

تهیه نقشه‌های خطر احتمال و حساسیت سیل با استفاده از روش نسبت فراوانی در حوزه آبخیز پل دوآب شازند

حمید دارابی^۱، کاکا شاهی^{۲*} و مهدی مردیان^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ^۲ دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰

چکیده

به دلیل کمبود اطلاعات در اکثر حوزه‌های آبخیز، بسیاری از محققین برای مطالعات هیدرولوژیکی و سیل‌خیزی به استفاده از تجزیه و تحلیل‌های مکانی در سیستم اطلاعات جغرافیایی روی آورده‌اند. پژوهش حاضر به منظور تهیه نقشه‌های احتمال و حساسیت سیل با استفاده از روش نسبت فراوانی، از پارامترهای طبقات ارتفاعی، درصد شیب، انحنای زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، توان آبراهه، میانگین بارندگی، فاصله از رودخانه، سنگ‌شناسی، نوع خاک و کاربری اراضی در حوزه آبخیز پل دوآب شازند انجام شد. ابتدا نقشه رقومی تمامی پارامترها با استفاده از نرم‌افزارهای Arc GIS 10.1 و SAGA GIS 2 با فرمت رستری تهیه شدند. برای تهیه نقشه کاربری اراضی از تصویر ماهواره IRS-IC و نرم‌افزار ENVI 4.8 و الگوریتم حداکثر احتمال استفاده شد. سپس موقعیت جغرافیایی ۹۵ نقطه سیل‌گیر در منطقه بر اساس اطلاعات سیلاب‌های اردیبهشت ماه ۱۳۸۲، اردیبهشت ماه ۱۳۸۳ و اسفند ماه ۱۳۸۳ تهیه شد. نقاط به صورت تصادفی به گروه‌هایی متشکل از ۶۷ نقطه (۷۰ درصد) و ۲۸ نقطه (۳۰ درصد) به ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی تقسیم شدند. مجموعه نقاط گروه واسنجی به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای تاثیرگذار بر سیل به عنوان متغیر مستقل به روش نسبت فراوانی معرفی شدند. سپس احتمال رخداد سیل برای هر طبقه از هر پارامترها محاسبه شد. در نهایت وزن‌های به دست آمده برای هر طبقه در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در لایه‌های مربوطه اعمال شده و با استفاده از توابع روی هم‌گذاری، نقشه‌های حساسیت و احتمال سیل منطقه مورد مطالعه به دست آمد. بر اساس نقشه پتانسیل، منطقه به پنج طبقه با حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم تقسیم شد. نتایج هیستوگرام ارزیابی روش نسبت فراوانی نشان داد که احتمال حضور نقاط سیل‌گیر گروه اعتبارسنجی داده‌ها در طبقه خیلی زیاد برابر با ۶۷/۸۶ درصد و برای طبقه خیلی کم این عدد برابر با صفر می‌باشد. بنابراین هیستوگرام مربوطه تاییدکننده روش نسبت فراوانی در تهیه نقشه حساسیت سیل در منطقه مورد پژوهش می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم حداکثر احتمال، نسبت فراوانی، هیستوگرام ارزیابی، Arc GIS، SAGA GIS

مقدمه

سیلاب‌های ادواری و مخرب قرار دارند و ابعاد خسارات و تلفات جانی و مالی سیل افزایش یافته است. چنانچه ابعاد و گستردگی پیامدهای وقوع سیل (مستقیم و

روند رو به افزایش سیل در سال‌های اخیر حاکی از آن است که اکثر مناطق کشور در معرض تهاجم

و حدود ۲۷ درصد از سطح حوضه در خطر وقوع سیلاب زیاد است. این مناطق بیشتر در قسمت‌های پایین‌دست حوضه واقع شده‌اند. نامبردگان به استناد نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع سیل حوضه، سیل‌خیزی بیشتر مناطق پایین‌دست را به همزمانی پیوستن دبی دو شعبه اصلی حوضه مورد مطالعه نسبت دادند. Azari و همکاران (۲۰۰۹)، در تعیین مشارکت زیرحوضه‌های آبخیز جاغرق در دبی اوج و حجم رواناب به‌منظور اولویت‌بندی در کنترل سیل و با حذف متوالی زیرحوضه‌های مختلف از جریان شبیه‌سازی شده میزان سهم زیرحوضه‌ها را در دبی اوج در خروجی حوضه تعیین کردند. نتایج مطالعه نشان داد که ۶۶/۱۶ درصد کاهش دبی اوج و ۶۵/۹۸ درصد کاهش حجم سیلاب برای دوره بازگشت‌های ۲۰ سال متعلق به چهار زیرحوضه بالادست و میانی بوده و حال آنکه یکی از زیرحوضه‌های مشرف به خروجی حوضه دارای اولویت نخست در تولید و مشارکت سیلاب به ازای واحد سطح بوده است.

Pradhan (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 (RADARSAT) به‌صورت لایه‌های رقومی در سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه کرد. از همپوشانی لایه‌های مذکور و استخراج ضرایبی مناطق سیل‌خیز را در چهار دامنه خطر بالا، متوسط، کم و بدون خطر سیل تعیین کرد. Tehrani و همکاران (۲۰۱۴) به شناسایی نقاط سیل‌گیر بر اساس وقوع سیل‌های گذشته و پارامترهای موثر بر وقوع آن‌ها با استفاده از روش‌های ترکیبی مانند درخت تصمیم‌گیری، رگرسیون لجستیک و ماشین بردار پشتیبان پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از آن بود که روش‌های وزن معیارها (WoE) و توابع پایه شعاعی ماشین بردار (RBF-SVM) با بیشترین صحت (به‌ترتیب دارای سطح زیرمنحنی یا AUC ۹۶/۴۸ و ۹۵/۶۷ درصد) در ارزیابی پتانسیل سیل، به‌عنوان روش‌های برگزیده در منطقه انتخاب شدند.

روش‌های هیدرولوژیکی مختلفی برای ارزیابی سیل‌خیزی حوزه‌های آبخیز وجود دارد که از آن جمله

غیرمستقیم) از لحاظ اقتصادی مورد ارزیابی قرار گیرد، آنگاه پرداختن به مسائلی چون سیل در اولویت قرار می‌گیرد. بنابراین برای پیشگیری و مهار سیلاب باید در درجه اول مناطقی که پتانسیل بالایی در تولید سیل دارند، تعیین و سپس عوامل تولید و ایجاد سیل شناسایی شوند. در بروز و یا تشدید سیلاب عوامل متعددی دخالت دارند. این عوامل را می‌توان در حوزه آبخیز و رودخانه مورد بررسی قرارداد. به‌طور کلی دو دسته از عوامل اقلیمی و حوضه‌ای در ایجاد سیلاب‌ها نقش دارند. منشأ بسیاری از سیلاب‌ها به‌ویژه 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 به‌طور کلی عوامل مورفومتریکی اشاره نمود (Khosroshahi و Saghafian، ۲۰۰۶؛ Saghafian و همکاران، ۲۰۰۷؛ Roughani و همکاران، ۲۰۰۷).

در مدیریت سیل برخی از این عوامل قابل کنترل هستند که در طرح‌های کنترل سیل بیشتر باید آن‌ها را مد نظر قرار داد (Miller و همکاران، ۲۰۰۲). تهیه نقشه‌های پتانسیل سیل و توجه به اهمیت کاهش اثرات آن یکی از اهداف اولیه مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز است. بر این اساس بسیاری از محققین داخلی و خارجی به مطالعه و تهیه نقشه‌های سیل پرداختند. Besharati و همکاران (۲۰۰۷) در اولویت‌بندی مکانی مناطق سیل‌خیز در حوزه آبخیز رودک با استفاده از مدل شبیه‌سازی بارش-رواناب HEC-HMS نقش کلیه زیرحوضه‌ها در هیدروگراف سیل خروجی تعیین و بر اساس آن اولویت‌بندی را انجام داد.

در این تحقیق زیرحوضه کلوکان به‌عنوان زیرحوضه سیل‌خیز شناسایی شد. همچنین، نتایج نشان داد که میزان مشارکت زیرحوضه‌ها در سیل خروجی، با مساحت آن‌ها رابطه مستقیم ندارد. Kheyrizadeh و همکاران (۲۰۱۲)، پتانسیل خطر وقوع سیلاب در حوزه آبخیز مردق چای را با استفاده از مدل ANP پهنه‌بندی کردند و نتیجه گرفتند، پنج درصد از سطح حوضه در خطر وقوع سیلاب بسیار زیاد

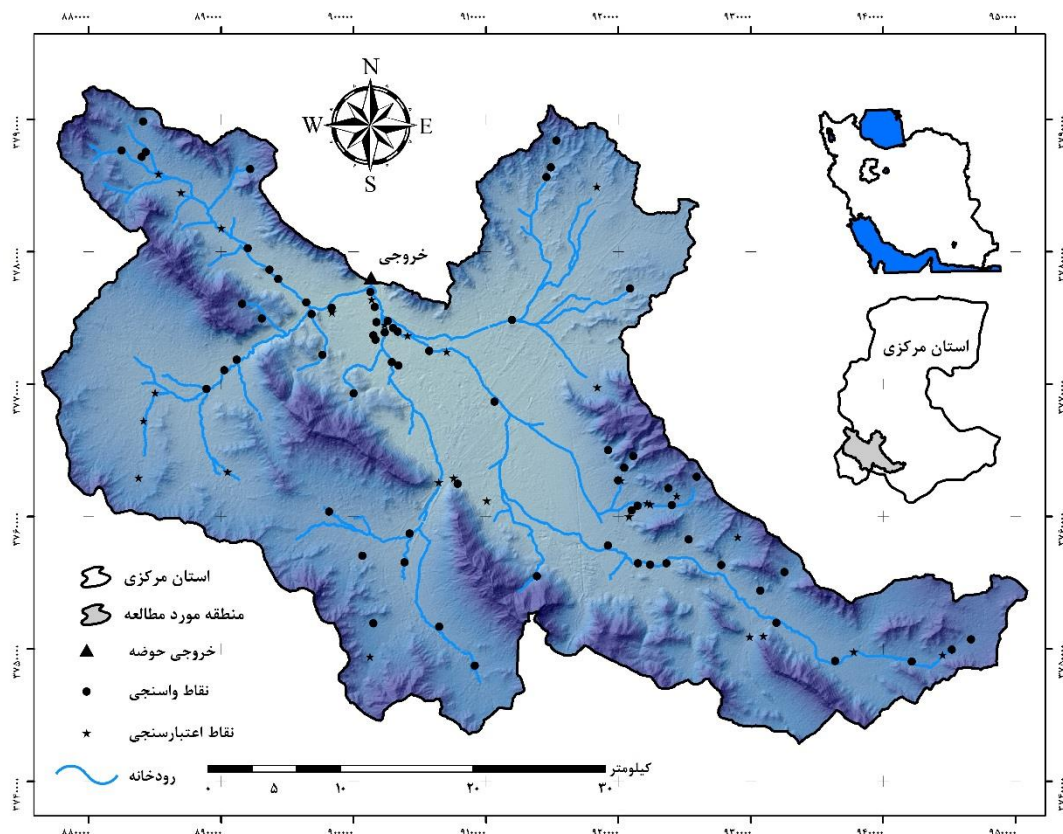
Morelli و همکاران، ۲۰۱۴؛ Greenwood و همکاران، ۲۰۱۴). از این رو با توجه به مطالب فوق و کمبود اطلاعات و داده‌های دارای کیفیت مناسب در اکثر حوزه‌های آبخیز کشور، ارائه روشی نوین برای ارزیابی پتانسیل سیل‌خیزی حوزه‌های آبخیز بسیار حائز اهمیت است. بنابراین هدف اصلی تحقیق حاضر ارزیابی کارایی روش نسبت فراوانی در ارائه نقشه‌های احتمال و حساسیت سیل در حوزه آبخیز پل دوآب شازند می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز پل دوآب شازند با مساحتی بالغ بر ۱۷۴۰ کیلومترمربع و مختصات جغرافیایی $49^{\circ} 4' 15''$ تا $49^{\circ} 52' 12''$ شرقی و $33^{\circ} 44' 42''$ تا $33^{\circ} 13' 13''$ شمالی یکی از زیرحوضه‌های دریاچه نمک است که سیل‌های فراوانی در آن اتفاق می‌افتد (شکل ۱).

می‌توان به مدل‌های بارش-رواناب (HEC-ANUGA، IHACRES، HMS و WBNM) اشاره کرد (Knebl و همکاران، ۲۰۰۵)، ولی با توجه ماهیت این مدل‌ها در مدل‌سازی بارش-رواناب می‌توان بیان داشت که مدل‌های مذکور برای تحلیل‌های جامع رودخانه‌ها و مناطق تحت مشکل آب‌گرفتگی، مناسب نیستند. از این رو بسیاری از محققین (Tehrany و همکاران، ۲۰۱۴؛ Pradhan و همکاران، ۲۰۱۴) برای مطالعات هیدرولوژیکی و سیل‌خیزی به استفاده از تجزیه و تحلیل‌های مکانی در قالب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) روی آورده‌اند.

بنابراین روش‌های به‌کاربرده شده به‌منظور بررسی و تعیین نقشه‌های پتانسیل سیل، طی سال‌های اخیر شامل، روش نسبت فراوانی، آنالیزهای چند متغیره آماری، WoE یا وزن معیارها در GIS، فرایند تحلیل سلسله مراتبی، روش ماشین بردار پشتیبان و درخت تصمیم‌گیری می‌باشند (Tehrany و همکاران، ۲۰۱۵؛



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز پل دوآب شازند و نقاط سیل‌گیر برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی روش نسبت فراوانی

دارد، در طبقه نیمه‌خشک معتدل تا نیمه‌خشک سرد قرار دارد. به‌طوری که بیشینه دمای آن در تیر ماه

اقلیم حوضه با استفاده از روش آمبرژه و بر اساس ایستگاه تبخیرسنجی قدمگاه که در داخل حوضه قرار

شد. نقشه مزبور به سه طبقه انحنای مقعر، انحنای محدب و تخت (بدون انحنای) تقسیم‌بندی شد. شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI^1) یکی از شاخص‌های تاثیرگذار بر وقوع و پتانسیل سیل در حوزه‌های آبخیز به‌شمار می‌رود. شاخص رطوبت توپوگرافی با توجه به رابطه زیر تعریف می‌شود (Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۲؛ Tehrany و همکاران، ۲۰۱۳)، برای تهیه این نقشه از نرم‌افزار SAGA GIS 2 استفاده شد. نقشه حاصل به پنج طبقه تقسیم شد.

$$TWI = Ln \left(\frac{A_s}{\tan \beta} \right) \quad (1)$$

که در آن، AS سطح ویژه حوزه آبخیز و β شیب زمین (درجه) می‌باشند.

شاخص توان آبراهه (SPI^2) یکی از شاخص‌های پارامترهای مهم در پتانسیل سیل‌خیزی حوزه‌های آبخیز به‌شمار می‌رود و از رابطه زیر تعریف می‌گردد (Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Tehrany و همکاران، ۲۰۱۳)، برای تهیه این نقشه از نرم‌افزار SAGA GIS 2 استفاده شد. نقشه حاصل به ده طبقه تقسیم شد.

$$SPI = A_s \tan \beta \quad (2)$$

به‌منظور تهیه نقشه میانگین بارندگی از داده‌های بارندگی ۱۳ ایستگاه باران‌سنج (در داخل و خارج از حوضه) در دوره زمانی ۱۳۸۸-۱۳۵۷ استفاده شد. پس از بررسی دقت روش‌های مختلف درون‌یابی در نرم‌افزار ArcGIS 10.1، نقشه توزیع میانگین بارندگی سالانه حوزه آبخیز پل دوآب شازند بر اساس روش کریجینگ معمولی (به‌دلیل وجود کمترین خطا) تهیه شد. نقشه حاصل نیز به پنج طبقه تقسیم‌بندی شد. فاصله از رودخانه‌ها یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار در سیل-گرفتگی اراضی حاشیه رودخانه‌ها می‌باشد (Tehrany و همکاران، ۲۰۱۵). نقشه مذکور با استفاده از دستور Multiple Ring Buffer و نرم‌افزار ArcGIS 10.1 تهیه و به شش طبقه تقسیم شد. زمین‌شناسی به‌دلیل تاثیر مستقیم بر میزان نفوذپذیری و رواناب سطحی، یکی از عوامل مهم در پدیده سیل حوزه‌های آبخیز است. نقشه زمین‌شناسی حوزه آبخیز پل دوآب شازند از

برابر با ۴۲/۰۰ درجه سلسیوس و کمینه آن در دی ماه برابر با ۲۵/۷- درجه سلسیوس می‌باشد. نزولات جوی در این منطقه عمدتاً از نوع باران و برف می‌باشد، و مقدار متوسط سالانه آن طبق آمار ۳۰ساله ایستگاه-های داخل حوضه (مزرعه خاتون، قدمگاه، عمارت و آستانه) برابر ۴۳۰/۲ میلی‌متر می‌باشد. توزیع زمانی بارندگی در ماه‌های مختلف سال متفاوت است، به‌طوری که می‌توان ماه‌های تیر، مرداد و شهریور را از ماه‌های کم باران و آبان، آذر و فروردین را از ماه‌های پر باران سال به حساب آورد.

انتخاب پارامترهای موثر در تهیه نقشه‌های

پتانسیل سیل: عوامل زیادی از جمله بارندگی، کاربری اراضی، شیب زمین، خاک‌شناسی و غیره بر وقوع سیل در حوزه‌های آبخیز تاثیرگذارند. در پژوهش حاضر پیش فاکتورهای طبقات ارتفاعی، درصد شیب، انحنای زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، توان آبراهه، میانگین بارندگی، فاصله از رودخانه، سنگ‌شناسی، نوع خاک و کاربری اراضی به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل سیل حوزه آبخیز پل دوآب شازند انتخاب شدند و نقشه‌های رستری آن‌ها با اندازه سلول ۲۰ متر تهیه شدند. در بین این پارامترها برخی اطلاعات ژئومورفولوژیکی از حوضه در اختیار ما قرار می‌دهند، که شامل، نقشه شیب، SPI ، TWI و $Curvature$ می‌باشند و در تقسیم‌بندی دیگر نیز شاخص‌های مرتبط با آب را شاخص‌های TWI و SPI بیان داشتند (Tehrany و همکاران، ۲۰۱۴).

نقشه طبقات ارتفاع زمین بر اساس مدل رقومی ارتفاع و با کمک نرم‌افزار ArcGIS 10.1 تهیه شد. در نهایت نقشه ارتفاع حوزه آبخیز پل دوآب شازند به ده طبقه گروه‌بندی شد. نقشه شیب زمین به‌دلیل تاثیر 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 ۲۰ متر) و نرم‌افزار ArcGIS 10.1 تهیه و سپس به پنج طبقه تقسیم‌بندی شد. انحنای زمین یکی از پارامترهای مکانی مورد استفاده در تهیه نقشه‌های پتانسیل سیل حوزه‌های آبخیز است (Tehrany و همکاران، ۲۰۱۵). نقشه انحنای زمین بر اساس مدل رقومی ارتفاع (با قدرت تفکیک ۲۰ متر) و نرم‌افزار ArcGIS 10.1 تهیه

¹ Topographic Wetness Index

² Stream Power Index

IRS-1C (بر گرفته از سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح) تهیه شد. سنجنده LISS III دارای چهار باند طیفی می‌باشد که در آن برخلاف سنجنده‌های II و LISS I یک باند مادون قرمز میانی جایگزین باند آبی-سبز (کانال ۱ سنجنده‌های LISS II و LISS III) شده است. دامنه‌های طیفی برای III-LISS عبارتند از ۰/۵۲-۰/۵۹، ۰/۶۸-۰/۶۲، ۰/۸۶-۰/۷۷ و ۰/۷۰-۱/۵۵ میکرومتر است. سنجنده پانکروماتیک یک تصویربردار تک کاناله (۰/۷۵-۰/۵۰) با توان جداسازی مکانی پنج متر فراهم می‌آورد (Amini, ۲۰۱۰). نقشه کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم حداکثر احتمال و طبقه‌بندی نظارت شده در محیط نرم‌افزاری ENVI 4.8 به شش طبقه کشاورزی دیم و آبی، مراتع، باغات، اراضی فاقد پوشش گیاهی و اراضی مسکونی تقسیم‌بندی شد (Darabi و همکاران، ۲۰۱۴).

اداره کل منابع طبیعی استان مرکزی تهیه شد. سپس لایه وکتوری نقشه مزبور با فرمت رستری و اندازه پیکسل ۲۰ متر با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.1 تهیه و نقشه حاصل به چهار طبقه تقسیم‌بندی شد (Varvani, ۲۰۰۱). نقشه نوع خاک نیز از اداره کل منابع طبیعی استان مرکزی تهیه و لایه وکتوری نقشه مزبور نیز با فرمت رستری و اندازه پیکسل ۲۰ متر با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.1 ایجاد شد. نقشه حاصل به شش طبقه تقسیم شد.

کاربری اراضی نتیجه روابط متقابل پارامترهای اجتماعی-فرهنگی و توان بالقوه سرزمین است. تغییرات در کاربری و پوشش اراضی نتایج چشم‌گیری در پتانسیل سیل‌خیزی حوزه‌های آبخیز دارد (Mohammad Esmaeil, ۲۰۱۱). نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز پل دوآب شازند با استفاده از تصویر سنجنده LISS-III-P6-2008 مربوط به ماهواره هندی

جدول ۱- تصاویر مورد استفاده و مشخصات آن‌ها

ماهواره	قدرت تفکیک مکانی (m)	تاریخ	شماره گذر	شماره ردیف
لندست ۷- سنجنده ⁺ ETM*	۲۸	۲۰۰۱/۰۷/۲۵	۱۶۶	۳۶
IRS-LISSIII	۲۳/۵	۲۰۰۸/۰۸/۱۶	۶۸	۴۶

* تصویر این سنجنده صرفاً جهت تصحیح هندسی تصویر سنجنده IRS-LISS III استفاده شد.

متغیر وابسته و پارامترهای انتخاب شده (طبقات ارتفاعی، شیب و...) به‌عنوان متغیرهای مستقل به روش نسبت فراوانی معرفی شدند. با استفاده از تکنیک نسبت فراوانی، احتمال رخداد سیل قرار گرفته در هر طبقه برای تمام پارامترها محاسبه شد. تکنیک نسبت فراوانی نشان‌دهنده احتمال حضور یک پدیده با مشخصاتی ویژه است. به‌منظور تعیین میزان تأثیر هر طبقه از هر متغیر مستقل از رابطه (۳) استفاده می‌شود.

$$W_i = \frac{F_i}{P_i} \quad (3)$$

که در آن، W_i میزان تأثیر هر طبقه از هر پارامتر، F_i درصد نقاط قرار گرفته در طبقه i و P_i درصد پیکسل‌های طبقه i در کل حوزه آبخیز است و از روابط (۴) و (۵) به‌دست می‌آید.

$$F_i = \frac{n}{N} \times 100 \quad (4)$$

بررسی آمار سیل^۱: به‌منظور تهیه نقشه‌های حساسیت و احتمال سیل، تجزیه و تحلیل سیل‌های ثبت‌شده ضروری است. حوزه آبخیز پل دوآب شازند در دهه‌های اخیر به‌شدت تحت تأثیر سیل‌های خطرناک بوده است. بنابراین یک نقشه از موقعیت جغرافیایی ۹۵ نقطه سیل‌گیر در منطقه بر اساس اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای استان مرکزی تهیه شد (سیلاب اردیبهشت ماه ۱۳۸۲، اردیبهشت ماه ۱۳۸۳ و سیلاب اسفند ماه ۱۳۸۳). این مجموعه به‌صورت تصادفی به یک گروه متشکل از ۶۷ نقطه (۷۰ درصد) برای واسنجی و یک گروه متشکل از ۲۸ نقطه (۳۰ درصد) برای اعتبارسنجی تقسیم شدند. موقعیت نقاط سیل‌گیر در شکل ۱ ارائه شده است.

تعیین نسبت فراوانی طبقه‌های پارامترهای مورد استفاده: مجموعه نقاط سیل‌گیر واسنجی به‌عنوان

¹ Flood inventory

در محیط GIS با نقشه حساسیت سیل روی هم گذاری شدند، سپس با استفاده از دستور Sample هر کدام از نقاط که در طبقات نقشه پیش‌بینی قرار گرفتند، نمونه برداری شدند و بدین ترتیب صحت‌سنجی نقشه پیش‌بینی و با استفاده از هیستوگرام فراوانی وقوع نقاط سیل‌گیر انجام شد.

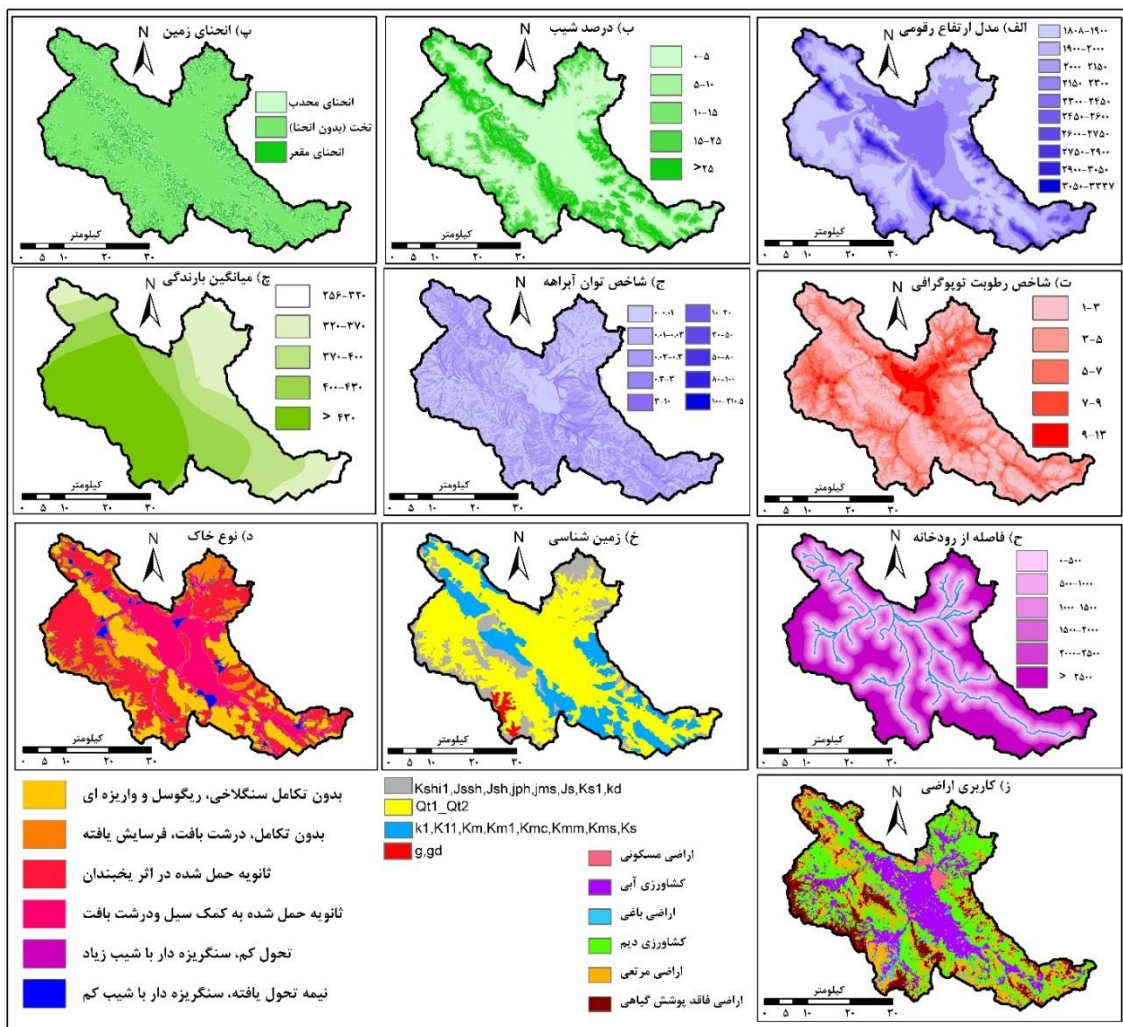
نتایج و بحث

نقشه‌های پارامترهای موثر در وقوع سیل: نقشه پارامترهای ورودی روش نسبت فراوانی شامل طبقات ارتفاعی، درصد شیب، انحنای زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، توان آبراهه، میانگین بارندگی، فاصله از رودخانه، سنگ‌شناسی، نوع خاک و کاربری اراضی در شکل ۲ ارائه شده است.

$$P_i = \frac{a}{A} \times 100 \quad (5)$$

که در آن‌ها، n تعداد نقاط سیل در طبقه i ، A تعداد کل نقاط سیل، a تعداد پیکسل‌های طبقه i و A تعداد کل پیکسل‌های حوزه آبخیز پل دوآب شازند می‌باشد. در نهایت نرخ‌های به‌دست آمده برای هر طبقه در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در لایه‌های مربوطه اعمال شده و با استفاده از تابع روی هم‌گذاری (Weighted Overlay)، نقشه پیش‌بینی پتانسیل سیل حوزه آبخیز گلستان به‌دست آمد.

اعتبارسنجی نقشه‌های پیش‌بینی پتانسیل سیل: به‌منظور اعتبارسنجی نقشه پیش‌بینی پتانسیل سیل، مجموعه نقاط اعتبارسنجی (۲۸ نقطه، ۳۰ درصد مجموع نقاط) استفاده شدند. در این مرحله ۲۸ نقطه



شکل ۲- نقشه الف) طبقات ارتفاعی، ب) درصد شیب، پ) انحنای زمین، ت) شاخص رطوبت توپوگرافی، ج) نقشه توان آبراهه، چ) میانگین بارندگی، ح) فاصله از رودخانه، خ) سنگ‌شناسی، د) نوع خاک و ز) کاربری اراضی

وزن تأثیر هر طبقه 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 بر اساس آن، وزن تأثیر هر طبقه از پارامترها به دست آمد. وزن تأثیر هر یک از طبقه‌های پارامترهای انتخاب شده برای تکنیک نسبت فراوانی در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. همان‌طور که از جدول ۲ پیداست، برای پارامتر

طبقات ارتفاعی بیشترین وزن مربوط به طبقه اول (محدوده ارتفاعی ۱۹۰۰-۱۸۰۸ متر) می‌باشد. برای متغیر شیب نیز بیشترین وزن مربوط به طبقه اول (محدوده صفر تا پنج درصد) می‌باشد. در نقشه انحنای زمین بیشتر وزن را اراضی مسطح به خود اختصاص داده‌اند. در شاخص رطوبت توپوگرافی طبقه آخر دارای بیشترین وزن می‌باشد. همچنین، در پارامتر مربوط به توان آبراهه طبقه هفتم دارای بیشترین تأثیر می‌باشد.

جدول ۲- نسبت فراوانی بین وقوع سیل‌های گذشته و پارامترهای مؤثر بر وقوع سیل

عامل	طبقه (i)	درصد پیکسل‌ها (Pi)	تعداد وقوع سیل (n)	درصد وقوع سیل (Fi)	وزن تأثیر (Wi)
طبقات ارتفاعی (m)	۱۸۰۸-۱۹۰۰	۱۱/۳۸	۱۸	۲۶/۸۷	۲/۳۶
	۱۹۰۰-۲۰۰۰	۱۴/۷۶	۱۴	۲۰/۹۰	۱/۴۳
	۲۰۰۰-۲۱۵۰	۲۶/۱۰	۱۸	۲۶/۸۷	۱/۰۳
	۲۱۵۰-۲۳۰۰	۲۱/۸۳	۱۴	۲۰/۹۰	۰/۹۶
	۲۳۰۰-۲۴۵۰	۱۳/۴۲	۳	۴/۴۸	۰/۳۳
	۲۴۵۰-۲۶۰۰	.	.	.	.
	۲۶۰۰-۲۷۵۰	.	.	.	.
	۲۷۵۰-۲۹۰۰	.	.	.	.
	۲۹۰۰-۳۰۵۰	.	.	.	.
	۳۰۵۰-۳۳۳۷	.	.	.	.
شیب (درصد)	۰-۵	۴۹/۶۶	۵۷	۸۵/۰۷	۱/۷۱
	۵-۱۰	۱۲/۷۴	۷	۱۰/۴۵	۰/۸۲
	۱۰-۱۵	۸/۵۴	۱	۱/۴۹	۰/۱۷
	۱۵-۲۵	۱۶/۳۷	۱	۱/۴۹	۰/۰۹
	> ۲۵	۱۲/۶۸	۱	۱/۴۹	۰/۱۲
انحنای زمین	انحنای محدب	۳۴/۱۷	۸	۱۱/۹۴	۰/۶۹
	تخت (بدون انحنای)	۶۵/۹۵	۵۷	۸۵/۰۷	۱/۲۹
	انحنای مقعر	۱۶/۷۱	۲	۲/۹۹	۰/۱۸
شاخص رطوبت توپوگرافی	۱-۳	۳۵/۹۸	۲	۲/۹۹	۰/۰۸
	۳-۵	۳۲/۱۹	۱۶	۲۳/۸۸	۰/۷۴
	۵-۷	۱۹/۰۷	۲۵	۳۷/۳۱	۱/۹۶
	۷-۹	۸/۹۱	۱۴	۲/۹۰	۲/۳۴
	۹-۱۳	۳/۸۵	۱۰	۱۴/۹۳	۳/۸۷
	۰-۰/۰۱	۳۴/۳۶	۱۶	۲۳/۸۸	۰/۶۹
	۰/۰۱-۰/۰۳	۲۲/۸۹	۹	۱۳/۴۳	۰/۵۹
شاخص توان آبراهه	۰/۰۳-۰/۰۳	۳۳/۸۴	۲۰	۲۹/۸۵	۰/۸۸
	۰/۳-۳	۸/۱۲	۱۴	۲۰/۹۰	۲/۵۷
	۳-۱۰	۰/۶۲	۷	۱۰/۴۵	۱۶/۹۰
	۱۰-۳۰	۰/۱۴	.	.	.
	۳۰-۵۰	۰/۰۲	۱	۱/۴۹	۶۵/۷۶
	۵۰-۸۰	۰/۰۱	.	.	.
	۸۰-۱۰۰	.	.	.	.
	۱۰۰-۲۱۰/۵	.	.	.	.

حریم صفر تا ۵۰۰ متر) دارند دارای بیشترین وزن می‌باشند. در مورد عامل سنگ‌شناسی و خاک نیز به ترتیب طبقه‌های سوم و چهارم دارای بیشترین وزن می‌باشد. در نهایت کاربری باغات نیز دارای بیشترین وزن در متغیر کاربری اراضی می‌باشد.

جدول ۳ نیز وزن هر طبقه از بقیه پارامترهای سیل را نشان می‌دهد. در مورد میانگین بارندگی طبقه چهارم (محدوده بارندگی ۴۳۰-۴۰۰ میلی‌متر) دارای بیشترین وزن می‌باشد. در پارامتر فاصله از رودخانه اراضی که نزدیک‌ترین فاصله تا آبراهه (طبقه اول،

جدول ۳- نسبت فراوانی بین وقوع سیل‌های گذشته و پارامترهای مؤثر بر وقوع سیل

عامل	طبقه (i)	درصد پیکسل‌ها (Pi)	تعداد وقوع سیل (n)	درصد وقوع سیل (Fi)	وزن تأثیر (Wi)
میانگین بارندگی (mm)	۲۵۶-۳۲۰	۱/۶۷	۱	۱/۴۹	۰/۸۹
	۳۲۰-۳۷۰	۱۸/۹۱	۱۰	۱۴/۹۳	۰/۷۹
	۳۷۰-۴۰۰	۱۹/۳۰	۱۶	۲۳/۸۸	۱/۲۴
	۴۰۰-۴۳۰	۲۰/۵۲	۲۰	۲۹/۸۵	۱/۴۵
	>۴۳۰	۵۹/۳۹	۲۰	۲۹/۸۵	۰/۷۵
فاصله از رودخانه (m)	۰-۵۰۰	۱۸/۳۸	۴۸	۷۱/۶۴	۳/۹۰
	۵۰۰-۱۰۰	۱۵/۴۶	۵	۷/۴۶	۰/۴۸
	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۱۳/۷۲	۷	۱۰/۴۵	۰/۷۶
	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۱۱/۹۳	۲	۲/۹۹	۰/۲۵
	۲۰۰۰-۲۵۰۰	۹/۹۳	۱	۱/۴۹	۰/۱۵
>۲۵۰۰	۳۰/۵۸	۴	۵/۹۷	۰/۲	
سنگ‌شناسی	Ksh1, Jssh, Jsh, jph, jms, Js, Ks1, kd	۱۷/۳۵	۵	۷/۴۶	۰/۴۳
	Qt1, Qt2	۶/۲۹	۵۶	۸۳/۵۸	۱/۳۹
	k1, K11, Km, Km1, Kmc, Kmm, Kms, Ks	۲۱	۶	۸/۹۶	۱/۴۳
	g, gd	۱/۳۶	۰	۰	۰
خاک	بدون تکامل سنگلاخی و لینوسل یا ریگوسل و واریزه‌ای	۲۵/۱۷	۶	۸/۹۶	۰/۳۶
	بدون تکامل-درشت بافت-فرسایش‌یافته	۱۳/۹۸	۵	۷/۴۶	۰/۵۳
	خاک‌های ثانویه حمل شده در اثر یخبندان	۳۸/۸۸	۲۵	۳۷/۳۱	۰/۹۶
	خاک‌های ثانویه حمل شده به کمک سیل و درشت بافت یا سنگ	۱۹/۳۳	۲۸	۴۱/۷۹	۲/۱۶
	تحول کم-سنگریزه داربا شیب زیاد	۰/۸۴	۲	۲/۹۹	۳/۵۴
	نیمه تحول‌یافته-سنگریزه‌دار-شیب کم رسوب حمل شده	۱/۸۰	۱	۱/۴۹	۰/۸۳
	کشاورزی آبی	۲۰/۷۲	۳۷	۵۵/۲۲	۲/۶۷
کاربری اراضی	باغات	۲/۹۶	۹	۱۳/۴۳	۴/۵۳
	کشاورزی دیم	۳۷/۶۳	۱۴	۲۰/۹۰	۰/۵۶
	مرتع	۲۲/۸۵	۴	۵/۹۷	۰/۲۶
	اراضی فاقد پوشش گیاهی	۱۴/۰۴	۱	۱/۴۹	۰/۱۱
	اراضی مسکونی	۱/۸۰	۲	۲/۹۹	۱/۶۶

اطلاعات جغرافیایی (GIS) در لایه‌های مربوطه اعمال شده و با استفاده از توابع روی هم‌گذاری، نقشه‌های

تهیه نقشه پیش‌بینی پتانسیل سیل: در نهایت وزن‌های به‌دست آمده برای هر طبقه در سیستم

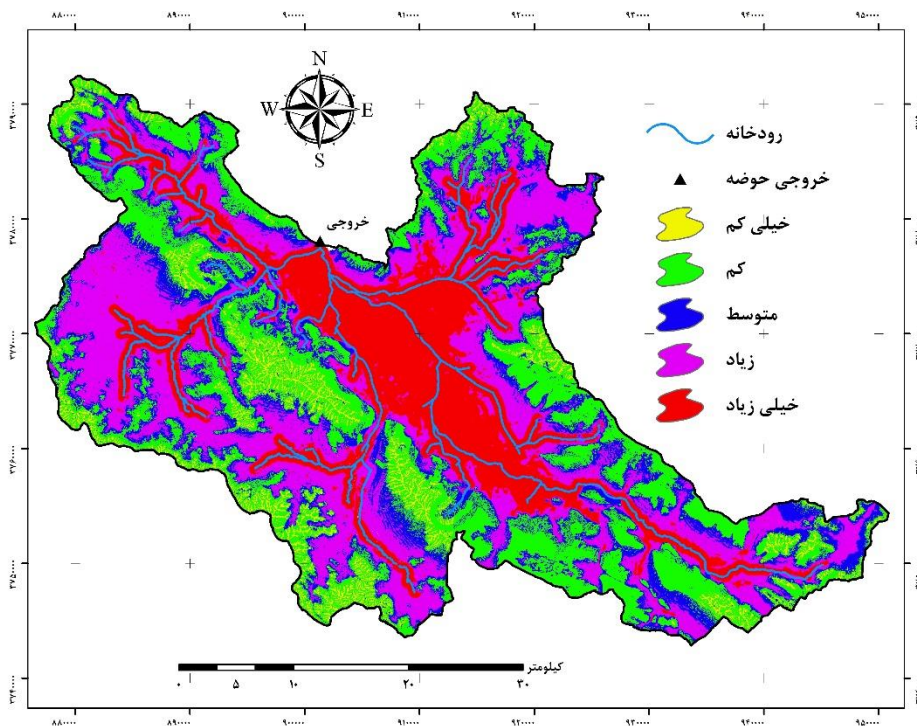
محور افقی هر یک از طبقات مربوط به نقشه حساسیت قرار گرفته است و در محور عمودی درصد مساحت هریک از طبقات و همچنین، درصد وقوع سیل‌های اتفاق افتاده در داخل هر طبقه از نقشه حساسیت سیل درج شده است. با توجه به اینکه ۲۸ نقطه انتخاب شده جهت صحت‌سنجی در واقع نشان‌دهنده شرایط وقوع سیل می‌باشند، بنابراین احتمال حضور این نقاط در طبقه‌های با حساسیت بیشتر (یعنی طبقه‌های خیلی زیاد و زیاد) و حتی در طبقه متوسط نیز دیده شوند.

بنابراین با توجه به شکل ۶ مشخص می‌شود که احتمال حضور نقاط سیل‌گیر گروه اعتبارسنجی داده‌ها در طبقه خیلی زیاد برابر با ۶۷/۸۶ درصد و برای طبقه خیلی کم این عدد برابر با صفر درصد می‌باشد. این در حالی است که مساحت هر کدام از این طبقه‌ها به ترتیب ۲۳/۲۱ و ۴/۲ درصد از مساحت کل را شامل می‌شوند. بنابراین هیستوگرام مربوطه تاییدکننده روش نسبت فراوانی در تعیین نقشه حساسیت سیل در منطقه مورد پژوهش می‌باشد.

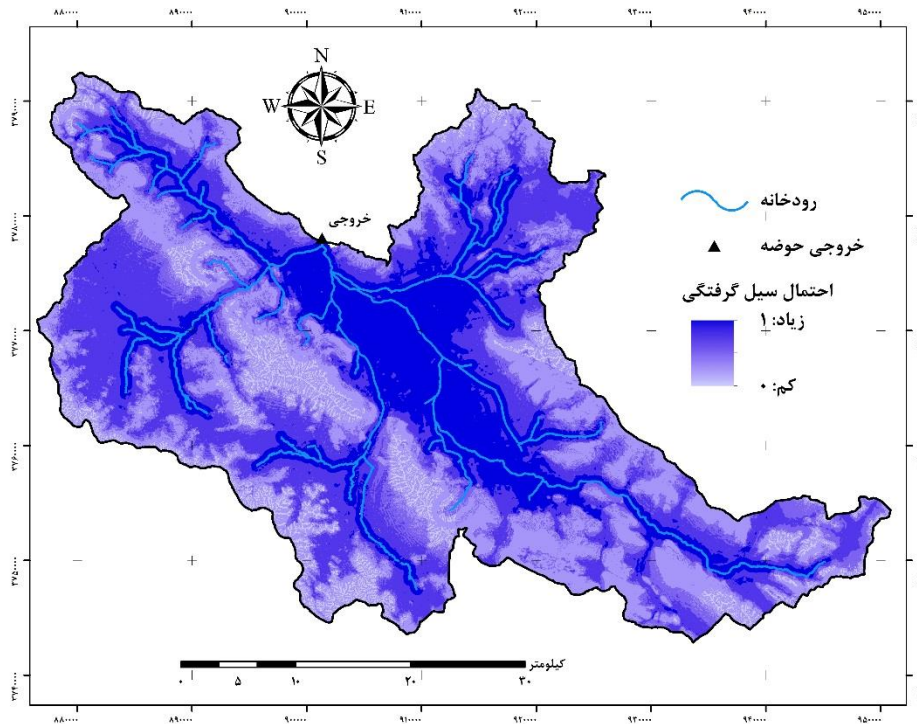
حساسیت و احتمال سیل حوزه آبخیز پل دوآب سازند به‌دست آمد. بر این اساس نقشه‌های پیش‌بینی پتانسیل سیل حوزه آبخیز پل دوآب سازند در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. همان‌طور که از شکل ۳ پیداست، بیشترین درصد اراضی مربوط به طبقه خیلی زیاد می‌باشد که مساحتی بالغ بر ۴۰۳/۲۷ کیلومترمربع را به خود اختصاص داده است. بقیه طبقه‌ها نیز به ترتیب طبقه خیلی کم، کم، متوسط و زیاد دارای وسعتی معادل ۷۲/۹۸، ۴۹۲/۸۵، ۲۹۹/۷۷ و ۴۶۸/۲۵ کیلومترمربع می‌باشند.

شکل ۴ نیز نقشه احتمال وقوع سیل‌گرفتنی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست، اراضی با شیب کم دارای بیشترین احتمال سیل-گرفتنی می‌باشند. اراضی کوهستانی و مرتفع دارای کمترین احتمال وقوع سیل‌گرفتنی می‌باشند.

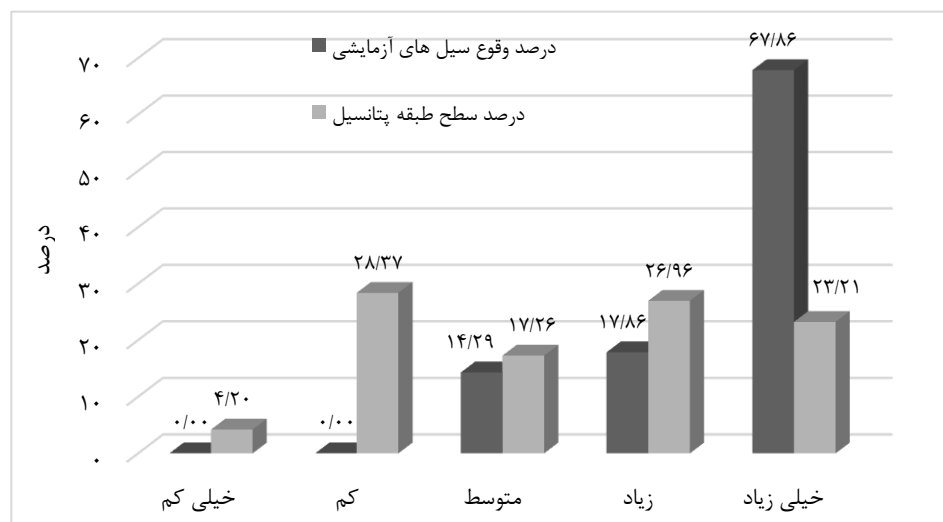
ارزیابی دقت نقشه پیش‌بینی استعداد سیل:
به‌منظور ارزیابی دقت نقشه پیش‌بینی حساسیت سیل، از مجموع نقاط گروه اعتبارسنجی استفاده شد که نتایج آن به‌صورت هیستوگرام در شکل ۵ ارائه شده است. تفسیر هیستوگرام به این صورت می‌باشد که در



شکل ۳ - نقشه طبقات حساسیت سیل در منطقه مورد مطالعه



شکل ۴- نقشه احتمال وقوع سیل در منطقه مورد پژوهش



شکل ۵- هیستوگرام ارزیابی صحت نقشه حساسیت سیل در حوزه آبخیز پل دوآب شازند

ارتفاعی، درصد شیب، انحنای زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، توان آبراهه، میانگین بارندگی، فاصله از رودخانه، ژئولوژی، نوع خاک و کاربری اراضی در محیط GIS، با تکیه بر نقشه مدل رقومی ارتفاع منطقه استخراج شدند. سپس پارامترهای استخراج شده به منظور تهیه نقشه‌های پتانسیل سیل استفاده شدند. از میان عوامل موثر بر دبی سیلاب، ویژگی‌های فیزیکی حوضه به سبب پایداری و تغییرپذیری بسیار ناچیز نسبت به سایر عوامل از اهمیت خاصی برخوردار

نتایج این تحقیق نشان داد که با تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و عوامل موثر بر شرایط وقوع سیل و داده‌های تاریخی سیل‌های ثبت شده می‌توان اثر متقابل عوامل موثر بر پتانسیل سیل‌خیزی حوزه‌های آبخیز را مورد بررسی قرار داد. سامانه اطلاعات جغرافیایی یکی از ابزارهای قدرتمند تحلیل و نمایش داده‌های مکانی در زمینه مدیریت حوزه‌های آبخیز می‌باشد که پیش عوامل موثر بر پتانسیل سیل در حوزه آبخیز پل دوآب شازند از قبیل طبقات

تحقیق در واقع کاربرد برخی متغیرهای موثر بر وقوع سیل که این پارامترها برآیند عوامل مختلف محیطی و انسانی است که بر اساس نقشه پیش‌بینی خطر سیل ارائه شده می‌توان اقدامات مدیریتی مناسبی جهت کاهش خسارت‌ها و تلفات ناشی از سیل انجام داد. در نهایت به‌کارگیری تکنیک نسبت فراوانی و سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌منظور بررسی پتانسیل و استعداد سیل، مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه که دسترسی به اطلاعات و داده‌های هیدروژئولوژیکی و ادافیکی با مشکل و محدودیت مواجه است، پیشنهاد می‌شود. از آنجایی که سیل به‌عنوان یک پدیده فاجعه انگیز در کل جهان شناخته شده است.

بنابراین تهیه نقشه حساسیت سیل به‌منظور مدیریت بهتر حوزه‌های آبخیز امری حیاتی و اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. ارزیابی حساسیت سیل توسط بسیاری از محققین انجام شده است. در بین این تحقیقات نیاز به یک روش جامع و قابل اعتماد جهت شناسایی مناطق مستعد سیل بیش از پیش احساس می‌شود. بنابراین روش‌های مختلف (مثل روش رگرسیون لجستیک، روش ماشین بردار پشتیبان، WofE، درخت تصمیم‌گیری در تعامل با تکنیک سنجش از دور) به‌صورت تلفیقی به‌منظور شناخت مناطق مستعد سیل در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود تا نتایج حاصل از آن‌ها با اطمینان بیشتری در کارهای مدیریتی و اجرایی مورد استفاده قرار گیرد.

است (Rohani و همکاران، ۲۰۰۵). این خصوصیات به‌طور مستقیم بر رژیم هیدرولوژیکی و به‌طور غیر مستقیم بر آب و هوای منطقه تاثیر می‌گذارند. به‌عبارت دیگر شرایط فیزیوگرافی و توپوگرافی اثر تعیین‌کننده‌ای بر خصوصیات هیدرولوژیکی و رژیم آبی از جمله میزان تولید آبی سالانه، حجم سیلاب، ضریب رواناب، شدت و ضعف دبی سیلاب‌ها، بیلان آبی یک حوضه، ذوب برف، تغذیه آب‌های زیرزمینی، میزان رسوب تولیدی، شدت فرسایش خاک و همچنین، بر عوامل اقلیمی مانند درجه حرارت و تغییرات آن، نوع و میزان بارش جوی سالیانه، میزان تبخیر و تعرق، اکولوژی و پوشش گیاهی و غیره اثر دارند.

لذا همان‌طور که Darabi و همکاران (۲۰۱۱) بیان داشتند، آگاهی از خصوصیات مورفومتریک یک حوضه، همراه با داشتن اطلاعات از شرایط آب و هوایی منطقه می‌تواند تصویر نسبتاً دقیقی از کارکرد کمی و کیفی سیستم هیدرولوژیک حوضه و همچنین، وضعیت حاکم بر آن را از نقطه نظرهای مختلف به‌دست آورد. یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که دقت تکنیک نسبت فراوانی در شناسایی مناطق دارای استعداد سیل حوزه آبخیز پل دوآب شازند مناسب می‌باشد. بنابراین استفاده از تکنیک نسبت فراوانی در ارزیابی خطر سیل‌گرفتگی، مفید و قابل اعتماد است که با نتایج مطالعات Tehrani و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد. رویکرد ارائه شده در این

منابع مورد استفاده

1. Amini, J. 2010. Computer processing of remotely sensed images. Tehran University Press, 576 pages (in Persian).
2. Azari, M., H.R. Sadeghi and A. Telvari. 2009. Determining of sub-watershed contribution in peak flows and runoff volume in to prioritize in flood control. Geography and Development Iranian Journal, 12: 199-213 (in Persian).
3. Besharati, R. 2007. Prioritization of areas prone to flooding using in rainfall-runoff simulation HEC-HMS model in Roodak Watershed. MSc Thesis, University of Agriculture and Natural Resources of Sari, 116 pages (in Persian).
4. Darabi, H., K. Shahedi, K. Solaimani and M. Miryaghoubzadeh. 2014. Prioritization of sub-watersheds based on flooding conditions using hydrological model, multivariate analysis and remote sensing technique. Water and Environment Journal, 28(3): 382-392.
5. Darabi, H., K. Solaimani and S. Faryadi. 2011. The effects of physiographic factors on hydrological characteristics, case study: Maarch Sub-basin of Nourrood Watershed. 2nd International Symposium on Climate Change and Dendrochronology in Caspian Ecosystems, Sari University, 8 pages (in Persian).
6. Greenwood, J.B., G. Schoups, E.d. Campbell and N.J.L. Patrick. 2014. Bayesian scrutiny of simple rainfall-runoff models used in forest water management. Journal of Hydrology, 512: 344-365.

7. Khosroshahi, M. and B. Saghafian. 2006. Prioritization of flooding condition, strategy for flood control and measurements in watersheds. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 2: 12-19 (in Persian).
8. Kheyri-zadeh, M., J. Maleki and H. Amounia. 2012. Flood hazard zoning using ANP model in watershed, case study: Mardaghchay Watershed. *Quantitative Geomorphological Researches*, 3: 39-56 (in Persian).
9. Knebl, M.R., Z.L. Yang, K. Hutchison and D.R. Maidment. 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS and HEC-HMS/RAS, a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75: 325-336.
10. Miller, S.N., W.G. Kepner, M.H. Mehaffey, M. Hernandez, R.C. Miller and D.C. Goodrich. 2002. Integrating landscape assessment and hydrologic model for land cover change analysis. *Journal of the American Water Resources Association*, 38: 915-926.
11. Mohammad Esmail, Z. 2011. Monitoring land use changes in Karaj using remote sensing. *Soil and Water Research Institute (Soil and Water Sciences)*, 24: 81-88 (in Persian).
12. Morelli, S., A. Battistini and C. Filippo. 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.
13. Pourghasemi, H.R., H.R. Moradi, S.M. Fatemi Aghdas, C. Gokceoglu and B. Pradhan. 2012. GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). *Journal of Geosciences*, 7: 1857-1878.
14. Pradhan, B. 2009. Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. *Journal of Spatial Hydrology*, 9: 1-18.
15. Pradhan, B., U. Hagemann, M. Tehrany Shafapour and N. Prechte. 2014. An easy to use ArcMap based texture analysis program for extraction of flooded areas from TerraSAR-X satellite image. *Computers and Geosciences*, 63: 34-43.
16. Rohani, H., M. Mohseni Saravi and A. Malekian. 2005. Identify the most important climate and morphometry factors affecting peak flow and preparing regression model of the east and north-east of Iran. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 3: 99-108 (in Persian).
17. Roughani, M., M. Ghafouri and M. Tabatabaei. 2007. An innovative methodology for the prioritization of sub-catchments for flood control. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9: 79-87.
18. Saghafian, B., H. Farazjoo, H. Sepehri and E. Najafzade. 2007. Assessment of land use changes on flooding condition in Golestan dam Watershed. *Iran-Water Resources Research*, 2: 18-28 (in Persian).
19. Tehrany Shafapour, M., B. Pradhan and M.N. Jebur. 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.
20. Tehrany Shafapour, M., B. Pradhan and M.N. Jebur. 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, 512: 332-343.
21. Tehrany Shafapour, M., B. Pradhan, Sh. Mansor and A. Noordin. 2015. Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena*, 125: 91-101.
22. Varvani, J. 2001. Regional analysis of suspended sediment using regression equations in the Gorganroud Watershed. MSc thesis, University of Tehran, 120 pages.