



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر و پهنه‌بندی رخداد سیل به وسیله مدل‌های احتمالاتی و GIS در آبخیز گرگان‌رود استان گلستان

کوروش شیرانی^{۱*}، محمدعلی صدیقی^۲

۱ - دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۲ - کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی لنجان اصفهان، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

سیل و زلزله شایع‌ترین و غیرقابل پیش‌بینی‌ترین رویدادهای طبیعی هستند که با تأثیر بر جان و مال به جوامع آسیب وارد کرده و شکل زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهند. برای انجام اقدام‌های پیش‌گیرانه قبل از رخداد حادثه‌های ناهنجار و راه کارهای کاهش آثار این حادثه‌ها، هدف اصلی آگاه‌سازی عمومی با تأکید بر امر اطلاع‌رسانی مردم تغییر کرده است. هدف از این پژوهش بررسی عامل‌های شکل‌سنجی، آب‌شناسی و اقلیمی مؤثر بر رخداد سیل، مدل‌سازی و ارزیابی ظرفیت حساسیت زمین‌ها در آبخیز گرگان‌رود نسبت به رخداد سیل است. هم‌چنین، مهم‌ترین نوآوری پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با پهنه‌بندی خطر در داخل کشور، مقایسه‌ی دو روش احتمالاتی آن‌تروپی شانون و وزن شاهد بیزین به‌منظور تعیین کارآمدترین مدل و افزایش دقت نقشه‌های پیش‌بینی رخداد سیل است.

مواد و روش‌ها جمع‌آوری و آماده‌سازی نقشه‌های عامل‌های مؤثر

ابتدا منطقه‌ی پژوهش انتخاب و سپس جمع‌آوری و آماده‌سازی نقشه‌های عامل‌های مؤثر انجام شد. در این پژوهش ۱۵ عامل به‌عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند. با استفاده از اطلاعات دریافتی از سازمان نیرو و بازدیدهای میدانی به‌عنوان متغیر وابسته، نقشه‌ی پراکنش رخداد سیل تهیه شد و به دو دسته‌ی نقاط آزمایشی (۳۰٪) و آموزشی (۷۰٪) تقسیم شد. کمی‌کردن عامل‌های مؤثر با کاربرد شاخص نسبت فراوانی انجام شد و آزمون چندخطی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: K_sh424@yahoo.com

استناد: شیرانی، ک.، صدیقی، م.ع. ۱۴۰۲. اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر و پهنه‌بندی رخداد سیل به وسیله مدل‌های احتمالاتی و GIS در آبخیز گرگان‌رود استان گلستان. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۶ (۱): ۱۱۱-۱۳۱.

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2022.358648.1473

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۲، دوره‌ی ۳۶، شماره‌ی ۱، شماره‌ی پیاپی ۱۳۸، بهار ۱۴۰۲، صفحه‌های ۱۱۱ تا ۱۳۱.



© نویسندگان

ناشر: مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی علوم و فناوری

برای استقلال عامل‌های مؤثر اجرا شد. اجرای مدل‌های آنتروپی و وزن‌شاهد، تهیه‌ی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت به رخداد سیل و طبقه‌بندی آن‌ها به پنج رده‌ی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد انجام شد. ارزیابی دقت طبقه‌بندی و اعتبارسنجی نقشه‌های پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت نسبت به رخداد سیل انجام شد. اهمیت عامل‌های مؤثر تعیین و مناسب‌ترین مدل انتخاب شد.

نتایج و بحث

براساس وزن‌های محاسبه‌شده از هر دو مدل شاخص آنتروپی و وزن‌شاهد بیزین به‌ترتیب عامل‌های کاربری زمین، بلندی، شاخص پوشش گیاهی، خاک، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، تراکم شبکه‌ی زهکشی، شاخص توان آبراهه، شیب، شاخص موقعیت پستی‌بلندی، سنگ‌شناسی، میانگین بارش سالانه، ضریب نفوذ، شکل انحنای فراوانی آبراهه و بیشینه‌ی بارش روزانه در رخداد سیل مؤثر بودند. در این پژوهش عامل کاربری زمین و پوشش گیاهی به‌خاطر تغییرات کاربری زمین‌ها در رخداد سیل از اولویت بالایی برخوردار بودند. شدت بارش در رتبه‌ی آخر قرار داشت ولی اهمیت و تأثیرگذاری آن در کنار دیگر عامل‌ها را نباید نادیده گرفت. نقشه‌های تهیه‌شده از پهنه‌بندی خطر رخداد سیل با کاربرد هر دو مدل، نشان‌دهنده‌ی دقت بالای طبقه‌بندی پهنه‌ها و توزیع مناسب نقاط سیلابی در رده‌های زیاد و خیلی‌زیاد بود. همچنین براساس منحنی ویژگی عمل‌گر گیرنده و سطوح طبقه‌بندی دقت، کارآمدی هر دو مدل در طبقه‌ی خیلی‌خوب (۰/۸-۰/۹) قرار داشت. نتایج اندازه‌ی مساحت زیر منحنی (AUC) مدل آنتروپی شانون نشان‌دهنده‌ی دقت امتیاز بالاتر در هر دو وضعیت آزمایشی و آموزشی (۰/۹۴ و ۰/۹۸) نسبت به روش وزن‌شاهد بیزین (۰/۸۳ و ۰/۸۸) بود که این موضوع بیان‌گر همبستگی بالا بین نقشه‌های حساسیت و پراکنش رخداد سیل است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی رخداد سیل، از ۳۶۸ پهنه‌ی سیلابی با ۷۸۲ تکرار رخداد سیل و ۱۵ عامل مؤثر بر آن استفاده شد. با برازش هر دو مدل، عامل‌های مؤثر بر رخداد سیل اولویت‌بندی شدند. در منطقه‌ی پژوهش عامل‌های کاربری زمین، بلندی و پوشش گیاهی به‌ترتیب دارای بیشترین اهمیت و اولویت در رخداد سیل بودند و عامل‌های شکل انحنای فراوانی آبراهه و شدت بارش در رده‌های آخر قرار گرفتند. نتایج نشان داد مدل آنتروپی شانون ضمن دارابودن آستانه‌ی طبقه‌های مناسب در طبقه‌بندی و به‌کارگیری ۳۰٪ پهنه‌های رخداد سیل از اولویت بیش‌تری برای پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخداد سیل برخوردار است. اما درمجموع هر دو مدل در پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخداد سیل کارآمد و مناسب بودند.

واژگان کلیدی: پهنه‌بندی، سیل، شاخص آنتروپی شانون، گرگان‌رود، وزن‌شاهد بیزین

مقدمه

لطفی و همکاران ۲۰۱۴، صفری پور و همکاران ۲۰۱۲، ملکیان و همکاران ۲۰۱۲، غیور ۱۳۷۵). به‌منظور مدیریت هدف‌مند کاهش آثار مخرب و زیان‌های سیل، شناسایی مستعدترین مناطق در منطقه‌ی پژوهش، بسیار مهم است. ازاین‌رو پهنه‌بندی مناطق رخداد سیل، امکان انجام اقدام‌های پیش‌گیرانه و مهار سیلاب را فراهم کرده است و ضمن کاهش خطر رخداد سیل، هزینه‌های احداث سازه‌های مربوطه در مناطق غیرضروری را کاهش می‌دهد. اخیراً روش‌های شاخص آنتروپی^۱ و وزن‌دهی‌شاهد^۲ در علوم زمینی هم‌چون پهنه‌بندی زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفته‌اند

سیل و زلزله شایع‌ترین و غیرقابل پیش‌بینی‌ترین رویدادهای طبیعی هستند که با تأثیر بر جان و مال به جوامع آسیب وارد کرده و شکل زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهند (اصغری‌پور و اژدري ۲۰۱۱، کسترا ۲۰۰۷). سیلاب‌ها از جمله پدیده‌هایی هستند که همیشه احتمال رخداد آن‌ها به‌عنوان یک خطر طبیعی برای انسان‌ها وجود داشته‌است. در ایران و به‌ویژه استان گلستان و منطقه‌ی گرگان‌رود، طغیان رودخانه‌ها و بروز سیل، هر ساله زیان‌های جانی و مالی قابل ملاحظه‌ای را بر جای می‌گذارد (بیت‌الهی ۲۰۱۹، خدایاری ۲۰۱۹، جنتی ۲۰۱۹، اسدالهی‌شهیر ۲۰۱۸،

(رضوی و همکاران ۲۰۱۸؛ فرامرزی و همکاران ۲۰۱۹؛ رحمتی و همکاران ۲۰۱۶). از آن‌جاکه استان گلستان دارای سابقه‌ی رخداد سیلاب است و سالانه متحمل زیان‌های جانی و مالی است، از این‌رو برای انجام اقدام‌های پیش‌گیرانه نیازمند بررسی و اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر، تهیه‌ی نقشه‌های دقیق‌تر رخداد سیل و پیش‌بینی میزان بزرگی، دامنه و زیان‌های احتمالی است. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی عامل‌های شکل‌سنجی، آب‌شناسی و اقلیمی مؤثر بر رخداد سیل، مدل‌سازی و ارزیابی ظرفیت حساسیت زمین‌ها در آبخیز گرگان‌رود نسبت به رخداد سیل است. همچنین، مهم‌ترین نوآوری پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با پهنه‌بندی خطر در داخل کشور، مقایسه‌ی دو روش احتمالاتی آنتروپی‌شانون و وزن‌شاهد بیزی به‌منظور تعیین کارآمدترین مدل و افزایش دقت نقشه‌های پیش‌بینی رخداد سیل است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در ۶ مرحله اجرا شد (شکل ۱). در مرحله‌ی اول منطقه‌ی پژوهش انتخاب و سپس جمع‌آوری و آماده‌سازی نقشه‌های عامل‌های مؤثر انجام شد. در مرحله‌ی دوم نقشه‌ی پراکنش رخداد سیل تهیه شد. در مرحله‌ی سوم کمی‌کردن عامل‌های مؤثر با کاربرد شاخص نسبت فراوانی انجام شد و آزمون چندخطی برای استقلال عامل‌های مؤثر اجرا شد. در مرحله‌ی چهارم اجرای مدل‌های آنتروپی و وزن‌شاهد، تهیه‌ی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت به رخداد سیل و طبقه‌بندی آن‌ها به پنج رده‌ی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد انجام شد. در مرحله‌ی پنجم ارزیابی دقت طبقه‌بندی و اعتبارسنجی نقشه‌های پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت نسبت به رخداد سیل انجام شد و در مرحله‌ی ششم اهمیت عامل‌های مؤثر تعیین و مناسب‌ترین مدل انتخاب شد (شکل ۱).

(شیرانی و همکاران ۲۰۱۸). از آن‌جاکه اهمیت این روش‌ها مبتنی بر وقایع ثبت‌شده و در نظر گرفتن کلیه ویژگی‌های طبیعی و غیرطبیعی مؤثر بر رخداد پدیده‌ی مورد نظر است، بنابراین در زمینه‌ی پهنه‌بندی رخداد سیل نیز می‌توانند مفید باشند. نتایج کاربرد روش‌های آنتروپی تلفیقی و ویکور در اولویت‌بندی مناطق حساس به رخداد سیل در آبخیز شمشک نشان داد که سطح تعداد و طول رودخانه اصلی، بیشینه‌ی بارش روزانه، سطح غیرقابل نفوذ، بیشینه‌ی رواناب سالانه با دوره‌ی بازگشت ۲۵ سال مهم‌ترین عامل‌های مؤثر می‌باشند (ملکیان و آذرنبوند ۲۰۱۵). نتایج به‌کارگیری متغیرهای مهم در پهنه‌بندی رخداد و توان خطر سیل پارک ملی گلستان با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین شامل آنتروپی بیشینه، مدل جنگل تصادفی و درخت وایازی تقویت‌شده نشان داد مدل درخت وایازی تقویت‌شده و جنگل تصادفی با مقدار سطح زیر منحنی^۲ ویژگی عمل‌گر نسبی یا گیرنده^۳، ۰/۹۹ و دقت کافی آنتروپی بیشینه، ۰/۸۹ کارآمد و مناسب بودند (فرامرزی و همکاران ۲۰۱۹). نتایج بررسی ظرفیت وجود آب‌های زیرزمینی مناطق خشک بدرای عراق با استفاده از مقایسه‌ی روش‌های آنتروپی و کاتاسترف نشان داد هر دو مدل قابلیت خوبی در پیش‌بینی ظرفیت وجود آب‌های زیرزمینی دارند (ال‌ابادی و شمسودین‌شهید ۲۰۱۵). با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده روش‌های دومتغیره‌ی احتمالاتی علاوه بر سادگی دارای دقت بسیار خوبی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رخداد سیل هستند (پائول و همکاران ۲۰۱۹؛ کندلا و ارونیکا ۲۰۱۷؛ گول‌دبای و همکاران ۲۰۱۴؛ تهرانی و همکاران ۲۰۱۳؛ نقیبی و پورقاسمی ۲۰۱۵؛ آوند و مرادی ۲۰۲۱). همچنین پژوهش‌گران پرشماری دو مدل آنتروپی‌شانون و وزن‌شاهد را به‌شکل تک و یا در مقایسه با دیگر مدل‌ها مانند فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی^۵، آماری دومتغیره و چندمتغیره، ماشین‌بردار پشتیبان، شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش‌های فراابتکاری برای پهنه‌بندی سیل به‌کار گرفته‌اند و نتایج مناسبی را گزارش کرده‌اند

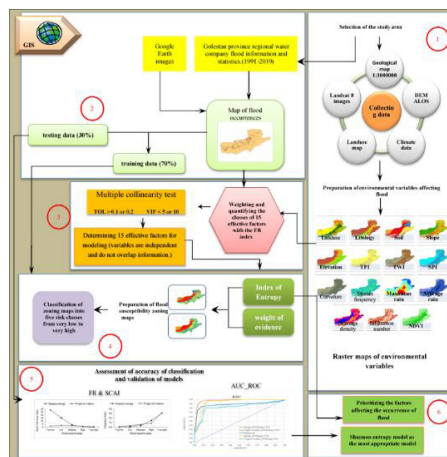
1 - Index of Entropy

2 - Weight of Evidence

3 - AUC

4 - ROC

5 - Analytical hierarchy process (AHP)



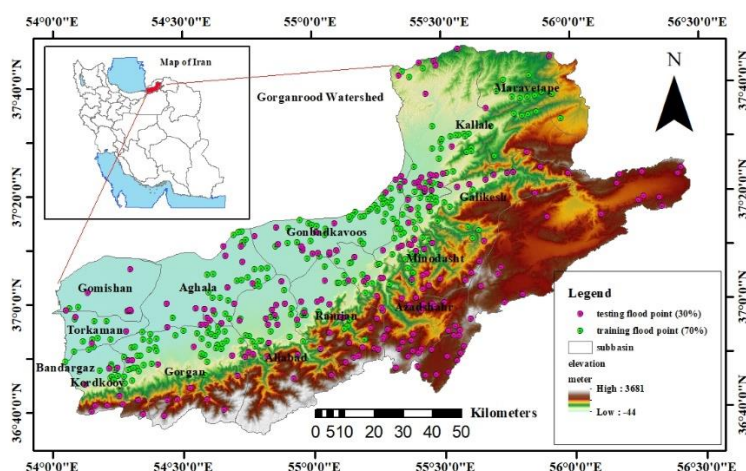
شکل ۱- نمودار گردش روش پژوهش.

Figure 1- Flowchart of the Methodology.

موقعیت جغرافیایی منطقه

منطقه‌ی پژوهش (آبخیز گرگان‌رود) در سه استان گلستان، خراسان شمالی و سمنان واقع شده‌است. آبخیز گرگان‌رود ۴۳٪ از مساحت استان گلستان را در بر می‌گیرد. به عبارت دیگر ۱۳٪ آب سطحی استان معادل ۳۲۳ میلیون مترمکعب در این آبخیز جریان دارد. مساحت این آبخیز معادل ۱۳۰۵۰ کیلومتر مربع است و در بخش جنوب‌شرقی دریای خزر قرار دارد (شکل ۲). این آبخیز در محدوده‌ی طول جغرافیایی ۵۳ درجه تا ۵۶ درجه و ۱۵ دقیقه‌ی شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶°۳۵ تا ۳۷°۴۳ شمالی واقع شده‌است. این منطقه در محدوده‌ی بلندی ۱۴- تا ۳۶۸۱ متر از سطح دریا قرار گرفته‌است که به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین بلندی آن است. سه رود مهم استان گلستان اترک، گرگان‌رود و قره‌سو هستند که گرگان‌رود و قره‌سو رودخانه‌های اصلی آبخیز گرگان‌رود و قره‌سو به‌شمار می‌روند (بردی‌شیخ و همکاران ۲۰۰۹). در آبخیز گرگان‌رود اندازه و شدت زیاد بارندگی، کوهستانی بودن و شیب زیاد سبب‌شده تا رواناب به سرعت تشکیل و در مناطق پایین‌دست وارد رودخانه‌های قره‌سو و گرگان‌رود شود و در جاهایی که پستی‌بلندی اجازه دهد سطح وسیعی را به شکل سیل در بر می‌گیرد. در آبخیز

گرگان‌رود میانگین سالانه‌ی بارش از ۳۰۰ میلی‌متر در کناره‌های جنوبی و شمالی آبخیز تا ۱۰۰۰ میلی‌متر در بخش مرکزی آن متغیر است و روند تغییرات سالانه‌ی بارندگی، شبه مدیترانه‌ای است. بیش‌ترین بارندگی در ماه‌های زمستان و کم‌ترین آن در ماه‌های تابستان مشاهده می‌شود. بخش خشک و نیمه‌خشک این آبخیز نیمه‌ی شمالی استان گلستان است که از کم‌ترین اندازه‌ی بارندگی بهره‌مند است (ایسوازی و همکاران ۲۰۱۰). در آبخیز و گرگان‌رود میانگین سالانه‌ی دما از ۱۷°C در نواحی پست تا ۷/۵°C در بلندی‌های جنوبی متغیر است (بردی‌شیخ و همکاران ۲۰۰۹). سازندهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگی آبخیز بسیار متنوع و شامل واحدهای سنگی آهک، شیل، مارن، ماسه‌سنگ می‌باشند. در آبخیز گرگان‌رود ۶ نوع کاربری اصلی شامل کشاورزی دیم و آبی، مرتع، باغ میوه، مسکونی و جنگل وجود دارد. کشاورزی، جنگل‌ها و مراتع بخش عمده‌ای از آبخیز را اشغال می‌کنند. در منطقه‌ی پژوهش انواع خاک از رده‌های آنتی سول‌ها، این‌سپتی سول‌ها، آلفی سول‌ها، آریدی سول‌ها، این‌سپتی سول‌ها، مولی سول‌ها و پهنه‌های نمکی رخنمون و گسترش دارند.



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه در ایران.
Figure 2- Geographical Location of the Study Area in Iran.

جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های مکانی

مهم‌ترین مرحله پهنه‌بندی رخداد سیل شناسایی عامل‌های مؤثر است. براساس سابقه‌ی پژوهش، منبع‌های موجود و تجربه‌های متخصصین پانزده عامل که در رخداد سیل می‌تواند مؤثر باشد، در منطقه شناسایی و نقشه‌های مربوطه در محیط نرم‌افزار ArcGIS®10.5، رقومی شد. در این پژوهش نقشه‌های پایه استفاده‌شده شامل نقشه‌های زمین‌شناسی و کاربری زمین بود. نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (برگه‌های گرگان، دوزین و گنبدکاووس از استان گلستان و کوه کورخود از استان خراسان شمالی) برای شناسایی و تشخیص عارضه‌ها و طبقه‌بندی آن‌ها استفاده شد. نقشه‌ی کاربری زمین با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ بود که پس از بررسی دقیق عارضه‌ها و جداسازی واحدهای آن، مرز بین عارضه‌ها با دقت بهتری رسم و نقشه‌ی جدید با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ باز تولید شد. هم‌چنین از تصویرهای ماهواره‌ای لندست ۸ (نوزدهم ماه آگست سال ۲۰۲۱) و نقشه‌ی خطوط هم‌باران (به‌دست آمده از آمار ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کل کشور) نیز استفاده شد. شایان ذکر است مقیاس تمامی نقشه‌ها در محیط GIS براساس کوچک مقیاس‌ترین نقشه‌ی عامل استفاده‌شده یکسان‌سازی و بهنجار شد و دقت نقشه‌های خروجی

براساس مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ تحلیل شدند. به‌منظور پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد سیل، معیارها براساس مقیاس، موقعیت منطقه‌ی پژوهش و روش پهنه‌بندی استفاده‌شده ارزیابی شدند. با استفاده از اطلاعات اداره‌ی کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان، مختصات ۳۶۸ پهنه‌ی رخداد سیل در آبخیز ثبت و وارد نرم‌افزار ArcGIS®10.5 شد و نقشه‌ی پراکنش پهنه‌های رخداد سیل از این روش تهیه شد (شکل ۲). سپس وضعیت زمین‌شناسی به‌وسیله‌ی نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه به‌خوبی بررسی شد. هم‌چنین با مطالعه و بررسی تصویرهای گوگل‌ارث و گاهی بازدیدهای میدانی، مرز واحدهای سنگی با نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه تدقیق شد. واحدهای سنگ‌شناسی پس از مشخص شدن، رقومی شده و نقشه‌ی سنگ‌شناسی^۶ در محیط نرم‌افزار ArcGIS®10.5 تهیه شد. برای تعیین محدوده‌ی آبخیز، از نقشه‌ی بلندی آبخیز و عامل‌های شکل‌سنجی آن شامل انحنای مقطع^۷، شیب^۸، تراکم شبکه زهکشی^۹، ضریب نفوذ^{۱۰}، فراوانی آبراهه^{۱۱} و طبقه‌های مربوط به آنها از مدل رقومی ارتفاع^{۱۲} سنجنده پالسار ماهواره آلوپ با دقت ۱۲/۵ متر در ۱۲/۵ متر استفاده شد. به‌منظور یکپارچه‌سازی داده‌ها برای ورود به مدل‌ها، تمامی نقشه‌ها با ابعاد پیکسل ۲۵×۲۵ مترمربع مجدد نمونه‌برداری شدند. در آبخیز

- 6 - Lithology
- 7 - Profile curvature
- 8 - Slope
- 9 - Drainage density
- 10 - Infiltration number
- 11 - Stream frequency
- 12 - Digital elevation model (DEM)

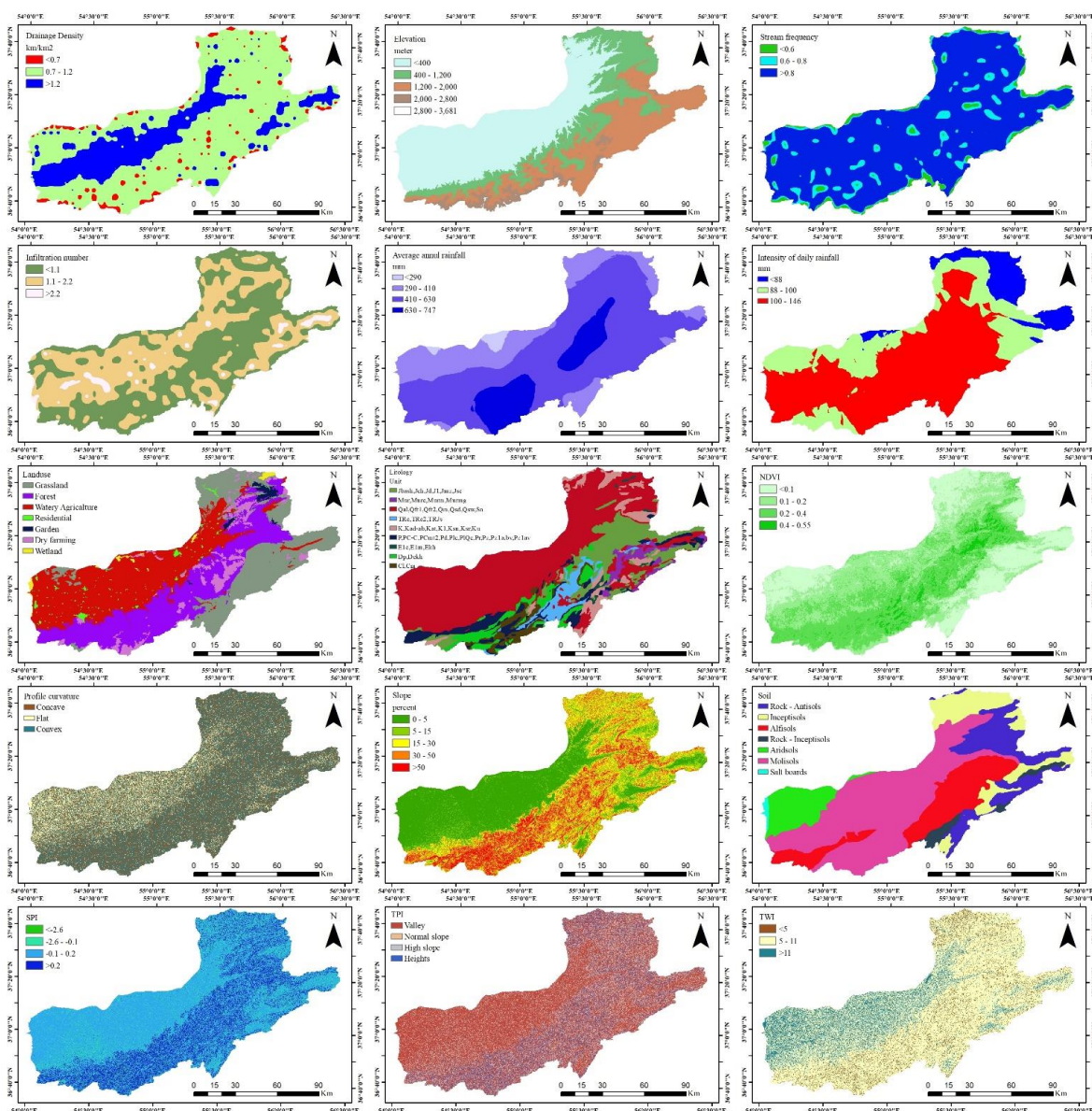
(شیرانی و همکاران ۲۰۱۸).

تهیه‌ی نقشه‌ی پراکنش پهنه‌های رخداد سیل

در این پژوهش برای استفاده از روش‌های احتمالاتی و مدل‌سازی در پهنه‌بندی حساسیت به رخداد سیل از داده‌های مکانی و نقشه‌ی پراکنش پهنه‌های رخداد سیل به‌عنوان متغیر وابسته استفاده شد. در راستای تهیه‌ی این نقشه با استفاده از اطلاعات سیل وزارت نیرو، بازدیدهای میدانی از روش ثبت محدوده‌ی داغ‌آب‌ها و آثار، ثبت مکانی پهنه‌های رخداد سیل به‌وسیله‌ی دستگاه موقعیت‌یاب جهانی^{۲۳}، تفسیر تصویرهای ماهواره‌ای در سال ۱۳۹۸، بررسی تصویرهای راداری و گوگل ارث قبل و بعد از رخداد سیل، تعداد ۳۶۸ پهنه رخداد سیل شناسایی شد و نقشه‌ی پراکنش پهنه‌های رخداد سیل در منطقه‌ی پژوهش تهیه شد (شکل ۲). پهنه‌های رخداد سیل در قالب دو دسته‌ی آموزشی و آزمایشی به‌ترتیب به‌نسبت ۷۰٪ (۲۵۸ پهنه) به‌منظور اجرا و توسعه‌ی مدل‌ها و ۳۰٪ (۱۱۰ پهنه) به‌منظور اعتبارسنجی و پیش‌بینی مدل‌ها با روش کاملاً تصادفی در محیط نرم‌افزار ArcGIS®10.5 تقسیم و انتخاب شدند (شکل ۲).

گرجان‌رود نقشه‌ی منحنی‌های هم‌باران سالانه^{۱۳} و شدت بارش ۲۴ ساعته^{۱۴} به‌وسیله‌ی آمار ۲۱ ساله‌ی ایستگاه‌های هواشناسی واقع در محدوده‌ی پژوهش (۷۷ ایستگاه باران‌سنجی، ۱۴ ایستگاه کلیماتولوژی و ۱۰ ایستگاه سینوپتیک با در نظر گرفتن دو ویژگی میانگین بارش سالانه و بیشینه‌ی بارش روزانه) و روش میان‌یابی کیریجینگ^{۱۵} در محیط نرم‌افزار ArcGIS®10.5 تهیه شد. در منطقه‌ی پژوهش نقشه‌های شاخص پوشش گیاهی^{۱۶} و کاربری زمین^{۱۷} براساس تصویرهای ماهواره‌ی لندست ۸ در محیط نرم‌افزار ENVI®4.5 اصلاح و تکمیل شدند. شاخص موقعیت پستی‌بلندی^{۱۸}، توان آبراهه^{۱۹} و رطوبت پستی‌بلندی^{۲۰} به‌وسیله‌ی مدل رقومی ارتفاع و نرم‌افزار SAGA®7.7 تهیه و استخراج شدند (شکل ۳). لازم به ذکر است وضعیت فراوانی آماری توزیع پیکسل‌ها، معیار تعیین کمی آستانه‌های طبقه‌های هر عامل در محیط ArcGIS®10.5، انتخاب شد. در حالت بهنجاربودن فراوانی پیکسل‌ها از الگوریتم طبقه‌بندی شکست‌های طبیعی^{۲۱} و در حالت ناهنجاربودن از الگوریتم فاصله‌ی هندسی^{۲۲} استفاده شد.

-
- 13 - Average annual rainfall
 - 14 - Intensity of daily rainfall
 - 15 - Krigging
 - 16 - Normalized difference vegetation index (NDVI)
 - 17 - Landuse
 - 18 - Topographic position index (TPI)
 - 19 - Stream power index (SPI)
 - 20 - Topographic Wetness Index (TWI)
 - 21 - Natural breaks
 - 22 - Geometrical interval
 - 23 - Global position system (GPS)



شکل ۳- عامل های مؤثر بر رخداد سیل.

Figure 3- Factors Affecting on the Flood Occurrence.

برای ما مشخص می کند. با توجه به شرایط منطقه معمولاً در پهنه بندی حساسیت سیلاب، عامل های مختلفی تأثیرگذار بوده و در تعیین میزان حساسیت به وسیله مدل های آماری دو متغیره و احتمالی مانند بیزین، تمامی عامل های مؤثر بر رخداد سیل وزن یکسانی دارند. از این رو چنانچه یکی از عامل ها تأثیر بیش تری داشته باشد اندازه ی اثر آن نادیده گرفته می شود (راما کریشنا ۲۰۰۵)، بنابراین نظریه ی فوق می تواند به عنوان یک رویکرد مدیریتی در شناسایی عامل های مؤثر و اندازه ی تأثیرگذاری آن ها کمک به سزایی کند (شارما ۲۰۱۰). به طور کلی

مدل آنتروپی

آنتروپی یکی از رویکردهای مدیریتی است که به منظور برخورد با بی نظمی، بی ثباتی، اغتشاش و نبود اطمینان های موجود در یک سامانه استفاده می شود (یونگ و فنگسینت ۲۰۰۹). نظریه ی مذکور اولین بار به وسیله استفان بولتزمن مطرح و نهایتاً به وسیله شانون به شکل کمی ارائه شد (شانون ۱۹۴۸). آنتروپی در حقیقت بیان گر آن است که چگونه از بین عامل های مؤثر یک هدف، می توان مهم ترین عامل ها را تخمین زد یا به عبارتی متغیرهایی که بیش ترین تأثیر را در رخداد یک شاهد بیزین دارند

به‌منظور اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر و تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی رخداد سیل به‌وسیله‌ی روش ذکرشده، از رابطه‌های یک تا پنج استفاده شد (بدناریک و همکاران ۲۰۱۰؛ کنستانتین و همکاران ۲۰۱۱؛ پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۲).

$$(P_{ij}) = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^{S_j} P_{ij}} \quad (1)$$

$$(H_j) = - \sum_{i=1}^{S_j} (P_{ij}) \log_2(P_{ij}), j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$H_{j \max} = \log_2 S_j, S_j - \text{number of classes} \quad (3)$$

$$I_j = \frac{H_{j \max} - H_j}{H_{j \max}}, I = (0,1), j = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$W_j = I_j P_{ij}$$

P_{ij} : تراکم رخداد سیل هر طبقه، (P_{ij}) : احتمال تراکم رخداد سیل هر عامل و طبقه‌های مربوط به آن، H_j و $(H_{j \max})$: اندازه‌ی آنتروپی و بیشینه‌ی آنتروپی، I_j : ضریب اطلاعات و W_j : وزن نهایی هر عامل با ضرب آن در طبقه‌های عامل ذکرشده است.

نقشه‌های وزنی با هم جمع‌شده و نقشه‌ی نهایی حساسیت به رخداد سیل به‌دست آمد. طبقه‌هایی که اندازه‌ی عددی بیش‌تری دارند، وزن بیش‌تری را در رخداد سیل به خود اختصاص دادند.

مدل وزن شاهد

در سال‌های اخیر بسیاری از پژوهش‌گران برای تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی حساسیت به رخداد سیل از روش‌های تجربی که تا حدودی براساس نظریه‌ی احتمال وابسته^{۲۴} می‌باشند، استفاده می‌کنند. در این چارچوب، احتمال وابسته، به معنای اندازه‌گیری درست یا اشتباه بودن یک فرضیه با توجه به شاهد‌های موجود است. به‌طور کلی نظریه‌ی بیزین را می‌توان به‌شکل رابطه‌ی ۶ نوشت:

$$P(A|B) = (P(B|A) \times P(A)) / P(A) \quad (6)$$

$P(A)$: احتمال رخداد پیش‌آمد A ، $P(B)$: احتمال رخداد پیش‌آمد B ، $P(B|A)$: احتمال رخداد پیش‌آمد B به‌شرطی که پیش‌آمد A اتفاق افتاده باشد و B ، $P(B|A)$: احتمال رخداد پیش‌آمد A به‌شرطی که پیش‌آمد B اتفاق افتاده باشد (ون‌وستن ۲۰۰۲).

شبکه‌های بیزین نیز به نام شبکه‌های تصمیم، شبکه‌های تصادفی و نمودارهای تأثیر نیز شناخته می‌شوند (شهابی و سدودین ۲۰۰۹). مبنای این روش محاسبه‌ی احتمالات وابسته است که در

ابتدای دهه‌ی ۱۹۹۰ به‌عنوان سامانه‌های پشتیبانی تصمیم برای پژوهش پزشکی استفاده شد. در دهه‌ی اخیر نیز در سایر علوم و به‌ویژه در پهنه‌بندی رخداد سیل و زمین‌لغزش کاربردهای زیادی داشته‌است. نظریه‌ی وزن شاهد روشی داده‌محور است که به‌عنوان یکی از مدل‌های نظریه‌ی بیزین در قالب لگاریتم خطی شناخته شده‌است (رگمی و همکاران ۲۰۱۰) و از احتمال قبلی (غیرشرطی) و خلفی (شرطی) بهره می‌گیرد (رگمی و همکاران ۲۰۱۰). زمانی از این روش استفاده می‌شود که داده‌های کافی برای برآورد اهمیت نسبی موضوع‌های مستدل از روش میانگین‌های آماری وجود داشته باشد (لی و چوی ۲۰۰۴). احتمال قبلی یا اولیه در اصل احتمال یک واقعه یا رخداد (رخداد سیل) است که به‌وسیله‌ی رخداد‌های مشابه فراوانی که در گذشته در یک دوره‌ی زمانی معین رخ داده‌اند، مشخص و تعیین می‌شود. برای مثال احتمال آبی سیل یک واحد از سطح زمین (یا پیکسل) براساس فراوانی یا تناوب رخداد سیل سطح واحد (یا پیکسل) در گذشته می‌تواند تخمین زده شود. از این‌رو ابتدا به‌وسیله‌ی رابطه‌های ۷ و ۸ وزن‌های محتمل هر عامل و طبقه‌های مربوط به آن محاسبه می‌شود.

$$W_i^+ = \log_e [P(B_i|S) / P(B_i|\bar{S})] \quad (7)$$

$$W_i^- = \log_e [P(\bar{B}_i|S) / P(\bar{B}_i|\bar{S})] \quad (8)$$

W_i^+ : وزن شاهد عامل در رخداد سیل در شرایط حضور رده‌ی عامل مؤثر (شرطی)، W_i^- : وزن شاهد عامل در رخداد سیل در شرایط حضور نداشتن رده‌ی عامل مؤثر (شرطی)، $\log_e$ لگاریتم طبیعی، P احتمال، B_i وجود (سطح) رده‌ی عامل مؤثر (شرطی) در رخداد سیل بالقوه، S : وجود (سطح) سیل، $\bar{B}_i$: وجود نداشتن (سطح) رده‌ی عامل مؤثر (شرطی) در رخداد سیل بالقوه و $\bar{S}$: وجود نداشتن (سطح) سیل است. برای درک بهتر رابطه‌های فوق و سهولت کار، به‌ویژه در محیط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی مدل براساس جدول ۱ و به‌شکل رابطه‌های ۹ و ۱۰ ارائه می‌شود (ون‌وستن ۲۰۰۲؛ یاسیل‌نیکر ۲۰۰۵). براساس رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ وزن نهایی برای هر عامل به‌منظور پهنه‌بندی رخداد سیل محاسبه شد (رمضانی و ابراهیمی ۲۰۰۹؛ رویرینگ و همکاران ۲۰۰۵).

$$W_i^+ = \log_e \left[\left(N_{pix1} / (N_{pix1} + N_{pix2}) \right) / \left(N_{pix3} / (N_{pix3} + N_{pix4}) \right) \right] \quad (9)$$

$$W_i^- = \log_e \left[\left(N_{pix2} / (N_{pix1} + N_{pix2}) \right) / \left(N_{pix4} / (N_{pix3} + N_{pix4}) \right) \right] \quad (10)$$

جدول ۱- آرایه‌ی ابهام ظرفیت رخداد سیل (ون وستن ۲۰۰۲).

Table 1- Contingency Matrix of Flood Occurrence (Van Westen 2002).

Causes of flood		
Absence	Presence	Flood
N_{pix2}	N_{pix1}	Presence
N_{pix4}	N_{pix3}	Absence

هم‌پوشانی اطلاعاتی عامل‌های مؤثر از آزمون استقلال داده‌ها، تحلیل هم‌بستگی وایازی چندمتغیره خطی و دو شاخص عامل تورم پراکنش^{۲۷} و ضریب تحمل^{۲۸}، در محیط نرم‌افزار SPSS®22 استفاده شد. چنان‌چه اندازه‌ی ضریب تحمل کم‌تر از ۰/۱ یا ۰/۲ و عامل تورم پراکنش بیش‌تر از ۵ یا ۱۰ بود آن متغیر یا آن عامل، دارای هم‌خطی یا هم‌پوشانی اطلاعاتی است و از آن عامل برای استفاده در مدل باید صرف‌نظر کرد (مگواپر ۱۹۹۵). داده‌های مکانی پراکنش پهنه‌های رخداد سیل در قالب دو دسته‌ی آموزشی و آزمایشی به‌ترتیب به‌نسبت ۷۰٪ برای اجرا و توسعه و ۳۰٪ برای اعتبارسنجی مدل‌ها به‌طورکاملاً تصادفی در محیط ArcGIS®10.5 تقسیم و انتخاب شدند. سپس متغیرها یا عامل‌های مؤثر کمی شدند، و مدل‌های آنتروپی شانون و وزن شاهد به‌وسیله‌ی ۱۵ عامل مؤثر و ۷۰٪ داده‌های نقشه‌ی پراکنش رخداد سیل اجرا شدند. سرانجام نقشه‌ی پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد سیل تهیه شد. نقشه‌ی نهایی حساسیت به رخداد سیل (Yioe) به‌وسیله‌ی مدل آنتروپی شانون از مجموع حاصل ضرب وزن هر ویژگی^{P_{ij}} در خود ویژگی^{W_j} با استفاده از رابطه‌ی ۱۳ تهیه شد. در این رابطه i تا n همان ویژگی‌ها یا عامل‌های مؤثر در رخداد سیل است.

$$Y_{ioe} = \sum_{i=1}^n W_{ij} \times P_{ij} \quad (13)$$

همچنین نقشه‌ی نهایی حساسیت به رخداد سیل (Ywoe) به‌وسیله‌ی مدل وزن شاهد از مجموع حاصل ضرب وزن استاندارد شده هر رده‌ی ویژگی^{C/Sc} در وزن خود رده‌ی ویژگی^C با استفاده از رابطه‌ی ۱۴ و نتایج موجود در جدول ۱ محاسبه شد. n تا همان ویژگی‌ها یا عامل‌های مؤثر در رخداد سیل است.

$$Y_{woe} = \sum_{i=1}^n C/Sc \times C \quad (14)$$

N_{pix1} : تعداد پیکسل‌های سیلابی یک طبقه،
 N_{pix2} : تعداد کل پیکسل‌های سیلابی یک نقشه منهای
تعداد پیکسل‌های سیلابی یک طبقه،
 N_{pix3} : تعداد پیکسل‌های یک طبقه منهای تعداد پیکسل‌های سیلابی یک طبقه و
 N_{pix4} : تعداد کل پیکسل‌های سیلابی یک نقشه منهای تعداد پیکسل‌های یک طبقه است.

$$C = [(W^+) + (W^-)] \quad (11)$$

$$W_{final} = C/Sc \quad (12)$$

C: برآیند وزن‌های مثبت و منفی،
 W_{final} : وزن نهایی استاندارد شده و
 Sc : انحراف معیار برآیند وزن‌های شاهد مثبت و منفی است که برابر با جذر پراکنش هر یک از وزن‌های مثبت و منفی است.

روش پژوهش

برای افزایش دقت و سهولت کار، ۱۵ عامل مؤثر بر رخداد سیل به‌وسیله‌ی دستورها و الگوریتم‌های موجود در نرم‌افزارهای ArcGIS®10.5، SAGA GIS®7.7 و ENVI®4.5 آماده‌سازی، تهیه و طبقه‌بندی شد. تمام ۱۵ عامل (متغیر مستقل) و نقشه‌ی پراکنش تعداد رخداد (متغیر وابسته) در محیط ArcGIS®10.5 به‌شکل یک بانک داده‌ی زمینی (ژئودیتابیس) با اندازه‌ی سلولی ۲۵ متر و مختصات مکانی UTM40 تهیه شد. هریک از نقشه‌های عامل‌های مؤثر طبقه‌بندی شده با نقشه‌ی پراکنش پهنه‌های رخداد سیل و با کاربرد رابطه‌ی نسبت فراوانی^{۲۶} هم‌پوشانی و وزن‌دهی و بر اساس اندازه‌ی نسبت فراوانی (FR) کمی شدند. برای تعیین

26 - Frequency ratio (FR)

27 - Variance inflation factor (VIF)

28- Tolerance

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (obs-pre)}{n} \quad (16)$$

RMSE: جذر میانگین مربعات خطا، obs: اندازه‌های مشاهده‌ای، pre: اندازه‌های پیش‌بینی‌شده، n: تعداد کل داده‌ها در هر مرحله از اندازه‌های آزمایش و آموزش، MAE: متوسط قدر مطلق خطا است. هرچه اندازه‌ی MAE و RMSE به صفر نزدیک‌تر باشند، نشان‌دهنده‌ی دقیق‌تر بودن جواب‌ها یا برازش‌ها در هر مرحله است (اسلامی‌نژاد و همکاران ۲۰۲۱).

نتایج و بحث

نتایج آزمون چندخطی یا استقلال عامل‌های مؤثر نتایج تحلیل همبستگی وایازی چندمتغیره خطی برای بررسی هم‌خطی یا همپوشانی اطلاعاتی بین داده‌های پراکنش و عامل‌های مؤثر بر رخداد سیل در جدول ۲ نشان داده شده‌است. نتایج تحلیل وایازی چندمتغیره خطی نشان داد تمامی عامل‌ها، دارای شاخص اندازه‌ی تحمل بیش‌تر از ۰/۱ یا ۰/۲ و شاخص تورم انحراف کم‌تر از ۵ یا ۱۰ بودند، در نتیجه هر ۱۵ عامل مؤثر بر رخداد سیل به‌دلیل استقلال داده‌ای و همپوشانی نداشتن اطلاعاتی برای ادامه‌ی فرآیند مدل‌سازی به‌کار گرفته شد (شیرانی و همکاران ۲۰۱۸).

سرانجام دقت طبقه‌بندی با استفاده‌ی شاخص‌های نسبت فراوانی^{۲۹} (نسبت تعداد رخداد سیل در هر رده به کل آن، سطح سلول هسته (SCAI) (نسبت درصد تعداد پیکسل هر رده به درصد هسته (Seed/)) هر رده)، اندازه‌ی سطح زیر منحنی ویژگی عمل‌گر گیرنده^{۳۰} ارزیابی و اعتبار سنجی شد (رحمتی و همکاران ۲۰۱۵؛ شیرانی و همکاران ۲۰۱۸). در شرایطی که مدل با داده‌های نامشخص محاسبه شود اندازه‌ی AUC از ۰/۵ تا ۰/۶ متغیر است و یک مدل ناکارآمد را ارائه می‌کند. اندازه‌ی AUC بین ۰/۶ تا ۰/۷ نشان‌دهنده‌ی یک مدل ضعیف است و با اندازه‌ی ۰/۷ تا ۰/۸ یک مدل نسبتاً خوب با عمل‌کرد متوسط را نشان می‌دهد. هنگامی که اندازه‌ی AUC بیش‌تر از ۰/۸ باشد نشان‌دهنده‌ی یک مدل کارآمد است که با مجموعه‌ی داده‌ها برازش بالایی دارد (ساجدی‌حسینی و همکاران ۲۰۱۸). دقت نسبی مدل‌ها بر اساس برآورد نسبی خطاهای به‌دست آمده از دو مدل، در مرحله‌ی آموزشی و آزمایشی و با کاربرد ریشه‌ی میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق ارزیابی شد (رابطه‌های ۱۵ و ۱۶).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(obs-pre)^2}{n}} \quad (15)$$

جدول ۲- تحلیل همبستگی وایازی چندمتغیره خطی و آزمون استقلال داده‌ها.

Table 2- Linear Multivariate Correlation Analysis and Collinearity Independence Test.

Factors affecting the occurrence of floods	t	Sig.	Collinearity Statistics	
			Tolerance	VIF
(Constant)	0.833	0.05	-	-
Profile curvature	-0.03	0.02	0.849	1.178
Drainage density	-0.873	0.03	0.339	2.946
Digital elevation model (DEM)	-0.295	0.08	0.428	2.336
Infiltration number	0.659	0.01	0.376	2.661
Landuse	-0.526	0.05	0.891	1.123
Lithology	-0.07	0.04	0.514	1.947
Normalized difference vegetation index	-0.554	0.08	0.856	1.168
Average annual rainfall	0.141	0.04	0.802	1.247
Intensity of daily rainfall	-0.998	0.01	0.769	1.301
Topographic Wetness Index	0.574	0.06	0.725	1.379
Topographic position index	2.363	0.01	0.865	1.156
Stream power index	-1.298	0.05	0.508	1.97
Soil	-0.737	0.02	0.555	1.802
Slope	0.413	0.04	0.297	3.371
Stream frequency	0.368	0.03	0.744	1.345

بیش‌تر از ۱/۲ کیلومتر در کیلومتر مربع تراکم شبکه‌ی زهکشی با وزن ۱/۸۹، رده‌ی ۱۴۶-۱۰۰ میلی‌متر بیشه‌ی بارش روزانه با وزن ۱/۲۰، رده‌ی کم‌تر از ۲۹۰ میلی‌متر میانگین بارش سالانه با وزن ۱/۸۵، رده‌ی بیش‌تر از ۱۱ شاخص رطوبت پستی‌بلندی با وزن ۱/۸۷، رده‌ی

نتایج بررسی اهمیت عامل‌های مؤثر بر رخداد سیل نتایج حاصل از همپوشانی نقشه‌ی پراکنش پهنه‌های رخداد سیل و هر یک از ۱۵ نقشه‌ی طبقه‌بندی شده‌ی عامل‌های مؤثر بر رخداد سیلاب، براساس شاخص نسبت فراوانی (FR) در جدول ۳ نشان داده شده‌است. رده‌ی

سطحی‌تر و نفوذپذیری خاک ضعیف‌تر باشد، رواناب سطحی و به تبع آن حساسیت به رخداد سیل نیز افزایش می‌یابد (رحمتی و همکاران ۲۰۱۶؛ عابدینی ۲۰۱۶). با افزایش فراوانی آبراهه، ظرفیت رخداد سیل نیز افزایش یافت که با یافته‌های یمانی و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد. عامل ضریب نفوذ تأثیر منفی بر رخداد سیل دارد ولی در این پژوهش با افزایش آن وزن مربوطه ابتدا روند افزایشی سپس کاهشی داشت که این ناهمبستگی در رده‌ی ۱/۱-۲/۲ مشخص است. نوع کاربری منطقه (بیشتر زراعی و کشاورزی) و فراهم بودن بستر مناسب برای جاری شدن آب دلیل این اتفاق است. طبق نتایج پژوهش رحمتی و همکاران (۲۰۱۶)، بیش‌ترین میزان رخداد سیل مربوط به طبقه‌های با بلندی کم و زمین هموار است که این ویژگی سبب جاری شدن سیل در این مناطق می‌شود. با افزایش شاخص توان آبراهه سرعت سطحی جریان نیز افزایش یافت و در نتیجه اندازه‌ی رخداد سیل روند افزایشی داشت (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۷). رده‌های عامل خاک تأثیرات مختلفی در رخداد سیل داشت به‌طوری‌که تخته‌های نمکی به‌دلیل انحلال و جذب بیش‌تر آب، اندازه‌ی رخداد سیل را به‌شدت کاهش دادند و برعکس گروه مولی‌سول‌ها بیش‌ترین اندازه‌ی سیل را داشتند که این یافته با نتایج پژوهش رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. با افزایش شیب، اندازه‌ی رخداد سیل کاهش یافت، چون در نواحی با شیب کم، رواناب زمان بیش‌تری برای نفوذ در اختیار دارد و موجب رخداد سیل می‌شود (فرامرزی و همکاران ۲۰۱۹؛ رحمتی و همکاران ۲۰۱۶).

نتایج حاصل از اجرای دو مدل

نتایج رابطه‌ی بین رخداد سیل، عامل‌های مؤثر و اندازه‌ی اثر هر یک از آن‌ها برای تهیه‌ی نقشه‌ی ظرفیت حساسیت نسبت به رخداد سیل به وسیله‌ی شاخص آنتروپی و وزن‌شاهد بیزین با کاربرد رابطه‌های ۱ تا ۵ و ۷ تا ۱۲ در جدول ۳ نشان داده شده‌است. در مجموع براساس وزن‌های محاسبه‌شده حاصل از هر دو مدل شاخص آنتروپی و وزن‌شاهد بیزین به‌ترتیب عامل‌های کاربری زمین، بلندی، شاخص پوشش گیاهی، خاک، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، تراکم شبکه‌ی زهکشی، شاخص توان آبراهه، شیب، شاخص موقعیت پستی‌بلندی، سنگ‌شناسی، میانگین بارش سالانه، ضریب نفوذ، شکل انحنا، فراوانی آبراهه و بیشینه‌ی بارش روزانه در رخداد سیل مؤثر بودند (شکل ۴). در استان گلستان در چند سال اخیر به‌دلیل ساخت ساختمان‌ها و ویلاهای غیرمجاز در امتداد مسیر جنگلی و تغییر کاربری‌های زمین با خطرهای زیست‌محیطی ناشی از رخداد سیل مواجه

۰/۱-۰/۲ شاخص پوشش گیاهی با وزن ۱/۹۲، رده‌ی شیب ملایم شاخص موقعیت پستی‌بلندی با وزن ۱/۷۹، رده‌ی گروه هشتم از عامل سنگ‌شناسی که شامل انواع سازندهای Qal, Qft1, Qft2, Qm, Qsd, Qsw, Sn می‌باشد با وزن ۱/۶۳، رده‌ی مسکونی عامل کاربری زمین با وزن ۱۲/۵۶، رده‌ی بیش‌تر از ۰/۸ عامل فراوانی آبراهه با وزن ۱/۰۸، رده‌ی بیش‌تر از ۲/۲ عامل ضریب نفوذ با وزن ۱/۲۱، رده‌ی کم‌تر از ۴۰۰ متر بلندی با وزن ۲/۰۳، رده‌ی ۰/۱ تا ۱۰/۱- (هموار) عامل انحنای مقطع با وزن ۱/۶۵، رده‌ی ۰/۱- تا ۰/۲ شاخص توان آبراهه با وزن ۱/۳۷، رده‌ی مولی‌سول‌ها عامل خاک با وزن ۱/۸۴ و رده‌ی ۵- درصد عامل شیب با وزن ۱/۷۹ نسبت به دیگر رده‌های همان عامل دارای بیش‌ترین وزن یا اهمیت بودند (جدول ۳). نتایج اندازه‌ی وزنی نسبت فراوانی رده‌های عامل‌های مؤثر بر رخداد سیل، نشان داد که با افزایش تراکم زهکشی، اندازه‌ی رخداد سیل نیز افزایش یافت، که با نتایج پژوهش‌های یمانی و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد. در این پژوهش با افزایش شدت بارندگی که بیش‌ترین بارش روزانه بود، اندازه‌ی رخداد سیل نیز افزایش یافت و سیلاب‌هایی با حجم بیش‌تر به وجود آمد که با نتایج پژوهش نگارش و ویسی (۲۰۱۳) مطابقت دارد. نوع پوشش گیاهی و کاربری زمین در مناطق بررسی‌شده باعث شد که وزن رده‌های میانگین بارش سالانه، در ابتدا روند کاهشی و سپس افزایشی داشته باشد. ولی به‌طور کلی بیش‌ترین میزان رخداد سیل با کم‌ترین میزان بارش سالانه مواجه بوده‌است که نشان دهنده‌ی فقدان پوشش گیاهی و یا بارش‌های رگباری در آن منطقه است و با نتایج پژوهش فرامرزی و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد. شاخص رطوبت پستی‌بلندی یک خصوصیت پستی‌بلندی ثانویه است که توزیع مکانی رطوبت را نشان می‌دهد که زیاد بودن این عامل باعث افزایش حجم سیلاب شد که این یافته با پژوهش‌های رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) و پورقاسمی و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد. براساس نتایج این پژوهش و یافته‌های پورقاسمی و همکاران (۲۰۱۷)، بین شاخص پوشش گیاهی و رخداد سیل در منطقه رابطه‌ی منفی وجود داشت یعنی با افزایش تراکم پوشش گیاهی، حساسیت مناطق نسبت به رخداد سیل کاهش پیدا کرد و برعکس. با توجه به معیارهای شاخص موقعیت پستی‌بلندی و کاربری زمین، بیش‌ترین اندازه‌ی سیل مربوط به قسمت‌های سکونت‌گاهی و زراعی بود. این یافته به‌دلیل شیب ملایم زمین و هدایت رواناب ایجادشده در بلندی‌های این مناطق که پوشش گیاهی مناسب هم ندارد، بود. عامل سنگ‌شناسی در واقع وضعیت زمین‌شناسی منطقه با تأکید بر ویژگی‌های ساختار زمین‌شناسی را نشان می‌دهد. هرچه خاک

شده‌است. در این پژوهش عامل کاربری زمین و عامل پوشش گیاهی به‌خاطر تغییر کاربری‌های زمین در رخداد سیل اولویت بالایی داشتند. باید توجه داشت که بدون توجه به ماهیت دومتغیره بودن مدل‌ها، در پدیده‌ی سیل عامل‌ها به‌تنهایی نقش ندارند و در تعامل هم‌زمان با یکدیگر به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم باعث رخداد سیل می‌شوند. بنابراین با اینکه شدت بارش در رتبه‌ی آخر قرار دارد ولی اهمیت و تأثیرگذاری آن در کنار دیگر عامل‌ها را نباید نادیده گرفت (شکل ۴).

ارزیابی اندازه‌ی وزن‌های P_{ij} و C حاصل از هر دو مدل، به‌ترتیب اهمیت رده‌های مختلف کاربری زمین را نشان داد. براساس این نتایج زمین مسکونی به‌ترتیب با اندازه‌ی $0/63$ و $2/68$ به‌دلیل تغییر کاربری نامناسب و ساخت‌وسازهای فراوان و از بین رفتن پوشش گیاهی و همچنین کاهش نفوذپذیری (آسفالت سطح زمین و سقف ساختمان‌ها و ...)، بیش‌ترین حساسیت نسبت به رخداد سیل را نسبت به دیگر رده‌های کاربری زمین داشت (جدول ۳). بنابراین رواناب حاصل از بارندگی جایی برای نفوذ ندارد و باعث افزایش حجم سیلاب می‌شود. براساس اندازه‌های P_{ij} و C ، بلندی‌های کم‌تر از 400 متر به‌ترتیب با اندازه‌ی $0/82$ و $2/35$ بیش‌ترین وزن را نسبت به دیگر رده‌های بلندی کسب کردند و این یافته به‌دلیل جاری‌شدن رواناب تشکیل‌شده در بلندی‌ها به‌سمت مناطق پایین‌دست و با بلندی کم در بخیز بود. با افزایش اندازه‌ی شاخص پوشش گیاهی^{۳۱} و ضریب نفوذ، اندازه‌های P_{ij} و C کاهش یافت و با افزایش اندازه‌ی تراکم زهکشی، فراوانی آبراهه، ماکزیمم بارش 24 ساعته، رطوبت پستی‌بلندی و توان آبراهه، اندازه‌های P_{ij} و C افزایش یافت و در نتیجه رخداد سیل افزایش یافت (جدول ۳). نتایج بررسی اندازه‌های P_{ij} و C طبقه‌های شیب نشان داد که بیش‌ترین حساسیت نسبت به سیل‌های رخ داده در منطقه در شیب‌های بسیار کم (0 تا $5/$) به‌ترتیب با اندازه‌های $0/45$ و $1/19$ است. در شیب کم سرعت رواناب کاهش و تجمع آن زیاد می‌شود و از این رو رخداد سیل در مناطق کم شیب مانند دشت‌ها زیاد است. همچنین در قسمت‌های دره و شیب‌های ملایم شاخص موقعیت پستی‌بلندی بیش‌ترین وزن را کسب کرد. متغیر انحنای زمین با مهارکردن حرکت آب بر زهکشی و نگهداری آب مؤثر بوده و به

این دلیل بر شکل‌گیری مناطق سیل‌گیر اثر گذار است. با توجه به طبقه‌های این عامل اندازه‌های P_{ij} و C رده‌ی هموار به‌ترتیب با وزن $0/49$ و $0/65$ بیش‌ترین حساسیت را نسبت به سیل داشتند. نوع خاک با توجه به اندازه‌ی نفوذپذیری آن در کنار ویژگی‌هایی مانند نوع پوشش گیاهی و کاربری زمین یکی از مهم‌ترین عامل‌های رخداد سیل در هر آبخیزی به‌شمار می‌رود. در آبخیز گرگان‌رود اندازه‌های P_{ij} و C در مولی‌سول‌ها بیش‌ترین ($0/53$ و $1/63$) و در آلفی‌سول‌ها و اینسپتی‌سول‌ها کم‌ترین حساسیت را نشان داد. براساس اندازه‌ی P_{ij} و C ، به‌ترتیب $0/42$ و $1/95$ برای گروه سازندهای Qal, Qst, Qm, Qsd, Qsw, Sn، به‌دلیل وجود نهشته‌های ماسه‌سنگی، سنگ‌های مرجانی، آبرفت‌های سیلابی و پهنه‌های رسی کواترنری بیش‌ترین حساسیت را نسبت به دیگر سازندها داشتند.

نتایج تهیه‌ی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت به رخداد سیل

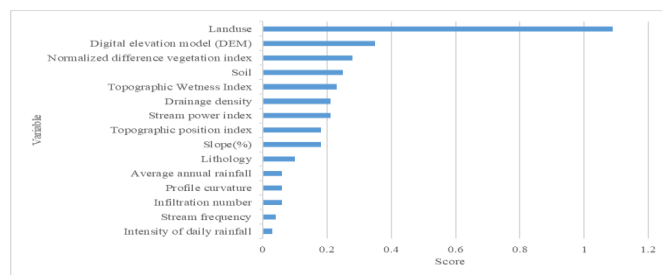
نتایج طبقه‌بندی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد سیل در شکل ۵ نشان داد در مدل آنتروپی شانون، سطح رده‌های حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی‌زیاد به‌ترتیب با نسبت‌های $14/50\%$ ، $17/44\%$ ، $24/73\%$ ، $21/39\%$ و $21/94\%$ و در مدل وزن شاهد با نسبت‌های $3/62\%$ ، $19/84\%$ ، $31/06\%$ ، $21/09\%$ و $24/39\%$ از سطح $13050/3$ کیلومترمربعی آبخیز را پوشش دادند (جدول ۴، شکل ۶). از هم‌پوشانی نقشه‌ی پراکنش پهنه‌های رخداد سیل با نقشه‌ی طبقه‌بندی پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد سیل مشخص شد در مدل آنتروپی و وزن شاهد رده‌های حساسیت خیلی کم تا کم به‌ترتیب $1/66\%$ و $8/44\%$ و رده‌های حساسیت زیاد تا خیلی‌زیاد به‌ترتیب $91/17\%$ و $80/44\%$ از تعداد رخداد سیل را به خود اختصاص دادند. به‌عبارت دیگر در هر دو مدل رده‌های حساسیت خیلی کم تا کم، سطح کمی از سیل‌های رخ داده را پوشش دادند و رده‌های حساسیت زیاد تا خیلی‌زیاد سطح زیادی (بیش از 80%) از سیل‌های رخ داده را پوشش دادند. در هر دو مدل، اندازه‌ی سطح رخداد سیل با افزایش رده‌ی حساسیت از رده‌ی خیلی کم تا خیلی‌زیاد روند افزایشی داشت و در رده‌ی حساسیت خیلی‌زیاد این افزایش قابل توجه بود (جدول ۴، شکل ۶).

جدول ۳- رابطه بین رخداد سیل، و اندازه های هریک از عامل های مؤثر به وسیله شاخص آنتروپی و وزن شاهد.

Criteria	class	number	Flood	FR	w+	w-	C	S ² (w+)	S ² (w-)	S ²	C/S ²	(Pij)	Hj	Hj_total	Hj	Ij	Wj
Drainage density	<0.7	847240	7	0.31	-1.16	0.03	-1.19	0.14	0.00	0.38	-3.13	0.11	-0.35				
	0.7 – 1.2	14726585	279	0.72	-0.33	0.52	-0.85	0.00	0.00	0.09	-9.94	0.25	-0.50	1.25	1.58	0.21	0.21
	>1.2	5306724	265	1.89	0.64	-0.36	1.00	0.00	0.00	0.09	11.73	0.65	-0.41				
Intensity of daily rainfall	<88	2388529	39	0.62	-0.48	0.05	-0.53	0.03	0.00	0.17	-3.18	0.24	-0.49				
	88 - 100	6181325	123	0.75	-0.28	0.10	-0.38	0.01	0.00	0.10	-3.72	0.29	-0.52	1.53	1.58	0.04	0.03
	100 - 146	12310705	389	1.20	0.180	-0.334	0.514	0.003	0.006	0.094	5.50	0.47	-0.51				
Average annual rainfall	<290	328581	16	1.85	0.61	-0.01	0.63	0.06	0.00	0.25	2.47	0.41	-0.53				
	290 - 410	4928681	97	0.75	-0.29	0.08	-0.37	0.01	0.00	0.11	-3.30	0.16	-0.43	1.90	2.00	0.05	0.06
	410 - 630	12591242	373	1.12	0.116	-0.21	0.32	0.0	0.01	0.09	3.53	0.25	-0.50				
Topographic Wetness Index	630 - 747	3032056	65	0.81	-0.21	0.03	-0.24	0.02	0.00	0.13	-1.81	0.18	-0.44				
	<5	1591837	9	0.21	-1.54	0.06	-1.60	0.11	0.00	0.34	-4.77	0.07	-0.27				
	5 - 11	15518962	356	0.87	-0.14	0.32	-0.46	0.00	0.01	0.09	-5.17	0.29	-0.52	1.21	1.58	0.24	0.23
Normalized difference vegetation index	>11	3769597	186	1.87	0.63	-0.21	0.84	0.01	0.00	0.09	9.31	0.63	-0.42				
	<0.1	5854335	45	0.29	-1.23	0.24	-1.48	0.02	0.00	0.16	-9.50	0.10	-0.33				
	0.1 – 0.2	6876778	349	1.92	0.65	-0.61	1.26	0.00	0.01	0.09	14.23	0.65	-0.40	1.23	2.00	0.38	0.28
Topographic position index	0.2 – 0.4	8087818	157	0.74	-0.31	0.16	-0.46	0.01	0.00	0.09	-4.89	0.25	-0.50				
	0.4 – 0.55	61676	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.047	-0.07	0.00	0.00				
	Valley	13155234	408	1.18	0.16	-0.355	0.516	0.002	0.01	0.097	5.31	0.31	-0.52				
Lithology	Normal slope	380983	18	1.79	0.58	-0.02	0.60	0.06	0.00	0.24	2.49	0.47	-0.51	1.62	2.00	0.19	0.18
	High slope	6042177	122	0.77	-0.27	0.09	-0.36	0.01	0.00	0.10	-3.50	0.20	-0.46				
	Heights	1302001	3	0.09	0.00	0.06	-0.06	0.00	0.00	0.04	-1.38	0.02	-0.12				
	Cl,Cm	808173	2	0.09	-2.37	0.036	-2.40	0.50	0.00	0.71	-3.39	0.02	-0.13				
	Dp,Dckh	1162637	13	0.42	-0.86	0.03	-0.89	0.08	0.00	0.28	-3.18	0.11	-0.35	2.40	3.17	0.24	0.10
	Elc,Elm,Ekh	141296	3	0.80	-0.22	0.00	-0.22	0.33	0.00	0.58	-0.38	0.21	-0.47				
	Jbash,Jch,Jd,Jl,Jmz,Jsc	2839441	21	0.28	-1.27	0.11	-1.38	0.05	0.00	0.22	-6.20	0.07	-0.27				
	K,Kad-ab,Kat,Kl,Ksn,Ksr,Ku	1344311	7	0.20	-1.62	0.05	-1.68	0.14	0.00	0.38	-4.41	0.05	-0.22				
	Mur,Murc,Murm,Murmg	671224	0	0.00	-	0.03	-	-	0.00	-	-	0.00	0.00				
	P,PC-	1560397	3	0.07	-2.62	0.07	-2.69	0.33	0.00	0.58	-4.65	0.02	-0.11				
	C,PCmt2,Pd,Plc,PlQc,Pr,Pz,Pz1a,bv,Pz1av	11440953	493	1.63	0.49	-1.46	1.95	0.00	0.02	0.14	14.03	0.42	-0.53				
	Qal,Qft1,Qft2,Qm,Qsd,Qsw,Sn	911947	9	0.37	-0.98	0.03	-1.01	0.11	0.00	0.34	-3.01	0.10	-0.33				

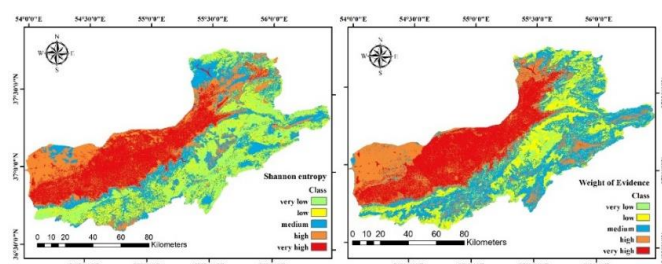
ادامه جدول ۳- رابطه بین رخداد سیل، و اندازه های هریک از عامل های مؤثر به وسیله شاخص آنتروپی و وزن شاهد.

Criteria	class	number	Flood	FR	w+	w-	C	S ² (w+)	S ² (w-)	S ²	C/S ²	(Pij)	Hj	Hj_total	Hj	Ij	Wj
Landuse	Grassland	5340343	21	0.15	-1.90	0.26	-2.16	0.05	0.00	0.22	-9.71	0.01	-0.05				
	Forest	6060052	22	0.14	-1.98	0.30	-2.29	0.05	0.00	0.22	-	0.01	-0.05	1.74	2.81	0.38	1.09
	Watery agriculture	7335285	354	1.83	0.60	-0.60	1.20	0.00	0.01	0.09	13.49	0.09	-0.31				
	Residential	244400	81	12.56	2.53	-0.15	2.68	0.01	0.00	0.12	22.26	0.63	-0.42				
	Garden	247916	19	2.90	1.07	-0.02	1.09	0.05	0.00	0.23	4.67	0.14	-0.40				
	Dry farming	1412823	46	1.23	0.21	-0.02	0.23	0.02	0.00	0.15	1.48	0.06	-0.25				
	Wetland	237346	8	1.28	0.25	0.00	0.25	0.13	0.00	0.36	0.70	0.06	-0.25				
Stream frequency	<0.6	941267	19	0.76	-0.27	0.01	-0.28	0.05	0.00	0.23	-1.20	0.33	-0.53				
	0.6 – 0.8	2109189	26	0.47	-0.76	0.06	-0.82	0.04	0.00	0.20	-4.08	0.20	-0.47	1.51	1.58	0.05	0.04
	>0.8	17830093	506	1.08	0.07	-0.58	0.65	0.00	0.02	0.16	4.21	0.47	-0.51				
Infiltration number	<1.1	10434179	164	0.60	-0.52	0.34	-0.86	0.01	0.00	0.09	-9.20	0.18	-0.45				
	1.1 – 2.2	9728565	364	1.42	0.35	-0.45	0.80	0.00	0.01	0.09	8.92	0.44	-0.52	1.50	1.58	0.05	0.06
	>2.2	717804	23	1.21	0.19	-0.01	0.20	0.04	0.00	0.21	0.95	0.38	-0.53				
Digital elevation model (DEM)	<400	9160728	491	2.03	0.71	-1.64	2.35	0.00	0.02	0.14	17.17	0.82	-0.24				
	400 - 1200	5051351	59	0.44	-0.82	0.16	-0.98	0.02	0.00	0.14	-7.10	0.18	-0.44	0.70	2.32	0.70	0.35
	1200 - 2000	5596653	1	0.01	-4.99	0.31	-5.31	1.00	0.00	1.00	-5.30	0.00	-0.02				
	2000 - 2800	986351	0	0.00	0.00	0.05	-0.05	-	0.00	-	-	0.00	0.00				
	2800 - 3681	85313	0	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00	-	-	0.00	0.00				
Profile curvature	Concave	8867119	221	0.94	-0.06	0.04	-0.10	0.01	0.00	0.09	-1.12	0.28	-0.51				
	Flat	3632008	158	1.65	0.50	-0.15	0.65	0.01	0.00	0.09	6.87	0.49	-0.50	1.51	1.58	0.05	0.06
	Convex	8381268	172	0.78	-0.25	0.14	-0.39	0.01	0.00	0.09	-4.25	0.23	-0.49				
Stream power index	<-2.6	136552	0	0.00	0.00	0.007	-	0.00	0.002	0.043	-0.15	0.00	0.00				
	-2.6 - -0.1	5017872	126	0.95	-0.05	0.02	-0.07	0.01	0.00	0.10	-0.64	0.36	-0.53	1.37	2.00	0.32	0.21
	-0.1 – 0.2	10721692	378	1.37	0.31	-0.49	0.81	0.00	0.01	0.09	8.64	0.52	-0.49				
	>0.2	5005845	38	0.29	-1.25	0.23	-1.45	0.03	0.00	0.17	-8.62	0.11	-0.35				
	Rock - Antisols	3080865	32	0.39	-0.93	0.10	-1.03	0.03	0.00	0.18	-5.67	0.11	-0.36				
Soil	Inceptisols	2545466	19	0.28	-1.26	0.10	-1.36	0.05	0.00	0.23	-5.82	0.08	-0.29	1.41	2.81	0.50	0.25
	Alfisols	3688388	29	0.30	-1.21	0.14	-1.35	0.03	0.00	0.19	-7.08	0.09	-0.30				
	Rock - Inceptisols	565758	0	0.00	0.00	0.03	-0.03	0.00	0.00	0.04	-0.65	0.00	0.00				
	Aridisols	1892538	33	0.66	-0.41	0.03	-0.45	0.03	0.00	0.18	-2.49	0.19	-0.46				
	Molisol	9013989	438	1.84	0.61	-1.02	1.63	0.00	0.01	0.11	15.45	0.53	0.00				
Slope(%)	Salt boards	93074	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	-0.11	0.00	0.00				
	0 - 5	7680751	362	1.79	0.58	-0.61	1.19	0.00	0.01	0.09	13.28	0.45	-0.52				
	5 - 15	3181031	117	1.39	0.33	-0.07	0.41	0.01	0.00	0.10	3.89	0.35	-0.53	1.78	2.32	0.23	0.18
	15 - 30	4092835	45	0.42	-0.88	0.13	-1.01	0.02	0.00	0.16	-6.48	0.11	-0.34				
	30 - 50	3642953	18	0.19	-1.68	0.16	-1.83	0.06	0.00	0.24	-7.65	0.05	-0.21				
	>50	2282826	9	0.15	-1.90	0.10	-2.00	0.11	0.00	0.34	-5.95	0.04	-0.18				



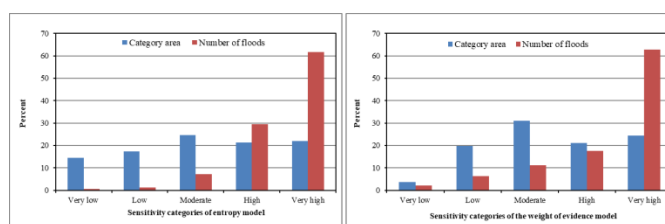
شکل ۴- اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر بر رخداد سیل با روش آنتروپی شانون.

Figure 4- Prioritizing of the Factors Affecting on the Flood Occurrence with Shannon's Entropy Method.



شکل ۵- نقشه‌ی پهنه‌بندی رخداد سیل با روش آنتروپی و وزن شاهد.

Figure 5- Flood Occurrence Susceptibility Zonation Map with Entropy Index and Weight of Evidence Methods.



شکل ۶- طبقه‌های نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد سیل در هر مدل.

Figure 6- Figure 7- Flood occurrences susceptibility zonation classes in each model.

جدول ۴- مساحت رده‌های حساسیت رخداد سیل، نسبت فراوانی و شاخص سلول هسته.

Table 4- Flood Occurrences Susceptibility Zonation Classes Area, frequency ratio (FR) and Seed Cell Area Index (SCAI).

Model	Flood susceptible	Number of	%	Number of	%	Frequency	Seed Cell
Shannon entropy	Very low	4	0.51	3026315	14.50	0.01	0.51
	Low	9	1.15	3639275	17.44	0.01	1.15
	Moderate	56	7.16	5161300	24.73	0.07	7.16
	High	230	29.41	4464262	21.39	0.29	29.41
	Very high	483	61.76	4578709	21.94	0.62	61.76
Weight of evidence	Very low	17	2.17	756286	3.62	0.02	2.17
	Low	49	6.27	4140168	19.84	0.06	6.27
	Moderate	87	11.13	6482241	31.06	0.11	11.13
	High	137	17.52	4401054	21.09	0.18	17.52
	Very high	492	62.92	5090111	24.39	0.63	62.92

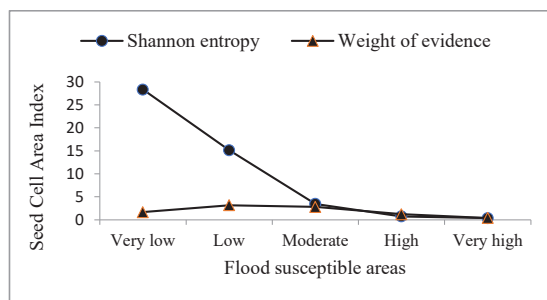
به رخداد سیل نشان داد که مدل آنتروپی شانون در مقایسه با وزن شاهد کارآمدتر و مناسب‌تر است (جدول ۴ و شکل‌های ۷ و ۸). براساس رابطه‌ی منطقی و نسبی موجود بین تعداد رخداد سیل و پهنه‌های حساسیت، به‌ترتیب برای پهنه‌های با حساسیت خیلی کم تا

نتایج ارزیابی دقت طبقه‌بندی و اعتبارسنجی مدل‌ها

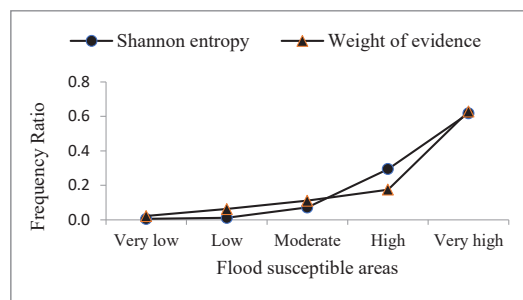
نتایج اجرای مدل‌ها برای محاسبه‌ی شاخص‌های نسبت فراوانی و سطح سلول هسته^{۳۲} برای ارزیابی دقت تفکیک طبقه‌بندی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت نسبت

نسبت به رخداد سیل تهیه‌شده و نقشه‌ی پراکنش تعداد رخداد سیل است (شکل ۹). مقادیر حاصل از اعتبارسنجی مدل‌ها در این پژوهش، نتایج حقی‌زاده و همکاران (۲۰۱۷) را تایید می‌کند. همچنین برای داده‌های آموزشی و آزمایشی دو ویژگی جذر میانگین مربعات خطا^{۳۳} و متوسط قدرمطلق خطا^{۳۴} برای هر مدل محاسبه و نتایج نشان داد هر دو مدل از برازش اطلاعاتی خوبی بهره‌مند بودند. برای مدل آنتروپی شانون اندازه‌ی RMSE در دو حالت آموزش و آزمایش به ترتیب ۰/۰۰۱۱ و ۰/۰۵۰ بود و اندازه‌ی MAE در دو حالت آموزش و آزمایش به ترتیب ۰/۰۰۰۷ و ۰/۰۰۳ محاسبه شد. همچنین برای مدل وزن شاهد اندازه‌ی RMSE در دو حالت آموزش و آزمایش به ترتیب ۰/۰۰۳ و ۰/۰۵۳ بود و اندازه‌ی MAE در دو حالت آموزش و آزمایش به ترتیب ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۹ محاسبه شد. نتایج مدل آنتروپی شانون به دلیل اندازه‌ی خطای کمتر نسبت به مدل وزن شاهد دقیق‌تر ارزیابی شد (جدول ۵).

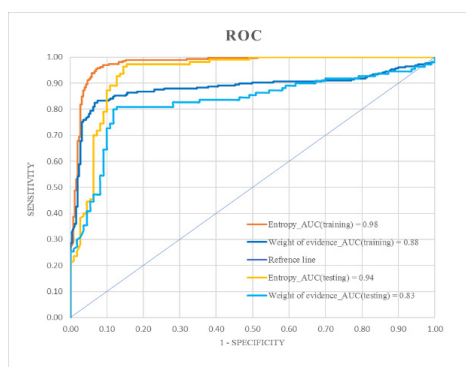
خیلی‌زیاد اندازه‌ی نسبت فراوانی افزایش و شاخص سطح سلول هسته به شکل قرینه‌ی معکوس کاهش یافت (شکل‌های ۷ و ۸). نمودار شاخص SCAI برای مدل آنتروپی شانون روند نزولی مشخص و یکنواخت و برای مدل وزن شاهد بیزین روند نزولی غیریکنواخت (ابتدا صعودی سپس نزولی) نشان داد. براساس نمودار شاخص سطح سلول هسته، مدل آنتروپی شانون دارای پهنه‌بندی مناسب‌تر طبقه‌های حساسیت است (شکل‌های ۷ و ۸). در صورتی که اگر فقط روند منحنی نسبت فراوانی برای تفکیک‌پذیری رده‌های حساسیت نسبت به رخداد سیل مدنظر قرار گیرد، تمایزی بین دو مدل وجود نخواهد داشت (جدول ۴ و شکل‌های ۷ و ۸). در مقایسه‌ی مدل‌ها نسبت به هم، نتایج اندازه‌های مساحت زیر منحنی (AUC) مدل آنتروپی شانون نشان‌دهنده‌ی دقت و امتیاز بالاتر در هر دو وضعیت آزمایشی و آموزشی (۰/۹۴ و ۰/۹۸) نسبت به روش وزن شاهد بیزین (۰/۸۳ و ۰/۸۸) بود که بیان‌گر هم‌بستگی بالا بین نقشه‌ی حساسیت



شکل ۸- شاخص سطح سلول هسته.
Figure 8- Seed Cell Area Index



شکل ۷- شاخص نسبت فراوانی.
Figure 7- Frequency Ratio Index.



شکل ۹- منحنی نرخ پیش‌بینی (ROC) نقشه‌های حساسیت نسبت به رخداد سیل مدل آنتروپی و وزن شاهد بیزین.
Figure 9- Prediction Rate Curve (ROC) of Flood Susceptibility Maps Generated by Entropy Index and Weight of Evidence Models.

جدول ۵- دقت ارزیابی دو مدل برای داده‌های آموزشی و آزمایشی به‌وسیله‌ی ویژگی‌های سنجش خطا.

Table 5- Accuracy Evaluation of Two Models for Training and Testing Data by Mean Error Measurement Parameters.

Error	Index of Entropy (IOE)		Weight of Evidence (WOE)	
	Training (70%)	Testing (30%)	Training (70%)	Testing (30%)
RMSE	0.0011	0.050	0.003	0.053
MAE	0.0007	0.003	0.002	0.009

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی رخداد سیل، از ۳۶۸ پهنه‌ی سیلابی با ۷۸۲ تکرار رخداد سیل و ۱۵ عامل مؤثر بر آن استفاده شد. این عامل‌ها شامل تراکم شبکه‌ی زهکشی، فراوانی آبراهه، ضریب نفوذ، شیب، سنگ‌شناسی، خاک، کاربری زمین، بلندی، میانگین بارش، شدت بارش، و شاخص‌های رطوبت پستی‌بلندی، توان آبراهه، پوشش گیاهی، موقعیت پستی‌بلندی و انحنای سطح بودند. همه‌ی عامل‌ها فاقد هم‌پوشانی اطلاعاتی بودند. براساس برازش مدل‌های آنتروپی شانون و وزن شاهد عامل‌های مؤثر بر رخداد سیل اولویت‌بندی شدند. در منطقه‌ی پژوهش عامل‌های کاربری زمین، بلندی و پوشش گیاهی به‌ترتیب دارای بیشترین اهمیت و اولویت در رخداد سیل بودند و عامل‌های شکل انحنای فراوانی آبراهه و شدت بارش در رده‌های آخر قرار گرفتند. در مرحله‌ی اجرای مدل‌ها با استفاده از ۷۰٪ پهنه‌های رخداد سیل، مدل آنتروپی شانون و وزن شاهد به‌ترتیب با خطای کم (اندازه‌های RMSE و MAE نزدیک به صفر) بهترین برازش را در بررسی داده‌های ورودی و

ایجاد مدل داشتند. همچنین نتایج نشان داد مدل آنتروپی شانون ضمن دارا بودن آستانه‌ی طبقه‌های مناسب در طبقه‌بندی و به‌کارگیری ۳۰٪ پهنه‌های رخداد سیل از اولویت بیش‌تری برای پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخداد سیل برخوردار است. اما درمجموع هر دو مدل در پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخداد سیل در آبخیز گرگان‌رود واقع در استان گلستان کارآمد و مناسب بودند.

در آبخیز گرگان‌رود مدل آنتروپی در هر دو مرحله‌ی اجرا و پیش‌بینی، نتیجه‌ی بهتری نسبت به مدل وزن شاهد کسب کرد و نتایج پژوهش‌های پیشین را تأیید می‌کند. با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت به رخداد سیل در آبخیز گرگان‌رود، در مدل آنتروپی رده‌ی حساسیت خیلی زیاد با وسعتی حدود ۲۰٪ منطقه، حدود ۶۲٪ رخدادهای سیل و در مدل وزن شاهد با وسعتی حدود ۲۵٪ منطقه، حدود ۶۳٪ رخداد سیل را پوشش دادند. به عبارت دیگر مدل آنتروپی شانون و وزن شاهد به‌ترتیب حدود یک پنجم و یک چهارم منطقه را با حساسیت خیلی زیاد تقسیم‌بندی کردند.

فهرست منابع

- Abedini M, Beheshtijavid E. 2016. Zoning of flood risk in Liqan Chay watershed using network analysis process model and GIS. *Geographical Space*, 16(55): 293–312. (In Persian).
- Al-Abadi AM, Shahid S. 2015. A comparison between index of entropy and catastrophe theory methods for mapping groundwater potential in an arid region. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(9): 1–21.
- Asadollahi Shahir M. 2018. Analytical report of floods in Golestan Province. Deputy technical and watershed management directorate of natural resources and watershed management of Golestan Province. (In Persian).
- Asgharpour SE, Ajdari B. 2011. A case study on seasonal floods in Iran, watershed of Ghotour Chai Basin. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 19: 556–566.
- Avand M, Moradi H. 2021. Spatial modeling of flood probability using geo-environmental variables and machine learning models, case study: Tajan watershed, Iran. *Advances in Space Research*, 67(10): 3169–3186.
- Bardi sheikh V, Babaee A, Mosheikhian Y. 2009. Assessment of the changes in precipitation regimes Gorganroud Basin. *Iran-Watershed Management Science and Engineering*, 3(8): 29–38. (In Persian).
- Bednarik M, Magulova B, Matys M, Marschalko M. 2010. Landslide Susceptibility Assessment of the Kral'ovany–Liptovsky' Mikulaš Railway Case Study, *Physics and Chemistry of the Earth*, 35(3–5): 162–171.
- Beitollahi A. 2019. Golestan Province Flood Report. Water and regional company of Golestan province. (In Persian).
- Candela A, Aronica GT. 2017. Probabilistic flood hazard mapping using bivariate analysis based on copulas. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 3(1): A4016002.
- Constantin M, Bednarik M, Jurchescu M.C, Vlaicu M. 2011. Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environmental Earth Sciences*, 63(2): 397–406.
- Eivazi M, Mosaedi A, Meftah Halaghi M, Hesham M. 2010. Investigation of precipitation trend on the north region of Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 17(2): 145–167. (In Persian).
- Eslaminezhad SA, Eftekhari M, Akbari M. 2021. GIS-Based Flood Risk Zoning Based on Data-Driven Models. *Journal of Hydraulic Structures*, 6(4): 75–98.
- Faramarzi H, Hosseini S, Pourghasemi H, Faranghi M. 2019. Evaluation and zoning of flood risk in Golestan National Park. *Echo Hydrology*, 6(4): 1055–1068. (In Persian).
- Ghayyur HA, Rezaei M, Shakur A. 1996. Floods and flood-prone areas. *Geographical Research*, 40: 101–120. (In Persian).
- Gouldby BF, Méndez J, Guanche Y, Rueda A, Mínguez R. 2014. A methodology for deriving extreme nearshore sea conditions for structural design and flood risk analysis. *Coastal Engineering*, 88: 15–26.
- Haghizadeh A, Siahkamari S, Haghiabi A. H, Rahmati O. 2017. Forecasting flood-prone areas using Shannon's entropy model. *Journal of Earth System Science*, 126(3): 1–11.
- Jannati H. 2019. History of the devastating floods in Iran. *Political Studies and Research Institute*, 593 p.
- Keesstra SD. 2007. Impact of natural reforestation on floodplain sedimentation in the Dragonja Basin, SW Slovenia. *Earth Surface Processes and Landforms, The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 32(1): 49–65.

- Khodayari A. 2019. Crisis management of water and sewage distribution networks in natural disasters (flood). National Conference on the Perspective of Caspian Sea Water Transfer to Desert Areas.
- Lee S, Choi J. 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(8): 789–814.
- Lotfi AR, Asadollahi Shahir M, Abbasi M. 2014. Frequency analysis of flood occurrence and damage in spatial and temporal scale of Golestan province. 10th National Conference on Watershed Management Science and Engineering, Birjand University, pp. 1–11. (In Persian).
- Malekian A, Azarnivand A. 2016. Application of integrated Shannon's entropy and VIKOR techniques in prioritization of flood risk in the Shemshak Watershed, Iran. *Water Resources Management*, 30(1): 409–425.
- Malekian A, Khozani AO, Ashoornejad GH. 2012. Zoning of flooding potential of Akhtarabad watershed using fuzzy hierarchical analysis method. *Natural Geography Research*, 4(44): 162–191. (In Persian).
- McGuire RK. 1995. Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: Closing the loop. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(5): 1275–1284.
- Naghibi SA, Pourghasemi HR. 2015. A comparative assessment between three machine learning models and their performance comparison by bivariate and multivariate statistical methods in groundwater potential mapping. *Water Resources Management*, 29(14): 5217–5236.
- Negaresh H, Voisi HJ. 2013. Analysis of the effects of rainfall changes on the flooding of the Ravand River Catchment (West Islamabad Region-Kermanshah Province). *Scientific-Research Quarterly, Regional Planning*, 3(11): 79–98. (In Persian).
- Paul GC, Saha S, Hembram TK. 2019. Application of the GIS-based probabilistic models for mapping the flood susceptibility in Bansloi sub-basin of Ganga-Bhagirathi River and their comparison. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 2(2): 120–146.
- Rahmati O, Pourghasemi HR, Zeinivand H. 2016. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golestan Province, Iran, *Geocarto International*, 31(1): 42–70.
- Ramakrishna D, Ghose MK, Vinu Chandra R, Jeyaram A. 2005. Probabilistic techniques, GIS and remote sensing in landslide hazard mitigation: A case study from Sikkim Himalayas, India, *Geo Cartography International*, 20(4): 53–58.
- Razavi Termeh SV, Pourghasemi HR, Dadgan Fard FA. 2018. Preparation of flood potential map using hierarchical analysis decision methods and TOPSIS and statistical model of incident weight, Case study: Jahrom City, Iran. (In Persian).
- Regmi NR, Giardino JR, Vitek JD. 2010. Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach. *Western Colorado, USA, Geomorphology*, 115(1–2): 172–187.
- Roering JJ, Kirchner JW, Dietrich WE. 2005. Characterizing structural and lithologic controls on deep-seated landsliding: implications for topographic relief and landscape evolution in the Oregon Coast Range. *Geological Society of America Bulletin*, 117(5–6): 654–668.
- Safaripour M, Monavari M, Zare M, Abedi Z, Gharagozlou A. Stud. 2012. Flood Risk Assessment Using GIS (Case study, Golestan Province, Iran). *Polish Journal of Environmental*, 21(6): 1817–1824.
- Sajedi-Hosseini F, Malekian A, Choubin B, Rahmati O, Cipullo S, Coulon F, Pradhan B. 2018. A novel machine learning-based approach for the risk assessment of nitrate

- groundwater contamination. *Science of the Total Environment*, 10(644): 954–962.
- Shahabi M, Sadoddin A. 2009. Bayesian decision network approach to predict the effects of drought management measures on wheat cultivation in Golestan province. *Proceedings of the Fifth National Conference on Watershed Management*. (In Persian).
- Shannon CE. 1948. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3): 379–423.
- Sharma LP, Patel N, Ghose MK, Debnath P. 2010. Influence of Shannon's entropy on lands lide -causing parameters for vulnerability study and zonation-a case study in Sikkim, India. *Arabian Journal of Geoscience*, 5(3): 421–431.
- Shirani K, Pasandi M, Arabameri A. 2018. Landslide susceptibility assessment by dempster-shafer and index of entropy models, Sarkhoun Basin (Iran). *Natural Hazards*, 93(3): 1379–1418.
- Tehrany MS, Pradhan B, Jebur MN. 2013. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule-based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical model in GIS. *Journal of Hydrology*, 504: 69–79.
- Van Western CJ. 2002. Use of weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping, pp. 1–21.
- Yamani M, Abbasi M. 2020. Evaluation of flooding below Gadar Catchments based on morphometric parameters and statistical correlation. *Town and Country Planning*, 12(1): 205–224. (In Persian).
- Yesilnacar EK. 2005. The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey, PhD Thesis. Department of Geomatics the University of Melbourne, 423 p.
- Yufeng S, Fengxiant J. 2009. Landslide stability analysis based on generalized information entropy. *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, pp. 83–85.



Fars Agricultural and Natural Resources
Research and Education Center



Agricultural Research, Education
and Extension Organization

Prioritization of Effective Factors and Flood Susceptibility Zonation Using Probabilistic Models and GIS Environment in Gorganrood Watershed Golestan Province

Kourosh Shirani^{*1}, Mohamdali Sadri²

1- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

2- M.Sc., Islamic Azad University, Lenjan, Isfahan, Iran

Extended Abstract

Introduction and Objective

Floods and earthquakes are the most common and unpredictable natural events that harm communities by affecting life and property and affect the landforms of the basin. Therefore, in ways to reduce the effects of natural events, The main goal has changed to public awareness and emphasis on informing the people in line with preventive measures before the occurrence of abnormal events. Considering these explanations and the need to compare and evaluate the effectiveness of probabilistic statistical methods, The main goal of this research is to investigate the morphological, hydrological and climatic factors affecting the occurrence of floods, Modeling and evaluation of land sensitivity potential in Gorganrood watershed to flood occurrence. Also, the most important innovation of the current research compared with to the previous researches related to risk zonation in the country, the comparison of two probabilistic methods of Shannon entropy and weight of evidence in order to determine the most efficient model and increase the accuracy of flood prediction maps.

Materials and Methods

1- Selection of the study area, Collecting and preparing maps of effective factors as independent variables, 15 factors were considered in this research. 2- The flood event distribution map was prepared

Article Type: Research Article

***Corresponding Author E-mail:** K_sh424@yahoo.com

Citation: Shirani, K., Sadri, M.A. 2023. Prioritization of Effective Factors and Flood Susceptibility Zonation Using Probabilistic Models and GIS Environment in Gorganrood Watershed Golestan Province. Watershed Management Research. 36(1): 111-131.

DOI: 10.22092/WMRJ.2022.358648.1473

Received: 21 April 2022, **Received in revised form:** 06 June 2022, **Accepted:** 21 June 2022, **Published online:** 21 March 2023

Watershed Management Research, VOL. 36, No.1, Ser. No: 138, Spring 2023, pp. 111-131.

Publisher: Regional Information Center for Science and Technology

©Author(s)



using the information received from the Ministry of Energy and field observations as a dependent variable, and it was divided into two groups of test points (30%) and training points (70%). 3- Quantifying the effective factors with the help of the frequency ratio index and also performing the multilinear test (independence of the effective factors). 4- Implementation of entropy and weight of evidence models, Preparation of flood sensitivity zoning maps and classifying them into five categories: very low, low, medium, high and very high. 5- Assessing the accuracy of classification and validation of zoning maps and predicting sensitivity to flood events. 6- Determining the importance of effective factors and choosing the most suitable model.

Results and Discussion

In total, based on the calculated weights of both entropy index and weight of evidence models, in the order of factors land use, altitude, Normalized difference vegetation index (NDVI), soil, Topographic Wetness Index (TWI), Drainage density, Stream power index, slope (SPI), Topographic position index (TPI), lithology, average annual precipitation, Infiltration number, Profile curvature, Stream frequency and Intensity of daily rainfall are effective in flood occurrence. In this research, the land use factor and then the vegetation cover factor have a high priority in the occurrence of floods due to land use changes. The intensity of rainfall is in the last rank, but its importance and influence should not be ignored along with other factors. The maps resulting from flood risk zonation by both models indicate the high accuracy of zone classification and proper distribution of flood points in high and very high zone. Also, based on the receiver operator characteristic (ROC) curve and accuracy classification levels, the efficiency of both models is in the very good category (0.8-0.9). In terms of comparing the models to each other, the results of the area under the curve (AUC) values of the Shannon entropy model show a higher score accuracy in both testing and training situations (0.94 and 0.98) than the Bayesian weighting method (83.83). 0 and 0.88) which indicates a high correlation between the prepared flood sensitivity map and the distribution map of the number of flood events.

Conclusion and Suggestions

In this research, in order to prepare a map of flood event zoning, 368 flood zones with a repetition number of 782 flood events and 15 factors affecting flood events were used. Based on the fitting of both models and the prioritization of the factors affecting the occurrence of floods, it was determined altogether that land use, altitude and vegetation factors have importance and priority in the occurrence of floods in the study area and Profile curvature, Stream power index and Intensity of daily rainfall factors were placed in the last priorities. The results showed that Shannon's entropy model has the appropriate class threshold in classification, and by using 30% of flood occurrence zones, it has more priority for zonation and flood occurrence prediction. But in general, both models are effective in zoning and predicting flood occurrences.

Keywords: Flood, Gorganrood, Shannon entropy index, weight of evidence, zonation