

پهنه‌بندی حساسیت سیل در حوضه آبریز سنقر در استان کرمانشاه

محمد مهدی حسین‌زاده^{۱*}، رؤیا پناهی^۲، توران تربند^۳

۱. دانشیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲. دکترای ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۳. کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۲/۲۲، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۶/۱۲)

چکیده

سیل شایع‌ترین مخاطره طبیعی در جهان است که سبب از بین رفتن جان و مال انسان‌ها شده است. تأثیر سیل تابعی از چندین معیار مانند قدرت و بزرگای سیل، تکرار و مدت جریان سیل و ژئومتری مقطع رودخانه است. ارزیابی مناطق مستعد سیل در مقیاس منطقه‌ای برای مدیریت حوضه آبریز و کاهش تلفات احتمالی اهمیت زیادی دارد. هدف از مطالعه حاضر، تهیه نقشه حساسیت سیل با استفاده از نوعی تحلیل ترکیبی از معیارهای هیدروژئومورفیک و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) است. برای رسیدن به این هدف، از معیارهای عامل ارتفاع، شیب، فاصله از شبکه زهکشی، ژئومورفولوژی، تراکم شبکه زهکشی، تجمع جریان، بارش، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، قدرت جریان، شاخص رطوبت توپوگرافی و انحنا توپوگرافی استفاده شده است. لایه‌های قدرت جریان، شاخص رطوبت توپوگرافی و انحنا توپوگرافی در محیط ساگا (SAGA) و بقیه فاکتورها در محیط GIS تهیه شده‌اند. پس از آماده‌سازی معیارها، ماتریس مقایسه زوجی آنها تهیه شده است. سپس، مقدار ضریب نهایی لایه‌ها با کمک نرم‌افزار اکسپورت چویز تهیه شده است. پس از آن، تمامی فاکتورها، کلاس‌بندی شده و با استفاده از توابع فازی، نرمال‌سازی فازی روی آنها اعمال شده است. در نهایت، همه لایه‌ها با استفاده از روش وزن‌دهی خطی (WLC) با هم ادغام شده‌اند و نقشه نهایی تهیه شده است. برای تعیین میزان همبستگی لایه‌ها با استفاده از نقاط تصادفی، میزان ضریب همبستگی فاکتورها محاسبه شده است. نتیجه به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر نشان می‌دهد در حوضه آبریز سنقر، حدود ۲۶ درصد از منطقه در معرض حساسیت سیل زیاد و خیلی زیاد و ۵۹ درصد آن در معرض حساسیت سیلاب کم و خیلی کم قرار دارد. از میان عوامل ژئومورفولوژیک مؤثر بر سیلاب، سه عامل ارتفاع، شیب و تراکم شبکه زهکشی و بارش تأثیر عمده‌ای بر حساسیت سیلاب حوضه آبریز سنقر دارند. در مقابل، چهار فاکتور فاصله از شبکه زهکشی، تجمع جریان، شاخص قدرت رود و انحنا توپوگرافی تأثیر کمتری بر نقشه حساسیت سیلاب حوضه آبریز سنقر دارند.

کلیدواژگان: حساسیت سیلاب، حوضه آبریز سنقر، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، GIS.

مقدمه

اغلب سیستم‌های رودخانه‌ای تحت تأثیر متغیرهای خارجی مانند تغییرات زمین‌شناسی و اقلیمی دچار آشفتگی می‌شوند. این آشفتگی مانند یک سیل فصلی می‌تواند پدیده‌های دوره‌ای با وقوع کم، شدت زیاد و کوتاه‌مدت باشد و اثر موضعی بر رودخانه بر جای بگذارد [۱]. سیل در میان انواع مختلف مخاطرات، رایج‌ترین مخاطره طبیعی در جهان است که هر ساله بسیاری از مردم جهان را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد [۲ و ۳]. سیل‌های اتفاق افتاده در سراسر جهان سبب کشته شدن هزاران نفر و خسارت‌های اجتماعی و اقتصادی فراوانی شده‌اند. با توجه به مطالعات انجام‌شده، سالیانه حدود ۱۷۰ میلیون نفر تحت تأثیر مخاطره سیل قرار می‌گیرند و بیش از ۹۰ کشور در جهان که حدود ۸۲ درصد از جمعیت جهان را تشکیل می‌دهد، در معرض مخاطره سیل قرار دارند. با توجه به تغییرات آب‌وهوایی، تغییر الگوی بارش و افزایش سطح آب دریاها و همچنین، رشد جمعیت و توسعه شهری و سکونتگاه‌های انسانی سبب شده است سیل به عنوان مخاطره‌ای برای انسان تبدیل شود [۴ و ۵]. مداخلات انسانی در حوضه‌های آبریز مانند افزایش سکونتگاه‌های انسانی، رشد جمعیت‌ها و فعالیت‌های اقتصادی در دشت‌ها به طور درخور توجهی افزایش احتمال خطر سیلاب را افزایش داده است [۶]. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه تجزیه و تحلیل روند سری زمانی بارش و سیلاب انجام شده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد تغییرات آب‌وهوایی به عنوان محرک اصلی در رویداد بارش و سیل شناخته شده است. مطالعات مدل‌سازی آب‌وهوایی پیش‌بینی می‌کند که در بیشتر نقاط جهان در قرن ۲۱ افزایش بارش خواهیم داشت [۷ و ۸]. تغییرات آب و هوایی به شدت بر رواناب رودخانه، سرعت ذوب برف و تبخیر و تعرق تأثیر می‌گذارد [۲]. برنامه‌ریزی مبتنی بر ریسک با هدف کاهش خسارت به مردم و دارایی‌ها قبل از وقوع فاجعه انجام می‌شود و عملکرد آن در کاهش بلایای طبیعی نیازمند سطح بالایی از همکاری‌های فنی و سیاسی سایر بخش‌های اجتماعی است. برنامه‌ریزی فضایی در بیشتر کشورهای در حال توسعه به دلیل رویکرد برنامه‌ریزی سنتی به مدیریت توسعه پایدار منجر نمی‌شود [۲ و ۹]. با توجه به اینکه مخاطره سیلاب نوعی پدیده

فضایی است، تهیه نقشه‌های احتمال خطر سیلاب در حوضه‌های آبریز شهری ضروری به نظر می‌رسد. نقشه‌های احتمال خطر سیلاب ابزار مؤثری برای کاهش خسارت سیل و دستیابی به یک مدیریت پایدارند [۶ و ۱۰]. مطالعات متعددی در مورد روش‌های ارزیابی خطر سیلاب از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ انجام شده است که شامل ۴ روش اصلی می‌شود که عبارت‌اند از:

الف) روش‌های آماری: که مبتنی بر وقوع سیلاب‌های تاریخی که اتفاق افتاده هستند. ارزیابی خطر سیل مستلزم ثبت سیلاب‌های تاریخی طولانی‌مدت است و تصور می‌شود که گذشته کلیدی برای آینده است [۱۱ و ۱۲]

ب) سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور: که براساس نوعی پشتیبانی فنی به ارزیابی خطر سیلاب پرداخته است. این روش را نخستین بار مجیا ناوارو و همکاران (۱۹۹۴) با استفاده از GIS برای ارزیابی خطر سیل به کار گرفتند [۱۳]. در ادامه، شوومان و همکاران (۲۰۰۰) از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای مفهومی کردن مدل‌سازی بارش رواناب استفاده کردند [۱۴]. آنها طی مطالعه‌ای بیان کردند که چگونه می‌توان توصیف‌های آماری از ویژگی‌های حوضه‌ها را برای بررسی ناهمگونی فضایی در مدل‌های مفهومی استفاده کرده و مشکلات پارامترهای مبتنی بر مدل‌ها را حل کرد.

ج) تجزیه و تحلیل مبتنی بر سناریو^۱ از طریق نوعی روش کمی به مطالعه احتمال خطر سیلاب می‌پردازد [۱۰]. آنالیز مخاطره سیلاب به وسیله مدل‌های کمی یک‌بعدی و دوبعدی شبیه‌سازی می‌شود که میزان گسترش سیلاب، عمق آب و سرعت شبیه‌سازی است [۱۵ و ۱۹].

د) روش‌های سیستم تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA)^۲، که مبتنی بر نوعی روش ارزیابی کیفی است که از یک شاخص برای ارزیابی استفاده می‌شود. با توجه وقوع بارش‌های شدید و تکرار وقوع سیلاب‌ها، نوعی روش برآورد احتمال خطر سیلاب مؤثر برای حوضه‌های آبریز در مقیاس بزرگ که اطلاعات هیدرومتری نداشته باشند، توسعه پیدا کرده است. روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره به عنوان ابزار پشتیبانی، تصمیم‌گیری از مسائل

همدان و از غرب به کرمانشاه محدود می‌شود. ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا ۲۱۱۰ متر، حداکثر ارتفاع منطقه ۳۴۰۹ و حداقل ارتفاع آن، ۱۶۲۴ متر است. رودخانه جامیشان به عنوان رودخانه اصلی این حوضه از غرب محدوده می‌گذرد و از کوه‌های اطراف سنقر و سراب سنقرچای سرچشمه می‌گیرد، در دشت دینور به رودخانه دینور پیوسته و در بیستون به گاماسیاب می‌پیوندد و در منطقه فرامان با پیوستن قره سو، سیمه را به وجود می‌آورد. از لحاظ ژئومورفولوژی منطقه شامل دو واحد بزرگ ناهمواری است که در جنوب شرق کوه دالاخانی و در شمال مادیان کوه و دشت آبرفتی سنقر تشکیل شده است. بلندترین ارتفاع آن، کوه دالاخانی، ۳۴۰۹ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. روند ناهمواری‌ها در ناحیه سنقر غرب به شمال غرب و شرق به جنوب شرقی است. براساس تقسیم‌های آقناباتی، محدوده مطالعه‌شده در زون سنندج سیرجان واقع شده است. سنگ‌های منطقه شامل آهک (۲۵ درصد)، انواع شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرا (۱۹ درصد) و رسوبات آبرفتی (۵۵ درصد) می‌شود. متوسط بارش سالیانه منطقه یادشده در یک دوره آماری ۲۵ ساله، ۴۱۹/۵ میلی‌متر؛ متوسط دما، ۱۴ درجه سانتی‌گراد؛ کمترین متوسط دما در دی‌ماه، به میزان ۶- درجه سانتی‌گراد و بیشترین مقدار متوسط دما در تیرماه، به میزان ۲۸ درجه است. اقلیم منطقه در اقلیم‌نمای آمبرژه نیمه‌خشک سرد است (شکل و جدول ۱). حوضه آبریز سنقر با داشتن ۴۷ روستا و ۲۵۵۵۴ خانوار، جمعیتی حدود ۸۱۶۶۱ نفر دارد. شهر سنقر به عنوان مرکز این بخش قرار گرفته است که از این تعداد، ۴۵۳۰۴ نفر ساکن در شهر و ۳۶۳۵۷ ساکن در روستاها هستند [۲۵]. اقتصاد منطقه به‌جز مناطق شهری، مبتنی بر کشاورزی و دامپروری است. نظام‌های بهره‌برداری در رابطه با کشاورزی و دامداری در منطقه مطالعاتی به صورت سنتی است. روستاهای منطقه ساختاری دهقانی- شبانی دارند که در این ساخت، اساس اقتصاد جامعه کشاورزی و دامپروری را تشکیل می‌دهد.

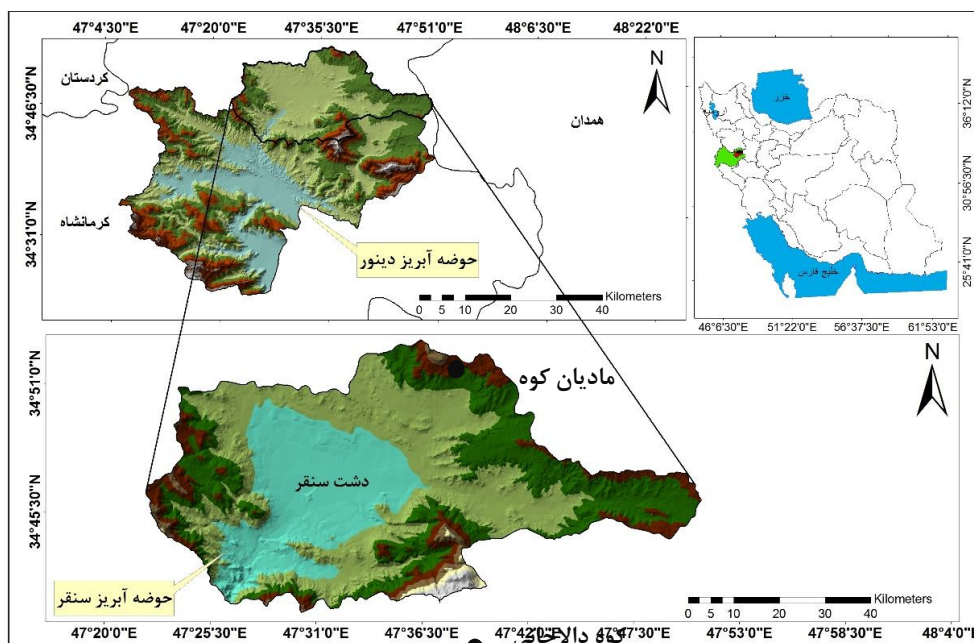
را به صورت ترکیبی از جنبه‌های فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی تحت پوشش قرار می‌دهند [۹]. این روش (MCDA)، نخستین‌بار توسط ووگ (۱۹۸۳) ارائه شد [۲۰]. پس از آن، در دهه ۱۹۶۰ روش‌های متعدد دیگری برای بررسی روش سیستم تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) پیشنهاد شد. روش جدید (MCDA) اغلب با فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی^۱ (AHP) و تکنیک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای ارتقا دادن به این رویکرد ترکیب شده است [۱۰ و ۲۱]. روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در سال ۱۹۸۰ به وسیله ساعتی پیشنهاد شد. در روش یادشده معیارها در یک چهارچوب سلسله‌مراتبی قرار می‌گیرند که با تلفیق و رتبه‌بندی و وزن‌دهی به لایه‌ها که به دانش کارشناس بستگی دارد، نقشه‌های احتمال خطر سیلاب تهیه می‌شود. این روش به دلیل سادگی در اجرا و با حداقل داده‌های در دسترس به طور گسترده در حوضه‌های آبریز در مقیاس بزرگ استفاده می‌شود [۲ و ۲۲-۲۴].

محدوده مطالعه‌شده در پژوهش حاضر، حوضه آبریز سنقر است. این حوضه بخشی از حوضه آبریز دینور است. با توجه به وضعیت اقلیمی (میانگین بارندگی ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر) و حداکثر دبی روزانه رودخانه جامیشان (۵۰ مترمکعب بر ثانیه) و شرایط سنگ‌شناسی منطقه، یکی از مناطق مستعد و در معرض سیل است. برای بررسی محدوده یادشده، با توجه به اطلاعات در دسترس برای مدیریت سیلاب حوضه و برای مقابله با آن در تصمیم‌گیری، از نوعی تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده می‌شود.

مواد و روش

منطقه پژوهش

محدوده مطالعه‌شده پژوهش حاضر، حوضه آبریز سنقر یکی از زیرحوضه‌های آبریز دینور است. این حوضه با مساحتی حدود ۵۴۰ کیلومترمربع در مختصات ۳۴° و ۴۰° تا ۳۴° و ۵۲° عرض شمالی و ۴۷° و ۲۳° تا ۴۷° و ۵۰° طول شرقی در شهرستان سنقر در استان کرمانشاه قرار دارد. این حوضه در قسمت شمال به کردستان، از شرق به



شکل ۱. نقشه موقعیت حوضه آبریز سنقر در استان و کشور

جدول ۱. مساحت، محیط و طول حوضه به تفکیک زیرحوضه‌های حوضه آبریز سنقر

Hectares	طول حوضه (km)	محیط (km)	مساحت km ²	محدوده حوضه	واحد هیدرولوژیک حوضه آبریز سنقر
۵۲۹۹۱	۵۱	۱۳۲	۵۴۰	حوضه آبریز سنقر (زیرحوضه، حوضه آبریز دینور)	حوضه سنقر

طبقات ارتفاعی منطقه مطالعه شده ۲۰۰۰ تا ۲۲۰۰ متر است (شکل ۲).

۲. شیب

در ارزیابی هیدرولوژیکی، شیب یک منطقه کارکرد زیادی در تنظیم دبی دارد [۲۷]. علاوه بر این، شیب تا حدی زیادی میزان فرایند نفوذ را کنترل می‌کند. سرعت رواناب سطحی با افزایش میزان شیب به مقدار درخور توجهی افزایش می‌یابد. در نتیجه، میزان نفوذ کاهش می‌یابد و با کاهش ناگهانی نفوذ، منطقه بیشترین میزان احتمال وقوع سیل را دارد [۲۴ و ۲۶]. نقشه شیب منطقه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع موجود و نرم‌افزار Arc GIS تهیه شده است. شکل ۲ طبقات کلاس شیب در حوضه سنقر را نشان می‌دهد؛ متوسط شیب منطقه ۱ تا ۶ درجه است.

۳. فاصله از شبکه زهکشی

مخاطره سیلاب به توزیع شبکه زهکشی در یک حوضه مرتبط است. هنگامی که سیلاب اتفاق می‌افتد، مناطق نزدیک رودخانه به آسانی تحت تأثیر مخاطره سیلاب قرار می‌گیرند. هرچه منطقه به رودخانه نزدیک‌تر باشد، از نظر

روش پژوهش

آماده‌سازی معیارها

در مطالعه حاضر به منظور تهیه نقشه حساسیت سیل حوضه آبریز سنقر، از ۱۲ لایه متعدد استفاده شده است. همه لایه‌ها به قدرت تفکیک ۱۰ متر تبدیل شده‌اند و لایه‌ها با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، وزن‌دهی شده و سپس، با هم تلفیق شده‌اند. در نهایت، نقشه حساسیت سیل برای حوضه آبریز سنقر تهیه شده است. روش تهیه هر لایه و ارتباط آنها با حساسیت به سیل در زیر بیان شده است.

۱. ارتفاع

ارتفاع حوضه نسبت به سطح دریا نشان‌دهنده موقعیت اقلیمی آن حوضه است. در حوضه‌های مناطق مرتفع نه تنها بارندگی بیش از حوضه‌های پست است، بلکه در قله‌های ارتفاعات غالباً نزولات جوی به صورت برف است که تأثیر زیادی بر تولید رواناب مستقیم دارد [۲۶ و ۲۷]. نقشه طبقات ارتفاعی حوضه آبریز سنقر با کمک مدل رقومی ارتفاع (DEM) از نقشه توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ با قدرت تفکیک ۵ متر تهیه شده است. متوسط

۶. انباشت جریان^۲

در ارزیابی خطر سیل، انباشت جریان کارکرد بسیار مهمی دارد. مقادیر زیاد تجمع جریان بیانگر مقدار زیاد رواناب و در نتیجه، احتمال خطر زیاد سیلاب است. انباشت جریان به وسیلهٔ تجمع محاسبهٔ شماری از پیکسل‌ها در لایهٔ رستری (گریدها) که به‌طبع به سمت خروجی حوضه تشکیل شده است، محاسبه می‌شود [۳۱]. در پژوهش حاضر، تجمع جریان از مدل رقومی ارتفاعی منطقه در ArcGIS با استفاده از دستور تجمع جریان پس از محاسبهٔ جهت جریان ایجاد شده است (شکل ۲).

۷. نقشهٔ هم‌بارش

احتمال خطر سیلاب به‌طور گسترده‌ای با تغییرات آب‌وهوایی در جهان مرتبط است. تغییرات جهانی آب‌وهوایی و متغیرهای اقلیمی محلی به شیوه‌های مختلف همراه با رطوبت خاک و ذخیرهٔ برف روی سیلاب تأثیر می‌گذارند. به‌طور کلی، یک اتمسفر گرم می‌تواند بخار آب بیشتری را در خود نگه دارد، که ممکن است سبب افزایش بارندگی شدید و در نتیجه، سیل شود. بارندگی شدیدتر به معنای احتمال بیشتر سیل است [۲۰ و ۳۲]. نقشهٔ هم‌بارش حوضهٔ آبریز سنقر با استفاده از ۱۸ ایستگاه سینوپتیک و کلیماتولوژی در داخل و اطراف محدودهٔ مطالعه‌شده با دورهٔ آماری ۲۵ ساله از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۹ با کمک روش ترکیبی رگرسیون و (IDW) ترسیم شده و از حداکثر بارش ۲۴ ساعتهٔ سالیانه استفاده شده است (شکل ۲).

۸. کاربری اراضی

تکرار وقوع سیلاب در یک ناحیه به‌شدت تحت تأثیر الگوی کاربری اراضی و تکامل زمانی آن است. کاربری اراضی یک منطقه در پاسخ‌های هیدرولوژیک آن منطقه اهمیت دارد. همچنین، تغییرات در کاربری اراضی می‌تواند احتمال بروز سیل یک منطقه را تسریع کند [۲ و ۳۴]. نقشهٔ کاربری منطقه با کمک تصاویر ماهواره‌ای در محیط گوگل ارث و بررسی‌های میدانی تهیه شده است. در منطقهٔ مطالعه‌شده ۶ نوع کاربری اصلی استخراج شده که اغلب کشاورزی آبی و دیم، باغ و مرتع بوده است. با توجه به تأثیری که هر نوع کاربری بر حرکت رواناب داشته، تأثیر آن در مدل اعمال شده است (شکل ۲).

سیل آسیب‌پذیرتر است [۲۴]. بسیاری از محققان [۱۷] در خصوص فاصله از رودخانه، گفته‌اند که مناطقی که کمتر از ۱۰۰ متر از رودخانه فاصله دارند، مستعد سیلاب هستند و مناطقی که فاصلهٔ بیش از ۲ هزار متر با رودخانه دارند، پتانسیل احتمال خطر سیلاب کمتری دارند. لایهٔ شبکهٔ زهکشی از نقشهٔ توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری استخراج شده است. در محیط GIS با استفاده از دستور فاصلهٔ متوالی^۱، لایهٔ فاصله از رودخانه تهیه شده است. سپس، مناطق ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ کیلومتر فاصله از شبکهٔ زهکشی به عنوان مناطق با احتمال خطر خیلی زیاد، زیاد، متوسط و احتمال خطر کم تقسیم‌بندی شده‌اند (شکل ۲).

۴. ژئومورفولوژی

ژئومورفولوژی عامل مهمی در ارزیابی سیل به‌شمار می‌رود. از نظر ژئومورفولوژی مناطق واقع در قسمت‌های پست دشت سیلابی نسبت به تپه‌ها پتانسیل خطر سیلاب بیشتری دارند [۲ و ۲۸]. نقشهٔ ژئومورفولوژی منطقه با کمک تصاویر گوگل ارث در محیط GIS ترسیم شده و سه واحد اصلی ژئومورفولوژی در منطقه شناسایی شده است (شکل ۲). واحد کوهستان: کوه‌های میان‌کوه (مادیان کوه) در شمال حوضه و کوه دالاخانی واقع در جنوب شرقی شهرستان سنقر، بلندترین ارتفاع حوضه را تشکیل داده‌اند. واحد تپه: اختلاف ارتفاع نسبی کمتر از ۱۰۰ متر را گویند. واحد دشت: سنقر از رسوبات منفصلی با شیب کمتر از ۸ درصد تشکیل شده است.

۵. تراکم شبکهٔ زهکشی

میزان تراکم آبراهه در کل حوضه بیانگر شدت و ضعف مقاومت سطح و لایهٔ زیرین خاک در مقابل عمل فرسایش و همچنین، وضعیت زمان تمرکز و زهکشی حوضه و میزان رواناب سطحی است [۲۷]. علاوه بر آن، بسیاری از محققان در تحقیقاتشان نشان داده‌اند که میزان رواناب سطحی در مناطقی که تراکم زهکشی زیادی داشته است، در مقایسه با نواحی‌ای که میزان تراکم زهکشی کمی دارند، بیشتر بوده است. میزان تراکم زهکشی در هر حوضه، شاخصی برای تعیین میزان رواناب است [۲۹ و ۳۰]. نقشهٔ شبکهٔ آبراهه از نقشهٔ ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری استخراج شده و شاخص تراکم شبکهٔ زهکشی از طریق دستور line density در محیط GIS محاسبه شده است (شکل ۲).

2. Flow Accumulation

1. Euclidean Distance

۹. زمین‌شناسی

زمین‌شناسی در یک ناحیه می‌تواند اطلاعات درخور توجهی از وقوع سیل‌های تاریخی در گذشته به ما بدهد. در واقع، بین میزان نفوذپذیری یک سازند و میزان رواناب ارتباطی قوی وجود دارد. سازندهای نفوذپذیر با نفوذ آب، جریان به نفع آب‌های زیرزمینی خواهد بود و به عکس، سنگ‌های نفوذناپذیر سبب افزایش رواناب سطحی می‌شوند [۲ و ۳۳]. به این منظور، برای مطالعه ساختار زمین‌شناسی منطقه مطالعه‌شده نقشه زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی شیت سنقر و میان‌راهان استفاده شد. منطقه مطالعه‌شده پژوهش پیش رو، در زون سنندج سیرجان واقع شده است. در قسمت شمال، شرق و جنوب شرق منطقه سازندها شامل سنگ آهک‌های سازند قم و سنگ آهک‌های ژوراسیک می‌شوند که مقاومت زیادی دارند و با توجه به مقاومت زیاد و شیب زیاد، میزان نفوذپذیری ضعیف‌تر داشته و توانایی تشکیل رواناب سطحی بیشتری دارند. سازندهای مخروطه‌افکنه‌های قدیمی و نهشته‌های آبرفتی جدید که از کنگلومرای سست با سیمان ناچیز به وجود آمده‌اند، اغلب در مرکز و غرب محدوده تشکیل شده‌اند، شیب ملایمی دارند و از رسوبات منفصل تشکیل شده‌اند. همچنین، به دلیل وجود لایه خاک کشاورزی که روی آنها تشکیل می‌شود، نفوذپذیری خیلی زیادی دارند (نقشه سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۸۸) (شکل ۲).

۱۰. شاخص قدرت رود (SPI)

شاخص قدرت رود را می‌توان به عنوان عملکرد درخور توجهی از فرسایش کانال و انتقال رسوب کانال توصیف کرد [۲]. همچنین، محققان بیان داشته‌اند که قدرت جریان زیاد در کانال‌های محدود منجر به تحول کانال‌های رودخانه می‌شود [۳۴]. موری و همکاران (۱۹۹۱) شاخص قدرت رود را بر اساس رابطه ۱ محاسبه کرده‌اند [۳۵].

$$SPI = As \tan \beta \quad (1)$$

مساحت حوضه آبریز As

شیب حوضه آبریز $\tan \beta$

که در پژوهش حاضر شاخص قدرت رود با استفاده از نرم‌افزار SAGA از مدل رقمی ارتفاعی منطقه محاسبه شده است (شکل ۲).

۱۱. شاخص رطوبت توپوگرافی^۲ (TWI)

شاخص رطوبت توپوگرافی، بازنمایی فیزیکی از مناطق به زیر آب رفته بر اثر سیل است که مؤلفه مهمی در مطالعات رودخانه است. شاخص رطوبت توپوگرافی یک حوضه آبریز دو نوع اندازه‌گیری مانند موقعیت زمین‌های مسطح و هیدروگراف شبکه آبراهه را نشان می‌دهد. این شاخص برای توصیف الگوهای رطوبت خاک و فرسایش استفاده می‌شود. بین ژئومورفولوژی و شاخص رطوبت توپوگرافی یک منطقه، رابطه‌ای قوی وجود دارد. مقادیر شاخص رطوبت توپوگرافی در محیط‌های سیلابی بیشتر است [۳۴]. در مطالعه حاضر برای تهیه شاخص TWI از معادله بون و کرکبای (۱۹۷۸) استفاده شده و در نرم‌افزار SAGA محاسبه شده است (شکل و رابطه ۲) [۳۶].

$$TWI = (\alpha / \tan \beta) \quad (2)$$

A کل مساحت بالادست، L طول مؤثر خط تراز (عمود

بر جهت جریان) $\alpha = A/L$

شیب حوضه آبریز (درجه) $\tan \beta$

مقادیر زیاد در این شاخص بیانگر مناطقی است که مشارکت بیشتری در هدایت رواناب به خروجی حوضه دارند. همچنین، شاخص LS نیز در محیط SAGA-GIS با استفاده از رابطه ۳ تهیه شد.

$$TWI = (\alpha / \tan \beta) \quad (3)$$

که در آن FAG شاخص جریان تجمعی^۳ بوده و عدد ۰/۱۷۴۵ برای تبدیل واحد به شیب رادیان در محیط GIS استفاده می‌شود.

۱۲. شاخص انحنای توپوگرافی^۴

انحنای توپوگرافی در میزان رواناب و روند نفوذ یک منطقه اهمیت اساسی دارد. شاخص‌های انحنای نشان‌دهنده میزان انحراف سطح از صاف بودن و یا به بیان دیگر، محدب و مقعر بودن دامنه است و مقادیر مثبت و منفی در انحنای عرضی دامنه، به ترتیب بیانگر تحدب (واگرایی جریان) و تعقر (همگرایی جریان) بوده و مقادیر مثبت و منفی در انحنای طولی دامنه، به ترتیب بیانگر تعقر (کاهش سرعت جریان) و

2. Topographic Wetness Index
3. Flow Accumulation Grid
4. Curvature

1. Stream Power Index

ب) مقایسه زوجی جایگزین‌ها و معیارهای تحقیق؛ (د) عملیات محاسبه داده‌ها؛ (و) تعیین میزان ناسازگاری [۳۷].

الف) تشریح و ترسیم درخت سلسله‌مراتبی: اولین قدم در تحلیل سلسله‌مراتبی، ایجاد یک نمایش گرافیکی از مسئله است که در آن هدف، معیارها و گزینه‌ها نشان داده می‌شوند. در این روند، در سطح نخست هدف قرار گرفته است، در سطح دوم معیارهای تصمیم‌گیری و در سطح سوم نتایج حاصل از مقایسه معیارها و در واقع، دستیابی به هدف مورد نظر هستند؛

ب) مقایسه زوجی جایگزین‌ها و معیارهای تحقیق: با استفاده از مقیاس نسبی و مقایسه دوبه‌دویی می‌توان به وزن‌دهی عناصر کیفی پرداخت و معیارها و زیرمعیارهای هر سطح را به مقادیر کمی تبدیل کرد که این روش برای هر عنصر و سطح در جهت رو به پایین تکرار می‌شود (جدول ۲). بر این اساس، تمامی معیارهای هیدروژئومورفیک در یک مقایسه زوجی قرار گرفته‌اند (جدول ۳) [۳۷].

تحدب دامنه (افزایش سرعت جریان) هستند. بسیاری از محققان پیش‌بینی کرده‌اند که میزان انحنای بین ۰/۱ تا ۰/۲ احتمال خطر سیلاب بیشتر است. انحنای برای نشان دادن میزان سرعت و ناهمگونی‌های جریان به کار می‌رود، زیرا توپوگرافی، فرم بستر و عمق آب را پیش‌بینی می‌کند [۳۴].

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی را ساعتی (۱۹۸۰) معرفی کرد که نوعی روش تصمیم‌گیری نیمه کمی است که با استفاده از وزن‌ها و از طریق یک مقایسه زوجی بین شاخص‌های مختلف انجام می‌شود. تنها ضعف روش AHP این است که رتبه‌بندی عوامل با توجه به دانش، تخصص و تجربه موجود کارشناسی می‌تواند از یک محقق به محقق دیگر متفاوت باشد [۲]. طبق روش AHP مقایسه شامل چند مرحله اصلی می‌شود: الف) تشریح و ترسیم درخت سلسله‌مراتبی؛

جدول ۲. مقیاس‌بندی ساعتی

مقدار	واژه‌های مقایسه‌ای	توصیف
۱	اهمیت مساوی	دو عنصر با توجه به سطح بالاتر اهمیت برابری دارند
۳	اهمیت نسبتاً بیشتر	با توجه به تجربیات و قضاوت هنگام مقایسه عناصر، ارزش نسبتاً بیشتری به یک عنصر داده می‌شود
۵	اهمیت بیشتر	با توجه به تجربیات و قضاوت هنگام مقایسه عناصر، ارزش زیادی به یک عنصر داده می‌شود
۷	خیلی مهم‌تر	در عمل غلبه یک عنصر اثبات شده است
۹	بسیار مهم‌تر	در میان عناصر بالاترین درجه به یک عنصر خاص داده می‌شود
۲، ۴، ۶ و ۸	مقادیر میانه	

زوجی است. در صورتی که نسبت سازگاری از $X > 0.10$ بیشتر باشد، ماتریس مقایسه زوجی دارای اشکال بوده است و باید مطابق با جدول ساعتی اصلاح شود (جدول ۲) [۲]. در این پژوهش نسبت سازگاری ۰/۰۷ محاسبه شده است. پس از آماده‌سازی پارامترها و محاسبه وزن نهایی آنها (جدول ۴)، تقسیم‌بندی کلاس‌های هر پارامتر، برای هر پارامتر تعیین می‌شود و هر یک از مؤلفه‌ها به ۵ کلاس طبقه‌بندی شده است که این میزان، ارزشی از ۱ تا ۵ را دارد که بستگی به اهمیت یا تأثیر هر کلاس در ارتباط با احتمال خطر سیل ارزش‌گذاری شده است (جدول ۵). در این مطالعه ۱ و ۵ به ترتیب، بیشترین و کمترین تأثیر بر سیلاب را دارند و روی تمامی فاکتورها بر اساس رابطه ۴ نرمال‌سازی فازی اعمال شده است (جدول ۴).

$$FUZZY = \frac{(max - X)}{MAX - MIN} \quad (4)$$

د) عملیات محاسبه داده‌ها: محاسبه داده‌های پروژه عملیاتی بسیار طولانی و نسبتاً پیچیده است که با کمک نرم‌افزار expert choice انجام می‌شود. این نرم‌افزار امکان طراحی نمودار سلسله‌مراتبی، تصمیم‌گیری و طراحی سؤال‌ها، تعیین ترجیحات و اولویت‌ها و محاسبه وزن نهایی، قابلیت تحلیل حساسیت تصمیم‌گیری نسبت به تغییرات در پارامترهای مسئله را دارد.

و) تعیین میزان سازگاری: تعیین میزان سازگاری فرایندی است که به وسیله آن اعتبار پرسش‌شوندگان با ماتریس‌های مقایسه‌ای سنجیده می‌شود. این فرایند معین می‌کند که پاسخ پرسش‌شوندگان به مقادیر زیرمعیارها چه اندازه اعتبار منطقی دارد. در روش AHP میزان سازگاری قابل تحمل کمتر از ۱ در نظر گرفته می‌شود. اگر نسبت سازگاری $x < 0.10$ محاسبه شود، محاسبات پذیرفته می‌شود و نشان‌دهنده دقت مناسب در ماتریس مقایسه

جدول ۳. ماتریس مقایسه زوجی و ارزش نسبی هر پارامتر

معیارها	ارتفاع	شیب	فاصله از شبکه زهکشی	ژئومورفولوژی	تراکم شبکه زهکشی	تجمع جریان	بارش	کاربری اراضی	زمین شناسی	SPI	TWI	Curvature
ارتفاع	۱	۲	۳	۴	۴	۵	۵	۶	۶	۷	۸	۸
شیب	۱/۲	۱	۲	۳	۳	۴	۴	۵	۵	۶	۷	۸
فاصله از شبکه زهکشی	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۳	۳	۴	۴	۵	۶	۶	۷
ژئومورفولوژی	۱/۴	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۳	۳	۴	۴	۵	۶	۷
تراکم شبکه زهکشی	۱/۴	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۳	۳	۴	۵	۶	۷
تجمع جریان	۱/۵	۱/۴	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
بارش	۱/۵	۱/۴	۱/۴	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۳	۵	۵	۶
کاربری اراضی	۱/۶	۱/۵	۱/۴	۱/۴	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۴	۵	۶
زمین شناسی	۱/۶	۱/۵	۱/۵	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۴	۵
SPI	۱/۷	۱/۶	۱/۶	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۴	۱/۲	۱	۲	۳
TWI	۱/۸	۱/۷	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۵	۱/۵	۱/۴	۱/۲	۱	۲
Curvature	۱/۸	۱/۸	۱/۷	۱/۷	۱/۷	۱/۷	۱/۶	۱/۶	۱/۵	۱/۳	۱/۲	۱

جدول ۴. وزن نسبی در ماتریس مقایسه زوجی استاندارد در نرم افزار expert choice

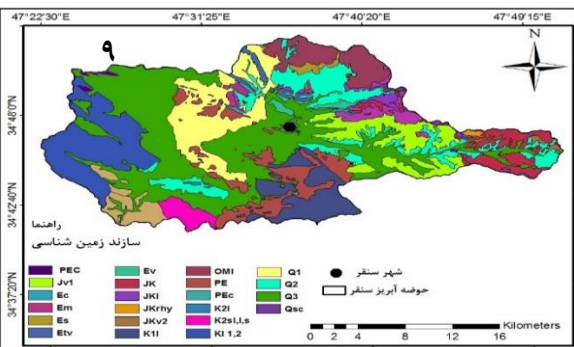
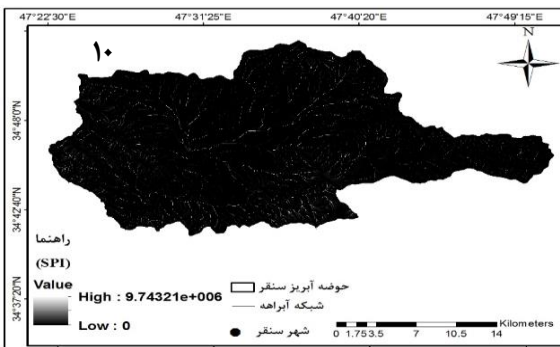
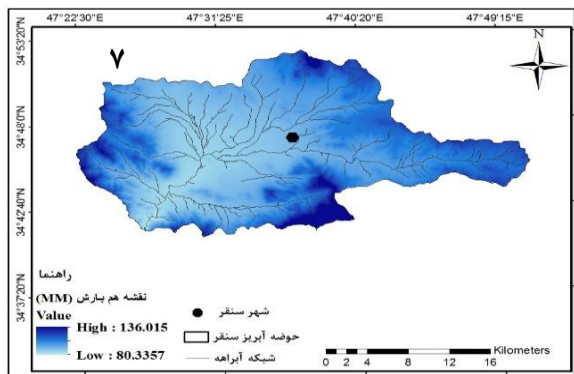
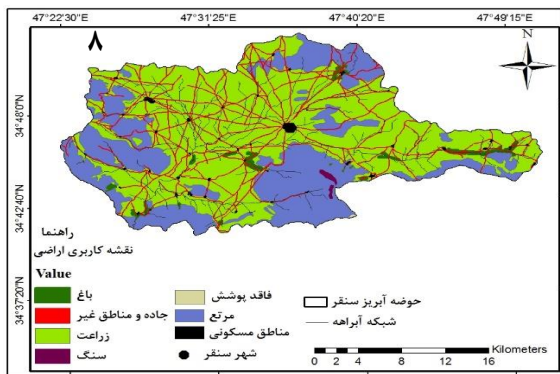
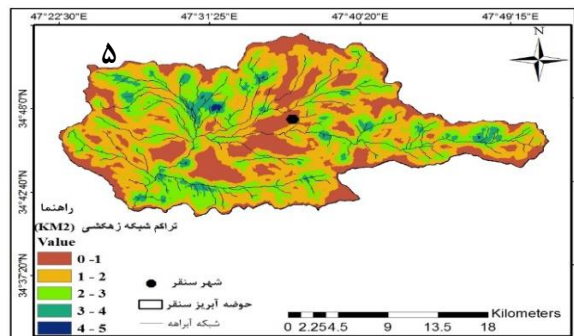
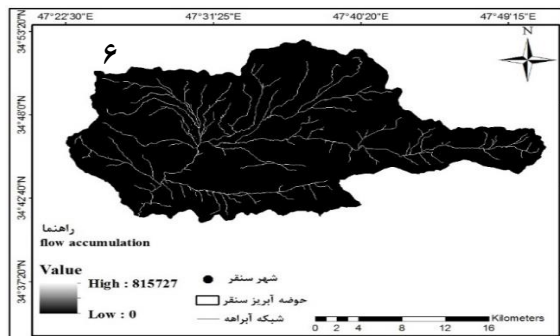
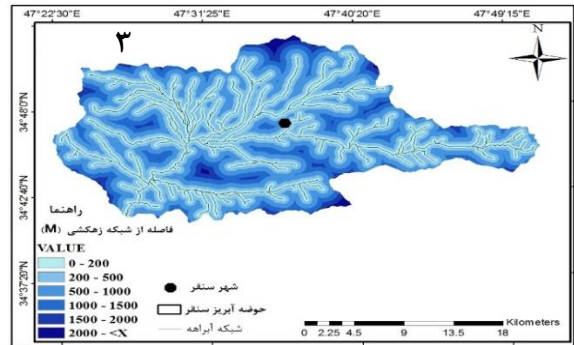
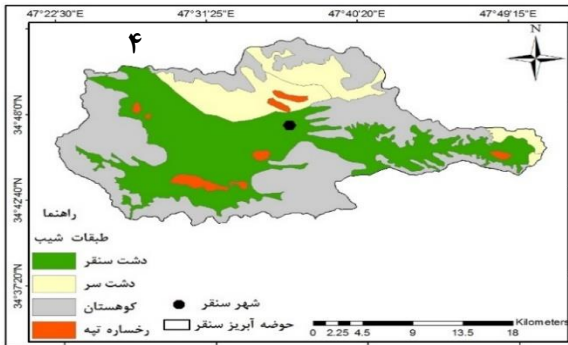
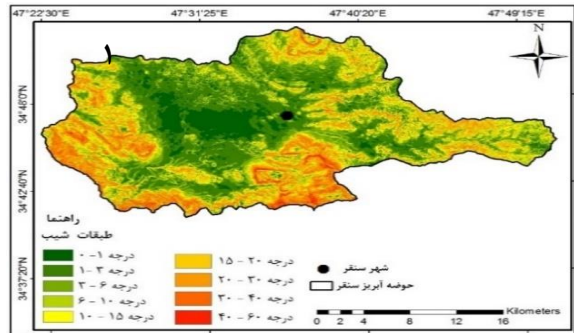
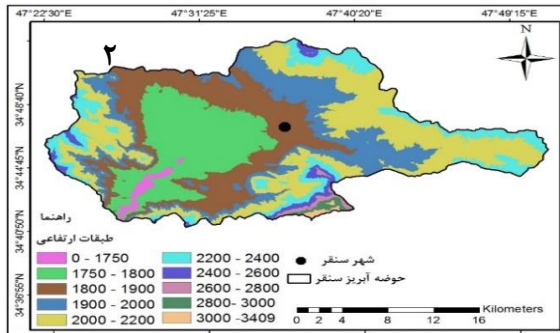
معیارها	ارتفاع	شیب	فاصله از شبکه زهکشی	ژئومورفولوژی	تراکم شبکه زهکشی	تجمع جریان	بارش	کاربری اراضی	زمین شناسی	قدرت جریان	TWI	Curvature
وزن نسبی	۰/۲۴۵	۰/۱۷۹	۰/۱۳۹	۰/۱۰۷	۰/۰۸۶	۰/۰۷۰	۰/۰۵۴	۰/۰۴۲	۰/۰۳۱	۰/۰۲۰	۰/۰۱۵	۰/۰۱۲

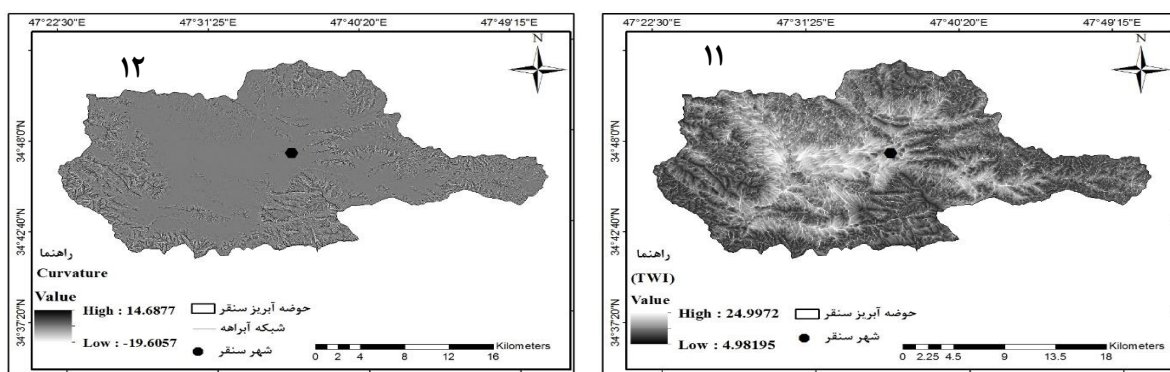
در محیط GIS با هم ضرب شده و در پایان بر اساس مجموع این وزن‌ها، نقشه نهایی تهیه می‌شود (رابطه ۵) [۹].

$$WLC = \sum_{i=1}^n W_i * X_{std} \quad (5)$$

که در این رابطه X_{std} معیار استاندارد شده و W_i وزن‌های به دست آمده حاصل مدل AHP برای هر معیار است.

تلفیق معیارها به روش ترکیب وزن‌دهی خطی^۱ (WLC) ترکیب وزن‌دهی خطی به میانگین وزنی تعدادی از پارامترهای انتخاب شده به وسیله کارشناس بستگی دارد. این روش که ساده‌ترین روش موجود به منظور تلفیق معیارها است و نتایج آن نیز به طور درخور توجهی بین کارشناسان می‌تواند متفاوت باشد. هر معیار با وزن محاسبه شده که از طریق مدل AHP به دست آمده است،

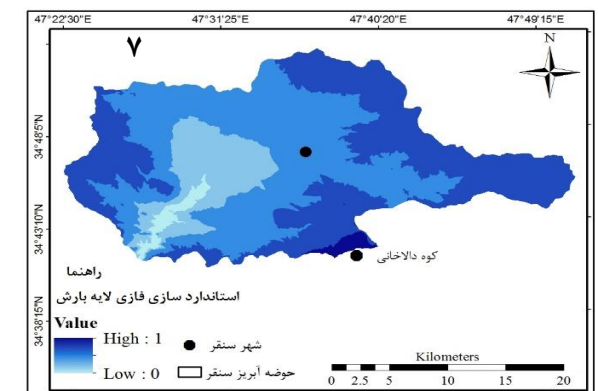
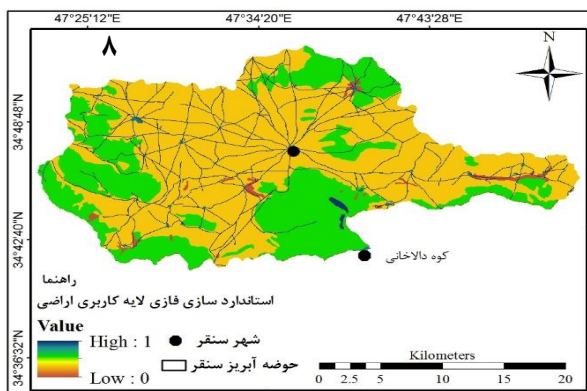
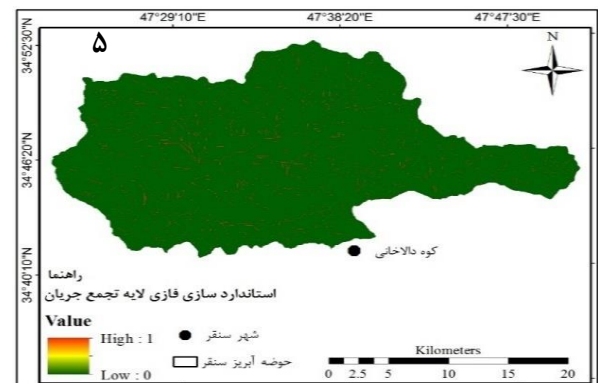
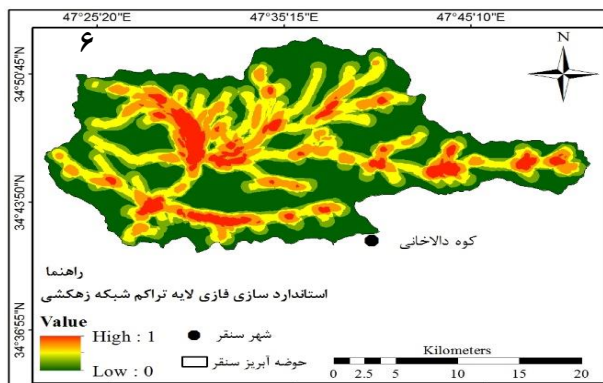
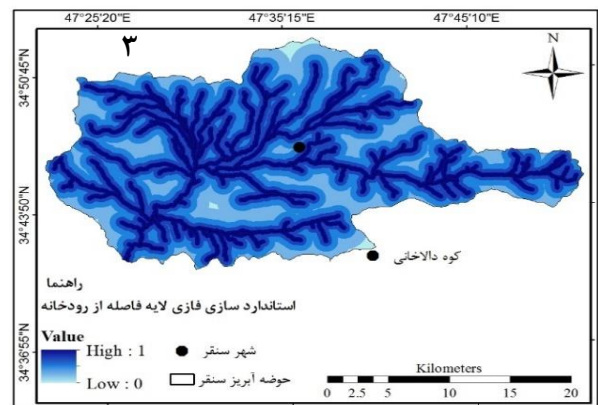
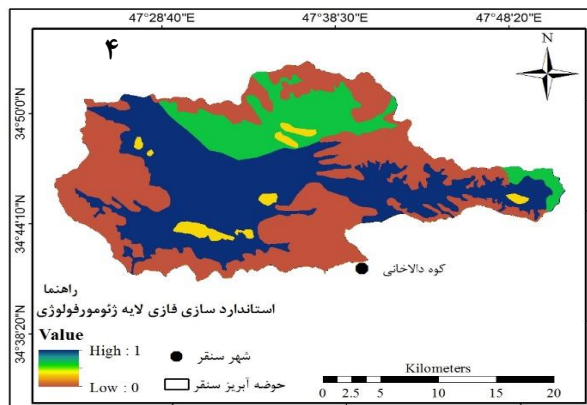
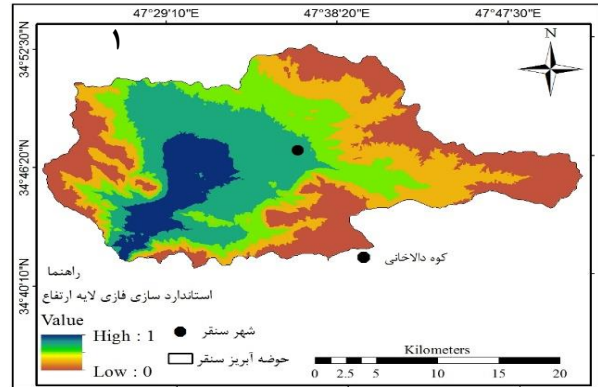
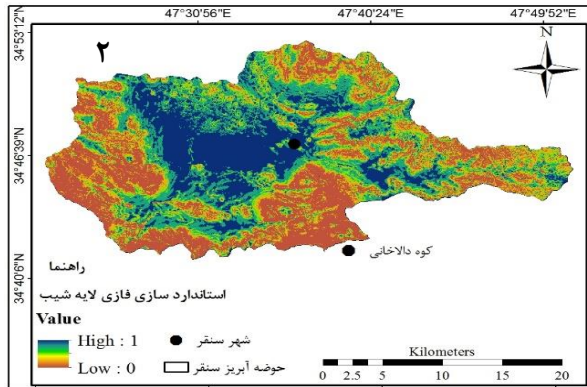


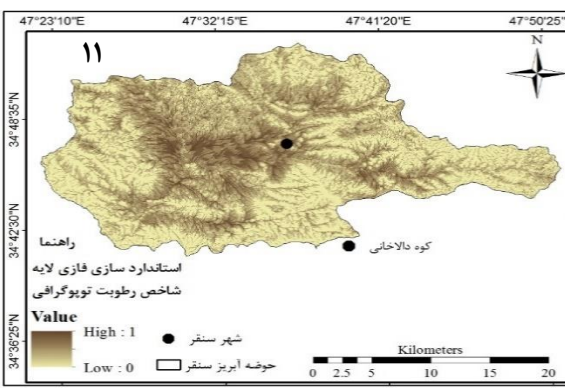
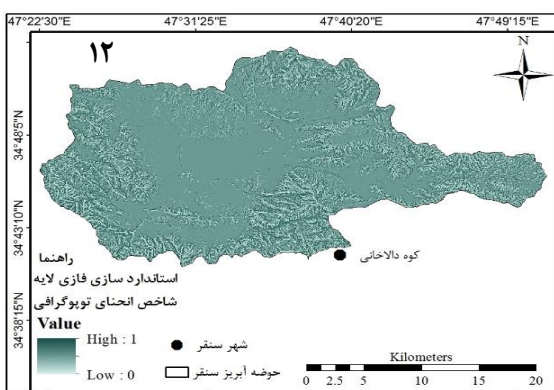
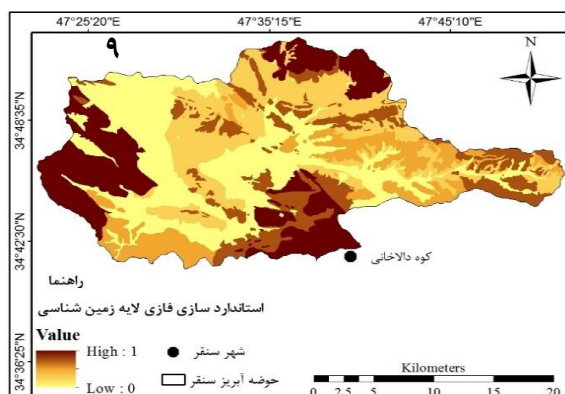
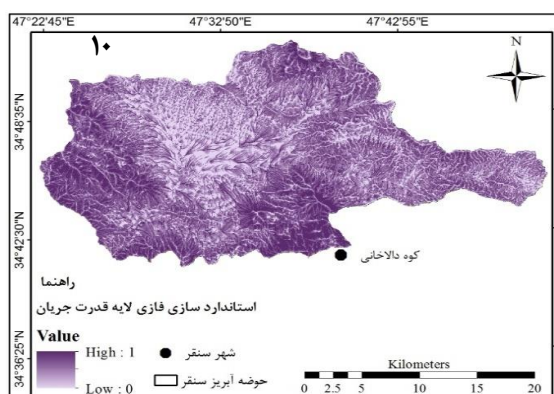


شکل ۲. نقشه فاکتورهای به کار گرفته شده در پهنه بندی حساسیت سیل: (۱) طبقات ارتفاعی، (۲) شیب، (۳) فاصله از شبکه زهکشی، (۴) ژئومورفولوژی، (۵) تراکم شبکه زهکشی، (۶) تجمع جریان، (۷) بارش، (۸) کاربری اراضی، (۹) زمین شناسی، (۱۰) قدرت جریان، (۱۱) شاخص رطوبت توپوگرافی، (۱۲) انحنا توپوگرافی

جدول ۵. کلاس بندی فاکتورهای مطالعه شده در تحلیل هیدروژئومورفولوژی حساسیت سیلاب حوضه آبریز سنقر

ردیف	فاکتور	کلاس بندی	ارزش دهی برای استاندارد سازی فازی	ردیف	فاکتور	کلاس بندی	ارزش دهی برای استاندارد سازی فازی
۱	ارتفاع	۱۷۵۰ - ۱۶۲۴	۱	۷	بارش	۸۳ - ۸۰	۵
		۱۸۵۰ - ۱۷۵۰	۲			۸۵ - ۸۳	۴
		۱۹۵۰ - ۱۸۵۰	۳			۹۲ - ۸۵	۳
		۲۱۰۰ - ۱۹۵۰	۴			۱۱۵ - ۹۲	۲
		۳۴۰۹ - ۲۱۰۰	۵			۱۳۶ - ۱۱۵	۱
۲	شیب	۲ - ۰	۱	۸	کاربری اراضی	سنگ	۱
		۵ - ۲	۲			جاده	۱
		۸ - ۵	۳			فاقد پوشش	۲
		۱۵ - ۸	۴			مناطق مسکونی	۲
		۶۰ - ۱۵	۵			مرتع	۳
۳	فاصله از شبکه زهکشی	۲۰۰ - ۰	۱	۹	زمین شناسی	آهک ضخیم لایه	۱
		۵۰۰ - ۲۰۰	۲			نهشته فلیش	۲
		۱۰۰۰ - ۵۰۰	۳			رادپولاریتی، شیل، آهک نازک	۳
		۲۰۰۰ - ۱۰۰۰	۴			مواد آبرفتی پادگانه کم ارتفاع	۴
		۲۰۰۰ < X	۵			گروه رسوبات کواترنر	۵
۴	ژئومورفولوژی	دشت	۱	۱۰	(شاخص قدرت جریان) SPI	۵۰ - ۰	۵
		دشت سر	۲			۱۱۰ - ۵۰	۴
		تپه	۳			۳۰۰ - ۱۱۰	۳
		کوهستان	۴			۱۰۰۰ - ۳۰۰	۲
			۵			۹۰۰۰۰۰ - ۱۰۰۰	۱
۵	تراکم شبکه زهکشی	۰/۴ - ۰	۱	۱۱	شاخص رطوبت توپوگرافی) TWI	۹ - ۴	۵
		۰/۸۱ - ۰/۴	۲			۱۱ - ۹	۴
		۱/۲۵ - ۰/۸۱	۳			۱۳ - ۱۱	۳
		۱/۸۰ - ۱/۲۵	۴			۱۵ - ۱۳	۲
		۳/۵ - ۱/۸۰	۵			۲۵ - ۱۵	۱
۶	تجمع جریان	۱۰۰۰ - ۰	۵	۱۲	انحنا Curvature	(-۰/۷۵) - (-۱۹)	۱
		۱۵۰۰۰ - ۱۰۰۰	۴			(-۰/۷۵) - (-۰/۱۵)	۲
		۱۰۰۰۰۰ - ۱۵۰۰۰	۳			(-۰/۱۵) - (-۰/۱۱)	۳
		۲۰۰۰۰۰ - ۱۰۰۰۰۰	۲			۰/۸۱ - ۰/۱۱	۴
		۸۰۰۰۰۰ - ۲۰۰۰۰۰	۱			۱۴ - ۰/۸۱	۵





شکل ۳. نقشه حاصل نرمال سازی فازی: (۱) ارتفاع، (۲) شیب، (۳) فاصله از شبکه زهکشی، (۴) ژئومورفولوژی، (۵) تراکم شبکه زهکشی، (۶) تجمع جریان، (۷) بارش، (۸) کاربری اراضی، (۹) زمین شناسی، (۱۰) قدرت جریان، (۱۱) شاخص رطوبت توپوگرافی، (۱۲) انحنای توپوگرافی

بحث و نتایج

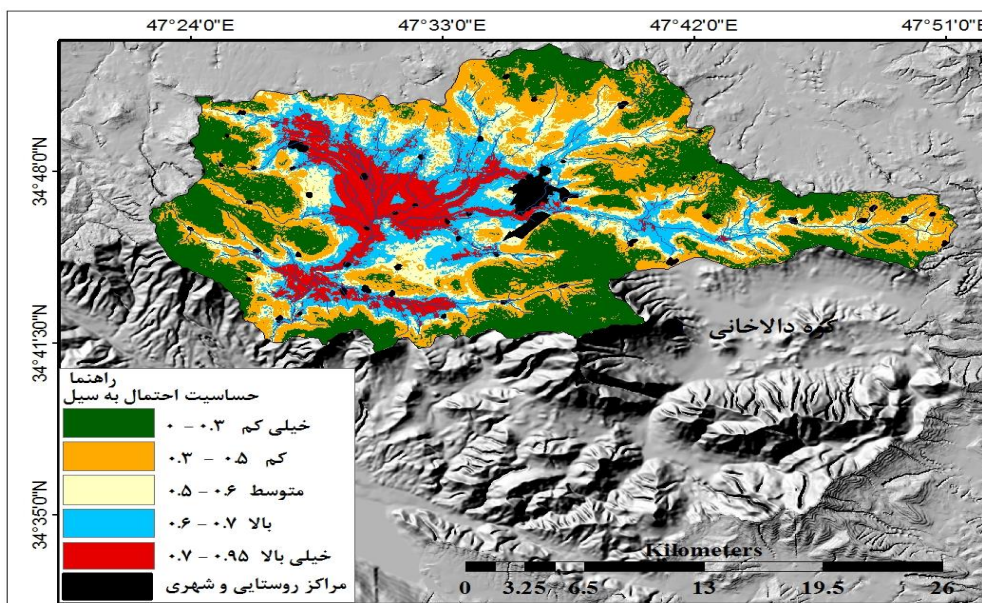
۱ و ۵ به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر بر سیلاب را دارد و تمامی فاکتورها پس از آماده سازی و استانداردسازی لایه‌ها (شکل ۳) عمل جمع فازی بر آنها اعمال شده و نقشه نهایی تهیه شده است (شکل ۴).

نقشه نهایی احتمال خطر سیلاب حوضه آبریز سنقر ارزشی بین $0/063$ تا $0/95$ به دست آمده و به ۵ کلاس تقسیم شده است. ارزش بین $0/06$ تا $0/3$ دارای حساسیت سیلاب خیلی کم است؛ $0/5$ تا $0/3$ حساسیت سیلاب کم دارد؛ $0/6$ تا $0/5$ دارای میزان آسیب پذیری متوسط است؛ $0/7$ تا $0/6$ با میزان آسیب پذیری زیاد و $0/95$ تا $0/7$ دارای میزان آسیب پذیری خیلی زیاد است (شکل ۴). محاسبات به دست آمده از نقشه نهایی نشان می دهد حدود $83/7$ و $59/5$ کیلومترمربع از حوضه آبریز سنقر به ترتیب دارای قابلیت احتمال سیلاب زیاد و خیلی زیاد است. در حالی که در سایر مناطق حساسیت سیلاب متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب 81 و $148/5$ و $166/3$ کیلومترمربع از حوضه را در بر گرفته است

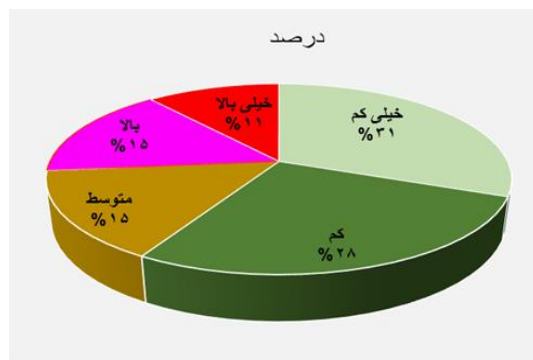
سیل از شایع ترین و ویران کننده ترین انواع مخاطره در جهان است. سیل فرایند بسیار پیچیده ای است که توسط بسیاری از عوامل محیطی کنترل می شود. عواملی مانند تغییرات آب و هوایی و دخالت های انسان از قبیل رشد جمعیت ها، توسعه شهرنشینی و صنعتی شدن حساسیت به سیل را تحت تأثیر قرار می دهد. در این پژوهش، سیلاب حوضه آبریز سنقر و تعیین وزن فاکتورها و میزان سازگاری با استفاده از مدل AHP مطالعه شده است. نقشه قابلیت احتمال سیلاب حاصل اجرای مدل AHP و با استفاده از ۱۲ فاکتور مرتبط با سیل به کار گرفته شده است. تمامی لایه های اطلاعاتی به ۵ کلاس تقسیم بندی شده اند. در تقسیم بندی مرزهای طبقاتی، استاندارد خاصی وجود ندارد و تمامی محققان بر اساس نظر کارشناسی، مرزهای طبقاتی را ایجاد می کنند و با توجه به تأثیر هر کلاس بر ارتباط با سیل ارزش ۱ تا ۵ اختصاص داده شده که ارزش

است. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر نشان می‌دهد مدل AHP توانایی خوبی در پیش‌بینی نقشه‌های احتمال خطر سیلاب دارد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش می‌تواند در آینده به برنامه‌ریزان برای مدیریت آسان سیلاب در منطقه سنقر کمک کند و علاوه بر آن، با به‌کارگیری این روش‌ها، درک جامع‌تری از سیلاب می‌توانند داشته باشند.

(جدول ۶ و شکل ۵). مناطقی که در معرض آسیب‌پذیری سیلاب خیلی زیاد قرار گرفته‌اند، عموماً ترکیبی از ویژگی‌های ارتفاع بسیار کم، درجه پایینی از شیب و مجاورت زیاد با شبکه زهکشی را نشان می‌دهند. موضوع درخور توجه دیگر اینکه حوضه آبریز سنقر که شکل دایره‌ای را نشان می‌دهد، نشان‌دهنده احتمال سیلاب بیشتر هنگام ورود به شاخه اصلی



شکل ۴. نقشه حساسیت سیلاب حوضه آبریز سنقر براساس فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و فازی



شکل ۵. توزیع منطقه حساسیت سیلاب حوضه آبریز سنقر

جدول ۶. مساحت پهنه حساسیت سیلاب حوضه آبریز سنقر

کلاس	حساسیت احتمال سیلاب	ارزش	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد
۱	خیلی کم	۰ - ۰/۳	۱۶۶/۳	۳۰/۸
۲	کم	۰/۳ - ۰/۵	۱۴۸/۵	۲۷/۵
۳	متوسط	۰/۵ - ۰/۶	۸۱	۱۵
۴	زیاد	۰/۶ - ۰/۷	۸۳/۷	۱۵/۵
۵	خیلی زیاد	۰/۷ - ۰/۹۵	۵۹/۵	۱۱



شکل ۶. ارتباط بین معیارهای سیل و نقشه حساسیت سیل، نمودارها براساس نقاط تصادفی انتخاب شده‌اند و مقادیر همبستگی بین فاکتورهای به کارگرفته شده و نقشه حساسیت به سیل ترسیم شده است

درک درست تأثیر عوامل ژئومورفولوژیک در وقوع سیلاب، داده‌های هیدرولوژی و ژئومورفولوژی استفاده شده است و نقشه حساسیت سیلاب حوضه آبریز سنقر در این پژوهش براساس فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی تهیه شده است. در مجموع، ۱۲ فاکتور شامل ارتفاع، شیب، فاصله از شبکه زهکشی، انباشت جریان، بارندگی، تراکم شبکه زهکشی، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، تجمع جریان، قدرت جریان، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحنای توپوگرافی برای تهیه نقشه حساسیت سیل حوضه آبریز سنقر به کار گرفته شده است. نتیجه به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد حوضه آبریز سنقر حدود ۲۶ درصد از منطقه در معرض حساسیت سیل زیاد و خیلی زیاد قرار دارند که ۱۷ نقطه از مراکز روستایی حوضه آبریز سنقر و همچنین، بخش جنوبی شهر سنقر در معرض حساسیت سیلاب خیلی زیاد قرار گرفته‌اند. از میان عوامل ژئومورفیک مؤثر بر سیلاب، سه عامل ارتفاع، شیب و تراکم شبکه زهکشی تأثیر عمده‌ای بر حساسیت سیلاب حوضه آبریز سنقر دارد. در مقابل، چهار فاکتور تجمع جریان، فاصله از شبکه زهکشی، شاخص قدرت رود و انحنای توپوگرافی تأثیر کمتری بر نقشه حساسیت سیلاب حوضه آبریز سنقر داشته‌اند. نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های Ogato و همکاران [۹] و Das [۲] و همچنین Xiao و همکاران [۲۴] مطابقت دارد، با توجه به اینکه محققان یادشده بر دو جنبه هیدرولوژی و ژئومورفولوژی تأکید داشته‌اند. علاوه بر آن، می‌توان بیان داشت که دقت مدل AHP برای حساسیت به سیل، درخور توجه بوده است. نقشه حساسیت سیل ارائه‌شده در این مقاله می‌تواند منبع خوبی برای مهندسان، سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان و دستگاه‌های اداری به منظور جلوگیری از بروز سیلاب در حوضه آبریز سنقر باشد.

منابع

- [1]. Hosseinzadeh MM, Esmaeli R. Fluvial geomorphology concepts, forms and processes. Puplicher Shahid Beheshti University Publication. 2015. [Persian].
- [2]. Dass S. Geospatial mapping of flood susceptibility and hydro-geomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2019; v. 14: 60-74.

با وجود تجزیه و تحلیل‌های سیستماتیک از تأثیرات هیدروژئومورفیک و تهیه نقشه‌های قابلیت احتمال سیلاب از منطقه، این روش محدودیت‌های درخور توجهی داشته است. از جمله اینکه دسترسی به داده‌های هیدرولوژیک از منطقه محدود بوده و تعداد ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی در منطقه دارای محدودیت است. علاوه بر آن، ایستگاه‌های کلیماتولوژی داده‌های دقیق و کافی نداشته‌اند و برای تهیه نقشه هم‌بارش از منطقه از ایستگاه‌های حوضه‌های مجاور حوضه آبریز سنقر استفاده شده است. ارزیابی پتانسیل سیلاب با استفاده از داده‌های دقیق تر و استفاده از روش‌های کمی نظیر استفاده از مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی و همچنین، به‌کارگیری روش‌های آماری می‌توان به تهیه نقشه‌های دقیق‌تری از سیلاب حوضه آبریز سنقر دست یافت.

برای درک بهتر رابطه بین حساسیت سیل و متغیرهای مستقل به‌کار گرفته‌شده، تعیین ضریب همبستگی آنها از طریق انتخاب نقاط تصادفی ترسیم شده است. برای تعیین ارتباط معیارهای کیفی (کاربری اراضی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی) با نقشه نهایی حساسیت سیل به صورت نمودار میله‌ای ترسیم شده است و در سایر فاکتورهایی که ویژگی کمی دارند، میزان همبستگی آنها از طریق رگرسیون بیان شده است که مقدار آن بین دو عدد +۱ و -۱ تغییر می‌کند (شکل ۶). نتایج تعیین میزان همبستگی فاکتورها با نقشه نهایی حساسیت نشان می‌دهد عامل فاصله از شبکه زهکشی، تجمع جریان، شاخص قدرت رود، انحنای توپوگرافی میزان واریانس کمی را نشان می‌دهند. این چهار عامل تأثیر کمتر و نقش کمتر در نقشه حساسیت سیل دارند. در حالی که بقیه عوامل به‌کار گرفته‌شده در روند مدل‌سازی سیل در منطقه مطالعه‌شده نقش اساسی دارند.

نتیجه‌گیری

رخداد سیل‌های بزرگ در یک منطقه، پیامدهای درخور توجهی در فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی آن منطقه دارد. برای جلوگیری از تلفات انسانی و خسارت‌های اجتماعی و اقتصادی و برای اطمینان از توسعه اقتصادی سالم و پایدار، ارزیابی حساسیت سیل اهمیت زیادی دارد. مدیریت سیل باید به‌ویژه در اقتصادهای نوظهور به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه در اولویت قرار بگیرد. برای

- [3].Termeh SVR, Kornejady A, Pourghasem HR, Keesstra, S. Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro fuzzy inference system and metaheuristic algorithms, *Science Total Environ.* 2018; V: 615, 438–451.
- [4].Falah f, Rahmati O, Rostami M, Ahmadisharaf E, Daliakopoulos I, Pourghasemi HR. Artificial neural networks for flood susceptibility mapping in data-scarce urban areas. *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*, Elsevier. 2019; pp. 323–337.
- [5].Yari a, Ardelan a, Ostadtaghizadeha A, Zarezadehc Y, Soufi Boubakranf M. Underlying factors affecting death due to flood in Iran: A qualitative content analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction.* 2019; Volume 40. 101258.
- [6].Samela C, Albano R, Sole A, Manfreda S. A GIS tool for cost-effective delineation of flood-prone areas. *Computers. Environment and Urban Systems.* 2018; Volume 70. Pages 43-52
- [7].Madsen H, Lawrence D, Lang M, Martinkova M, Kjeldsen T R. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology.* 2014 v. 519, p. 3634-3650
- [8].IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, UK, and New York, NY, USA .2012. 582 p.
- [9].Ogato G Sh, Bantider A, Abebe K, Geneletti D. Geographic information system (GIS)-Based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, West shoa zone, oromia regional State, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies.* 2020; Vol. 27, No.1.
- [10]. Lyu, H M, Shei Sh L, Zhou A, Yang j. Perspectives for flood risk assessment and management for mega-city metro system. *Tunnelling and Underground Space Technology.* 2019; 84. vol. .31- 44
- [11]. Black AR, Burns JC. Re-assessing the flood risk in Scotland. *Science of The Total Environment.* 2002; 294(1-3):169-84.
- [12]. Nott J. Extreme Events: A physical reconstruction and risk assessment. Cambridge University Press. 2006.
- [13]. Mejia-Navarro M, Wohl EE, Oaks SD. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs Colorado. *Geomorphology* 1994; v 10 (1), 331–354.
- [14]. Schumann AH, Funke R, Schultz GA. Application of a geographic information system for conceptual rainfall–runoff modeling. *Journal of Hydrolog.* 2000; 240 (1), 45–61.
- [15]. Yerramilli S. A Hybrid Approach of Integrating HEC-RAS and GIS Towards the Identification and Assessment of Flood Risk Vulnerability in the City of Jackson, MS. *American Journal of Geographic Information System* 2012; 1(1): 7-16
- [16]. Mazzoleni M, Bacchi B, Barontini S, Di Baldassarre G, Pilotti M, Ranzi R. Flooding hazard mapping in floodplain areas affected by piping breaches in the Po River, Italy. *Journal of Hydrologic Engineering.* 2014; 19:717–731.
- [17]. Samanta S, Koloa C, Kumar Pa D, Palsamanta B. Flood Risk Analysis in Lower Part of Markham River Based on Multi - criteria Decision Approach (MCDA). *Hydrology.* 2016; 3, 29
- [18]. Parhi PK. Flood Management in Mahanadi Basin using HEC-RAS and Gumbel's Extreme Value Distribution. *J. Inst. Eng. India Ser.* 2018; 99(4):751–755.
- [19]. Zelenakova M, Fijko R, Labant S, Weiss E, Markovic G, Weiss R. Flood risk modelling of the Slatvinec stream in Kruzlov village, Slovakia. *Journal of Cleaner Production.* 2019; 212.109-118.
- [20]. Voogd H. Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning. Pion London.1983. vol. 207.
- [21]. Hajkovicz S, Collins K. A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Recourse Manage.* 2007; 21 (9), 1553–1566.
- [22]. Chen YR, Yeh CH, Yu B. Integrated application of the analytic hierarchy process and the geographic information system for flood risk assessment and flood plain management in Taiwan. *Nat. Hazards.* 2011; 59:1261–1276.
- [23]. Fernández DS, Lutz MA. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Eng Geol.* 2010; 111:90–98.
- [24]. Xiao Y, Yi S, Tang Z. Integrated flood hazard assessment based on spatial ordered weighted averaging method considering spatial heterogeneity of risk preference. *Sci. Total Environ.* 2017; 599, 1034.

- [25]. the Statistics Center of Iran, 2018.[Persian].
- [26]. Pradhan B. Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression. GIS and remote sensing. J Spat. Hydrol. 2009; 9, 1–18.
- [27]. Alizadeh Amin. Principles of Applied Hydrology, Imam Reza University of mashhad, Printing Time. 2015. 40, 942p. [Persian].
- [28]. Slater LJ, Singer MB, Kirchner JW. Hydrologic versus geomorphic drivers of trends in flood hazard. Geophysical Research Letters. 2015; 42 (2014GL062482).
- [29]. Kumar PK, Gopinath G, Seralathan P. Application of remote sensing and GIS for the demarcation of groundwater potential zones of a river basin in Kerala, southwest coast of India. International Journal of Remote Sensing. 2007; 28 (24), 5583–5601.
- [30]. Rimba AB, Setiawati MD, Sambah AB, Miura F. Physical Flood Vulnerability Mapping Applying Geospatial Techniques in Okazaki City, Aichi Prefecture. Japan. Urban Science. 2017; 1 (7), 1–22.
- [31]. Papaioannou G, Vasiliades L, Loukas A. Multi-criteria analysis framework for potential flood prone areas mapping. Water recourse Manage. 2015; 29:399–418.
- [32]. Ouma YO, Tateishi R. Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. Water 6. 2014; 1515–1545.
- [33]. Kazakis N, Kougias I, Patsialis T. Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and analytical hierarchy process: application in Rhodope-Evros region, Greece. Science of The Total Environment. 2015; V,538, 555–563.
- [34]. Hong H, Panahi M, Shirzadi A Ma, Liu J, Zhu A, Chen W, & et al. Flood susceptibility assessment in Hengfeng area coupling adaptive neuro fuzzy inference system with genetic algorithm and differential evolution. Science of The Total Environment. 2017; 621, 1124–1141
- [35]. Moore ID, Grayson RB, Ladson AR. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological Process. 1991; 5, 3–30.
- [36]. Beven KJ, Kirkby MJ. 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. 1979; v. 24, p. 43-69
- [37]. Ekhtesasi M R, Sepehr A. Methods and models for assessing and preparing desertification maps. Yazd University. 2011.[Persian].
- [38]. Saaty TL. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill Book Co, New York. 1980; pp. 287.