavi, A., Nabipour, N., Shamshirband, S., Darabi, H., Haghighi, A. T. and Bui, D. T. (2020), "Flash-flood hazard assessment using ensembles and Bayesian-based machine learning models: Application of the simulated annealing feature selection method," Science of the Total Environment, 711, Article 135161. https://doi.org/. [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135161]

[۳۱]Bui, D. T., Pradhan, B., Nampak, H., Bui, Q. T., Tran, Q. A. and Nguyen, Q. P. (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, pp. 317–330. [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.06.027]

[۳۲] Panahi, M., Jaafari, A., Shirzadi, A., Shahabi, H., Rahmati, O., Omidvar, E., Asadi, S. and Bui, D. T. (2021), "Deep learning neural networks for spatially explicit prediction of flash flood probability," *Geoscience Frontiers*, 12(3), Article 101076. [DOI: 10.1016/j.gsf.2020.09.007]

[۳۳] Bui, D. T., Hoang, N. D., Martínez-Álvarez, F., Ngo, P. T. T., Hoa, P. V. and Pham, B. T. (2018), "New Hybrids of ANFIS with Several Optimization Algorithms for Flood Susceptibility Modeling," *Water*, 10(9), Article 1210." *Water*, vol. 10, no. 9, p. 1210, Sep. 2018. [DOI: 10.3390/w10091210]

[۳۴] Ahmadlou, M., Karimi, M., Alizadeh, M., Shirzadi, A., Shahabi, H., Panahi, M. and Bui, D. T. (2021), "Flood susceptibility mapping and assessment using a novel deep learning model combining multilayer perceptron and autoencoder neural networks," *Journal of Flood Risk Management*, 14(1), Article e12683. [DOI: 10.1111/jfr3.12683]

[۳۵] Nachappa, T. G., Piralilou, S. T., Gholamnia, K., Ghorbanzadeh, O., Rahmati, O and Blaschke, T. (2020). Flood susceptibility mapping with machine learning, multi-criteria decision analysis and ensemble using Dempster Shafer Theory. *Journal of hydrology*, *590*, 125275. [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125275]

[۳۶] Chapi, K., Singh, V. P., Shirzadi, A., Shahabi, H., Bui, D. T., Pham, B. T., Khosravi, K., Bin Ahmad, B., Norouzi, A. and Rahmati, O. (2017), "A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment," *Environmental Modelling & Software*, 95, pp. 229–245. [DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.06.012]

[۳۷] Rahmati, O., Pourghasemi, H. R. and Zeinivand, H. (2016), "Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran," *Geocarto International*, 31(1), pp. 42–70. [DOI: 10.1080/10106049.2015.1041559]

[۳۸] Santos, P. P. and Reis, E. (2018), "Assessment of stream flood susceptibility: A cross-analysis between model results and flood losses," *Journal of Flood Risk Management*, 11, pp. S1038–S1050. [DOI: 10.1111/jfr3.12290]

[۳۹] Glenn, E. P., Morino, K., Nagler, P. L., Murray, R. S., Pearlstein, S. and Hultine, K. R. (2012), "Roles of saltcedar (*Tamarix* spp.) and capillary rise in salinizing a non-flooding terrace on a flow-regulated desert river," *Journal of Arid Environments*, 79, pp. 56–65. [DOI: 10.1016/j.jaridenv.2011.11.025]

[۴۰] Chen, Z., Zhou, J. and Chen, Q. (2023), **"**Research and Application of the Calculation Method of River Roughness Coefficient with Vegetation," *Water*, 15(14). [DOI: 10.3390/w15142633]

[۴۱] Barinas, G., Good, S. P. and Tullos, D. (2024), "Continental Scale Assessment of Variation in Floodplain Roughness With Vegetation and Flow Characteristics," *Geophysical Research Letters*, 51(1), Article e2023GL105588. [DOI: 10.1029/2023GL105588]

[۴۲] Ghorbanzadeh, O., Meena, S. R., Blaschke, T. and Aryal, J. (2019), "Evaluation of different machine learning methods and deep-learning convolutional neural networks for landslide detection," *Remote Sensing*, 11, Article 196. [DOI: 10.3390/rs11020196]

[۴۳] Schmidt, J., Marques, M. R. G., Botti, S. and Marques, M. A. L. (2019), "Recent advances and applications of machine learning in solid-state materials science," *npj Computational Materials*, 5, Article 83. [DOI: 10.1038/s41524-019-0221-0]

[۴۴] Gholamnia, K., Nachappa, T. G., Ghorbanzadeh, O., Blaschke, T., Aryal, J. and Gholamnia, A. (2020), "Comparisons of diverse machine learning approaches for wildfire susceptibility mapping," *Symmetry*, 12, Article 604. [DOI: 10.3390/sym12040604]

[۴۵] Merghadi, A., Yunus, A. P., Dou, J., Whiteley, J., Pham, B. T., Bui, D. T., Avtar, R. and Abderrahmane, B. (2020), "Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance," *Earth-Science Reviews*, 207**,** Article 103225. [DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103225]

[۴۶] Park, N. W. (2015), "Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets," *Environmental Earth Sciences*, 73(3), pp. 937–949. [DOI: 10.1007/s12665-014-3442-z.]

[۴۷] Norallahi, M. and Kaboli, H. S. (2021), "Urban flood hazard mapping using machine learning models: GARP, RF, MaxEnt and NB," *Natural Hazards*, 106, pp. 119–137. [DOI: 10.1007/s11069-020-04453-3]

[۴۸] Getahun, Y. S. and Gebre, S. L. (2015), "Flood hazard assessment and mapping of flood inundation area of the Awash River Basin in Ethiopia using GIS and HEC-GeoRAS/HEC-RAS model," *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 5(4), Article 178. [DOI: 10.4172/2165-784X.1000179]

[۴۹] Davoudi Moghaddam, D., Pourghasemi, H. R., & Rahmati, O. (2019). Assessment of the contribution of geo-environmentalfactors to flood inundation in a semi-arid region of SW Iran: Comparison of different advanced modeling approaches. Natural hazards GIS-based spatial modeling using data mining techniques, 59-78. (In Persian)

[۵۰] Jahangir, M. H., Reineh, S. M. M. and Abolghasemi, M. (2019), "Spatial predication of flood zonation mapping in Kan River Basin, Iran, using artificial neural network algorithm," *Weather and Climate Extremes*, 25, Article 100215. [DOI: 10.1016/j.wace.2019.100215]

[۵۱] Ghanavati, E., Saffari, A., Karam, A., Najafi, E. and Jahandar, G. (2016). Investigation on Hydrogeomorphologic Characteristics of Tehran Metroplis Watersheds with Emphasis on the Flood Prone Zones. *Journal of Hydrogeomorphology*, *3*(6), 33-54. (In Persian)

[۵۲] Ghahroudi Tali, M., Majidi Heravi, A. and Abdoli, E. (2014), "Urban flood vulnerability (Case study: Tehran, Darakeh to Kan)," *Geography and Environmental Hazards*, No. 17, pp. 12–53. (In Persian)

[۵۳] Gholikandi, G. B., Haddadi, S., Dehghanifard, E. and Tashayouie, H. R. (2012), "Assessment of surface water resources quality in Tehran province, Iran," *Desalination and Water Treatment*, 37(1–3), pp. 8–20. [DOI: 10.1080/19443994.2012.664698]

[۵۴] Shekoohiyan, S. and Akbarzadeh, A. (2022), "The abundance of microplastic pollution along the Jajroud River of Tehran: Estimating the water quality index and the ecological risk," *Ecological Indicators*, 145, Article 109629. [DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109629]

[۵۵] Radmehr, A. (2025), "Collaborative spatial decision making empowering urban flood governance toward city resilience," *Scientific Reports*, 15, Article 45210. [DOI: 10.1038/s41598-025-29659-y]

[۵۶] Ilanlou, M. and Karam, A. (2020), "Assessment of the hydromorphological condition of the Jajrud River using the Morphological Quality Index (MQI)," Applied Researches in Geographical Sciences, *20*(56), pp. 35–53. (In Persian)