

ارزیابی روش شاخص آماری در تهیه نقشه حساسیت به وقوع سیل

ادریس معروفی نیا^{۱*}، ابراهیم نوحانی^۲، خه بات خسروی^۳، کامران چپی^۴

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۰۴

^۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مهاباد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، مهاباد

^۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دزفول

^۳- دانشجوی دکتری آب‌خیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

^۴- استادیار گروه آب‌خیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: edris.marufynia1389@gmail.com

چکیده

سیل یکی از فجایع موجود در طبیعت بوده که از قدیم الایام اتفاق افتاده است. هدف این تحقیق ارزیابی روش‌های شاخص آماری برای تهیه نقشه احتمال سیل می‌باشد. بدین‌منظور از پارامترهای طبقات ارتفاعی، شیب، انحنا، زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، توان آبراهه، میانگین بارندگی، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی و کاربری اراضی در حوضه آبخیز هراز در استان مازندران استفاده گردید. جهت تهیه نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۳ از تصویر ماهواره Landsat و نرم‌افزار ENVI 5.1 و الگوریتم شبکه عصبی استفاده شد. نقشه‌های رقومی کلیه پارامترها با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS 10.1 و SAGA GIS 2 با فرمت رستری تهیه شدند. سپس موقعیت جغرافیایی ۲۱۱ نقطه سیل‌گیر در منطقه تهیه گردید. نقاط به‌صورت تصادفی به دو گروه متشکل از ۱۵۱ نقطه (۷۰٪) و ۶۰ نقطه (۳۰٪) به‌ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی تقسیم شدند. مجموعه نقاط گروه واسنجی به‌عنوان متغیر وابسته و پارامترهای تأثیرگذار بر سیل به‌عنوان متغیر مستقل به‌روش نسبت فراوانی معرفی شدند. سپس احتمال رخداد سیل برای هر کلاس از هر پارامتر محاسبه گردید. در نهایت وزن‌های به‌دست‌آمده برای هر کلاس در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در لایه‌های مربوطه اعمال گردیده و نقشه احتمال سیل منطقه مورد مطالعه به‌دست آمد. دقت پیش‌بینی این روش در تهیه نقشه‌های حساسیت به وقوع سیل برای حوضه آبخیز هراز ۹۰ درصد می‌باشد. یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که تکنیک حاضر به‌منظور پیش‌بینی پتانسیل خطر سیل مخصوصاً در حوضه‌های فاقد آمار، با توجه به دقت بالای مدل می‌تواند مفید و قابل اعتماد باشد.

واژه‌های کلیدی: احتمال سیل، نسبت فراوانی، واسنجی و اعتبارسنجی، هراز، GIS

Evaluation of Statistical Index Method in Flood Susceptibility Mapping

E Merufinia^{1*}, E Nohani², K Khosravi³, K Chapi⁴

Received: 13 August 2015

Accepted: 18 October 2016

¹- Ph.D candidate, Young Researchers and Elite Club, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran

²- Assist. Professor, Young Researchers and Elite Club, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

³- Ph.D student, Dept. of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources Univ. Sari, Iran

⁴- Assist. Professor, Dep. of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Univ. of Kurdistan, Sanandaj, Iran

*Corresponding Author, Email: edris.marufynia1389@gmail.com

Abstract

Flood is one of the natural catastrophes which has been occurring since ancient times. The main purpose of this study is assessing the statistical index methods used for flood mapping. Consequently, elevation, slope, land topography, the land wetness index, stream power, rainfall average, distance from the river, geology and landuse parameters of the Haraz watershed located in Mazandaran province were used. In order to prepare the landuse map of 2013, the images of Landsat Satellite, ENVI 5.1 and neural networks algorithm were utilized. The digital maps of all parameters were provided using ArcGIS software 10.1 and SAGA GIS 2 with Raster format. Then, the geographical positions of the 211 floodpoints of the region were prepared. These floodpoints were randomly divided into two groups, with 151 points (71%) and 61 points (30%) for calibration and validation, respectively. The set of calibration group points and effective parameters on the flood were introduced as the dependent and independent variables respectively using the frequency ratio method. Then, the probability of the flood occurring for each class of parameters was calculated. At the end, the obtained weights for each class in the Geographical Information System (GIS) were applied to the corresponding layer and flood risk map of the studied region was prepared. The prediction accuracy of this method in order to prepare map within the region of Haraz is equal to 90 percent. The findings imply that the present technique for predicting the potential of flood risk is useful and reliable, especially for regions with no statistical data.

Keywords: Calibration and validation, Flood probability, Frequency ratio, GIS, Haraz City

مقدمه

همواره طغیان آب و سرازیر شدن آن به اماکن

مسکونی، از جمله حوادث طبیعی شایع در ایران پس از زلزله است که حیات بشر را به مخاطره می‌اندازد، سیل‌ها در مقیاس جهانی ویرانگرترین فاجعه ملی و عامل بیشترین تعداد مرگ و میر و خسارات هستند. آپولوت (۲۰۱۳) بیان کرده است که بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸ تقریباً ۹۹ میلیون مردم در سال توسط سیلاب در جهان تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. کرون (۲۰۱۲) سیلاب را نتیجه بارش سنگین و ذوب برف که از رودخانه‌ها به سمت سیلاب دشت طغیان کرده و به‌طور موقت اراضی اطراف بپوشاند، تعریف کرده است.

همه روزه در سراسر جهان وقایع زیادی رخ می‌دهد که تعدادی از آنها تبدیل به بلایای طبیعی می‌شوند. بلایای طبیعی در واقع یک فاجعه یا مصیبت ناشی از وقوع یک پدیده طبیعی پرخطر مانند سیلاب، خشکسالی، زلزله، رانش زمین، طوفان و یا آتشفشان است که باعث وارد آمدن خسارت مالی و جانی فراوان به جوامع انسانی می‌گردد، اما در مناطقی که ارتباط مستقیم با انسان ندارند و منافع انسانی در میان نیست این وقایع تبدیل به بلایای طبیعی نمی‌شوند. سیل جزء آن دسته از حوادث طبیعی است که همیشه به‌عنوان بلایای طبیعی قلمداد شده است (ثروتی و همکاران ۱۳۹۰).

ارسال هشدارهای مناسب در مواقع خطر سیل و تسهیل عملیات امداد و نجات را فراهم می‌سازد (نیک‌نژاد و همکاران ۱۳۸۵). با تمام اهمیتی که آب در اقتصاد ایران دارد و خرابی‌هایی که هر سال از سیلاب‌ها به بار می‌آید و آب‌هایی که بدون استفاده از کشور خارج یا به کویر سرازیر می‌شود، هنوز آنچنان که باید برنامه‌ریزی اصولی در این زمینه صورت نگرفته است. یکی از راه‌های سازگاری برای مقابله با شرایط خشکی و کمبود آب استفاده بهینه از منابع آب است. باید سعی کرد تا حد ممکن از ریزش‌های جوی، جریان آب‌های سطحی و منابع زیرزمینی به نحو مطلوب استفاده شود و این کار فقط با شناخت پدیده‌های هیدرولوژیکی عملی خواهد بود. منابع آب‌های سطحی یکی از سرمایه‌های قابل تجدید کشور است که باید از آن بیشینه استفاده را به عمل آورد.

بسیاری از محققان داخلی و خارجی به مطالعه و تهیه نقشه‌های سیل پرداختند: بشارتی و همکاران (۱۳۸۵) در اولویت‌بندی مکانی مناطق سیل‌خیز در حوضه آبخیز رودک با استفاده از مدل شبیه‌سازی بارش-رواناب HEC-HMS نقش کلیه زیرحوضه‌ها در هیدروگراف سیل خروجی تعیین و براساس آن اولویت‌بندی را انجام دادند. در این تحقیق زیرحوضه کلکان به‌عنوان زیرحوضه سیل‌خیز شناسایی شد. همچنین نتایج نشان می‌دهد میزان مشارکت زیرحوضه‌ها در سیل خروجی، با مساحت آنها رابطه مستقیم ندارد. خیری‌زاده و همکاران (۱۳۹۱) پتانسیل خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز مردق‌چای را با استفاده از مدل ANP^۱ پهنه‌بندی کردند و نتیجه گرفتند ۵ درصد از سطح حوضه در خطر وقوع سیلاب بسیار زیاد و حدود ۲۷ درصد از سطح حوضه در خطر وقوع سیلاب زیاد است. این مناطق بیشتر در قسمت‌های پایین‌دست حوضه واقع شده‌اند. پرادهان (۲۰۰۹) نقشه سیل‌خیزی و محدوده‌های خطر سیل را با استفاده از داده‌های شیب، توپوگرافی، شبکه زهکشی، خاک، پوشش زمین، مقدار بارش، مقدار تجمع جریان و سیل‌های تاریخی، از طریق تصاویر ماهواره‌ای

پدیده سیل به‌صورت کنونی خود در کشور ما بیش از آن که ناشی از وقوع بارش‌های شدید باشد، از عوارض به هم خوردن تعادل طبیعی و شرایط جغرافیایی منطقه می‌باشد. به‌طوری‌که بروز بارش‌های معمولی نیز موجب جاری شدن سیلاب می‌گردد. از بین رفتن پوشش گیاهی در اثر عدم درک صحیح از مدیریت منابع تجدید شونده، نبود جایگاهی برای آن در سیاست‌گذاری‌های کلان شرایطی را فراهم نموده است که هر از چندگاهی شاهد بروز سیلاب و اثرات تخریبی آن و از دست رفتن میلیون‌ها تن از خاک‌های با ارزش باشیم. برونسترت (۲۰۰۳) کریستنس و برادران (۲۰۰۳) یکی از دلایل تکرار فراوان این پدیده را عمدتاً در نتیجه شهرسازی در طول رودخانه‌ها و قطع جنگل‌ها می‌دانند. در بروز و یا تشدید سیلاب عوامل متعددی دخالت دارند. این عوامل را می‌توان در حوضه آبخیز و رودخانه مورد بررسی قرار داد.

به‌طورکلی دو دسته از عوامل اقلیمی و حوضه‌ای در ایجاد سیلاب‌ها نقش دارند. منشأ بسیاری از سیلاب‌ها به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک رگبارهای با شدت زیاد و تداوم نسبتاً کوتاه است. بنابراین در بررسی رگبارها باید به تداوم، شدت و توزیع زمانی و مکانی آنها در بروز سیل توجه شود. از مهمترین عوامل حوضه‌ای می‌توان به کاربری اراضی، وضعیت زمین‌شناسی، شیب و شبکه زهکشی و بطورکلی عوامل مورفومتریک اشاره نمود (ثقفیان و همکاران ۱۳۸۵، روقانی و همکاران ۲۰۰۷). ثروتی و همکاران (۱۳۹۰) عوامل تخریب پوشش گیاهی، تجاوز به حریم رودخانه‌ها و شدت بارندگی را از مهمترین عوامل مؤثر در وقوع سیل قلمداد کرده‌اند.

یکی از روش‌های مهم در کنترل و کاهش رواناب سطحی جهت به تعویق انداختن سیل، عملیات آبخیزداری می‌باشد. یکی دیگر از روش‌های کاهش خطرات سیل پهنه‌بندی سیل می‌باشد که اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با طبیعت، سیلاب‌ها و اثرات آن بر اراضی دشت سیلابی و تعیین حریم رودخانه‌ها ارائه می‌دهند، در نتیجه امکان

(RADARSAT) به صورت لایه های رقومی در سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه کرد. از همپوشانی لایه های مذکور و استخراج ضرایبی مناطق سیل خیز را در چهار دامنه خطر بالا، متوسط، کم و بدون خطر سیل تعیین کرد. تهرانی و همکاران (۲۰۱۴) به شناسایی نقاط سیل گیر براساس وقوع سیل های گذشته و پارامترهای مؤثر بر وقوع آنها با استفاده از روش های ترکیبی مانند درخت تصمیم گیری، رگرسیون لجستیک و ماشین بردار پشتیبان پرداختند. نتایج تحقیق آن ها حاکی از آن بود که روش های WOE (وزن واقعه) و RBF-SVM (ماشین بردار پشتیبان) با بیشترین صحت (به ترتیب دارای سطح زیر منحنی یا AUC ۹۶/۴۸ و ۹۵/۶۷ درصد) در ارزیابی پتانسیل سیل، به عنوان روش های برگزیده در منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند.

روش های سنتی مدل سازی بارش-رواناب برای تحلیل های جامع رودخانه ها و مناطق تحت مشکل آب-گرفتگی، مناسب نیستند. یکی از دلایل اصلی محدودیت مدل های بارش-رواناب، نیاز مبرم آن ها جهت جمع آوری داده های مختلف است. از این رو به دلیل کمبود داده در بیشتر حوضه های آبخیز، بسیاری از محققان (تهرانی و همکاران ۲۰۱۳، پرادهان و همکاران ۲۰۱۴، واندرز و همکاران، ۲۰۱۳) برای مطالعات هیدرولوژیکی و تعیین مناطق سیل گیر به استفاده از تجزیه و تحلیل های مکانی در قالب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) روی آورده اند. بنابراین روش های به کار برده شده که طی سال های اخیر به منظور بررسی و تعیین نقشه های پتانسیل سیل شامل: تکنیک نسبت فراوانی، تحلیل های چند متغیره آماری، WOE یا وزن دهی شواهد^۲، فرایند تحلیل سلسله مراتبی، روش ماشین بردار پشتیبان و درخت تصمیم گیری اشاره کرد (تهرانی و همکاران ۲۰۱۴، مورلی و

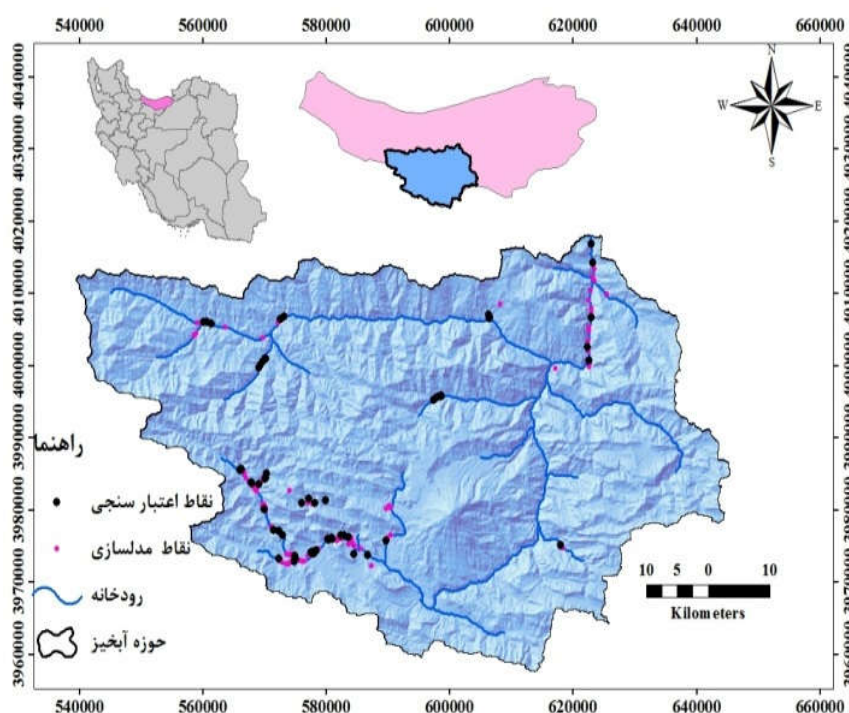
همکاران ۲۰۱۴، گرین وود و همکاران ۲۰۱۴). همچنین بسیاری از محققان به منظور پیش بینی و ارزیابی خطرات سیل به تجزیه و تحلیل پارامترهای مؤثر در وقوع سیل و آب گرفتگی اراضی پرداخته اند. از این رو با توجه به مطالب فوق و کمبود اطلاعات و داده های دارای کیفیت مناسب در بیشتر حوضه های آبخیز کشور، ارائه روشی نوین جهت ارزیابی پتانسیل سیل خیزی حوضه های آبخیز بسیار حائز اهمیت است. بنابراین هدف اصلی تحقیق حاضر موارد زیر می باشد:

- ۱- ارزیابی کارایی روش شاخص آماری در ارائه نقشه های احتمال سیل
- ۲- تعیین مناطق سیل گیر جهت کاهش خسارات ناشی از آن.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز هراز بین ۴۳' ۵۱° تا ۳۶' ۵۲° طول شرقی و ۴۵' ۳۵° تا ۲۲' ۳۶° عرض شمالی واقع شده است. منطقه مورد مطالعه در جنوب شهرستان آمل و استان مازندران واقع شده است و از نظر تقسیمات سیاسی جزء شهرستان آمل می باشد. وسعت حوضه آبخیز ۴۰۱۴/۰۷۵ کیلومتر مربع می باشد و کمینه ارتفاع حوضه ۳۰۰ متر و بیشینه ارتفاع آن ۵۶۰۰ متر می باشد. از مهمترین رودخانه های حوضه می توان به رودخانه های نور، آخن سر، شیرکلارود، نمارستاق اشاره کرد. مراکز مهم سکونت حوضه آبخیز هراز عبارتند از پلور، نشل، تیران، رینه، کندوان، آب اسک، گزنک، بایجان، بلقلم، بلده و نور.



شکل ۱- نقشه موقعیت حوزه آبخیز هراز در ایران و استان.

انتخاب پارامترهای مؤثر در تهیه نقشه‌های پتانسیل سیل

در تحقیق حاضر فاکتورهای طبقات ارتفاعی، درصد شیب، انحنا، زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی^۱ (TWI)، توان آبراهه، میانگین بارندگی، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی و کاربری اراضی به عنوان فاکتورهای مؤثر در وقوع سیل در حوزه آبخیز هراز به منظور تهیه نقشه پتانسیل سیل خیزی انتخاب شدند (تهرانی و همکاران ۲۰۱۴). نقشه‌های رستری آنها با اندازه پیکسل ۸۴ متر تهیه شدند.

نقشه طبقات ارتفاع زمین بر اساس مدل رقومی ارتفاع (با قدرت تفکیک ۸۴ متر) و نرم‌افزار ArcGIS 10.1 تهیه شد. در نهایت نقشه ارتفاع حوزه ۹ کلاس، تقسیم بندی گردید. نقشه شیب زمین به دلیل تأثیر مستقیم بر رواناب سطحی، یکی از عوامل مهم در وقوع سیل حوزه‌های آبخیز به‌شمار می‌رود. این نقشه با تکیه بر مدل رقومی

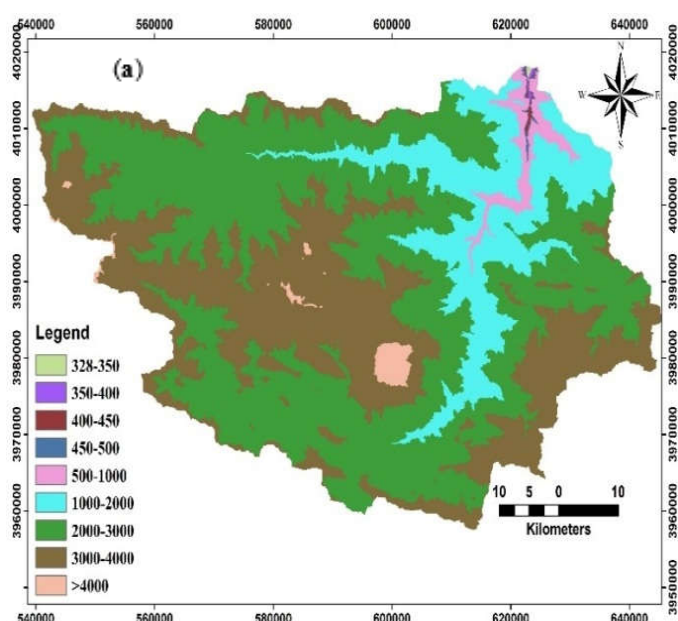
ارتفاع (با قدرت تفکیک ۸۴ متر) و نرم‌افزار ArcGIS 10.1 بر حسب درجه تهیه و سپس به پنج کلاس طبقه‌بندی شد. نقشه انحنا، زمین براساس مدل رقومی ارتفاع (با قدرت تفکیک ۸۴ متر) و نرم‌افزار ArcGIS 10.1 تهیه شد. نقشه مزبور به سه کلاس انحنا، مقعر، انحنا محدب و تخت (بدون انحنا) طبقه‌بندی شد. شاخص رطوبت توپوگرافی یکی از شاخص‌های تأثیرگذار بر وقوع و پتانسیل سیل در حوزه‌های آبخیز به‌شمار می‌رود. شاخص رطوبت توپوگرافی با توجه به رابطه زیر تعریف می‌گردد (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۴، تهرانی و همکاران ۲۰۱۳) برای تهیه این نقشه از نرم‌افزار SAGA GIS 2 استفاده شد. نقشه حاصل به پنج کلاس تقسیم گردید.

^۱ Topographic wetness index

در کاربری و پوشش اراضی نتایج چشم‌گیری در پتانسیل سیل‌خیزی حوضه‌های آبخیز دارد (محمد اسماعیل ۱۳۸۹). نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز هراز با استفاده از ماهواره لندست ۸ تهیه شد. نقشه کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی و طبقه‌بندی نظارت شده در محیط نرم‌افزاری ENVI 5.1 به هفت کلاس طبقه‌بندی شد.

بررسی وقوع سیل‌های گذشته

برای برآورد سیل‌های آینده در منطقه مورد مطالعه، تجزیه و تحلیل رخداد گذشته سیلاب‌ها ضروری می‌باشد (ماناندهار ۲۰۱۰). حوضه آبخیز هراز به دلیل توپوگرافی آن، بالا بودن بارش، تجاوز به حریم رودخانه‌ها، ریزش کوه و غیره دارای سیلاب‌های زیادی می‌باشد. مثلاً در طغیان سال ۱۳۸۳ علت اصلی طغیان رودخانه ریزش کوه و مسدود شدن مسیر رودخانه گزارش گردید (سلیمانی ۱۳۹۰). نقاط سیل‌گیری مشخص شده در این تحقیق (۲۱۱) موقعیت نقاط سیل‌گیر) به صورت تصادفی به یک گروه متشکل از ۱۵۱ نقطه (۷۰٪) برای مدل‌سازی و ساخت نقشه و یک گروه متشکل از ۶۰ نقطه (۳۰٪) برای اعتبارسنجی نقشه تقسیم شدند. موقعیت نقاط سیل‌گیر در شکل ۱ ارائه شده است.



$$TWI = \ln\left(\frac{As}{\tan\beta}\right) \quad [1]$$

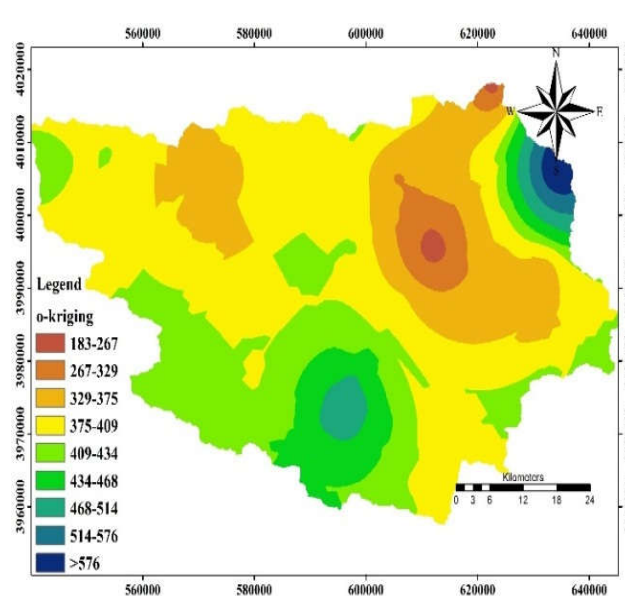
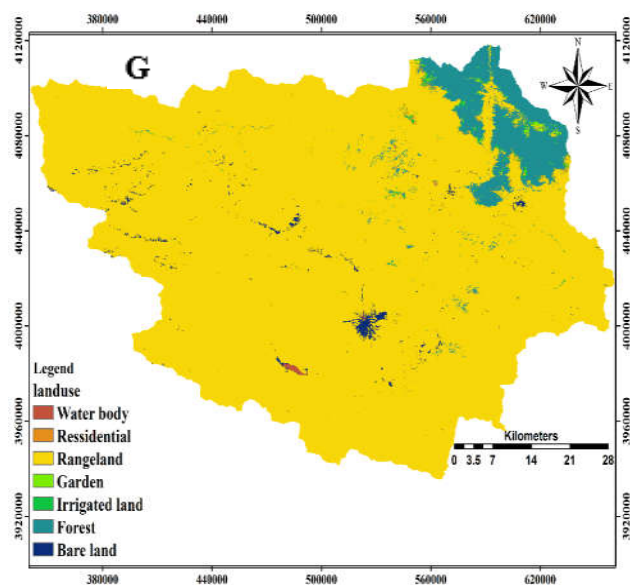
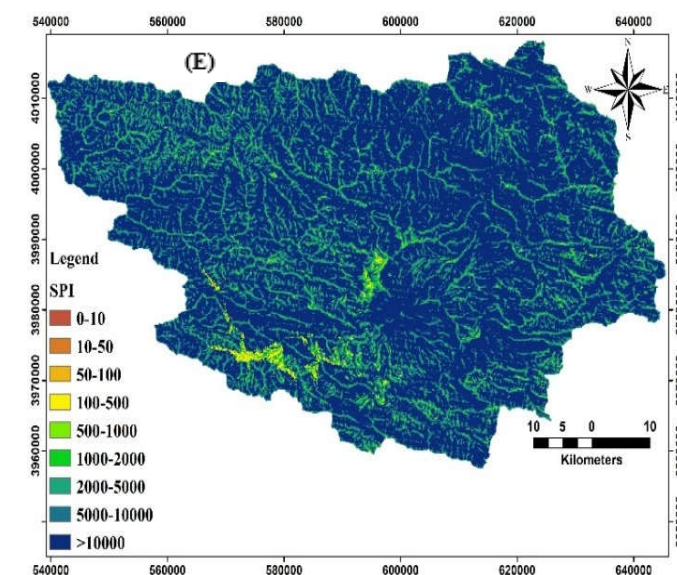
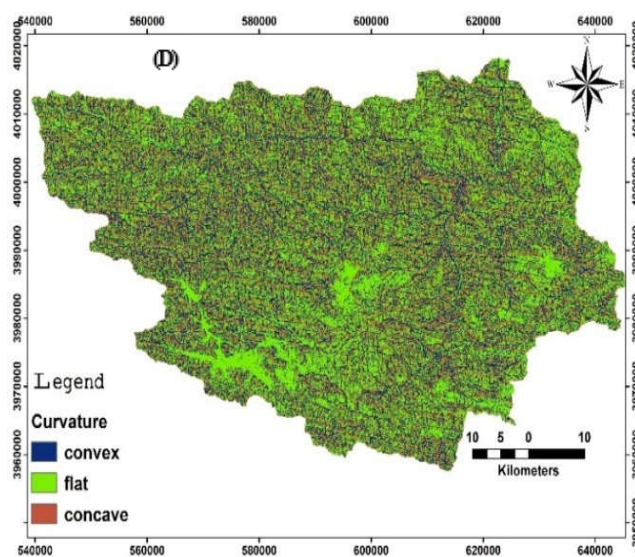
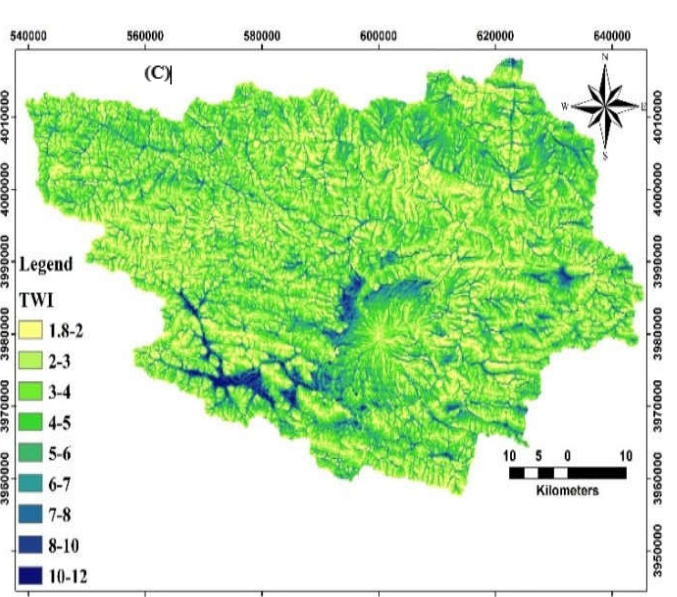
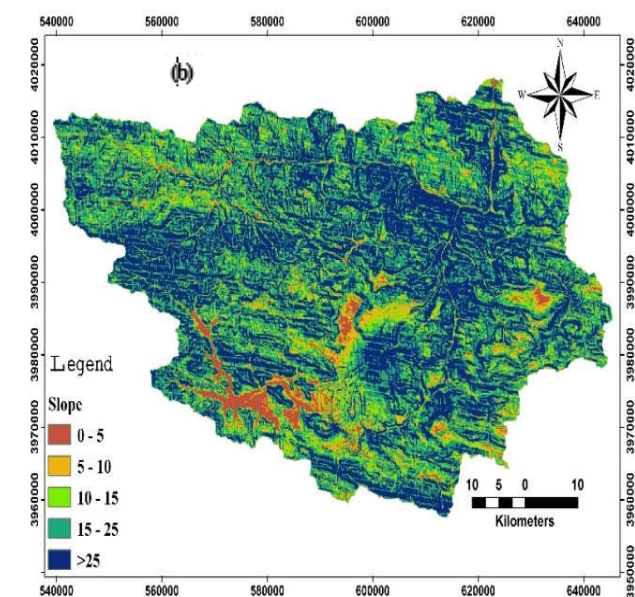
که در آن As سطح ویژه حوضه آبخیز (به صورت مساحت اراضی بالادست عرض کنتور، تقسیم بر عرض کنتور تعریف می‌گردد) و β شیب زمین (بر حسب درجه) می‌باشند.

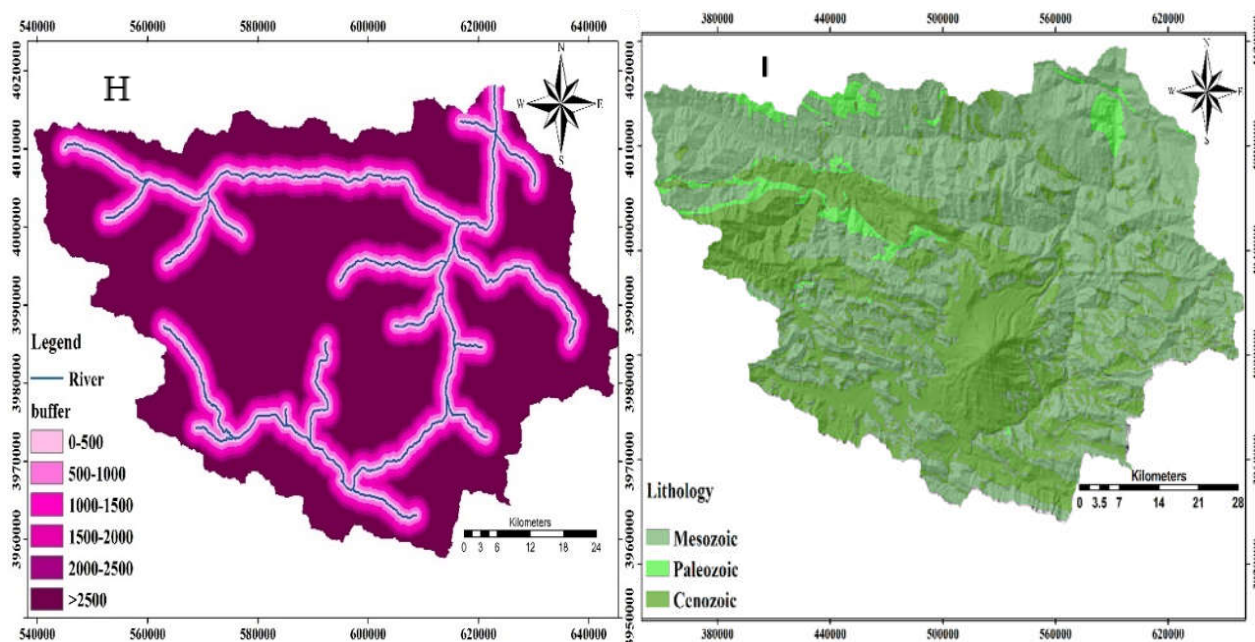
شاخص توان آبراهه^۱ (SPI) یکی از شاخص‌های پارامترهای مهم در پتانسیل سیل‌خیزی حوضه‌های آبخیز به‌شمار می‌رود. شاخص توان آبراهه با توجه به رابطه زیر تعریف می‌گردد (پورقاسمی و همکاران ۲۰۱۴، تهرانی و همکاران ۲۰۱۳)، برای تهیه نقشه این شاخص از نرم‌افزار SAGA GIS 2 استفاده شد. نقشه حاصل به ده کلاس تقسیم گردید.

$$SPI = A_s \tan\beta \quad [2]$$

به‌منظور تهیه نقشه میانگین بارندگی از داده‌های بارندگی ۱۷ ایستگاه باران‌سنج در دوره زمانی ۱۳۹۰-۱۳۷۰ استفاده شد. پس از بررسی دقت روش‌های مختلف درونیابی در نرم‌افزار ArcGIS 10.1، نقشه توزیع میانگین بارندگی سالانه حوضه بر اساس روش کریجینگ معمولی (به دلیل وجود کمترین خطا) تهیه گردید. نقشه حاصل نیز به ۹ کلاس طبقه‌بندی شد. فاصله از رودخانه‌ها یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در سیل‌گرفتگی اراضی حاشیه رودخانه‌ها می‌باشد (تهرانی و همکاران ۲۰۱۴). نقشه مذکور با استفاده از دستور Multiple Ring Buffer و نرم‌افزار ArcGIS 10.1 تهیه و به شش کلاس تقسیم شد. زمین‌شناسی به دلیل تأثیر مستقیم بر میزان نفوذپذیری و رواناب سطحی، یکی از عوامل مهم در پدیده سیل حوضه‌های آبخیز است، این نقشه با فرمت رستری و اندازه پیکسل ۸۴ متر با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.1 تهیه و نقشه حاصل به پنج کلاس طبقه‌بندی شد. کاربری اراضی نتیجه روابط متقابل پارامترهای اجتماعی-فرهنگی و توان بالقوه سرزمین است. تغییرات

¹ Stream power index (SPI)





شکل ۲- نقشه‌های ورودی: (a) شیب، (b) طبقات ارتفاعی، (c) شاخص رطوبت توپوگرافی، (d) انحناى زمین (e) شاخص توان آبراهه (f) بارندگی (g) فاصله از رودخانه (h) کاربری اراضی (i) زمین شناسی.

روش شاخص آماری

روش شاخص آماری یک روش آماری دو متغیره است که اولین بار توسط ون‌وسترن (۱۹۹۷) برای نقشه حساسیت به زمین لغزش پیشنهاد شده است. مقادیر وزن معین برای هریک از کلاس‌های پارامترهای موثر در وقوع سیل، به صورت لگاریتم طبیعی تراکم سیلاب در هرکلاس، تقسیم بر تراکم سیلاب در کل نقشه به دست می‌آید. فرمول این روش به صورت زیر است:

$$W_{SI} = \ln\left(\frac{E_{ij}}{E}\right) = \ln\left(\frac{\frac{L_{ij}}{P_{ij}}}{\frac{L_T}{P_L}}\right) \quad [3]$$

وزن معین برای هر کلاس مشخص i از پارامتر j W_{SI} تراکم سیلاب‌ها در داخل کلاس i پارامتر j E_{ij} تراکم کل سیلاب در داخل کل نقشه، L_{ij} تعداد سیلاب‌ها در داخل کلاس i پارامتر j P_{ij} تعداد پیکسل‌های کلاس i پارامتر j L_T تعداد کل سیلاب‌ها در کل نقشه و P_L تعداد کل پیکسل‌های نقشه.

در نهایت نرخ‌های به‌دست‌آمده برای هر کلاس با استفاده از این روش در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در لایه‌های مربوطه اعمال‌گردیده و نقشه پیش‌بینی پتانسیل احتمال سیل حوضه آبخیز هراز به‌دست آمد. سرانجام، نقشه تهیه شده به پنج کلاس حساسیت به وقوع سیل شامل خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم بندی گردید.

اعتبارسنجی نقشه‌های پیش‌بینی پتانسیل سیل

به‌منظور اعتبارسنجی نقشه پیش‌بینی پتانسیل سیل، مجموعه نقاط اعتبارسنجی روش (۶۰ نقطه، ۳۰ درصد مجموع نقاط) استفاده شدند. در این مرحله ۶۰ نقطه در محیط GIS با نقشه حساسیت سیل روی هم‌گذاری شدند، سپس با استفاده از دستور Sample هر کدام از نقاط که در کلاس‌های نقشه پیش‌بینی قرار گرفتند نمونه‌برداری شدند و بدین ترتیب صحت‌سنجی نقشه پیش‌بینی با استفاده از هیستوگرام فراوانی وقوع نقاط سیل‌گیر انجام شد.

جدول ۱- وزن به دست آمده توسط روش شاخص آماری بین وقوع سیل‌های گذشته و پارامترهای مؤثر بر وقوع سیل.

عامل	کلاس	درصد پیکسل - ها	تعداد وقوع سیل	درصد وقوع سیل	وزن تأثیر (SI)
طبقات ارتفاعی (m)	۳۲۸-۳۵۰	۰/۰۱۹	۰	۰	None
	۳۵۰-۴۰۰	۰/۰۴۲	۰	۰	None
	۴۰۰-۴۵۰	۰/۰۸۲	۲	۱/۳۲	۲/۷۸
	۴۵۰-۵۰۰	۰/۱۱	۵	۳/۳۱	۳/۳۶
	۵۰۰-۱۰۰۰	۱/۹۸	۴۶	۳۰/۴۶	۲/۷۴
	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۱۳/۹	۴۳	۲۸/۴۸	۰/۷۲
	۲۰۰۰-۳۰۰۰	۴۹/۶	۵۵	۳۶/۴۲	-۰/۳۱
	۳۰۰۰-۴۰۰۰	۳۳/۱	۰	۰	None
	۴۰۰۰<	۱/۰۱	۰	۰	None
شیب (%)	۰-۵	۳/۸	۴۵	۲۹/۸۰	۲/۰۶
	۵-۱۰	۷/۶	۴۵	۲۹/۸۰	۱/۳۶
	۱۰-۱۵	۱۲/۹	۲۳	۱۵/۲۳	-۰/۱۷
	۱۵-۲۵	۳۵/۷۷	۲۵	۱۶/۵۶	-۰/۷۷
	> ۲۵	۳۹/۷۵	۱۳	۸/۶۱	-۱/۵۳
انحنای زمین	انحنای محدب	۳۷/۹۴	۲۳	۱۵/۲۳	-۰/۹۸
	تخت (بدون انحنای)	۲۶	۴۴	۲۹/۱۴	۰/۳۴
	انحنای مقعر	۳۶	۸۴	۵۵/۶۳	۰/۳۷
شاخص رطوبت توپوگرافی	۱/۸-۲	۱۲/۷۸	۳	۱/۹۹	-۱/۸۶
	۲-۳	۲۵/۴۸	۴	۶۵,۲	-۲/۶۶
	۳-۴	۲۳/۲۱	۹	۵/۹۶	-۱/۳۹
	۴-۵	۱۶/۹۳	۲۸	۱۸/۵۴	۰/۱
	۵-۶	۱۰/۷۵	۴۰	۲۶/۴۹	۰/۹۱
	۶-۷	۶/۳	۳۹	۲۵/۸۳	۱/۴
	۷-۸	۳/۰۷	۱۸	۱۱/۹۲	۱/۳۶
	۸-۱۰	۰/۸۷	۸	۵/۳۰	۱/۸۱
	۱۰-۱۲	۰/۳۹	۲	۱/۳۲	۱/۲۱
شاخص توان آبراهه	۰-۱۰	۰/۰۰۴	۰	۰	None
	۱۰-۵۰	۰/۰۱۴	۰	۰	None
	۵۰-۱۰۰	۰/۰۵۱	۰	۰	None
	۱۰۰-۵۰۰	۰/۵۸	۰	۰	None
	۵۰۰-۱۰۰۰	۰/۹۷	۳	۱/۹۹	۰/۷۲
	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۲/۸	۱	۰/۶۶	-۱/۴۵
	۲۰۰۰-۵۰۰۰	۱۱/۱۶	۸	۵/۳۰	-۰/۷۴
	۵۰۰۰-۱۰۰۰۰	۱۷/۹	۱۱	۷/۲۸	-۰/۸۹
	> ۱۰۰۰۰	۶۶/۴۷	۱۲۸	۸۴/۷۷	۰/۲۴

ادامه جدول ۱- وزن به دست آمده توسط روش شاخص آماری بین وقوع سیل‌های گذشته و پارامترهای مؤثر بر وقوع سیل.

عامل	کلاس	درصد پیکسل‌ها	تعداد وقوع سیل	درصد وقوع سیل	وزن تأثیر (SI)
میانگین بارندگی (mm)	۱۸۷-۲۷۷	۰/۱۳	۴	۲/۶۵	۱/۹۳
	۲۷۷-۳۳۱	۰/۲۹	۲۶	۱۷/۲۲	۲/۳۱
	۳۳۱-۳۶۴	۲/۲۶	۳۵	۲۳/۱۸	۰/۳۷
	۳۶۴-۳۸۴	۱۲/۶۱	۶۲	۴۱/۰۶	۰/۲
	۳۸۴-۳۹۶	۳۷/۷۸	۱۹	۱۲/۵۸	-۰/۸۷
	۳۹۶-۴۱۶	۲۹/۹۱	۵	۳/۳۱	-۱/۳۵
	۴۱۶-۴۴۹	۱۰/۸۱	۰	۰	None
	۴۴۹-۵۰۳	۲/۴۳	۰	۰	None
	>۵۰۳	۲/۸۱	۰	۰	None
فاصله از رودخانه (m)	۵۰۰-۰	۳/۸۵	۱۲۸	۷۷,۸۴	۲/۱۹
	۱۰۰۰-۵۰۰	۳/۶۹	۹	۹۶,۵	-۰/۴
	۱۵۰۰-۱۰۰۰	۳/۵۷	۵	۳۱,۳	-۰/۹۶
	۲۰۰۰-۱۵۰۰	۷/۱۷	۲	۳۲,۱	-۱/۸۵
	۲۵۰۰-۲۰۰۰	۱۷/۲۶	۱	۰/۶۶	-۲/۵۶
	>۲۵۰۰	۱۶/۶۵	۶	۳/۹۷	-۲/۶۵
کاربری اراضی	خاک لخت	۲/۴	۹	۵/۹۶	-۰/۰۶
	جنگل	۵/۹	۵	۳/۳۱	-۲/۱۳
	باغ	۲/۶۸	۰	۰	-۰/۵۷
	اراضی آبی	۱/۰۲	۰	۰	None
	مرتع	۷۶/۹۸	۱۳۲	۸۷/۴۲	۱/۰۵
	مسکونی	۱۰/۸۶	۱	۰/۶۶	None
	پهنه‌های آبی	۰/۱۱	۴	۲/۶۵	۳/۶۵
زمین شناسی	سنوزویک	۳۸/۴۷	۵۵	۳۶/۴۲	۰/۰۵
	مزوزویک	۵۵/۹۲	۸۷	۵۷/۶۲	۰/۰۳
	پالئوزویک	۴/۶۸	۹	۵/۹۶	۰/۲۴

نتایج نقشه‌های پارامترهای مؤثر در وقوع سیل

نقشه پارامترهای ورودی روش شاخص آماری شامل طبقات ارتفاعی، شیب، انحنا، زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، توان آبراهه، میانگین بارندگی، فاصله از رودخانه، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی در شکل (a-i) ارائه شده است.

وزن تأثیر هر کلاس از پارامترهای مؤثر در پتانسیل سیل

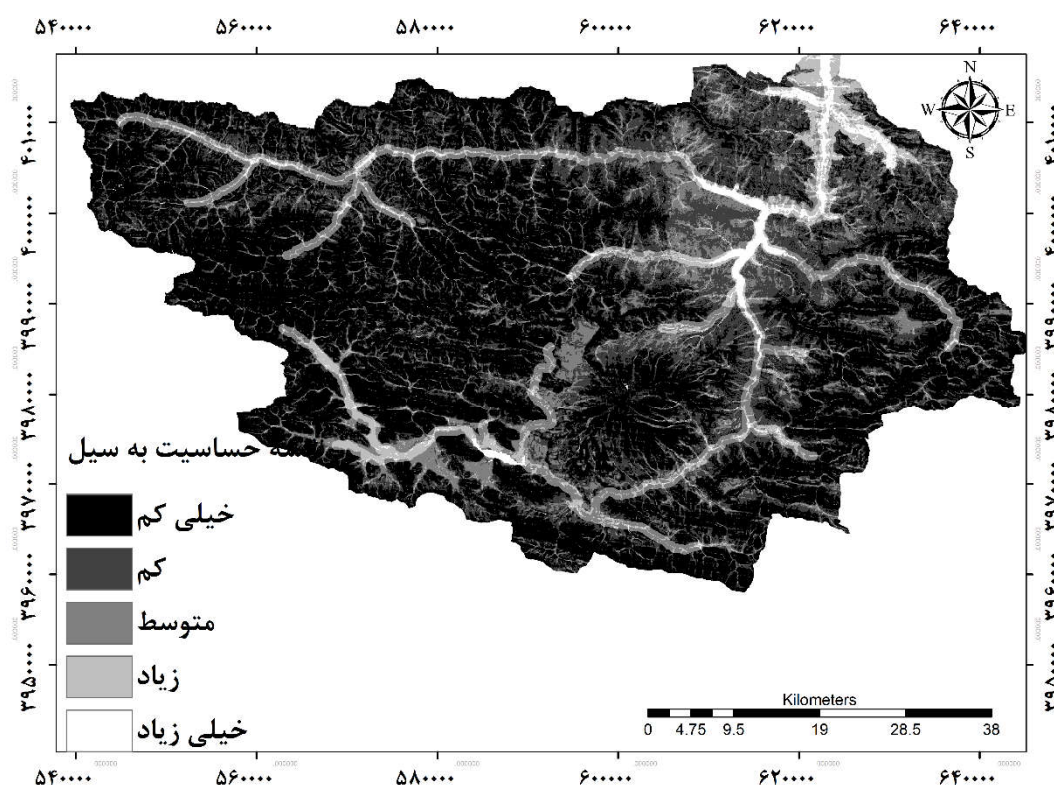
تجزیه و تحلیل‌های مقایسه‌ای بین موقعیت وقوع سیل‌های گذشته و پارامترهای محیطی مؤثر بر وقوع سیل انجام

گرفت و براساس آن، وزن تأثیر هر کلاس از پارامترها به دست آمد. وزن تأثیر هریک از کلاس‌های پارامترهای انتخاب شده برای تکنیک شاخص آماری در جدول ۱ ارائه شده است (هرچه همبستگی بیشتر عدد مثبت و بزرگتر و هرچه همبستگی کمتر عدد کوچکتر و منفی). همان‌طور که از جدول ۱ پیداست برای پارامتر طبقات ارتفاعی بیشترین وزن مربوط به کلاس چهارم (محدوده ارتفاعی ۴۵۰-۵۰۰ متر) می‌باشد. برای متغیر شیب نیز بیشترین

تهیه نقشه پیش‌بینی پتانسیل سیل

در نهایت وزن‌های به‌دست‌آمده برای هر کلاس در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در لایه‌های مربوطه اعمال‌گردیده و با استفاده از تابع روی‌هم‌گذاری Raster Calculator نقشه‌های حساسیت به وقوع سیل برای حوزه آبخیز هراز به‌دست آمد (شکل ۳).

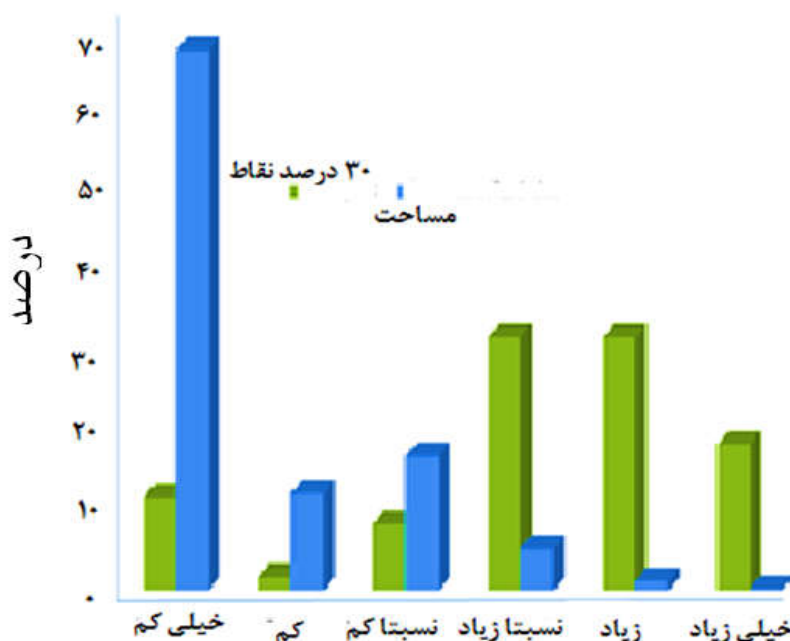
وزن مربوط به کلاس اول (محدوده ۵-۰ درصد) می‌باشد. در نقشه انحناى زمین بیشتر وزن را اراضی مسطح و مقعر به‌خود اختصاص داده‌اند. در شاخص رطوبت توپوگرافی محدوده ۸-۱۰ و برای توان آبراهه کلاس آخر دارای بیشترین وزن می‌باشند. برای فاکتور فاصله از رودخانه کلاس اول یعنی ۵۰۰-۰ متر، برای بارندگی محدوده ۲۷۷-۳۳۰ میلی‌متر، برای زمین‌شناسی کلاس پالئوزویک و برای کاربری اراضی، پهنه‌های آبی بیشترین وزن را به‌خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۳- نقشه حساسیت به وقوع سیل در حوزه آبخیز هراز در استان مازندران.

جدول ۲- محاسبه دقت پیش‌بینی پتانسیل سیل در روش شاخص آماری.

مورد	تعداد سیل
کل وقایع سیل	۶۰
تطابق بین موقعیت سیل و پیش‌بینی پتانسیل سیل	۵۴
عدم تطابق بین موقعیت سیل و پیش‌بینی پتانسیل سیل	۶
دقت پیش‌بینی	$\frac{54}{60} * 100 = 90\%$



شکل ۴- هیستوگرام ارزیابی صحت نقشه حساسیت سیل در حوضه آبخیز هراز.

و متوسط قرار دارد و همچنین نتایج جدول ۲ می‌توان دریافت که روش شاخص آماری در تهیه پهنه‌بندی نقشه پتانسیل مناطق سیل‌گیر دارای کارایی مناسبی می‌باشد. دقت پیش‌بینی روش شاخص آماری برای تهیه نقشه حساسیت به وقوع سیل ۹۰ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

یافته‌های این پژوهش حاکی از دقت مدل شاخص آماری در شناسایی مناطق دارای استعداد سیل‌گرفتگی حوضه آبخیز هراز استان مازندران با دقت پیش‌بینی ۹۰ است. بنابراین استفاده از مدل شاخص آماری احتمالاتی در ارزیابی خطر سیل‌گرفتگی، مفید و قابل اعتماد است که با نتایج مطالعات لی و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد. نتایج پیش‌بینی نشان داد که پارامترهای شیب، ارتفاع، انحنا، زمین، سنگ‌شناسی، بارندگی، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، توان حمل رودخانه و شاخص رطوبت توپوگرافی بر پتانسیل و استعداد سیل‌گرفتگی اراضی تأثیرگذار بوده و به‌کارگیری آن‌ها در مدل‌های احتمالاتی ارزیابی پتانسیل سیل مفید می‌باشد که با یافته‌های تهرانی

ارزیابی دقت نقشه پیش‌بینی استعداد سیل

به‌منظور ارزیابی دقت نقشه پیش‌بینی استعداد سیل، از ۶۰ واقعه سیل مربوط به دوره‌های گذشته استفاده شد که این وقایع برای پیش‌بینی پتانسیل سیل در مدل احتمالاتی وارد نشده‌اند. دقت پیش‌بینی پتانسیل سیل بر اساس روش درصد نسبت فراوانی محاسبه گردید (جدول ۲). نتایج ارزیابی دقت مدل به‌صورت هیستوگرام در شکل ۴ ارائه شده است. تفسیر هیستوگرام به این صورت می‌باشد که در محور افقی هر یک از کلاس‌های مربوط به نقشه حساسیت قرار گرفته است و در محور عمودی درصد مساحت هریک از کلاس‌ها و همچنین درصد وقوع سیل‌های اتفاق افتاده در داخل هر کلاس از نقشه حساسیت سیل درج شده است. با توجه به اینکه ۶۰ نقطه انتخاب شده جهت صحت‌سنجی در واقع نشان‌دهنده شرایط وقوع سیل می‌باشند، بنابراین احتمال حضور این نقاط در کلاس‌های با حساسیت بیشتر (یعنی کلاس‌های خیلی زیاد و زیاد) و حتی در کلاس متوسط نیز وجود دارند. با توجه به هیستوگرام‌های مربوطه که بیشتر نقاط اعتبارسنجی در کلاس‌های خیلی زیاد، زیاد

و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد. مکانیسم تشکیل سیل و سیل‌گرفتگی اراضی در قالب تحلیل‌های مکانی قابل-تعمیم به سایر نقاط حوضه آبخیز است. تجزیه و تحلیل پارامترهای محیطی و مناطق آسیب‌دیده در سیل‌های گذشته روشی بسیار مناسب در ارزیابی خطر سیل و شناسایی مناطق دارای پتانسیل سیل‌گرفتگی است که با نتیجه پژوهش پالارد و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد.

رویکرد ارائه شده در این تحقیق در واقع کاربرد برخی متغیرهای مؤثر بر وقوع سیل که این پارامترها برآیند عوامل مختلف محیطی و انسانی است که براساس نقشه پیش‌بینی خطر سیل ارائه شده می‌توان اقدامات مدیریتی مناسبی جهت کاهش خسارت‌ها و تلفات ناشی از سیل انجام داد. پیشنهاد می‌گردد از سایر روش‌های معمول مانند مثل رگرسیون لجستیک، روش ماشین بردار پشتیبان، WofE، درخت تصمیم‌گیری و غیره استفاده

منابع مورد استفاده

- بشارتی ط، سلیمانی ک، خسروشاهی م، ۱۳۸۵. اولویت‌بندی مکانی مناطق سیل‌خیز در حوضه آبخیز رودک با استفاده از مدل شبیه‌سازی بارش-رواناب HEC-HMS. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه مازندران، ایران.
- ثروتی مر، رستمی ا و خدادادی ف، ۱۳۹۰. امکان‌سنجی وقوع سیل در حوضه آبخیز لیلان‌چای مراغه به‌روش CN. فصل‌نامه جغرافیایی سرزمین، جلد ۳۲، شماره ۸، صفحه‌های ۶۷ تا ۸۱.
- ثقفیان ب، فرازجو ه، سپهر ع و نجفی نژاد ع، ۱۳۸۵. ارزیابی تغییرات کاربری اراضی بر سیل‌خیزی حوضه آبخیز سد گلستان. تحقیقات منابع آب ایران، جلد ۱، شماره ۲، صفحه‌های ۱۸ تا ۲۸.
- خیری زاده م، ملکی ج و آموئیا ه، ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر سیلاب توسط مدل ANP در حوضه آبخیز مرداچقی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۳، صفحه‌های ۳۹ تا ۵۶.
- سلیمانی ک، ۱۳۸۹. پهنه‌بندی خطر سیل در حوضه هراز. صفحه‌های ۶ تا ۷. مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، ایران.
- محمد اسماعیل ز، ۱۳۸۹. پایش تغییرات کاربری اراضی در کرج توسط سنجش از دور. پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، دوره ۲۴، شماره ۱، صفحه‌های ۸۱ تا ۸۸.
- نیک‌نژاد د و علیزاده ع، ۱۳۸۵. مطالعه سیلاب و کنترل آن در دو حوضه منتهی به دریاچه ارومیه. کارگاه فنی همزیستی با سیلاب. کمیته آبیاری و زهکشی. ارومیه، ایران.

گرد تا نتایج حاصل از آنها با اطمینان بیشتری در کارهای مدیریتی و اجرایی مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت بکارگیری مدل شاخص آماری و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌منظور بررسی پتانسیل و استعداد سیل، مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه که دسترسی به اطلاعات و داده‌های هیدروژئولوژیکی و گرافیکی با مشکل و محدودیت مواجه است، پیشنهاد می‌گردد. نتایج و اطلاعاتی که از این تحقیق می‌توان گرفت برای بسیاری از ارگانهای دولتی شامل اداره منابع آب، منابع طبیعی، برنامه‌ریزها جهت برنامه‌های هشدار سیل و جلوگیری از وقوع خسارات در سیل‌های آینده برای حوضه‌های شمال کشور که هر ساله چندین مرتبه شاهد وقوع سیل‌های خطرناک هستیم، مفید و ضروری خواهد.

- Ashley GJB, Schoups G, Campbell EP and Lane PNJ, 2014. Bayesian scrutiny of simple rainfall-runoff models used in forest water management. *Journal of Hydrology* 512: 344-365.
- Bronstert A, 2003. Floods and climate change: interactions and impacts. *Risk Analysis* 23: 545-557.
- Christensen JH and Christensen OB, 2003. Climate modeling: severe summertime flooding in Europe. *Nature* 421: 805-806.

- Kron W, 2002. Keynote lecture: Flood risk hazard exposure vulnerability. Pp.82-97 in: Wu et al. (ed.) Proceedings of the Flood Defense. Science Press, New York Ltd., ISBN 1-880132-54-0.
- Lee MJ, Kang JE and Jeon S, 2012. Application of frequency ratio model and validation for predictive flooded area susceptibility mapping using GIS. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Munich. 895–898.
- Manandhar B, 2010. Flood plain analysis and risk assessment of Lothar Khola. MSc Thesis, Tribhuvan University, Phokara, Nepal.
- Morelli S, Battistini A and Filippo C. 2014. Rapid assessment of flood susceptibility in urbanized rivers using digital terrain data: Application to the Arno river case study (Firenze, northern Italy). Applied Geography 54: 35-53.
- Opolot E, 2013. Application of remote sensing and geographical information systems in flood management: a review. Research Journal of Applied Science Engineering and Technology 6: 1884-1984
- Pallard B, Castellarin A and Montanari A, 2009. A look at the links between drainage density and flood statistics. Hydrology and Earth System Sciences 13(1): 1019–1029.
- Pourghasemi HR, Moradi HR, Fatemi SM, Aghda C, Gokceoglu and Pradhan B, 2012. GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). Arabian Journal of Geosciences 7: 1857-1878.
- Pradhan B, 2009. Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. Journal of Spatial Hydrology 9: 1-18
- Pradhan B, Hagemann U, Tehrany Shafapour M and Prechte N, 2014. An easy to use ArcMap based texture analysis program for extraction of flooded areas from TerraSAR-X satellite image. Computers & Geosciences 63: 34-43.
- Roughani M, Ghafouri M and Tabatabaei M, 2007. An innovative methodology for the prioritization of sub-catchments for flood control. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 9: 79-87.
- Tehrany MS, Pradhan B and Jebur MN, 2013. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. Journal of Hydrology 504: 69-79.
- Tehrany MS, Pradhan B and Jebur MN, 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. Journal of Hydrology 512: 332-343.
- Tehrany MSh, Pradhan B, Mansor SH and. Noordin A, 2015. Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. Catena 125: 91-101
- Van Westen C (1997) Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide. ITC Publication, Enschede, pp 73–84
- Wanders N, Bierkens MF, de Jong SM, de Roo A and Karssen D, 2013. The benefits of using remotely sensed soil moisture in parameter identification of large-scale hydrological models. Water Resources Research Journal, 50(12):35-48.