

## پیش‌بینی و پهنه‌بندی حساسیت سیل با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در استان ایلام

فرزانه غلامی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان.  
مژگان انتظاری \* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.  
رضا ذاکری نژاد - استادیار گروه سنجش از دور، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.  
حاجی کریمی - استاد گروه آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲      تأیید نهایی: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

### چکیده

امروزه مخاطرات طبیعی از جمله سیل در کشور خسارات مال و جانی زیادی را به بار می‌آورد. تحلیل ریسک مانند ارزیابی حساسیت سیل یکی از رویکردهای حیاتی برای کاهش اثرات سیل است. روش‌های آماری و یادگیری ماشین راه سریع‌تری برای تولید نقشه‌های دقیق پیش‌بینی سیل بدون ورودی داده‌های متعدد و الزامات محاسباتی از قبیل مدل‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر فیزیکی ارائه کرده‌اند. به غیر از این روش‌ها، در سال‌های اخیر، محققان از Maxent در ارزیابی خطر سیل استفاده کرده‌اند. استان ایلام که به دلیل توپوگرافی چالش برانگیز با تهدید دائمی سیل که منجر به خسارات اجتماعی و اقتصادی قابل توجهی در سال می‌شود، مواجه است. بنابراین، در محدوده مطالعاتی استان ایلام، با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (Maxent) نقشه حساسیت سیل تهیه شد. در این مطالعه ترکیبی از ۱۴ لایه محیطی و ۱۴۸ سیل ثبت شده برای پیاده‌سازی مدل Maxent و تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت سیل به کار گرفته است. نقاط رخداد سیل به دو مجموعه تقسیم شدند که ۷۰٪ برای ساخت مدل و ۳۰٪ باقی‌مانده برای اعتبارسنجی مدل اختصاص داده شد. نتایج مطالعه نشان داد سه متغیر اصلی کاربری اراضی، ارتفاع و شیب، به ترتیب ۶۱، ۱۲/۸ و ۱۰/۴ درصد بیشترین تأثیر را در وقوع سیل داشتند. حدود ۲،۰۶٪ منطقه در حساسیت بالا به سیل و ۴،۰۱٪ در منطقه متوسط و ۹۳،۹۳٪ در منطقه کم خطر یا بدون خطر قرار گرفت. اهمیت عوامل موثر در وقوع سیل را نیز می‌توان رتبه‌بندی کرد. ارزیابی مدل با  $AUC = 0/969$  نشان دهنده عملکرد بسیار خوب و پیش‌بینی‌های دقیق مدل است. رویکردهای مورد استفاده در این مطالعه می‌تواند بینش‌ها و استراتژی‌های ارزشمندی برای کاهش خطرات بلایای طبیعی ارائه دهد.

واژگان کلیدی: سیل، پهنه‌بندی حساسیت سیل، مدل حداکثر آنتروپی، استان ایلام.

## مقدمه

سیل یک پدیده طبیعی بسیار شایع و فاجعه بار است که در مقیاس جهانی رخ می‌دهد (گلاگو<sup>۱</sup>، ۲۰۲۱). تغییرات آب و هوای جهان باعث افزایش دما، بارندگی‌ها شدید و وقوع سیل و آب گرفتگی شده است (تلمن<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). سیل به عنوان یک بلای طبیعی توصیف می‌شود که از تجمع بیش از حد آب در یک منطقه ناشی می‌شود که معمولاً ناشی از ذوب برف، طغیان رودخانه (سیواکومار<sup>۳</sup>، ۲۰۱۵) و بارندگی شدید (رودریگز موراتا<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۶) یا عوامل دیگر است که مقدار زیادی رواناب سطحی را تشکیل می‌دهند. هنگامی که این رواناب نتواند به موقع جذب و تخلیه شود، باعث سیل و طغیان رودخانه‌ها می‌شود (شاو<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). ارزیابی صحیح خطر سیل در مناطق روستایی و کوهستانی چالش برانگیز است. زیرا، کمی‌سازی حساسیت به سیل یک فرآیند پیچیده است. سیل نه تنها در نتیجه بارندگی بیش از حد، بلکه به دلیل تأثیر عوامل مختلف مانند پارامترهای هیدرولوژیکی، زمین شناسی، ژئومورفولوژیکی و پوشش گیاهی رخ می‌دهد (دیاکاکیس<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). در سرتاسر جهان، بلایای طبیعی یک تهدید بزرگ برای اموال و جان انسان‌ها است. اگرچه پیشگیری از مخاطرات طبیعی غیرممکن است، اما با ایجاد استراتژی‌ها و برنامه‌ریزی مؤثر می‌توان تأثیر منفی آن‌ها را کاهش داد. تغییرات مورفولوژیکی قابل توجه در فرم‌های زمین ناشی از تغییرات تکتونیکی فعال یا تغییرات آب و هوایی ممکن است بر فعالیت و مدیریت انسان تأثیر بگذارد (آچور<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۲۰، کاستیلو و گومز<sup>۸</sup>، ۲۰۱۶). مردم کشورهای در حال توسعه معمولاً به شدت متأثر از این بلایا هستند زیرا اقتصاد آنها متکی به منابع طبیعی است (پانگالی شارما<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۲۲). از طرفی مشکلات موجود در بررسی میدانی و نبود داده‌ها و اطلاعات، مانع کارشناسان و محققین سیل در شناسایی مناطق سیل خیز و پیش بینی پدیده سیل می‌شود. اما علی‌رغم تمام محدودیت‌ها، مطالعات زیادی در این زمینه در خارج و داخل کشور انجام شده است. محققان ایرانی در پژوهشی با استفاده از مدل HEC-RAS مخاطرات سیلاب در سطح مخروط افکنه لیلان را بررسی کردند نتایج آنها نشان داد در صورت وقوع سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله، ۲،۱۲ هکتار از زمین‌های کشاورزی و ۱،۹ هکتار از مناطق مسکونی تحت تأثیر خطر سیل قرار خواهند گرفت (مختاری و همکاران، ۱۴۰۰). ارخی و همکاران (۱۴۰۰) با روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی، سیل خیزی حوضه گرگانرود را بررسی کردند. بررسی و تحلیل‌ها بیانگر آن است که مناطق شمال و شمال غرب بالاترین حساسیت در برابر خطر سیل را دارند و حدود ۴۰ درصد از مساحت منطقه در معرض وضعیت خطر خیلی زیاد و زیاد وقوع سیل است. خطر وقوع سیل در حوضه آبریز آجی چای با استفاده از روش آماری وزن شواهد (WOE<sub>10</sub>) پهنه‌بندی شد. نتایج نشان داد که بیش از ۳۰ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در مناطقی با خطر زیاد و خیلی زیاد واقع شده‌اند (رضایی مقدم و رحیم پور، ۱۴۰۳). سیل خیزی حوزه آبریز کارون با استفاده از شش مدل یادگیری ماشین (خطی تعمیم‌یافته (GLM<sub>11</sub>))، درخت رگرسیون تقویت‌شده

<sup>۱</sup> Glago<sup>۲</sup> Tellman<sup>۳</sup> Sivakumar<sup>۴</sup> Rodriguez-Morata<sup>۵</sup> Shaw<sup>۶</sup> Diakakis<sup>۷</sup> Achour<sup>۸</sup> Castillo & Gómez<sup>۹</sup> Pangali Sharma<sup>۱۰</sup> weight of evidence<sup>۱۱</sup> Generalized Linear Model

(BRT<sup>۱</sup>)، ماشین بردار پشتیبان (SVM<sup>۲</sup>)، جنگل تصادفی (RF<sup>۳</sup>)، خطوط رگرسیون تطبیقی چند متغیره (MARS<sup>۴</sup>) و حداکثر آنتروپی (MAXENT) بررسی شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که شمال شرقی شهرستان الیگودرز، بخش‌هایی از درود و ازنا در استان لرستان، خادممیرزا، شهرکرد و کیار در استان چهارمحال بختیاری، دنا و بویراحمد در استان کهگیلویه و بویراحمد، شهرستان سمیرم در استان اصفهان و نواحی مرزی جنوبی رودخانه کارون در استان خوزستان بیشترین پتانسیل سیل را در این حوضه دارند، مدل‌های جنگل تصادفی (RF) و حداکثر آنتروپی (Maxent) بهترین عملکرد در بین مدل‌ها داشتند (قره‌داغی و قاسم‌زاده، ۱۴۰۳). نگهبان و مرحمت (۱۴۰۳) با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (Maxent Entropy) حساسیت سیل حوضه شهری جهرم در استان فارس ارزیابی کردند، سه عامل ارتفاع، فاصله از آبراهه و کاربری اراضی بیشترین تاثیر در سیلاب منطقه داشتند. با استفاده از مدل‌های خطی تعمیم یافته و حداکثر آنتروپی حساسیت سیل حوزه آبخیز زیوه ارومیه بررسی شد. نتایج نشان داد عوامل زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه، ارتفاع و شیب بیشترین تاثیر و شاخص انحنای پروفیل، کاربری اراضی و شاخص تعادل جرم کمترین تاثیر شناسایی شدند (حنیفی نیا و عبقری، ۱۴۰۴). در منطقه شهری کامروپ<sup>۵</sup>، که در ایالت آسام<sup>۶</sup> در شمال شرقی هند<sup>۷</sup> قرار گرفته با استفاده از ۹ پارامتر محیطی، نقاط سیل‌خیزی موجود، و با مدل یادگیری ماشین، حداکثر آنتروپی (Maxent) و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP<sup>۸</sup>) نقشه‌های آسیب‌پذیری سیل تهیه شد. نتایج نشان داد که شاخص رطوبت توپوگرافی، ارتفاع و شیب مهم‌ترین عوامل برای ارزیابی مناطق سیل زده است و عملکرد مدل Maxent از AHP<sup>۹</sup> بهتر بود (هارشاسیمها و بات، ۲۰۲۳). در تحقیق دیگری مناطق مستعد سیل در مرکز شهر تیانجین<sup>۱۰</sup> با استفاده از مدل Maxent ارزیابی شد که نتایج آن نشان داد مدل Maxent کاربرد قوی برای ارزیابی ریسک غرقابی دارد و منطقه با خطر سیل‌خیزی بالا در مرکز شهر تیانجین در بخش مرکزی شهر متمرکز است (لی<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۴). با استفاده از متغیرهای مختلف ژئومحیطی و مدل حداکثر آنتروپی در ماریندوک، فیلیپین<sup>۱۲</sup> مناطق پرخطر سیل ارزیابی و شناسایی شد. عوامل ارتفاع، بافت خاک، تراکم زهکشی، شیب و بارندگی سالانه عوامل اصلی در استان ماریندوک معرفی شدند. نتایج نشان داد حدود ۴۵۱۲ هکتار در استان در معرض خطر سیل متوسط تا بسیار زیاد واقع شده است (سالویسیون و همکاران<sup>۱۳</sup>، ۲۰۲۴). خطر سیل رودخانه موهانانا-خوتیادر نپال<sup>۱۴</sup> نیز با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (Maxent) و ۱۰ لایه محیطی مکانی و فهرست سیل گذشته، ارزیابی

<sup>۱</sup> Boosted Regression Tree

<sup>۲</sup> Support Vector Machine

<sup>۳</sup> Random Forest

<sup>۴</sup> Multivariate Adaptive Regression Splines

<sup>۵</sup> Kamrup

<sup>۶</sup> Assam

<sup>۷</sup> India

<sup>۸</sup> Analytical Hierarchy Process

<sup>۹</sup> Harshasimha & Bhatt

<sup>۱۰</sup> Tianjin

<sup>۱۱</sup> Li et al

<sup>۱۲</sup> Marinduque, Philippines

<sup>۱۳</sup> Salvacion et al

<sup>۱۴</sup> Mohana-Khutiya of Nepal

شد. نتایج نشان داد که نزدیکی رودخانه مهم‌ترین عامل در وقوع سیل بوده است و حدود ۴,۹ درصد منطقه در مناطق پرخطر سیل واقع شده است (ماهارجان و همکاران ۱، ۲۰۲۴). با استفاده از مدل سازی Maxent، حساسیت سیل در حوضه رودخانه آمودریا ۲ در استان بدخشان ۳، افغانستان ۴ تعیین شد. نتایج نشان داد که میزان بارندگی، کاربری اراضی، فاصله تا رودخانه و نوع خاک مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی حساسیت سیلاب بودند (قاسمی و همکاران ۵، ۲۰۲۴). در تحقیقی دیگر با استفاده تکنیک‌های چند معیاره و مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) خطرات سیلاب حوضه بلسیری در هند ارزیابی شد و نتایج حاکی از آن است که مدل حداکثر آنتروپی عملکرد بهتری دارد و ارتفاع و شیب به عنوان عوامل کلیدی شناسایی شدند (کلیتا ۶ و همکاران، ۲۰۲۵)

باقلانی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل SWMM، داوند (۱۳۹۸) با استفاده مدل شواهد قطعی و شواهد وزنی و لجستیک رگرسیون، طهماسبی (۱۴۰۰) با استفاده از روش‌های کمی و به کمک نرم‌افزار Envi، Arc GIS، Fragtats و روش‌های کیفی و تکنیک‌های دلفی وضعیت سیل‌خیزی شهر ایلام بررسی کردند. علی‌رغم مطالعاتی که با مدل‌های مختلف در استان ایلام به علت وقوع سیل‌های فراوان و تهدیدهایی که در سطح استان به وجود آورده و از آن جمله می‌توان به سیل‌هایی ۱۳۹۴ و ۱۳۹۸، ۱۴۰۲ اشاره کرد. اما با مدل مکسنت هنوز پژوهشی در این استان انجام نشده است. از طرفی به دلیل کوهستانی بودن منطقه سنتیل ۱ دارای نویز است. همچنین نبود امکان دانلود سنتیل ۱ در این بازه زمانی، مدل Maxent می‌تواند پیش‌بینی و شناسایی مناطق پرخطر سیل را داشته باشد. در این مطالعه، از مدل Maxent برای پیش‌بینی، ارزیابی خطر سیل و آب‌گرفتگی و شناسایی مناطق مستعد سیل استفاده شده است.

## روش تحقیق

### محدوده مورد مطالعه

استان ایلام در غرب کشور ایران، هم مرز با کشور عراق می‌باشد. ۲,۱۰ درصد از مساحت کل کشور را پوشش می‌دهد این استان در ۳۱ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه طول واقع است. دارای مناطقی کوهستانی و مرتفع در نواحی شرقی و شمالی است و از طرفی در مناطق غربی هم مرز با کشور عراق از میزان ناهمواری‌ها کاسته شده و در مناطق جنوبی و جنوب غربی استان، که پهنه‌های هموار و دشت گسترش می‌یابد، هم مرز با استان خوزستان می‌باشد. اکثر مناطق شهری و روستایی ایلام خصوصاً نواحی شمالی و کرانه‌های شرقی استان در دامنه کوه‌ها و کوهپایه‌هایی با شیب تند، اکثراً با پوشش صخره‌ای و همچنین درحاشیه رودخانه‌هایی هم چون سیمره، گاوی، کنجانچم، دویرج، میمه و رودخانه‌های فصلی با مصبی طولانی و مستعد سیلاب‌های مخرب واقع شده‌اند، این امر باعث خلق سیلاب‌هایی مانند سیلاب‌های سالهای ۶۸-۷۳ - ۹۴ - ۹۷ و ۹۸، ۴۰۲ گردیده است که موجب ویرانی بسیاری از زیرساخت‌ها و شریان‌های حیاتی در استان شده است (شکل ۱).

<sup>۱</sup> Maharjan et al

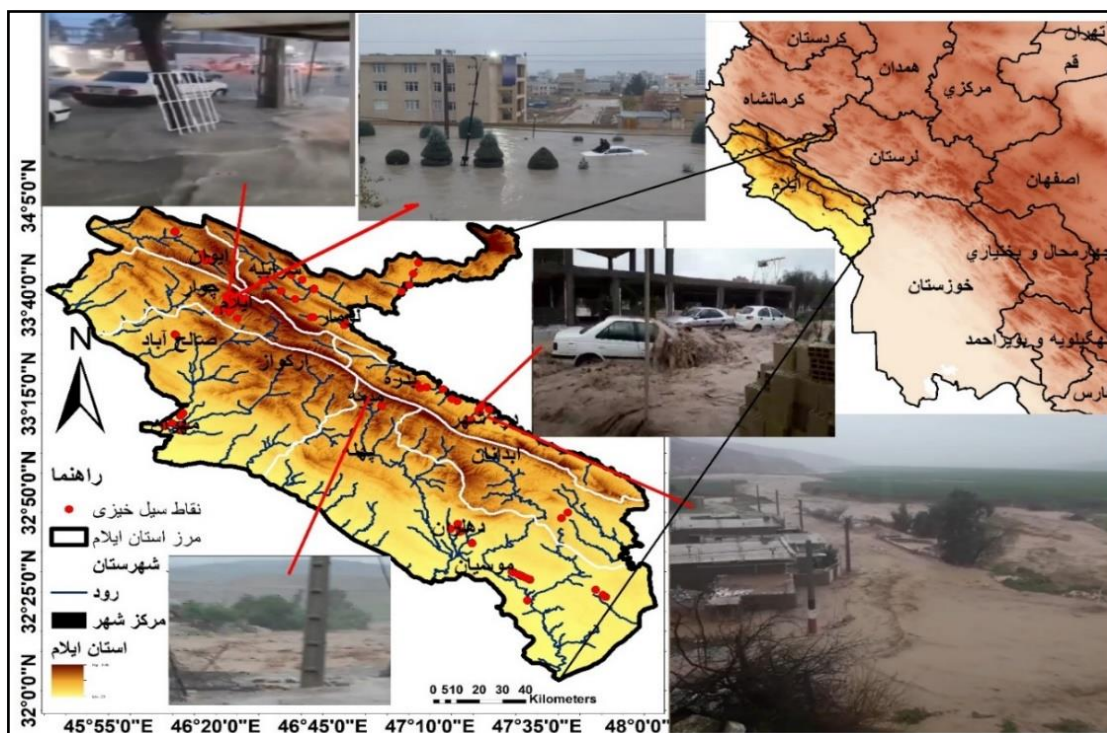
<sup>۲</sup> Amu Darya

<sup>۳</sup> Badakhshan

<sup>۴</sup> Afghanistan

<sup>۵</sup> Qasimi et al

<sup>۶</sup> Kalita



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه و نقاط رخداد سیل

### داده‌های مورد استفاده

#### فهرست تاریخچه سیل و متغیرهای محیطی

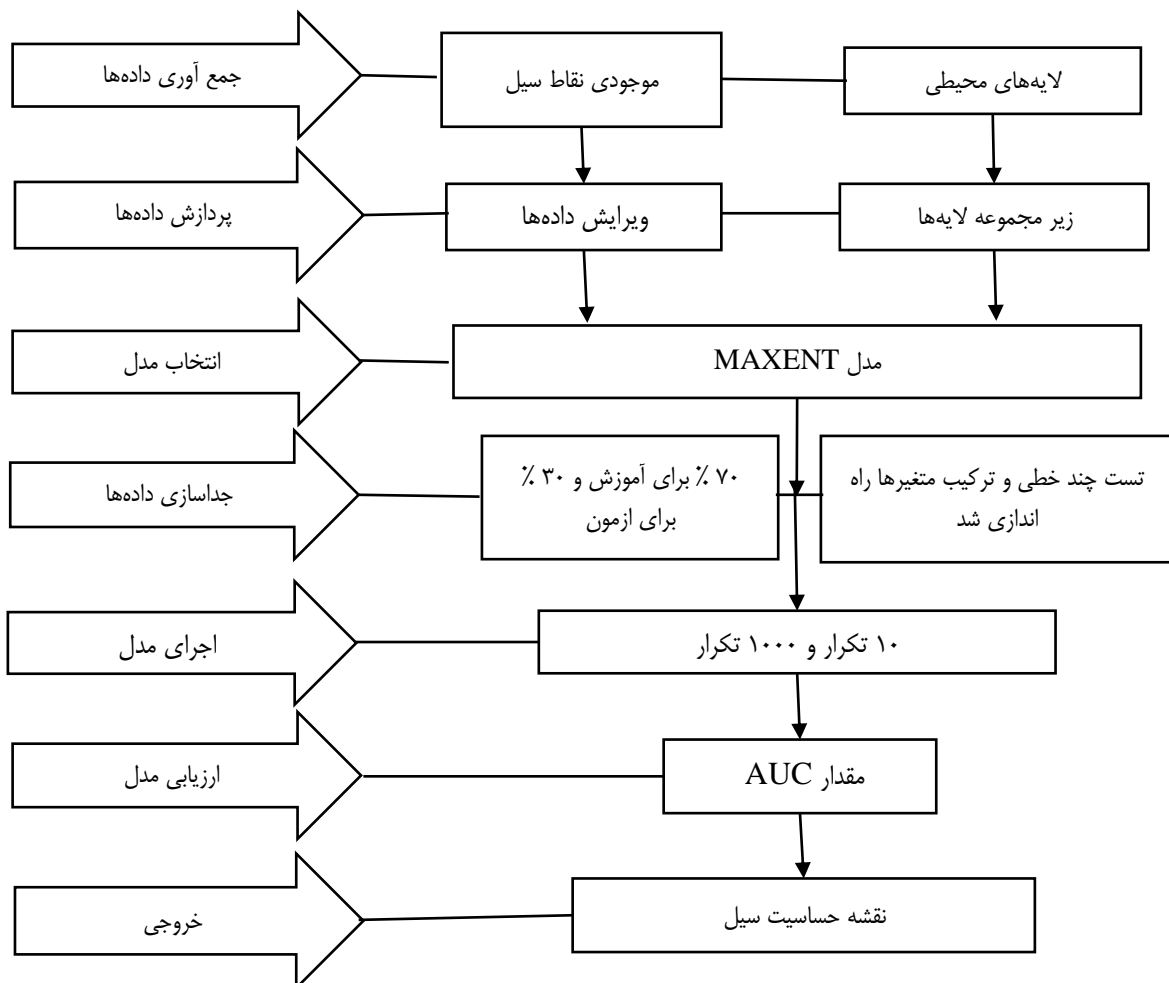
با استفاده از تجزیه و تحلیل سوابق وقوع سیل‌های گذشته می‌توان رویداد سیل آینده در یک منطقه را تخمین زد (مانندار<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰). یک گام کلیدی برای نقشه حساسیت، تهیه فهرستی از خطراتی است که زمین را تهدید می‌کند. برای انجام این پژوهش ابتدا نقاط سیل استان ایلام از سازمان آب منطقه‌ای و مدیریت بحران استان گردآوری شد. حدود ۱۴۸ منطقه وقوع سیل ثبت شده است، برای نمونه‌های آموزشی از رویکرد تقسیم تصادفی استفاده شد. در مطالعه حاضر ۷۰٪ (۱۰۴) نقاط سیل برای ساخت مدل (آموزش) در نظر گرفته شد و ۳۰٪ (۴۴ نقاط سیل) باقی مانده برای اعتبارسنجی استفاده شد. مجموع ۱۴ پارامتر محیطی از جمله، بافت خاک، بارندگی، پوشش زمین و کاربری اراضی (LULC)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، فاصله از رودخانه، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، شاخص مرطوب متفاوت نرمالیزه شده (NDMI)، شاخص گیاهی تفاوت نرمال شده (NDVI)، شاخص قدرت جریان (SPI)، شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI)، زهکشی تراکم، شیب، جهت شیب، و انحنای نیز برای پیش‌بینی سیل با استفاده از مدل Maxent به عنوان داده، وارد گردید. (جدول ۱)

<sup>۱</sup> Manandhar

جدول ۱: داده‌های مورد استفاده در پژوهش

منابع	نقشه‌های مورد نیاز	داده‌ها
Search.asf.alaska.edu/#/	ارتفاع، شاخص رطوبت توپوگرافی TWI، شاخص توان جریان SPI، شیب، جهت شیب، انحناء، تراکم شبکه زهکشی و فاصله از رودخانه دائمی، شاخص ناهمواری توپوگرافی،	ALOSPALSAR (D.E.M./12.5 m)
Google Earth Engine	نقشه NDVI	Sentinel 2 (10 m)
https://livingatlas.arcgis.com/landcove	نقشه LU/LC	Land use/Land cover (10m)
داده‌های هواشناسی	نقشه بارندگی	داده‌های بارندگی
مرکز داده ISRIC، اطلاعات خاک جهان)	بافت خاک	داده‌های خاک
Arc GIS, LANDASAT8, DEM12.5	شاخص رطوبت متفاوت نرمالیزه	LANDASAT8, DEM12.5

شکل (۲) داده‌های ورودی و روش مدل‌سازی Maxent نشان می‌دهد.



### شکل ۲: روش تحقیق مدل Maxent

#### پارامترهای موثر در سیل

تعیین عوامل موثر بر مخاطرات مختلف طبیعی و تلفات انسانی برای انجام نقشه‌های سیل ضروری است (۲۰۱۲ کیا و همکاران، ۲۰۱۲، اول و ژانگ و ۲، ۲۰۲۰). عوامل موثر در سیل با توجه به شرایط محیطی و داده‌های موجود انتخاب شدند (چاکرابورتی<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). پارامترهای محیطی مورد استفاده در این تحقیق به شرح زیر است:

#### ارتفاع

ارتفاع همیشه نقش بسیار مهمی در نقشه برداری حساسیت سیل دارد (فرناندز و لوتز<sup>۴</sup>، ۲۰۱۰). به دلیل نیروی گرانش، آب به سرعت از مناطق مرتفع به مناطق پست حرکت می‌کند و در دشت‌های پایین انباشته می‌شود و باعث وقوع سیل می‌شود (داس<sup>۵</sup>، ۲۰۱۹). مشابه فاصله از رودخانه، یک رابطه معکوس بین حساسیت به سیل و ارتفاع وجود دارد، به عنوان مثال، دشت‌ها به دلیل ارتفاعات کم و توپوگرافی هموار و قرار گرفتن در مناطق پایین دست، مکان وقوع سیل‌های فاجعه بار است (شکل ۳ الف).

#### شیب

رواناب سطحی و فرآیند تجمعی آب در هر محیط ژئومورفیک به ویژگی‌های شیب سطحی آن محیط بستگی دارد (۲۰۱۰ فرناندز و لوتز<sup>۶</sup>، ۲۰۱۰). آب از ارتفاعات بالاتر به پایین‌تر جریان می‌یابد، بنابراین (ترمه<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۸) زاویه شیب، نفوذ رواناب سطحی (۲۰۱۸، پاتریکاکی<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۸) و سرعت جریان آب را کنترل می‌کند. در ناحیه شیب ملایم (۱۸-۰)، رواناب آهسته است و زمان بیشتری را برای نفوذ در اختیار دارد (آدیات<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۲). نقشه شیب در نرم افزار ArcGIS 10.8.2 با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با اندازه سلول شبکه ای ۱۲,۵×۱۲,۵ متر تولید شد و به پنج دسته تقسیم شد (شکل ۳ ب).

#### جهت شیب

<sup>۱</sup> Kia

<sup>۲</sup> Ullah & Zhang

<sup>۳</sup> Chakraborty

<sup>۴</sup> Fernández & Lutz

<sup>۵</sup> Das

<sup>۶</sup> Fernández & Lutz

<sup>۷</sup> Termeh.

<sup>۸</sup> Patrikaki

<sup>۹</sup> Adiat

این عامل به طور کلی جهت پایین (رحمتی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹) و جهت حداکثر شیب (رگمی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴) را نشان می‌دهد. اگرچه این عنصر تنها تأثیر جزئی بر سیل دارد، اکثر محققان آن را به عنوان عامل موثر در حساسیت سیل در نظر گرفته اند (۲۰۲۰ کوستاچه و بوی<sup>۳</sup>، ۲۰۲۰)، (شکل ۳ پ).

#### شاخص رطوبت توپوگرافی<sup>۴</sup> (TWI)

توزیع فضایی ویژگی‌های توپوگرافی که نشان‌دهنده رطوبت خاک و عمق آب زیرزمینی است به عنوان شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) توصیف می‌شوند، مقادیر بالای شاخص رطوبت توپوگرافی مربوط به مناطقی است که انباشت آب و رواناب زیاد است. مقادیر شاخص رطوبت توپوگرافی بالا نشان دهنده زهکشی کم و زمین‌های اشباع است که ممکن است باعث سیل شود (۲۰۱ فرناندز و لوتز<sup>۵</sup>، ۲۰۱۰). (شکل ۳ ت).

#### شاخص گیاهی متمایز نرمال شده<sup>۶</sup> (NDVI)

شاخص گیاهی متمایز نرمال شده (NDVI) یک تکنیک ژئوانفورماتیک<sup>۷</sup> است که توسط تاکر<sup>۸</sup> (۱۹۷۹) برای اندازه‌گیری پوشش گیاهی ارائه شد (ساهو و بنگال<sup>۹</sup>، ۲۰۱۸). پوشش گیاهی یک عامل دفاعی در برابر سیل است، زیرا رواناب را قطع و به عنوان یک مانع عمل می‌کند. به طور کلی توسط شاخص گیاهی متمایز نرمال شده (NDVI) برآورد می‌شود (تهرانی<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). پوشش گیاهی کم و تنک به دلیل نفوذپذیری پایین، پتانسیل بالایی برای سیل دارد (کاپراریو و فینوتی<sup>۱۱</sup>، ۲۰۱۹). (شکل ۳ ث).

#### شاخص رطوبت متفاوت نرمالیزه شده<sup>۱۲</sup> (NDMI)

شاخص رطوبت تفاوت نرمال شده، توسط ویلسون و سادر<sup>۱۳</sup> (۲۰۰۲)، با هدف جستجوی رطوبت خاک توسعه یافته است. به طور معمول در مناطق پرآب و غرقابی، رطوبت خاک زیاد خواهد بود (ساهو و بنگال<sup>۱۴</sup>، ۲۰۱۸). برای محاسبه NDMI با استفاده از لندست ۸، فرمول (۱) به شرح زیر است:

$$(1) \quad NDMI = \frac{Band5(Near\ Infrared) - Band6(middle\ Infrared)}{Band5(Near\ Infrared) + Band6(middle\ Infrared)}$$

<sup>۱</sup> Rahmati

<sup>۲</sup> Regmi

<sup>۳</sup> Costache & Bui

<sup>۴</sup> topographic wetness index

<sup>۵</sup> Fernández & Lutz

<sup>۶</sup> normalized differential vegetation index

<sup>۷</sup> geoinformatics

<sup>۸</sup> Tucker

<sup>۹</sup> Sahu & Bengal

<sup>۱۰</sup> Tehrani

<sup>۱۱</sup> Caprario & Finotti

<sup>۱۲</sup> Normalized difference moisture index

<sup>۱۳</sup> Wilson and Sader

<sup>۱۴</sup> Sahu & Bengal

در شاخص رطوبت تفاوت نرمال شده، مقادیر بالا نشان‌دهنده وجود توده‌های عظیم آبی در زیر زمین و رطوبت بیشتر خاک، مقادیر پایین نشان‌دهنده رطوبت کم خاک است. (شکل ۳ ج).

#### خاک

خاک یک عامل اساسی در تهیه نقشه حساسیت به سیل است، زیرا نفوذ اولیه آب به ویژگی‌های خاک (کوستاچ<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). به ویژه بافت خاک بستگی دارد به عبارت دیگر، بافت خاک تولید رواناب سطحی و فرآیند طغیان را کنترل می‌کند (کازبی<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۸۴). (شکل ۳ چ).

#### انحنا

با استفاده از تجزیه و تحلیل انحنا پلان می‌توان اطلاعات ژئومورفولوژیکی مفیدی استخراج کرد (مقدم<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). علاوه بر این، وجود انحنا می‌تواند بر غلظت و پراکنندگی جریان آب تأثیر بگذارد (شو<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). در مورد انحنا پلان، انحنا منفی مقعر، انحنا صفر نشان‌دهنده زمین مسطح، و انحنا مثبت زمین محدب را نشان می‌دهد. با استفاده از ArcGIS 10.8، نقشه انحنا تهیه و سه کلاس، طبقه بندی شد (شکل ۳ ح).

#### شاخص قدرت جریان<sup>۵</sup> (SPI)

شاخص قدرت جریان یک ویژگی توپوگرافی ثانویه است که با استفاده از دو عامل جریان تجمعی و شیب جریان به دست می‌آید. قدرت فرسایشی کانال را تعیین می‌کند. توپوگرافی منطقه تعیین کننده مناطق رسوب (برای مقادیر کم یا منفی) و فرسایشی (مقادیر مثبت) است (احمد<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). شاخص توان جریان (SPI)، را می‌توان به عنوان یک پارامتر پایش سیل، میزان دبی با قدرت فرسایش آب جاری در یک مکان خاص تعریف کرد. مقادیر SPI با فراوانی وقوع سیل رابطه معکوس دارد، یعنی مقدار SPI پایین نشان‌دهنده شانس بیشتری برای طغیان سیل است (کورگیلاس و کاراتزاس<sup>۷</sup>، ۲۰۱۱، ۷). (شکل ۳ خ).

#### شاخص ناهمواری توپوگرافی<sup>۸</sup> (TRI)

شاخص ناهمواری توپوگرافی شامل نسبتی است از سطح ناهموار زمین به یک سطح صاف در یک محدوده معین (استامباو و گیت<sup>۹</sup>، ۲۰۰۸). ناهمواری توپوگرافی مترادف با پیچیدگی زمین، ناهمواری سطح و چین‌خوردگی است (وایت هاوس<sup>۱۰</sup>، ۲۰۲۳). (شکل ۳ د).

<sup>۱</sup> Costache

<sup>۲</sup> Cosby

<sup>۳</sup> Moghaddam

<sup>۴</sup> Shaw et al

<sup>۵</sup> stream power index

<sup>۶</sup> Ahmad

<sup>۷</sup> Kourgialas & Karatzas

<sup>۸</sup> Topographic roughness index

<sup>۹</sup> Stambaugh & Guyette

<sup>۱۰</sup> Whitehouse

### تراکم شبکه زهکشی

یک پارامتر اندازه گیری کمی است که به طور مستقیم توانایی یک منطقه را برای کنترل حرکت آب نشان می‌دهد. افزایش تراکم زهکشی می‌تواند منجر به واکنش سریع سیل در منطقه شود (عربامری<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). تراکم زهکشی به عنوان نسبت مجموع طول‌های زهکشی در سلول به اندازه مساحت سلول مربوطه تعریف می‌شود. جالب توجه است، تراکم زهکشی و حساسیت به سیل یک رابطه مثبت را نشان می‌دهد، به عنوان مثال، حساسیت به سیل با افزایش تراکم زهکشی افزایش می‌یابد. به منظور تبدیل الگوی شبکه زهکشی به کمیت قابل اندازه گیری، چگالی زهکشی با استفاده از نرم افزار ArcGIS 10.8 تعیین شد. این نقشه با استفاده از طرح طبقه بندی کمیت به هفت کلاس طبقه بندی شد. (شکل ۳ د).

### فاصله از رودخانه

فاصله از رودخانه به دلیل تأثیر قابل توجه آن بر گسترش و بزرگی سیل یکی از عوامل اصلی حساسیت سیل به شمار می‌آید (گلن<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۲). فاصله مکانی یک منطقه تا سیستم رودخانه یک عامل مهم در تعیین محدوده مناطق حساس به سیل است. با کاهش فاصله تا سیستم رودخانه، درجه خطرات سیل افزایش می‌یابد (ایکیری<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). یک رابطه معکوس بین حساسیت به سیل و فاصله از شبکه رودخانه وجود دارد که نشان می‌دهد افزایش فاصله از رودخانه احتمال سیل را کاهش می‌دهد (شکل ۳ ر).

### بارندگی

برای یک منطقه معین، بارندگی مهمترین عامل مربوط به وقوع سیل است، رابطه مستقیمی با جریان رودخانه دارد (پینوس و کسادا-رومن<sup>۴</sup>، ۲۰۲۱). شدت و طول بارندگی از عوامل اصلی ایجاد سیلاب است. داده‌های گذشته بارش اطلاعات ارزشمندی را در مورد الگوهای سیل ارائه می‌دهد و برای توسعه مدل‌های حساسیت به سیل ضروری است (آیدین و ایبان<sup>۵</sup>، ۲۰۲۳). (شکل ۳ ز).

### پوشش زمین و کاربری اراضی (LU/LC)

انواع پوشش زمین و کاربری اراضی به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر برخی پدیده‌های هیدرولوژیکی مانند تولید رواناب، نفوذ و تبخیر و تعرق تأثیر می‌گذارند (رحمتی<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۶، بون و کرکی<sup>۷</sup>، ۱۹۷۹، کومولافه<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۸).

<sup>۱</sup> Arabameri

<sup>۲</sup> Glenne

<sup>۳</sup> Ikirri

<sup>۴</sup> Pinos & Quesada-Román

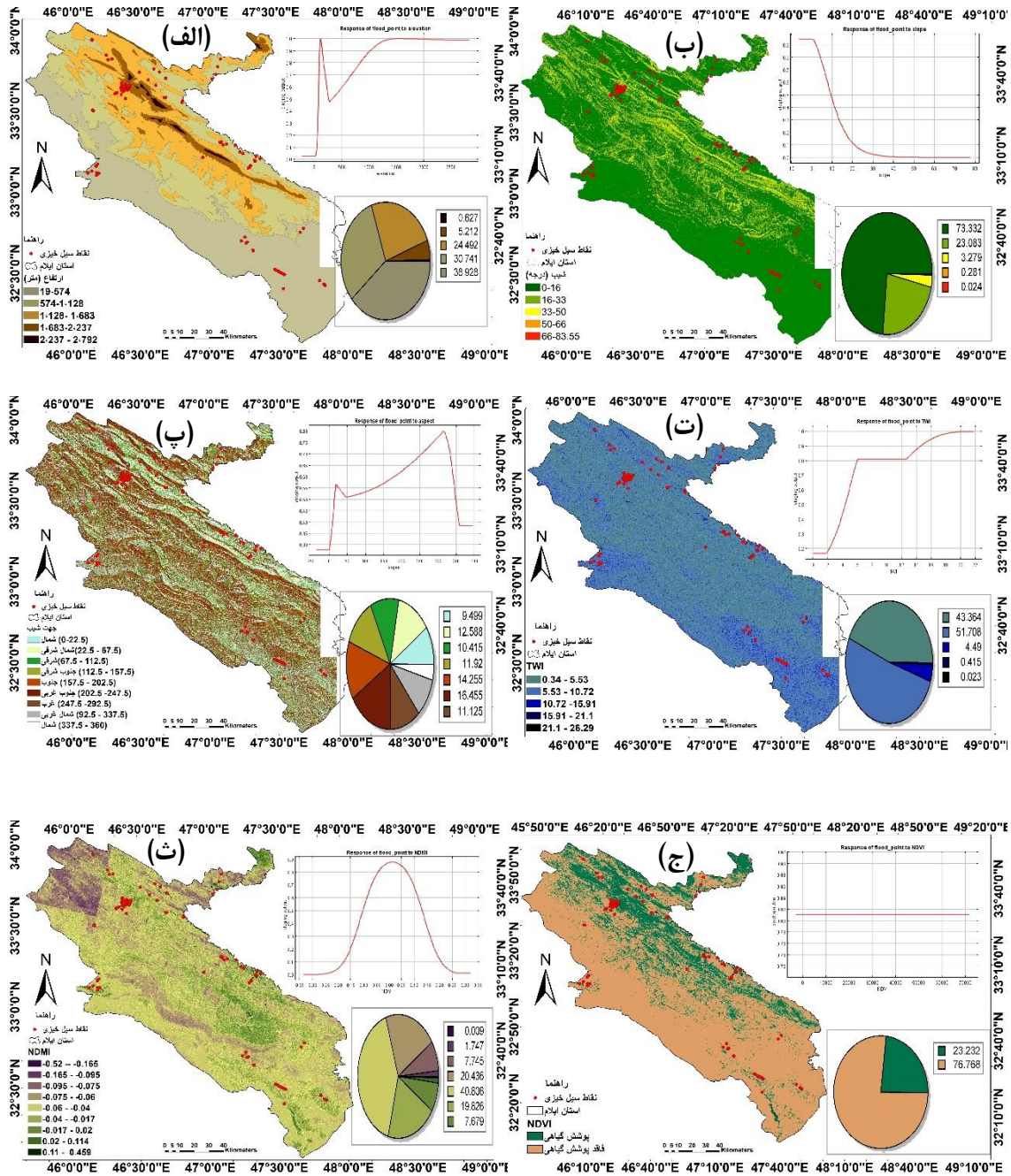
<sup>۵</sup> Aydin & Iban

<sup>۶</sup> Rahmati et al

<sup>۷</sup> Beven & Kirkby

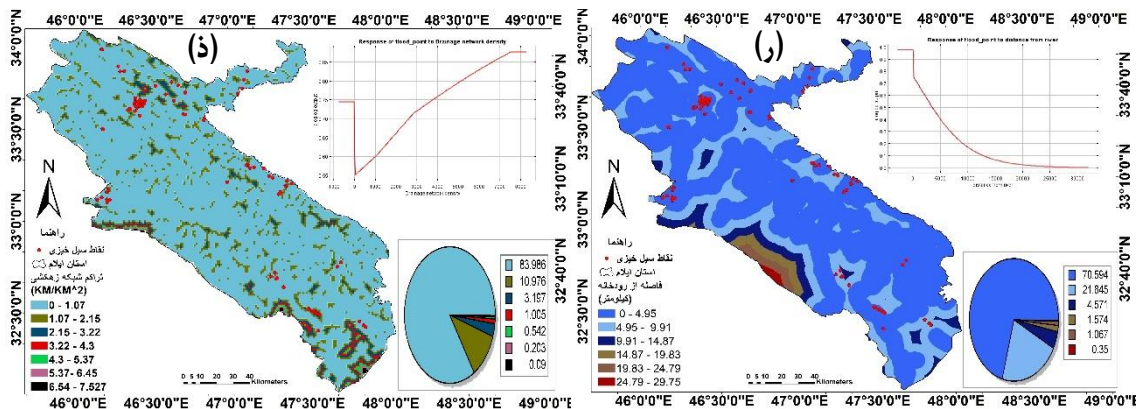
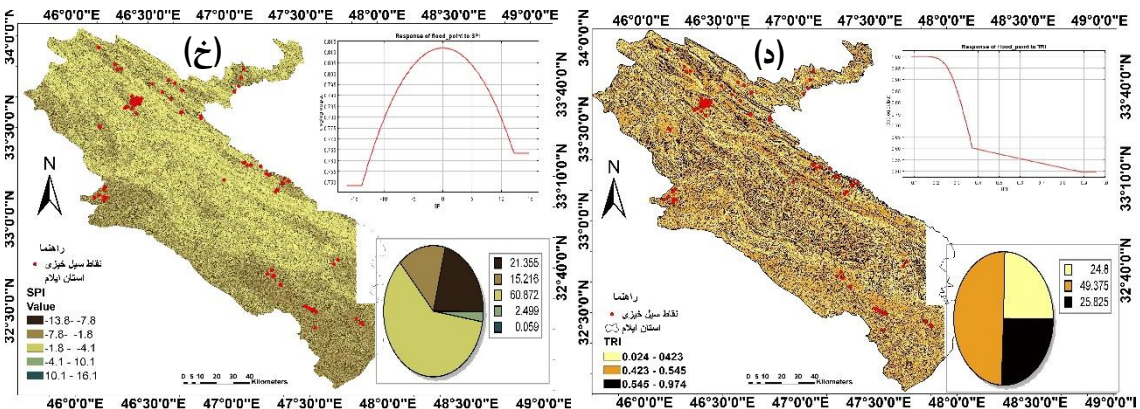
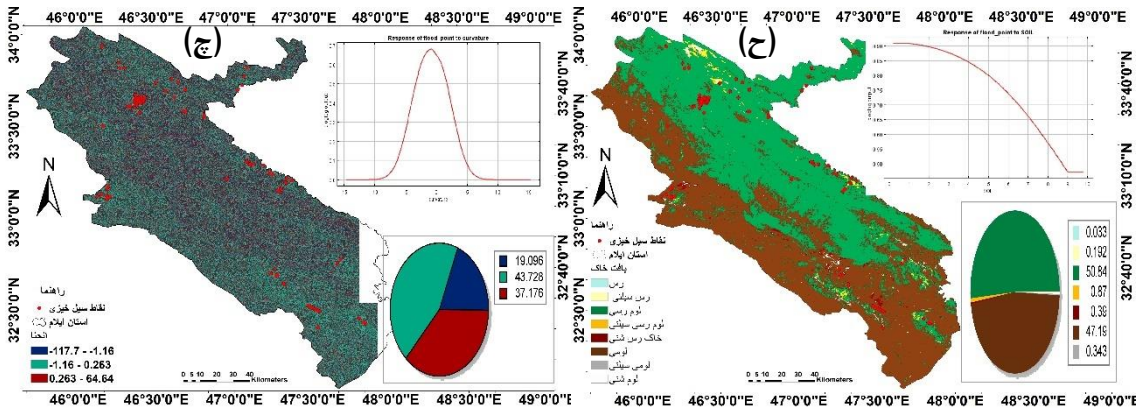
<sup>۸</sup> Komolafe

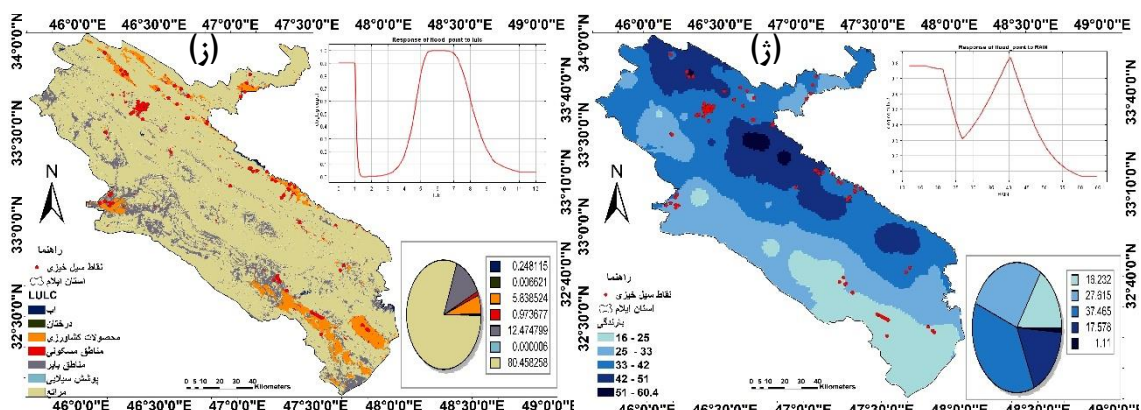
در مطالعه سواحل می‌سی‌سی‌پی و آلاباما<sup>۱</sup>، عامل کاربری همراه با ارتفاع و شیب عواملی در نظر گرفته شدند که بیشترین تأثیر را بر سیل در یک منطقه داشتند (بیلسکی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴)، (شکل ۳ ژ).



<sup>۱</sup> Mississippi and Alabama

<sup>۲</sup> Bilskie





شکل ۳: نقشه عوامل مورد استفاده جهت حساسیت سیل: (الف) ارتفاع، (ب) شیب، (پ) جهت شیب، (ت). TWI، (ث) NDVI، (ج) NDMI، (چ) بافت خاک، (ح) انحنای، (خ) SPI، (د) TRI، (ذ) تراکم شبکه زهکشی، (ر) فاصله از رودخانه، (ز) بارندگی، (ژ) LULC

### مدل مکسنت برای وقوع سیل

مدل حداکثر آنتروپی<sup>۱</sup> (Maxent)، به عنوان یک روش یادگیری ماشینی، از اطلاعات پایه استفاده می‌کند و در ابتدا توسط شانون<sup>۲</sup> مطرح شد (فیلیپس<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۶). که به دنبال پراکنده‌ترین یا نزدیک‌ترین روش توزیع یکنواخت برای پیش بینی احتمال است. این مدل فقط اطلاعات نمونه شناخته شده را در محاسبه در نظر می‌گیرد. با استفاده از نقاط سیل‌خیزی موجود و عوامل موثر در وقوع سیل، حساسیت سیل بررسی شد. تعداد زیادی از نقاط نمونه (سیل) به طور تصادفی انتخاب می‌شود و سپس رابطه مربوطه با عوامل تهیه شده، ارزیابی می‌شود. این مدل دارای دو مؤلفه اصلی است: یکی مقدار آنتروپی است که برای ایجاد عملکرد هدف استفاده می‌شود. مورد دیگر محدودیت است که برای کالیبراسیون مدل استفاده می‌شود.

با فرض اینکه متغیر احتمال  $X \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  از بروز سیل در منطقه مورد مطالعه، توزیع احتمال آن  $p_i, i=1, 2, \dots, p(X=x_i) =$  به صورت زیر تعریف می‌شود فرمول (۲ و ۳):

$$(۲) H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log p(x_i)$$

$$(۳) = - \sum_{i=1}^n p(x) \log p(x)$$

$H(X)$  به توزیع  $X$  بستگی دارد و ربطی به مقدار  $X$  ندارد. پس از معرفی عوامل مناسب مختلف  $Y (Y \in \{y_1, y_2, \dots, y_k\})$  به توزیع  $X$  تحت شرایطی که به عنوان  $Y$  شناخته می‌شود فرمول (۴ و ۵):

$$(۴) H(X|Y) = - \sum_{i=1}^n p(y_i) H(X|Y = y_i)$$

<sup>۱</sup> Maximum entropy

<sup>۲</sup> Shannon

<sup>۳</sup> Phillips et al

$$(5) = - \sum_{i=1}^n p(y_i) \sum_{i=1}^n p(x_i | y_i) \log p(x_i | y_i)$$

ما از ابزارهای تحلیل فضایی در نرم افزار ArcGIS10.8 و EXCEL21 برای محاسبه مختصات جغرافیایی نقاط سیلاب و وارد کردن آنها به مدل Maxent استفاده کردیم. با توجه به اصل حداکثر آنتروپی، تابع هدف مدل حداکثر آنتروپی (Maxent) به صورت زیر است فرمول (۶):

$$(6) X = \operatorname{argmax} H(X|Y)$$

یکی از مزیت‌های کلیدی Maxent، توانایی آن در پیش‌بینی سیل صرفاً بر اساس حضور رویدادهای گذشته است که نیاز به مشاهدات گسترده جریان رودخانه برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی را از بین می‌برد (زنگ و همکاران، ۲۰۲۱).

### عملکرد مدل

تشخیص دقیق نقشه حساسیت به سیل با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی بر پایه داده‌ها اولیه است. چندین شاخص آماری، مانند ماتریس سردرگمی، مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) و ناحیه زیر منحنی (AUC)، برای ارزیابی عملکرد یک طبقه‌بندی کننده استفاده شد (فاوست ۲، ۲۰۰۶). دقت پیش‌بینی‌ها و میزان موفقیت معمولاً با استفاده از ناحیه زیر منحنی (AUC) ارزیابی می‌شود (السیوان و همکاران ۳، ۲۰۲۱). مقدار AUC در زیر منحنی ROC از ۰٫۵ (به صورت مورب) تا ۱ تغییر می‌کند که هرچه مقدار عدد بزرگ‌تر باشد مدل قدرت پیش‌بینی بالاتری را نشان می‌دهد (برنینگ ۴، ۲۰۰۵). اگر AUC به ۱ برسد، یک طبقه بندی کامل است. اگر AUC به ۰٫۵ برسد، به معنی طبقه بندی ضعیف است (السیوان و همکاران، ۲۰۲۱). مقدار AUC بر اساس توانایی پیش‌بینی مدل به پنج دسته ضعیف (۰٫۵-۰٫۶)، متوسط (۰٫۶-۰٫۷)، خوب (۰٫۷-۰٫۸)، بسیار خوب (۰٫۸-۰٫۹) و عالی (۰٫۹-۱) تقسیم می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

### بحث و یافته‌ها

#### نقشه حساسیت سیل

نرم افزار Maxent از مدل حداکثر آنتروپی برای محاسبه برآوردهای خطر (نسخه ۳٫۴٫۴) استفاده می‌کند. این نرم افزار معمولاً برای تخمین توزیع گونه‌ها بر اساس مهم‌ترین شرایط محیطی استفاده می‌شود. از دیدگاه تئوری تصمیم، حداکثر تخمین آنتروپی را به عنوان یک تخمین قابل اعتماد بیز تفسیر می‌کنیم. این مدل متکی بر یادگیری ماشین است. در مدل حداکثر آنتروپی استفاده از پارامترهای محیطی الزامی است. تمام لایه‌های رستری طی مراحل (مختصات جغرافیایی یکسان، تعداد سطر و ستون یکسان و مقدار اندازه پیکسل یکسان) به تصاویر با فرمت ASCII تبدیل می‌شود. برای کاهش خطا، مدل را چندین بار تکرار کردیم تا نقشه احتمال سیل ایجاد شود، از طریق طبقه‌بندی حساسیت سیل به مناطق متمایز، توزیع فضایی حساسیت در نقشه زیر به تصویر کشیده شده است (شکل ۴ و ۵). شناسایی حدود ۲٫۰۶٪ از منطقه مورد مطالعه به عنوان منطقه در معرض خطر سیل‌های شدید است. حدود ۴٫۰۱٪ از منطقه مورد مطالعه دارای خطر متوسط و حدود

<sup>۱</sup> Zeng

<sup>۲</sup> Fawcett

<sup>۳</sup> AlThuwaynee

<sup>۴</sup> Brenning

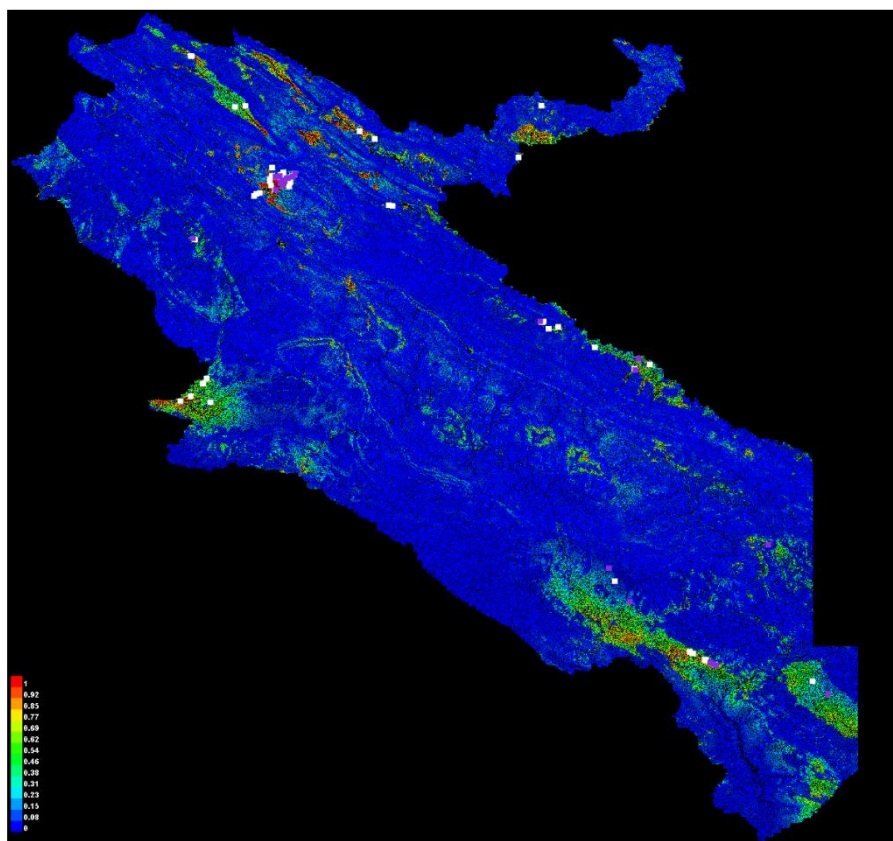
<sup>۵</sup> AlThuwaynee

<sup>۶</sup> Wang

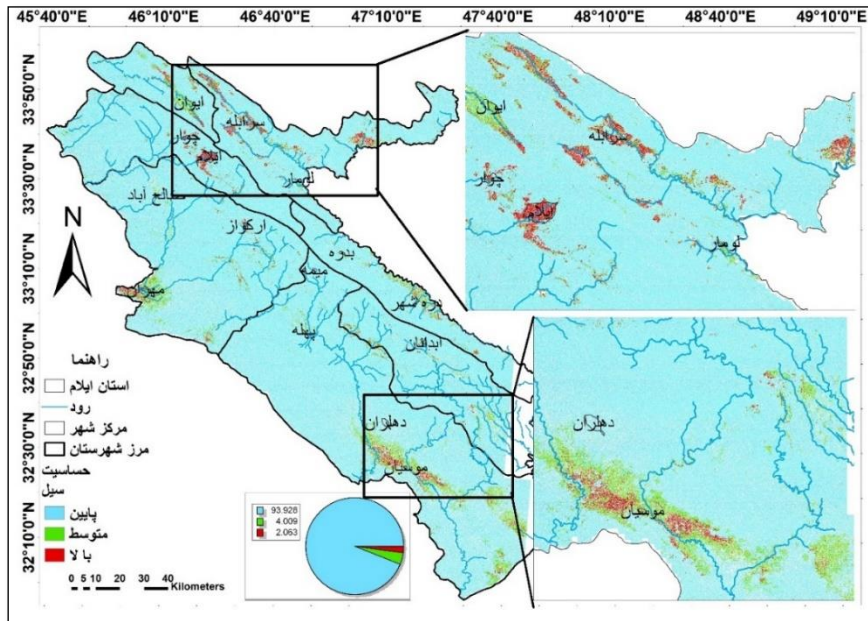
۹۳,۹۳٪ از منطقه مورد مطالعه در محدوده کم خطر یا بدون خطر وقوع شده است. (جدول ۲). در سطح خرد، ارزیابی حساسیت به سیل برای شهرها و روستاها در منطقه مورد مطالعه، دید اساسی در مورد آسیب‌پذیری محلی ارائه می‌کند (شکل ۴) این مطالعه نشان داد که در مجموع ۵ شهر (ایلام، سرابله، دره‌شهر، ارکواز و چوار) و ۹۲ روستا در منطقه با حساسیت بالا قرار دارند (جدول ۳).

جدول ۲: آماری از حساسیت سیل

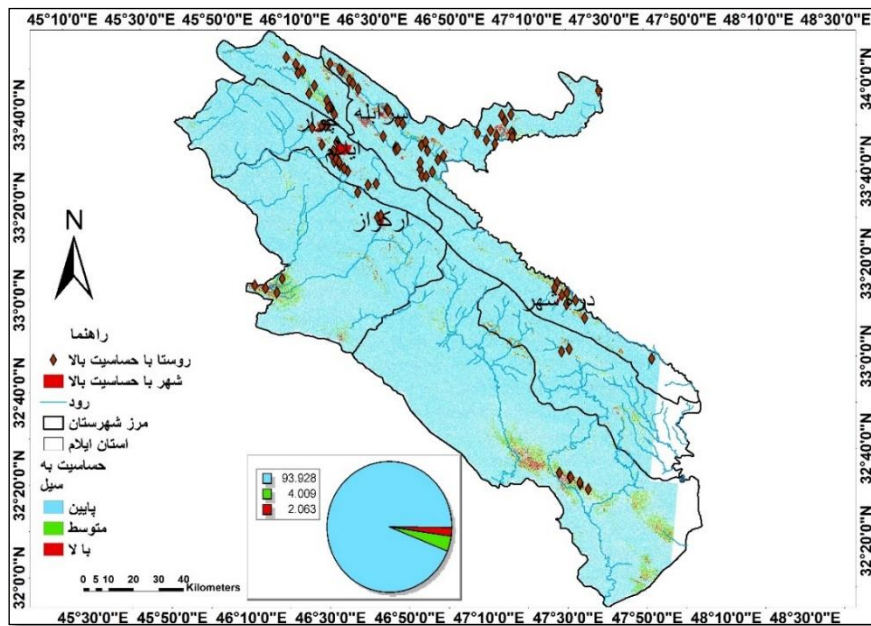
ردیف	حساسیت به سیل	مساحت (km <sup>2</sup> )	درصد (%)
۱	بالا	۳۹۷/۰۳	۲/۰۶
۲	متوسط	۷۷۱/۶۰	۴/۰۱
۳	بدون / پایین	۱۸۰۷۸/۱۴	۹۳/۹۳



شکل ۴: نقشه حساسیت به سیل از مدل Maxent



شکل ۵: نقشه حساسیت به سیل در منطقه مورد مطالعه



شکل ۶: روستاها و شهرها در مناطق حساس سیل

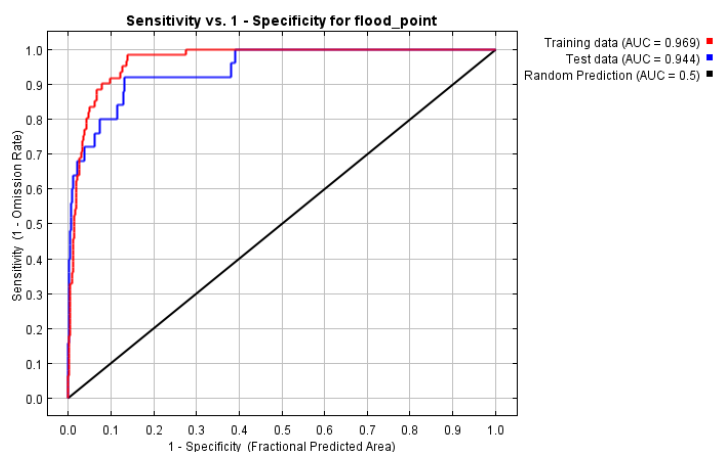
جدول ۳: مناطق سیل خیز

نام روستا	نام شهر	مناطق سیل خیز

حساسیت بالا	- ایلام - ارکواز - سرابله - چوار - دره شهر	سراب دولت آباد- هلشی علیا- خربانان علیا- گور خرم خربانان- خرابانان سفلی- چالانچی- شهرک نبوت- شاله شوری- زرنه- ترن- خوران سفلی- وارگه- کارخانه اجر ماشین- کارخانه رب گوجه- بابا مرادی علیا- صید نظری سفلی- کوله آسمان آباد- زنجیره سفلی- سرکلان- گلمه- شباب- مرغداری تهماسبی- علی آباد وسطی- باباشمس- عسلک- قلندر سفلی- پهنه بر- آفتاب لرنی- لرنی علیا- هیوند- چگنی- بادواز- کله قطار سفلی- شورابه مراتع- جوب شله- کورگ- زیرخاکی- مهدیه- کهره- سرجه لیجه- مزرعه جوی شله- چشمه ماهی- خرده چشمه- پشت تنگ سفلی- وربر- پله کیود- گراب- میدر سفلی- گلزار- شهرک ایلام صنعت- مرغداری ۲۵۰۰ قطعه- مورت- پادگان امام خمینی- مرغداری ویزین- تربیت معلم شهید مدرس- فاطمیه- چال سرا- مهدی آباد- انباره جهاد- شهرک شهید کشوری- فرودگاه- چشمه کیود- مرغداری تیهو- بلین- کله کیود- حسن آباد- ککل علیا- قلعه جوق- دلگشا- مزرعه مکانیزه دشت- بهرام آباد- فیروز آباد- بهین و بهروان- خربزان بالا- چاه تیمور طالبی- چاه دادی- پاه سبزعلی خاکی- شرکت سندوس- شن و ماسه دینارکو- چاه آب ارتش- جلیزی بالا- ورگر- جابر انصار- دشت آباد سفلی- الیاس آباد- دستگرد علیا- مرغداری- کله جوب علیا- چم ژاب- ماربره- همگام
-------------	--	--

### تحلیل مقایسه‌ای منحنی‌های حساسیت و پاسخ یا آزمون صحت‌سنجی

برای آزمون دقت مدل از چندین شاخص آماری استفاده شد. تأثیر نسبی هر متغیر پیش‌بینی‌کننده بر نتایج نقشه‌های حساسیت سیل با استفاده از آزمون جک نایف ۱ و تحلیل حساسیت از AUC مورد بررسی قرار گرفت. برای استخراج ماتریس سردرگمی، ۱۴۸ نقطه سیلابی که از منابع معتبر و رسمی اخذ شد، با استفاده از الگوریتم بذر تصادفی و گزینه آستانه حساسیت سیل نقشه باینری از وقوع سیل تهیه شد. در مورد اعتبارسنجی با توجه به نقاط موجودی سیل، مشاهده می‌کنیم که AUC برابر ۰٫۹۶۹ است (شکل ۶). به طور کلی،  $AUC = ۰٫۵$  هیچ تبعیضی را نشان نمی‌دهد (یعنی توانایی تشخیص در مناطق مستعد یا غیر مستعد سیل بر اساس آزمایش)، ۰٫۷ تا ۰٫۸ قابل قبول، ۰٫۸ تا ۰٫۹ خوب، و بیش از ۰٫۹ عالی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، توانایی پیش‌بینی مدل در منطقه مورد مطالعه عالی است.



شکل ۶. مدل منحنی ROC

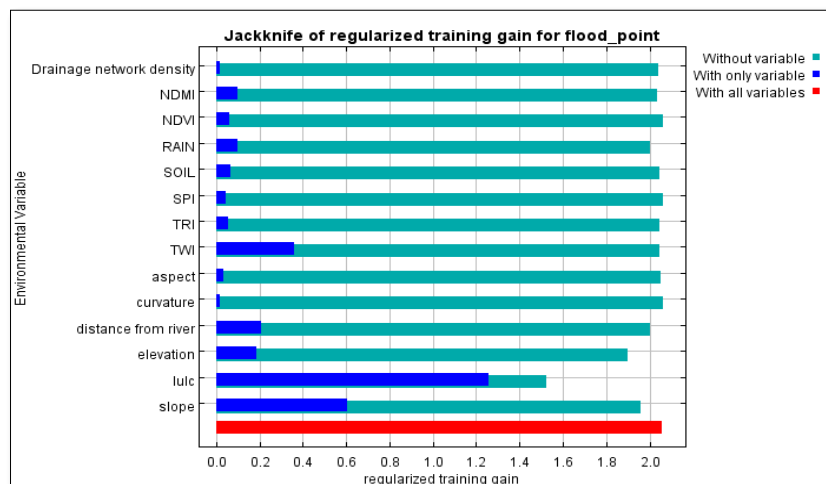
### تجزیه و تحلیل توزیع متغیرها

در این قسمت، تحلیل کمی شاخص‌ها برای ارزیابی سهم هر یک از عوامل تأثیرگذار اتخاذ شد و درصد سهم هریک از عوامل انتخاب شده، محاسبه گردید. جدول زیر تخمین‌هایی از سهم نسبی متغیرهای محیطی در مدل Maxent ارائه می‌دهد. (جدول ۳)

جدول (۳): جدول میزان مشارکت هریک از شاخص‌ها در وقوع سیل

اهمیت جایگشت	درصد سهم	متغیر
۴۴/۷	۶۱	LULC
۹/۶	۱۲/۸	ارتفاع
۲۸/۹	۱۰/۴	شیب
۴/۲	۳/۶	فاصله از رودخانه
۱	۳/۱	خاک
۳/۲	۳	بارش
۲/۷	۲/۲	TWI
۲	۱/۳	NDMI
۲	۱/۱	تراکم شبکه زهکشی
۰/۷	۰/۷	جهت شیب
۰/۹	۰/۴	TRI
۰	۰/۳	SPI
۰	۰	انحنا
۰	۰	NDVI

تصویر زیر با استفاده از تست جک نایف ۱ اهمیت متغیرها را نشان می‌دهد. در بین پارامترهای مورد استفاده، عامل کاربری اراضی و پوشش زمین بیشترین اهمیت را دارا بودند. (شکل ۷).



شکل ۷: نتایج آزمون جک نایف برای بررسی میزان نقش هر یک از شاخص‌های مورد استفاده در پژوهش

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، سه متغیر اصلی که بیشترین نقش را در خطرات سیل داشتند، کاربری اراضی، ارتفاع و شیب بودند و نرخ مشارکت آنها به ترتیب ۶۱٪، ۱۲٫۸٪ و ۱۰٫۴٪ می‌باشد. با توجه به تجزیه و تحلیل کیفی قبلی، می‌توان استنباط کرد که مناطق پوشیده از سطح ساخت و ساز، واقع در زمین مسطح با ارتفاع پایین در معرض خطر سیل بسیار بالایی هستند. همانطور که مشاهده می‌شود، عامل کاربری اراضی علاوه بر اینکه بالاترین درصد اهمیت در بین سایر عوامل دارد، دارای بیشترین اهمیت جایگزین (۴۴٫۷٪) نیز هست که این ویژگی کاربری اراضی را به عنوان ضروری‌ترین عامل در بین همه عوامل تبدیل کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود، اگرچه میزان مشارکت عامل شیب به اندازه ارتفاع نبود، اما اهمیت جایگشت نشان می‌دهد که تغییر متغیر شیب حدود ۲۸٫۹٪ از خطای مدل را به همراه خواهد داشت که آن را به یکی از ضروری‌ترین متغیر، بعد از کاربری اراضی در بین سایر متغیرها تبدیل می‌کند. عوامل فاصله از رودخانه، بافت خاک و بارندگی از نظر درصد سهم به ترتیب در رتبه چهارم تا ششم قرار گرفت که نشان می‌دهد تأثیر فاصله از رودخانه، بافت خاک و بارش بر خطر سیل نیز قابل ذکر هستند. عوامل شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص رطوبت متفاوت نرمالیزه شده و تراکم شبکه زهکشی به ترتیب ۲٫۲٪، ۱٫۳٪ و ۱٫۱٪ از سهم را در پیش‌بینی وقوع سیل داشتند، اما حذف این متغیر به ترتیب ۲٫۷٪، ۲٪ و ۲٪ خطا را برای مدل به ارمغان می‌آورد و از نظر اهمیت جایگشت در بین همه متغیرها تأثیر مؤثری ندارند. جهت شیب، شاخص ناهمواری توپوگرافی و شاخص قدرت جریان رودخانه به ترتیب ۰٫۷٪، ۰٫۴٪ و ۰٫۳٪ از سهم خطر سیل در منطقه دارند که نشان دهنده اهمیت پایین این متغیرها است. با در نظر گرفتن درصد سهم و اهمیت جایگشت در مجموع، به نظر می‌رسد که عوامل پوشش گیاهی و انحنا کم‌اهمیت‌ترین عامل در بین همه عوامل باشد.

با توجه به اینکه میزان بارندگی و سایر پارامترهای مختلف اقلیمی مانند زمان، شدت و مدت بارش در وقوع سیلاب مؤثرند اما به دلیل اینکه میانگین سالانه بارش در استان متفاوت می‌باشد، عوامل ثانویه کاربری اراضی، ارتفاع و شیب که به عنوان عوامل مؤثر در سیلاب استان شناسایی شدند.

### نتیجه‌گیری

سیل شایع‌ترین نوع بلایای طبیعی است که زندگی و دارایی مردم را در سطح جهانی تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش بر حسب ضرورت از رویکرد یادگیری ماشینی Maxent برای استخراج نقشه‌های حساسیت به سیل برای استان ایلام استفاده شد. با استفاده از خروجی Maxent نقشه حساسیت سیل در استان تهیه گردید. حدود ۲٫۰۶٪ از استان در منطقه حساسیت بالا و ۴٫۰۱٪ در منطقه با حساسیت متوسط و ۹۳٫۹۳٪ درصد با حساسیت پایین یا بدون حساسیت واقع شده است. به دلیل کوهستانی بودن منطقه مورد مطالعه محدوده حساسیت پایین، مساحت بیشتری در بر گرفته است. همچنین عواملی را که به طور قابل توجهی بر حساسیت به سیل در منطقه تأثیر گذار بودند، شناسایی شد. تجزیه و تحلیل نشان داد که تغییرات کاربری اراضی (۶۱٪)، ارتفاع (۱۲٫۸٪) و شیب (۱۰٫۴٪) عوامل مؤثر بر حساسیت سیل بودند. جهت شیب، شاخص ناهمواری توپوگرافی، شاخص قدرت جریان رودخانه، پوشش گیاهی و انحنا تأثیر ناچیزی بر حساسیت به سیل در منطقه مورد مطالعه داشت. بر اساس نتایج به دست آمده، ۵ شهر (ایلام، سرابله، دره شهر، ارکواز و چوار) و حدود ۹۲ روستا در منطقه مستعد سیلاب با حساسیت بالا شناسایی شدند.

خوشبختانه استفاده از این مدل در منطقه مورد مطالعه نتایج رضایت‌بخشی را به همراه داشت، که به وسیله روش‌های ارزیابی دقت مدل، تایید شد. نقشه‌برداری حساسیت برای تهیه طرح‌های مدیریت بلایا برای دولت، به‌ویژه در مناطق سیل‌خیز، حیاتی است. رویکرد مدل‌سازی Maxent که به دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن، سادگی و نیازهای کم داده مورد توجه قرار گرفته است، می‌تواند مدل مناسبی برای ارزیابی مخاطرات کشورهای در حال توسعه باشد. Maxent با

شناسایی مؤثر مناطق آسیب‌پذیر، به برنامه‌ریزی پیشگیرانه بلایا کمک می‌کند و در نهایت تأثیر آن را بر اموال و زندگی کاهش می‌دهد. این مطالعه اثربخشی مدل Maxent را به عنوان یک رویکرد مفید برای دانش‌گاہیان و سیاست‌گذاران در درک وقوع سیل و کمک به برنامه‌ریزی و چارچوب کاهش سیل برجسته می‌کند.

نتایج پژوهش حاضر با پژوهش نگهبان و مرحمت (۱۴۰۳) که در حوضه شهری جهرم در استان فارس انجام شده است، همسو می‌باشد. در این پژوهش پس از بررسی حساسیت سیل سه عامل ارتفاع، فاصله از آبراهه و کاربری اراضی به عنوان مهم‌ترین عامل شناسایی شد. همچنین پژوهش‌های ثقفیان و همکاران (۱۳۸۵) در حوضه آبریز سد گلستان، رشیدیان (۱۴۰۱) در حوضه آبریز تالار، عباس‌زاده تهرانی و همکاران (۱۳۸۹) در حوضه آبریز رودخانه مادرسو (دوغ) و قاسمی و همکاران (۲۰۲۴) در حوضه رودخانه آمودریا نیز در مطالعات خود، عامل اصلی مؤثر در وقوع سیلاب را کاربری اراضی معرفی کردند که همه با نتایج این مطالعه مطابقت دارد.

### منابع

- ارخی، ص.، یاری بیگی، ح.، عمادالدین، س.، ۱۴۰۰، پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۰(۳)، ۸۶-۱۱۰.
- باقلانی، م.، رستمی، ن.، توکلی، م.، ۱۳۹۷، شناسایی عوامل مؤثر بر بروز سیلاب شهری در حوضه آبخیز شهر ایلام، مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۱۱، شماره ۲، صص ۵۲۳-۵۳۶.
- ثقفیان، ب.، فرازجو، ح.، سپهری، ع.، نجفی‌نژاد، ع.، ۱۳۸۵. بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی بر سیل خیزی حوضه آبریز سد گلستان، تحقیقات منابع آب ایران، سال دوم، شماره ۱، صص ۲۸-۱۸.
- حنیفی‌نیا، ع.، عبقری، ه.، ۱۴۰۴، پیش بینی مناطق مستعد سیل با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین خطی تعمیم یافته و بیشینه آنتروپی، مخاطرات محیطی طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۳، پیاپی ۱.
- داوند، خ.، ۱۳۹۸، پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهر ایلام با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی کننده‌ی مکانی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان.
- رشیدیان، م.، ۱۴۰۱. ارزیابی اثرات تغییر کاربری حال و آینده بر روی ریسک سیلاب، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
- رضایی مقدم، م.، رحیم پور، ت.، ۱۴۰۳. ارزیابی پتانسیل خطر وقوع سیلاب با استفاده از روش تحلیل آماری دو متغیره (مطالعه موردی: حوضه آبریز آجی‌چای). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۲(۴)، ۹۱-۱۰۷.
- طهماسبی، ق.، ۱۴۰۰، مدیریت بحران مخاطرات شهری با تأکید بر خطر وقوع سیل (مطالعه موردی: شهر ایلام)، پایان‌نامه دکتری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.
- عباس‌زاده تهرانی، ن.، مخدوم فرخنده، م.، مهدوی، م.، ۱۳۸۹. بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر میزان دبی سیلاب‌ها با کاربرد فناوری سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) منطقه مورد مطالعه: حوضه آبریز رودخانه مادرسو (پارک ملی گلستان)، پژوهش‌های محیط زیست، دوره ۱، شماره ۲، صص ۱۴-۱.
- قره‌داغی، ب.، قاسم‌زاده، ا.، ۱۴۰۳، رویکرد پیش‌بینی جدید با استفاده ترکیب یادگیری ماشین برای پیش‌بینی مناطق حساس به وقوع سیل (مطالعه موردی: حوضه آبریز کارون)، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۶، شماره ۲.
- مختاری، د.، رضایی مقدم، م.، معزز، س.، ۱۴۰۰، تحلیل دینامیکی مخاطره سیلاب در مخروط افکنه‌های فعال با استفاده از مدل هیدرو دینامیکی HEC-RAS و تکنیک GIS (مطالعه موردی: مخروط افکنه لیلان، شمال غرب ایران). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۹(۴)، ۱۶۹-۱۸۵.
- نگهبان، س.، مرحمت، م.، ۱۴۰۳. پهنه بندی خطر سیل در حوضه آبریز شهری جهرم با استفاده از الگوریتم ماشینی (Maxent)، هیدروژئومورفولوژی، دوره ۱۱ (شماره ۴۱): ۴۷-۲۰.

- Achour, Y., & Pourghasemi, H. R., 2020. How do machine learning techniques help in increasing accuracy of landslide susceptibility maps?. *Geoscience Frontiers*, 11(3), 871-883.
- Adiat, K. A. N., Nawawi, M. N. M., & Abdullah, K., 2012. Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool—a case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. *Journal of Hydrology*, 440, 75-89.
- Ahmad, I., Dar, M. A., Teka, A. H., Gebre, T., Gadissa, E., & Tolosa, A. T., 2019. Application of hydrological indices for erosion hazard mapping using Spatial Analyst tool. *Environmental monitoring and assessment*, 191(8), 482.
- AlThuwaynee, O. F., Kim, S. W., Najemaden, M. A., Aydda, A., Balogun, A. L., Fayyadh, M. M., & Park, H. J., 2021. Demystifying uncertainty in PM10 susceptibility mapping using variable drop-off in extreme-gradient boosting (XGB) and random forest (RF) algorithms. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 43544-43566.
- Arabameri, A., Saha, S., Chen, W., Roy, J., Pradhan, B., & Bui, D. T., 2020. Flash flood susceptibility modelling using functional tree and hybrid ensemble techniques. *Journal of Hydrology*, 587, 125007.
- Aydin, H. E., & Iban, M. C., 2023. Predicting and analyzing flood susceptibility using boosting-based ensemble machine learning algorithms with SHapley Additive exPlanations. *Natural Hazards*, 116(3), 2957-2991.
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological sciences journal*, 24(1), 43-69.
- Bilskie, M. V., Hagen, S. C., Medeiros, S. C., & Passeri, D. L., 2014. Dynamics of sea level rise and coastal flooding on a changing landscape. *Geophysical Research Letters*, 41(3), 927-934.
- Brenning, A., 2005. Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(6), 853-862.
- Caprario, J., & Finotti, A. R., 2019. Socio-technological tool for mapping susceptibility to urban flooding. *Journal of Hydrology*, 574, 1152-1163.
- Castillo, C., & Gómez, J. A., 2016. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, 160, 300-319.
- Chakraborty, R., Pal, S. C., Janizadeh, S., Santosh, M., Roy, P., Chowdhuri, I., & Saha, A., 2021. Impact of climate change on future flood susceptibility: an evaluation based on deep learning algorithms and GCM model. *Water Resources Management*, 35, 4251-4274.
- Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Clapp, R. B., & Ginn, T., 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water resources research*, 20(6), 682-690.
- Costache, R., & Bui, D. T. 2020. Identification of areas prone to flash-flood phenomena using multiple-criteria decision-making, bivariate statistics, machine learning and their ensembles. *Science of the Total Environment*, 712, 136492.
- Costache, R., Hong, H., & Pham, Q. B., 2020. Comparative assessment of the flash-flood potential within small mountain catchments using bivariate statistics and their novel hybrid integration with machine learning models. *Science of the Total Environment*, 711, 134514.
- Das, S. 2019. Geospatial mapping of flood susceptibility and hydro-geomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 14, 60-74.

- Diakakis, M., Deligiannakis, G., Pallikarakis, A., & Skordoulis, M. 2016. Factors controlling the spatial distribution of flash flooding in the complex environment of a metropolitan urban area. The case of Athens 2013 flash flood event. *International journal of disaster risk reduction*, 18, 171-180.
- Fawcett, T., 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters*, 27(8), 861-874.
- Fernández, D. S., & Lutz, M. A., 2010. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1-4), 90-98.
- Glago, F. J., 2021. Flood disaster hazards; causes, impacts and management: a state-of-the-art review. *Natural hazards-impacts, adjustments and resilience*, 29-37.
- Glenn, E. P., Morino, K., Nagler, P. L., Murray, R. S., Pearlstein, S., & 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, 56-65.
- Harshasimha, A. C., & Bhatt, C. M., 2023. Flood vulnerability mapping using maxent machine learning and analytical hierarchy process (AHP) of Kamrup Metropolitan District, Assam. *Environmental Sciences Proceedings*, 25(1), 73.
- Ikirri, M., Faik, F., Boutaleb, S., Echogdali, F. Z., Abioui, M., & Al-Ansari, N., 2021. Application of HEC-RAS/WMS and FHI models for extreme hydrological events under climate change in the Ifni River arid watershed from Morocco. In *Climate and Land Use Impacts on Natural and Artificial Systems* (pp. 251-270). Elsevier.
- Kalita, N., Bora, A. K., Sarmah, R., Sahariah, D., & Nath, M. J. (2025). Comparative Flood Hazard Assessment in Assam's Belsiri River Basin Using AHP and MaxEnt Models. *Revue Internationale de Géomatique*, 34.
- Kia, M. B., Pirasteh, S., Pradhan, B., Mahmud, A. R., Sulaiman, W. N. A., & Moradi, A., 2012. An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. *Environmental earth sciences*, 67, 251-264.
- Komolafe, A. A., Herath, S., & Avtar, R., 2018. Methodology to assess potential flood damages in urban areas under the influence of climate change. *Natural Hazards Review*, 19(2), 05018001.
- Komolafe, A. A., Herath, S., & Avtar, R., 2018. Methodology to assess potential flood damages in urban areas under the influence of climate change. *Natural Hazards Review*, 19(2), 05018001.
- Kourgialas, N. N., & Karatzas, G. P., 2011. Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—a case study. *Hydrological Sciences Journal—Journal des Sciences Hydrologiques*, 56(2), 212-225.
- Li, H., Wang, Q., Li, M., Zang, X., & Wang, Y., 2024. Identification of urban waterlogging indicators and risk assessment based on MaxEnt Model: A case study of Tianjin Downtown. *Ecological Indicators*, 158, 111354.
- Maharjan, M., Timilsina, S., Ayer, S., Singh, B., Manandhar, B., & Sedhain, A., 2024. Flood susceptibility assessment using machine learning approach in the Mohana-Khutiya River of Nepal. *Natural Hazards Research*, 4(1), 32-45.
- Manandhar, B., 2010. Flood plain analysis and risk assessment of Lothar Khola. Master of Science Thesis in Watershed Management. Tribhuvan University Institute of Forestry Pokhara, Nepal.
- Moghaddam, D. D., Rezaei, M., Pourghasemi, H. R., Pourtaghie, Z. S., & Pradhan, B., 2015. Groundwater spring potential mapping using bivariate statistical model and GIS in the Taleghan watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 913-929.
- Pangali Sharma, T. P., Zhang, J., Khanal, N. R., Nepal, P., Pangali Sharma, B. P., Nanzad, L., & Gautam, Y., 2022. Household vulnerability to flood disasters among tharu community, western nepal. *Sustainability*, 14(19), 12386.

- Patrikaki, O., Kazakis, N., Kougiass, I., Patsialis, T., Theodossiou, N., & Voudouris, K., 2018. Assessing flood hazard at river basin scale with an index-based approach: The case of Mouriki, Greece. *Geosciences*, 8(2), 50.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Pinos, J., & Quesada-Román, A., 2021. Flood risk-related research trends in Latin America and the Caribbean. *Water*, 14(1), 10.
- Qasimi, A. B., Isazade, V., & Berndtsson, R., 2024. Flood susceptibility prediction using MaxEnt and frequency ratio modeling for Kokcha River in Afghanistan. *Natural Hazards*, 120(2), 1367-1394.
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H., 2016. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, 31(1), 42-70.
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H., 2016. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, 31(1), 42-70.
- Regmi, A. D., Devkota, K. C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Kumamoto, T., & Akgun, A., 2014. Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 725-742.
- Rodriguez-Morata, C., Ballesteros-Cánovas, J. A., Trappmann, D., Beniston, M., & Stoffel, M., 2016. Regional reconstruction of flash flood history in the Guadarrama range (Central System, Spain). *Science of the total environment*, 550, 406-417.
- Sahu, A. S., & Bengal, N. W., 2018. Detection of water-logged areas using geoinformatics techniques and relationship study in Panskura-Tamluk flood plain (India). *Trans. Inst. Indian Geographers*, 40(1), 9-24.
- Salvacion, A., Lutero, D., Abucay, E., Nazareno, A., & Pangga, I., 2024. Mapping Flood Hazard in Marinduque, Philippines, Using Maximum Entropy Approach. In *Geo-Environmental Hazards using AI-enabled Geospatial Techniques and Earth Observation Systems* (pp. 163-177). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Shaw, R., Surjan, A., & Parvin, G. A., 2016. Urban disasters and approaches to resilience. In *Urban Disasters and Resilience in Asia* (pp. 1-19). Butterworth-Heinemann.
- Sivakumar, S. S., 2015. Flood mitigation strategies adopted in Sri Lanka a review. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 3(6).
- Tehrani, M. S., Pradhan, B., & 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, 332-343.
- Termeh, S. V. R., Kornejady, A., Pourghasemi, H. R., & Keesstra, S., 2018. Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro fuzzy inference system and metaheuristic algorithms. *Science of the Total Environment*, 615, 438-451.
- Ullah, K., & Zhang, J., 2020. GIS-based flood hazard mapping using relative frequency ratio method: A case study of Panjkora River Basin, eastern Hindu Kush, Pakistan. *Plos one*, 15(3), e0229153.
- Wang, Y., Feng, L., Li, S., Ren, F., & Du, Q., 2020. A hybrid model considering spatial heterogeneity for landslide susceptibility mapping in Zhejiang Province, China. *Catena*, 188, 104425.
- Whitehouse, D. J., 2023. *Handbook of surface metrology*. Routledge.
- Zeng, Z., Li, Y., Lan, J., & Hamidi, A. R., 2021. Utilizing user-generated content and gis for flood susceptibility modeling in mountainous areas: A case study of Jian City in China. *Sustainability*, 13(12), 6929.