

بررسی سیل‌خیزی و تعیین عوامل مؤثر در آن در حوضه رودخانه بالقلی‌چای با استفاده از تکنیک GIS، RS و AHP

علی قاسمی*^۱، علی سلاجقه^۲، آرشن ملکیان^۳ و اباذر اسمعیلی عوری^۴

۱. کارشناس ارشد آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

salajegh@ut.ac.ir

۲. استاد آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

malekian@ut.ac.ir

۳. استادیار آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

esmailiouri@uma.ac.ir

۴. دانشیار آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۹/۳۰

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۸/۱۵

چکیده

سیلاب اصلی‌ترین بلای همه‌گیر و یکی از مسائل مهم جهانی است به طوری که با افزایش شدت و فراوانی رخدادهای سیل، نگرانی‌های جهانی در خصوص افزایش مرگ و میر و ضررهای اقتصادی ناشی از سیل افزایش یافته است. در این مطالعه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های ایستگاه باران‌سنجی و تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) روشی کارآمد برای نقشه‌گذاری خطر سیل‌خیزی حوضه و زیرحوضه‌های رودخانه بالقلی‌چای ارائه شده است. نقشه خطر سیل‌خیزی بر پایه تأثیرات ترکیبی عوامل فیزیکی و اقلیمی تهیه شد. ۸ عامل فیزیکی شامل مساحت، شیب، جهت، زمان تمرکز، تراکم زهکشی، نسبت انشعاب، ضریب شکل و شماره منحنی و ۲ عامل اقلیمی شامل متوسط بارندگی سالانه و متوسط حداکثران بارندگی روزانه استفاده شد. از GIS برای تولید لایه‌های عوامل و از بازدید میدانی و تصاویر ماهواره‌ای به منظور اصلاحات مورد نیاز لایه‌های تهیه‌شده استفاده شد. سپس، از طریق توزیع پرسش‌نامه و جمع‌آوری نظرهای کارشناسی با استفاده از روش AHP، به هر یک از معیارها و زیرمعیارها وزنی اختصاص یافت. با همپوشانی لایه‌های وزن‌دارشده در محیط GIS، نقشه خطر سیل‌خیزی تهیه شد. نتایج نشان داد که قسمت‌های جنوبی و شمال‌غرب حوضه از نظر تولید سیلاب بسیار مستعد است. همچنین، زیرحوضه سفزچی‌چای (H) در قسمت جنوبی حوضه بالقلی‌چای از نظر سیل‌خیزی در رتبه اول و زیرحوضه لاطران‌چای (A) در رتبه آخر قرار دارد.

کلیدواژه

بالقلی‌چای، سیل‌خیزی، شماره منحنی، AHP، GIS.

۱. سرآغاز

قرن بیستم، مرگ حدود ۱۰۰ هزار نفر را رقم زد و زندگی حدود ۱/۴ میلیارد نفر را تحت تأثیر قرار داد (Ezemonye and Emeribe, 2012). با افزایش شدت و فراوانی رخدادهای سیل، نگرانی‌های جهانی در خصوص افزایش مرگ و میر و ضررهای اقتصادی ناشی از آن افزایش یافته است (Sarhadi, et al., 2012). سیلاب در سال ۲۰۱۰ زندگی ۱۷۸ میلیون نفر را تحت تأثیر قرار داد و از سال

سیلاب اصلی‌ترین بلایای جهانی است که سبب خسارات زیادی به بخش کشاورزی، شیلات، مسکن و زیرساخت‌ها می‌شود و به شدت روی فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی تأثیر می‌گذارد (Chang, et al., 2008) «۳۵XE». به طوری که سیلاب حدود ۴۰ درصد از آمار مرگ و میرهای ناشی از بلایای طبیعی را دربر می‌گیرد و فقط در آخرین دهه

بسیاری در خطر سیل خیزی دارند. ملکیان و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقی در حوزه اختراآباد در جنوب غرب استان البرز و شمال استان مرکزی، پس از وزن‌دهی عوامل سنگ‌شناسی، نفوذپذیری، بارش، تراکم زهکشی، زمان تمرکز، فاصله از آبراهه، شیب، کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک با استفاده از روش AHP و تلفیق لایه‌های عوامل مذکور در محیط برنامه ArcGIS نقشه پتانسیل سیل خیزی را در هفت کلاس تهیه کردند. نتایج حاکی از آن بود که مناطق دارای شیب بیش از ۶۰ درصد و بارش ۳۰۰-۴۰۰ میلی‌متر پتانسیل سیل خیزی بالایی دارند. به منظور تعیین عوامل مؤثر در سیل خیزی مطالعات گوناگونی از سوی محققان در اقصی نقاط دنیا انجام شده که با توجه به تفاوت در نوع و تعداد پارامترهای در نظر گرفته شده، همچنین ویژگی‌های منحصر به فرد هر یک از مناطق مورد مطالعه، نتایج و نظرهای متعددی ارائه شده است. Braud و همکاران (۱۹۹۸) در مطالعه‌ای روی تولید رواناب حوضه‌ای در آرژانتین به این نتیجه رسیدند که اساسی‌ترین عامل در ایجاد رواناب، تغییرات مکانی بارش و نوع خاک است. Sinnakaudan و همکاران (۲۰۰۳) معتقدند که صرف‌نظر از عوامل جوی، متغیرهای زیادی مانند شیب حوضه، شیب بستر جریان، اندازه حوضه، شکل حوضه، تعداد آبراهه، جنس زمین، جنس خاک، هیپسومتری، پوشش گیاهی و کاربری زمین در به‌روزرسانی سیلاب نقش دارند. ملکی‌نژاد و کوشری (۱۳۸۷) با تجزیه و تحلیل حساسیت مدل SCS به این نتیجه رسیدند که شماره منحنی نسبت به سایر عوامل بیش‌ترین تأثیر را روی دبی اوج در دوره بازگشت‌های مختلف دارند. ثقفیان و قرمزچشمه (۱۳۸۷) با بررسی سیل خیزی زیرحوضه‌های رودزرد در جنوب غرب ایران، عنوان کرده‌اند که عواملی چون نوع خاک، پوشش گیاهی، فاصله از خروجی و برخی پارامترهای فیزیکی از عوامل تأثیرگذار روی سیل خیزی زیرحوضه‌هاست. نجفی و نصری (۱۳۸۸) در حوضه اصفهان-سیرجان، به این نتیجه رسیده‌اند که به ترتیب عوامل زمان تمرکز، شیب سطح حوضه و تراکم زهکشی

۱۹۹۸ تا ۲۰۱۰ در مجموع ۴۰ میلیارد دلار خسارت مالی به بار آورده است (Martin, et al., 2012). با توجه به اینکه در اغلب حوضه‌های آبخیز کشور، وقوع سیل و خسارت‌های ناشی از آن روند افزایشی دارد، تعیین مناطق مولد سیل و اولویت‌بندی زیرحوضه از نظر پروژه‌های کنترل سیل و مدیریت جامع حوضه آبخیزها ضرورت دارد (ثقفیان و فرامرزشو، ۱۳۸۶). ارزیابی سیل خیزی اساساً فرایند چندبعدی ترکیبی و پیچیده شامل عوامل کیفی و کمی است. به همین علت، تصمیم‌گیران برای تسهیل در این‌گونه بررسی‌ها ترجیح می‌دهند نظرهای کارشناسی خود را به صورت مقادیر عددی نشان دهند (Yang, et al., 2013). Pawattana و همکاران (۲۰۰۹) در شمال شرق تایلند با استفاده از فرایند تحلیلی سلسله مراتبی (AHP) و تکنیک GIS و وزن‌دهی به عوامل آب سطحی، تراکم زهکشی، لندفرم، کاربری اراضی، زهکشی خاک، ژئومورفولوژی، شاخص پوشش و آبدهی آب زیرزمینی، به شناسایی مناطق تولید سیلاب پرداختند. Mukand و همکاران (۲۰۱۱) در ویتنام با استفاده از روش AHP و کمی‌سازی میزان تأثیر عوامل مؤثر در سیل خیزی، به شناسایی عوامل مؤثر در خطر سیلاب پرداختند. Saini و Kaushik (۲۰۱۲) در هند با استفاده از تکنیک GIS و روش مجموع رتبه‌ها ابتدا با در نظر گرفتن وزنی برای عوامل هیدرولوژی، شیب، نوع خاک، تراکم زهکشی و پوشش زمین نقشه خطر سیل را در سه کلاس تهیه کردند. Stefanidis و Stathis (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای با استفاده از AHP به بررسی تأثیر عوامل طبیعی و عوامل مخل انسانی روی خطر سیل خیزی حوضه‌های آبخیز در شمال یونان پرداختند. آنان با در نظر گرفتن هفت عامل کاربری اراضی، فرسایش‌پذیری، شیب حوضه، شیب آبراهه اصلی، نفوذپذیری خاک، شکل حوضه و تراکم زهکشی به‌منزله عوامل طبیعی و سه عامل تجاوز به حریم رودخانه، کارهای فنی ناکافی، شکل مقطع رودخانه در مناطق هموار به‌منزله عوامل مخل انسانی نقشه خطر سیل خیزی حوضه‌ها را تهیه کردند. نتایج آنان نشان داد که عوامل مخل انسانی نقش

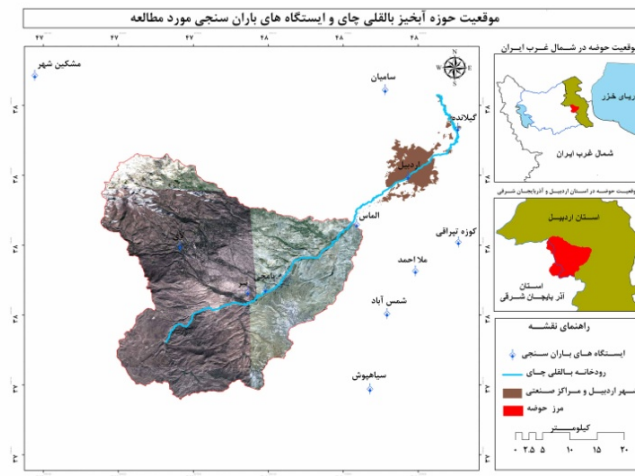
با تلفیق آن‌ها در محیط برنامه ArcGIS، با تأکید بر اثر ترکیبی آن‌ها روی سیل‌خیزی، نقشه سیل‌خیزی حوضه و اولویت حوضه‌ها از نظر سیل‌خیزی بررسی شد.

۲. مواد و روش بررسی

۱.۲. منطقه تحقیق

حوضه آبخیز بالقلی‌چای یکی از زیرحوضه‌های فرعی حوضه آبخیز بزرگ قره‌سو است. این حوضه در بالادست ایستگاه هیدرومتری پل الماس دارای ارتفاع متوسط ۲۰۱۴ متر و مساحت ۱۰۳۶/۱۸ کیلومتر مربع است که ۸۵ درصد از مساحت کل آن در استان اردبیل و ۱۵ درصد در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. مرتفع‌ترین نقطه حوضه، ۴۸۱۱ متر ارتفاع دارد که مربوط به قله کوه سبلان در قسمت شمال‌غربی حوضه است و پست‌ترین نقطه حوضه ۱۴۳۲ متر ارتفاع دارد که قسمت خروجی حوضه در سمت شمال‌شرقی واقع شده است. رودخانه بالقلی‌چای به علت عبور از مرکز اردبیل، قرارگرفتن بسیاری از مراکز صنعتی و تفریحی در نزدیکی حریم این رودخانه و تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه، یکی از رودخانه‌های مهم منطقه آذربایجان است. شکل ۱ موقعیت حوضه بالقلی‌چای را در شمال‌غرب ایران، غرب استان اردبیل و شرق استان آذربایجان شرقی و در بالادست ایستگاه هیدرومتری پل الماس، همچنین موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

آبراهه‌های درجه ۱ بیش‌ترین تأثیر را در ایجاد یا تشدید دبی‌های سیلابی دارند. امیدوار و کیان‌فر (۱۳۸۹) در حوضه آبخیز کنجانچم در استان ایلام با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و در نظر گرفتن ۲۸ پارامتر ژئومتری، فیزیوگرافی، نفوذپذیری و اقلیمی نقشه سیل‌خیزی را تهیه کردند. علایی‌طالقانی و همایونی (۱۳۹۰) با در نظر گرفتن ۱۴ عامل مؤثر در تولید رواناب و همپوشانی لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS، حوضه دینور در شمال‌شرق استان کرمانشاه را به ۵ پهنه تولید سیلاب بالا، نسبتاً بالا، متوسط، نسبتاً کم و کم طبقه‌بندی کردند. ثروتی (۱۳۹۰) در مطالعه‌ای روی حوضه‌های زیلگی و فیره‌رود در استان گیلان بیان کرده است که شکل، وسعت، شیب بستر، چالاب‌های گسترده در بستر رودخانه‌ها و بارش‌های ۲۴ ساعته این حوضه‌ها از عوامل مهم در سیل‌خیزی آن‌ها محسوب می‌شوند. نتایج مطالعات علایی‌طالقانی و همایونی (۱۳۹۰) در حوضه دینور در شمال‌شرق استان کرمان نشان داد که سیل‌خیزی این منطقه در اصل ناشی از ساختار ژئومورفولوژی این منطقه است. با توجه به موارد ذکرشده عوامل متعددی در ظهور سیلاب هر حوضه نقش دارد، اما اینکه میزان تأثیر هر یک از عوامل و اثر ترکیبی آن‌ها در مواقع سیلاب روی تشدید یا تضعیف سیلاب چگونه خواهد بود هنوز به درستی معلوم نیست. لذا در این پژوهش با در نظر گرفتن عوامل فیزیکی و اقلیمی مؤثر در سیل‌خیزی و ارزش‌گذاری هر یک از آن‌ها و



شکل ۱. موقعیت حوضه و ایستگاه‌های باران‌سنج

۳. روش تحقیق

در این تحقیق، با استفاده از GIS، RS، داده‌های ایستگاه باران‌سنجی وزارت نیرو و روش AHP نقشه خطر سیل خیزی حوضه بالقلی‌چای تهیه شد. برای این منظور ۸ عامل فیزیکی شامل مساحت زیرحوضه‌ها، شماره منحنی (CN)، شیب، جهت، زمان تمرکز، ضریب گردی میلر، تراکم زهکشی و نسبت انشعاب و ۲ عامل اقلیمی شامل بارش سالانه و حداکثر روزانه که عوامل مؤثر در تولید سیلاب به شمار می‌روند، در نظر گرفته شد. انتخاب این عوامل در وهله اول بر اساس مرور منابع و نتایج تحقیق سایر محققان، نظرهای کارشناسی و شناخت منطقه صورت گرفت. به منظور تهیه نقشه و اطلاعات مورد نیاز در انجام این تحقیق هر یک از عوامل دهگانه مؤثر در سیل‌خیزی به ترتیب زیر بررسی شدند.

- عامل مساحت

در میان عوامل ادا فیزیکی مؤثر در دبی اوج سیل مهم‌ترین عامل، مساحت حوضه است (مهدوی، ۱۳۸۸). برخی اوقات، الگوی زهکشی که بر اساس پردازش DEM اولیه به دست می‌آید با آنچه در واقعیت وجود دارد به طور کامل مطابق نیست؛ بنابراین DEM اولیه به اطلاعات اضافی تکمیل‌کننده نیازمند است که به طور کلی در قالب سه موضوع تبیین می‌شود (Djokic, 2008) که عبارت‌اند از: تکمیل شبکه آبراهه واقعی، تکمیل مرزهای واقعی حوضه زهکشی (حوضه و زیرحوضه) و تکمیل اتصالات جریان‌ات. هدف از موارد سه‌گانه عنوان‌شده مدل‌سازی دقیق زیرحوضه‌ها و شبکه آبراهه است که بتواند الگوی زهکشی درون DEM^۲ (نقشه رقومی ارتفاع) را به خوبی ارائه دهد. بدین منظور با استفاده از نقشه توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای Google Erath، ابتدا مرز حوضه و زیرحوضه‌ها، سپس نقشه آبراهه‌ها تهیه شد. لایه‌های تهیه‌شده برای اصلاح نقشه DEM اولیه به کار گرفته شد. بدین صورت که ابتدا با استفاده از نقشه توپوگرافی با فاصله تراز ۲۰ متر و ۵۸۵، نقطه ارتفاعی DEM ۱۰متری

تهیه، سپس با استفاده از نرم‌افزار Hydro Arc و اعمال اصلاحات مربوط به تکمیل آبراهه واقعی، مرز حوضه و زیرحوضه واقعی نقشه Hydro DEM تهیه شد. در نهایت با این DEM به مدل‌سازی زیرحوضه‌ها در نرم‌افزار Hydro Arc اقدام شد.

- عامل شماره منحنی

برای تهیه شماره منحنی به نقشه کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک نیاز داریم. امروزه در بیشتر موارد برای تهیه نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای همچون ETM برای تشخیص صحیح‌تر کاربری‌ها و تهیه نقاط کنترل از تصاویر Google Earth به سبب قدرت تفکیک بالای تصاویر آن و تسهیل در شناسایی نوع کاربری‌ها استفاده می‌شود. بنابراین، در این تحقیق به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth، همچنین بازدیدهای میدانی ابتدا نقشه اولیه‌ای در محیط برنامه Google Earth با دقت بالا تهیه سپس، با انتقال آن به محیط برنامه ArcGIS اصلاحات مورد نیاز از نظر توپولوژی روی آن اعمال شد. برای تهیه نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی، از نقشه خاک ۱:۲۵۰۰۰۰ و شیب حوضه استفاده شد. برای تهیه نقشه شماره منحنی با استفاده از ابزار HEC GEO HMS به ۳ ورودی نیاز داریم: نقشه DEM، نقشه تلفیقی کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و جدول Look Up. این جدول در واقع مربوط به شماره منحنی مورد نظر به ازای کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک است. در نهایت نقشه رستری شماره منحنی با اندازه پیکسل ۱۰ متر تهیه شد.

- عامل جهت و شیب

با توجه به اینکه دامنه‌های جنوبی نسبت به شمالی آفتاب‌گیرند، بنابراین ذوب برف در دامنه‌های جنوبی ناگهانی و ننگه‌داشت رطوبت در این دامنه‌ها نسبت به دامنه‌های شمالی کمتر است، از این رو دامنه‌های جنوبی نیز میزان پوشش کمتری دارند. همچنین، در منطقه مورد

مربع، L_i طول آبراهه به کیلومتر و A مساحت واحدها به کیلومتر مربع است.

نسبت انشعاب عبارت است از میانگین نسبت آبراهه‌های یک رده به تعداد رده بالاتر که در یک حوضه از فرمول ۵ محاسبه می‌شود.

$$BR = \frac{N_1}{N_2} + \frac{N_2}{N_3} + \frac{N_3}{N_4} + \dots + \frac{N_{n-1}}{N_n} \left(\frac{1}{n}\right) \quad (5)$$

که در آن BR نسبت انشعاب، N تعداد در هر رده و n شماره آخرین رده آبراهه است. معمولاً در صورتی که نسبت انشعاب حوضه کمتر باشد، دبی پیک حوضه نوک‌تیزتر و در صورت نسبت انشعاب بیشتر دبی پیک حوضه کشیده‌تر خواهد بود (Miller, Agarwal, 1998).
(۱۹۵۳) رابطه ۶ را به منظور محاسبه ضریب گردی حوضه پیشنهاد کرد که این ضریب همواره کمتر از یک است و در حوضه‌های گرد، نزدیک به یک می‌شود.

$$R_c = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (6)$$

که در آن A مساحت حوضه به کیلومتر مربع، P محیط حوضه به کیلومتر و C ضریب گردی حوضه است.

- عامل‌های متوسط حداکثر بارش روزانه و سالانه

به منظور تهیه نقشه هم‌باران متوسط حداکثر بارش روزانه و سالانه از آمار ۱۲ ایستگاه باران‌سنجی آب منطقه‌ای به علت پراکنش مناسب با طول دوره آماری مناسب ۲۷ ساله (سال آب ۱۳۶۲-۱۳۸۸) استفاده شد که موقعیت آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. برای رفع نقایص آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS، ماتریس همبستگی بین ایستگاه‌ها تشکیل شد. همگنی و تصادفی بودن داده‌ها با روش غیرنموداری ران-تست و استقلال داده‌ها با کاربرد آزمون ناپارامتری من-ویتنی بررسی شد. در این پژوهش برای بررسی تغییرات مکانی بارش، از روش‌های درون‌یابی قطعی، روش وزنی معکوس فاصله و تابع شعاع‌محور و از روش‌های زمین‌آمار روش کریجینگ و کوکریجینگ معمولی و ساده با مدل‌های کروی^۳، دایره‌ای^۴، نمایی^۵ و گوسی^۶ استفاده شده که به کرات مورد توجه محققان داخلی و خارجی قرار گرفته است. به منظور مقایسه

مطالعه با در نظر گرفتن مسیر غالب حرکت ابرهای باران‌زا و جهت وزش باد غالب (غرب به شرق) به نظر می‌رسد که دامنه‌های غربی به علت قرارگرفتن در مسیر توده بارش‌زا، در مواقع بارندگی، بارش بیشتری دریافت می‌کنند. از طرف دیگر، این دامنه‌ها در اثر وزش بادهای غربی-شرقی رطوبت خود را زودتر از دامنه‌های شرقی از دست می‌دهند. برای تهیه نقشه شیب و جهت از نقشه DEM ۱۰متری استفاده شد.

- محاسبه عامل‌های زمان تمرکز، تراکم زهکشی، نسبت انشعاب و ضریب میلر

برای محاسبه زمان تمرکز هر یک از زیرحوضه‌ها، DEM اصلاح‌شده به محیط نرم‌افزار HMS GEO HEC منتقل و از طریق این ابزار ابتدا زمان تأخیر زیرحوضه‌ها به دست آمد، سپس از طریق رابطه SCS زمان تمرکز هر یک از زیرحوضه‌ها محاسبه شد. فرمول ۱ تا ۳ روابط SCS را به ترتیب برای محاسبه زمان تأخیر، تلفات حوضه و زمان تمرکز نشان می‌دهد (مهدوی، ۱۳۸۸؛ علیزاده، ۱۳۸۸).

$$T_{log} = \frac{L^{1/8} (S+1)^{1/7}}{190.7 Y^5} \quad (1)$$

$$S = \frac{1000}{CN} \quad (2)$$

$$TC = 1/67(T_{log}) \quad (3)$$

که در آن T_{log} زمان تأخیر به ساعت، L طول آبراهه اصلی به فوت، Y شیب آبراهه اصلی به درصد، S تلفات حوضه به اینچ (که از روش شماره منحنی فرمول ۲ محاسبه می‌شود)، CN شماره منحنی به اینچ و TC زمان تمرکز به ساعت است.

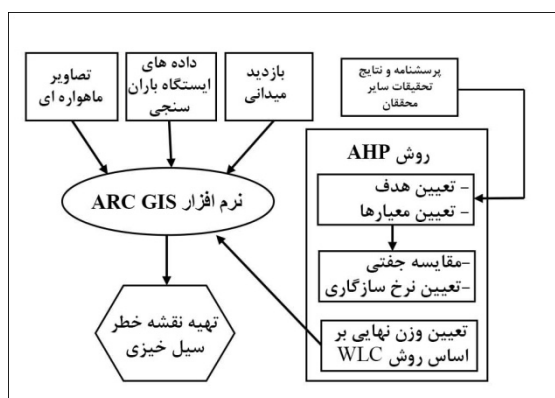
تراکم زهکشی، نسبت طول کل آبراهه‌ها به مساحت حوضه آبریز است که هرچه تراکم زهکش‌ها بیشتر باشد، نفوذپذیری کاهش و سرعت جریان‌ات سطحی افزایش می‌یابد (Narmatha, et al., 2013). به منظور محاسبه تراکم زهکشی فرمول ۴ از نرم‌افزار Arc GIS استفاده شد.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (4)$$

که در آن D_d تراکم زهکشی به کیلومتر بر کیلومتر

Saaty (۱۹۸۰) عنوان کرده است در صورتی که C.R به ۱ نزدیک شود، مقایسه به صورت تصادفی انجام گرفته است و در حالی که C.R به صفر نزدیک شود سازگاری بیشتر می‌شود. به طور کلی اگر C.R کمتر و مساوی ۰/۱ باشد وزن نهایی به دست آمده قابل قبول است، اما در صورتی که بزرگ‌تر از ۰/۱ باشد وزن‌های نسبی داده شده به معیارها بایستی تغییر یابند و مجدداً وزن‌دهی انجام شود.

پس از محاسبه وزن عوامل ذکر شده با استفاده از نرم‌افزار Choice Expert مقدار آن به لایه اطلاعاتی هر کدام از عوامل انتقال داده شد سپس، با کاربرد نرم‌افزار ArcGIS این لایه‌ها در هم تلفیق و همپوشانی شدند. در نهایت نقشه رستری با قدرت تفکیک ۱۰×۱۰ تولید شد، بدین ترتیب هرچه مقدار وزن هر پیکسل، بیشتر باشد مقدار خطر سیل‌خیزی آن پیکسل بالاتر خواهد بود. برای تعیین کلاس خطر سیل‌خیزی حوضه، وزن پیکسل‌ها به ۴ کلاس خطر سیل‌خیزی کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم‌بندی شد و برای مقایسه میزان سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها میانگین وزن پیکسل‌ها در هر یک از زیرحوضه‌ها، به منزله ملاک سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها استفاده شد. شکل ۲ نمودار مراحل تهیه نقشه خطر سیل‌خیزی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. فلوجارت مراحل تهیه نقشه خطر سیل‌خیزی

۴. نتایج

نتایج حاصل از مدل‌سازی زیرحوضه‌ها با استفاده از ابزار Arc Hydro نشان داد که حوضه آبخیز بالقلی‌چای از نظر

روش‌های مختلف درونیابی و انتخاب روش مناسب از روش ارزیابی متقابل^۷ استفاده شد. به این ترتیب که با کاربرد برنامه ArcGIS و استفاده از روش ارزیابی متقابل، مدل‌های درونیابی با هم مقایسه شدند و مدلی که دارای کمترین خطای برآوردی بود به منزله مدل مناسب برای تهیه نقشه تغییرات مکانی بارش استفاده شد.

- وزن‌دهی عوامل

برای وزن‌دهی به عوامل ذکر شده (معیارها) با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice از روش AHP استفاده شد. وزن‌دهی به عوامل، بر مبنای نتایج مطالعات سایر محققان (که در قسمت مقدمه و منابع به آن‌ها اشاره شده است)، همچنین جمع‌آوری نظر کارشناسان از طریق توزیع پرسش‌نامه اعمال شد. در این پرسش‌نامه عوامل ده‌گانه ذکر شده به صورت جدول ماتریسی طراحی و از محققان خواسته شد در بین عوامل مذکور از ۱ تا ۹ مقایسه جفتی انجام دهند. روش AHP از طریق Saaty (۱۹۸۰) توسعه داده شد. در این روش برای وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارها از ماتریس مقایسه جفتی^۸ به منزله ورودی به مدل استفاده می‌شود. در تحلیل و مدل‌سازی نهایی برای تهیه نقشه سیل‌خیزی روش ترکیب خطی وزن‌دار (WLC)^۹ استفاده شده است که از طریق رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$A_i = \sum_{j=1}^n W_j \times X_{ij} \quad (7)$$

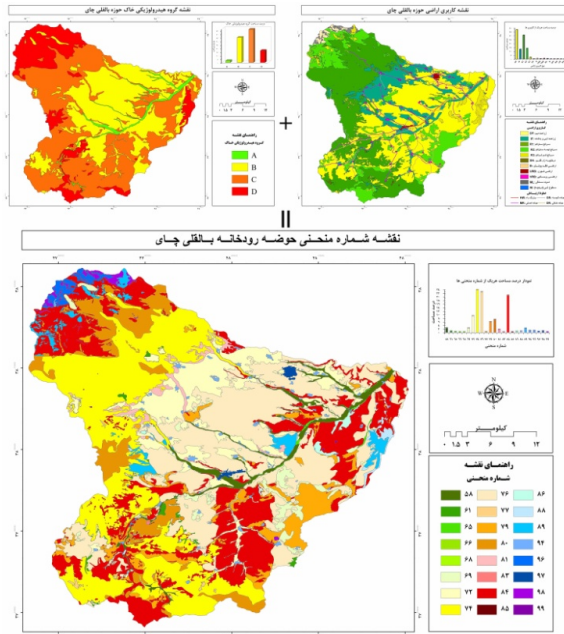
که در این رابطه، X_{ij} مقدار آیین‌گزینه در خصوص آیین معیار و W_j وزن استاندارد شده است، به طوری که مجموع وزن‌ها برابر یک است. Saaty برای آزمون سازگاری برای ارزیابی جفتی، شاخص سازگاری (C.I.)^{۱۰} و نرخ سازگاری (C.R.)^{۱۱} را مطرح کرده است که از طریق رابطه‌های ۸ و ۹ محاسبه می‌شود.

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (9)$$

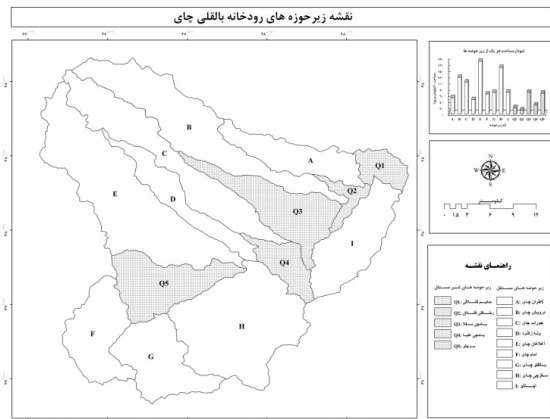
که در این روابط λ_{\max} حداکثر مقدار ویژه ماتریس، n رتبه ماتریس، $R.I.$ ^{۱۲} شاخص سازگاری ماتریس تصادفی است.

مکانی متوسط حداکثر بارش ۲۴ ساعته و متوسط بارندگی سالانه حوضه آبخیز بالقلی چای را نشان می‌دهد.

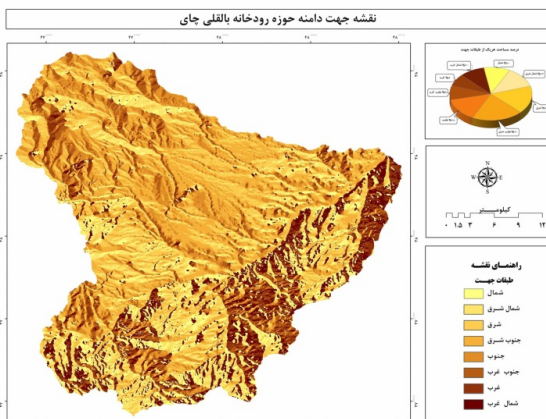
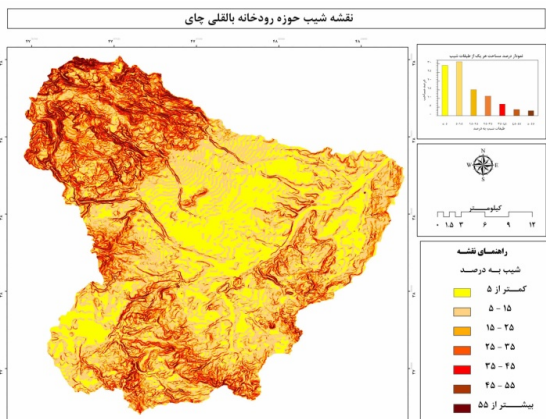


شکل ۴. نقشه شماره منحنی حوضه آبخیز بالقلی چای

فیزیوگرافی در محل ایستگاه پل الماس دارای ۱۴ زیرحوضه اصلی بوده که ۹ حوضه آن مستقل و ۵ حوضه غیرمستقل است. برای زیرحوضه‌های مستقل از حروف بزرگ A تا I و برای زیرحوضه‌های غیرمستقل حروف بزرگ Q1 تا Q5 استفاده شد (شکل ۳).



شکل ۳. نقشه زیرحوضه‌های حوضه آبخیز بالقلی چای



شکل ۵. نقشه شیب و جهت حوضه آبخیز بالقلی چای

پس از واردکردن اطلاعات موردنیاز در ابزار GEO HMS HEC نقشه شماره منحنی تهیه شد. شکل ۴ نقشه شماره منحنی را همراه نقشه کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک نشان می‌دهد. شکل ۵ نقشه شیب و جهت حوضه را نشان می‌دهد که بر اساس آن قسمت‌های شمالی و جنوبی حوضه به سبب حاکم‌بودن شرایط کوهستانی پرشیب‌تر از قسمت‌های میانی و شرقی حوضه است.

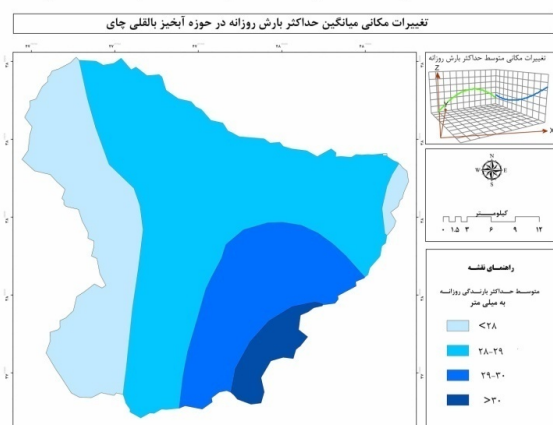
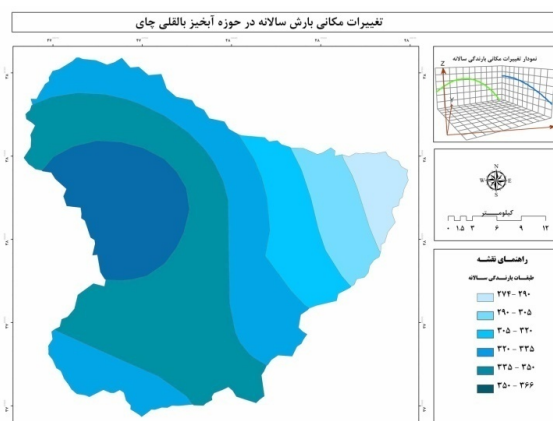
نتایج آزمون‌های مربوط به کیفیت داده‌های بارش حوضه، تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی را مستقل و همگن نشان داد. در نهایت با استفاده از روش کوکریجیگ معمولی دایره‌ای برای تغییرات مکانی متوسط حداکثر بارش روزانه و روش کوکریجیگ معمولی کروی برای بارش سالانه (به علت خطای کمتر و رابطه بارش ۲۴ ساعته و سالانه با متغیر کمکی ارتفاع) خطوط هم‌باران در محیط برنامه ArcGIS ترسیم شد. شکل ۶ نقشه تغییرات

جدول ۱. زمان تمرکز، نسبت انشعاب و تراکم زهکشی و ضریب میلیر زیرحوضه‌ها

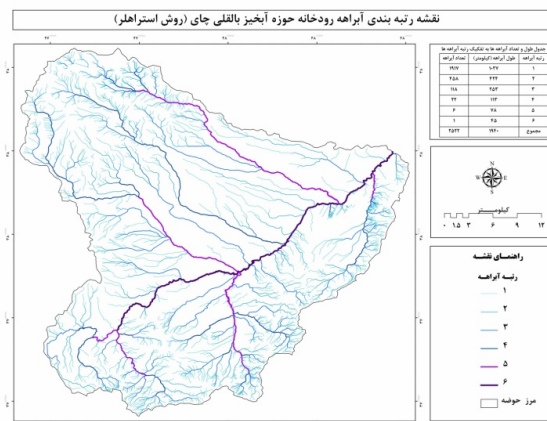
| ضریب میلیر | تراکم زهکشی | نسبت انشعاب | زمان تمرکز (h) | زیرحوضه‌ها |
|------------|-------------|-------------|----------------|------------|
| ۰/۳۲ | ۰/۹ | ۴/۳۳ | ۶/۱۰ | A |
| ۰/۲۱ | ۲/۲۲ | ۴/۴۵ | ۵/۷۰ | B |
| ۰/۲۰ | ۱/۷۲ | ۵/۱۶ | ۶/۰۱ | C |
| ۰/۱۸ | ۱/۰۳ | ۳/۹ | ۶/۷۰ | D |
| ۰/۲۸ | ۱/۶۵ | ۳/۷ | ۶/۵۲ | E |
| ۰/۴۴ | ۱/۸۵ | ۳/۲۹ | ۵/۹۲ | F |
| ۰/۴۴ | ۴/۳۲ | ۳/۹۲ | ۳/۰۹ | G |
| ۰/۵۴ | ۳/۲۵ | ۴/۶۲ | ۴/۴۳ | H |
| ۰/۴۳ | ۲/۵۴ | ۴/۶۷ | ۴/۱۵ | I |
| ۰/۳۵ | ۰/۲۴ | ۲/۸۳ | ۲/۱۹ | Q1 |
| ۰/۲۱ | ۱/۰۴ | ۲/۸۳ | ۲/۸۱ | Q2 |
| ۰/۲۹ | ۱/۲۶ | ۳/۴۳ | ۵/۲۴ | Q3 |
| ۰/۳۵ | ۱/۹۵ | ۴/۶۹ | ۳/۱۸ | Q4 |
| ۰/۴۱ | ۱/۳۴ | ۳/۶ | ۴/۱۵ | Q5 |

پس از جمع‌آوری پرسش‌نامه‌های توزیع شده در بین کارشناسان و در نظر گرفتن متوسط نمره مقایسه جفتی اعمال شده از سوی کارشناسان، همچنین بررسی منابع علمی، ماتریس مقایسه جفتی معیارها و زیرمعیارها با روش AHP اعمال و با استفاده از روش WLC وزن نهایی هر یک از معیارها و زیرمعیارها تعیین شد. مقدار C.R. برابر با ۰/۰۸ به دست آمد، بنابراین اوزان به دست آمده قابل قبول است. شکل ۸ وزن نهایی هر یک از معیارها و زیرمعیارهای مورد بررسی را با استفاده از تکنیک AHP نشان می‌دهد. پس از انتقال اوزان به دست آمده به فیلد اطلاعاتی زیرمعیارها در هر لایه اطلاعاتی، با استفاده از برنامه ArcGIS، تمامی ۱۰ معیار تلفیق و نقشه رستری خطر سیل خیزی با قدرت تفکیک ۱۰×۱۰ تهیه شد که در شکل ۹ نشان داده شده است.

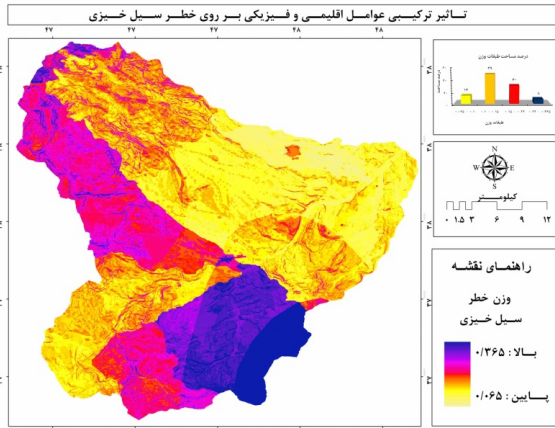
در شکل ۷ نقشه آبراهه حوضه همراه روش رتبه‌بندی Strahler (۱۹۶۴) نشان داده شده است. پس از محاسبات مربوط در جدول ۱ مساحت، زمان تمرکز، نسبت انشعاب و تراکم زهکشی و ضریب میلیر هر یک از زیرحوضه‌ها نشان داده شد.



شکل ۶. تغییرات مکانی متوسط حداکثر بارش روزانه و بارش سالانه



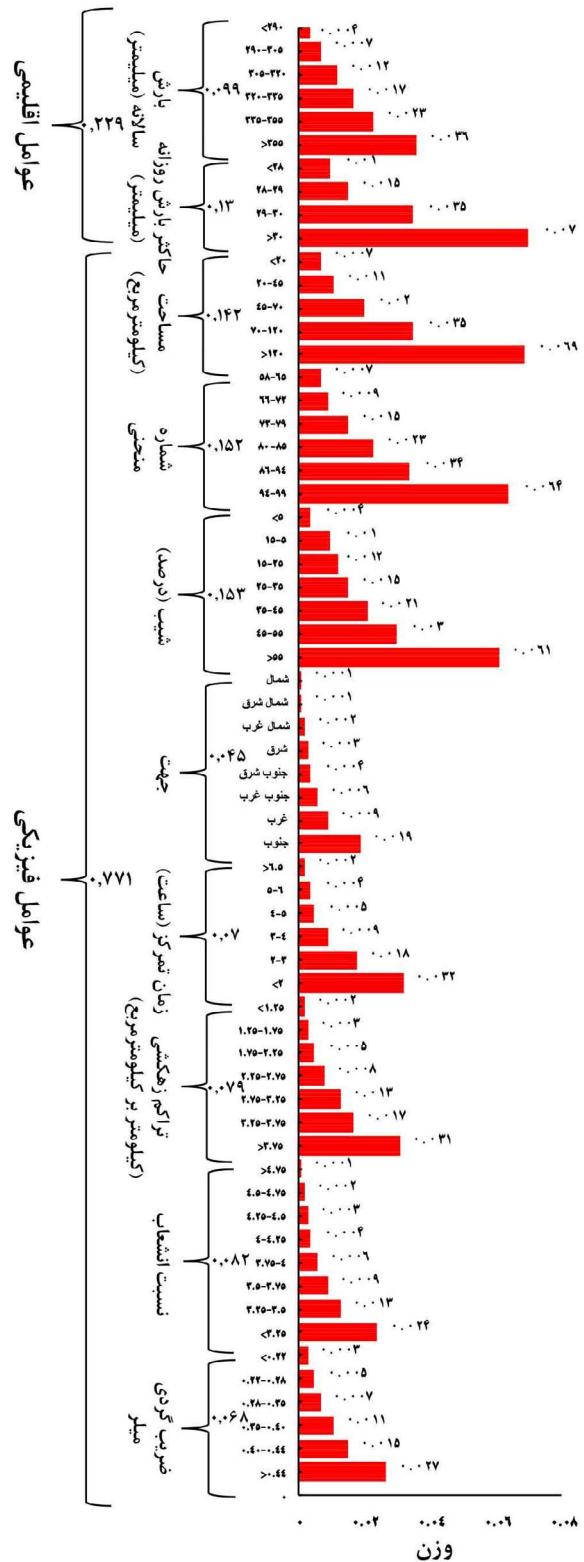
شکل ۷. نقشه آبراهه حوضه و رتبه‌بندی روش استراهلر



شکل ۹. نقشه خطر سیل‌خیزی حوضه

۵. بحث و نتیجه‌گیری

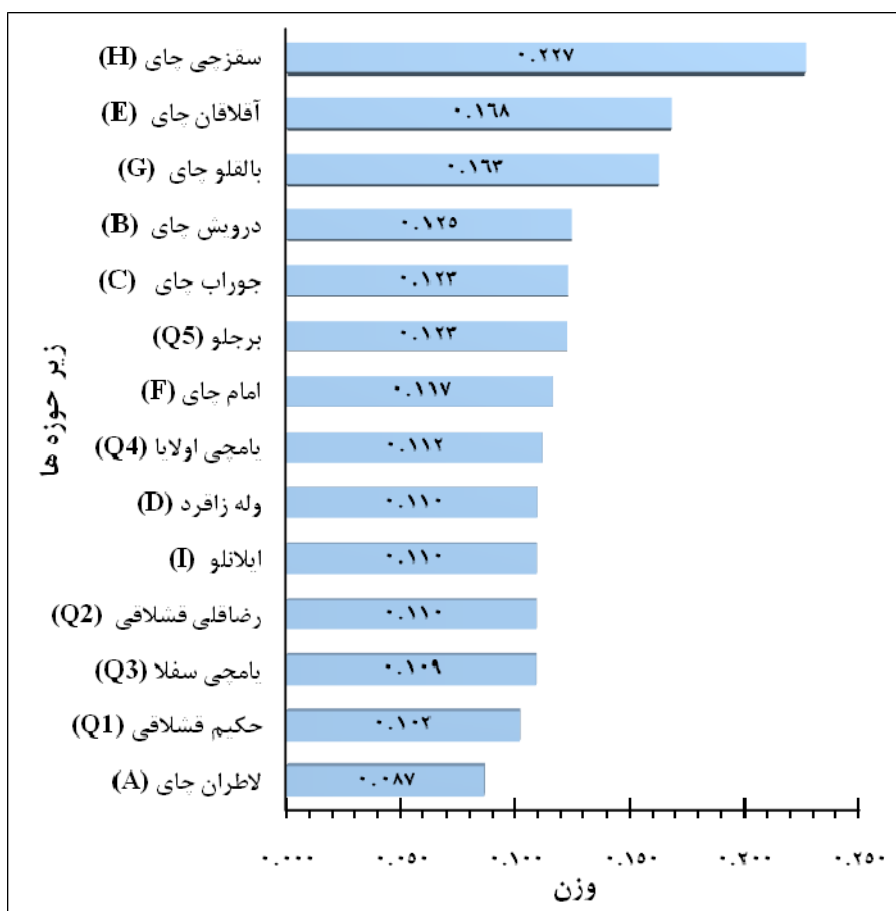
نتایج حاصله نشان می‌دهد که ۸ عامل فیزیکی با مجموع وزن ۰/۷۷۱ تأثیر بیشتری از ۲ عامل اقلیمی با مجموع وزن ۰/۲۲۹ دارد. در بین عوامل فیزیکی و اقلیمی بیش‌ترین وزن مربوط به معیار شیب با مقدار وزن ۰/۱۵۳ و در بین تمامی زیرمعیارها بیش‌ترین تأثیر مربوط به زیرمعیار حداکثر بارش ۲۴ ساعته با مقدار بیشتر از ۳۰ میلی‌متر و وزن ۰/۰۷ است. با توجه به نقشه رستری سیل‌خیزی مشاهده می‌شود که زیرحوضه‌های جنوبی و شمال‌غرب حوضه خطر سیل‌خیزی بالایی دارند که این امر به علت قرارگرفتن این‌ها در ارتفاعات سبلان در شمال‌شرق و بزقوش در قسمت‌های جنوبی حوضه است؛ چنانکه در این قسمت از حوضه عوامل فیزیکی و اقلیمی نقش فزاینده‌ای در افزایش خطر سیل‌خیزی زیرحوضه‌های این محدوده دارند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در نقشه خطر سیل‌خیزی حوضه، ۸ درصد از مساحت کل منطقه (۸۱ کیلومتر مربع) دارای خطر خیلی بالا (وزن ۰/۳۶۵-۰/۲۲)، ۳۰ درصد (۳۱۲ کیلومتر مربع) دارای خطر بالا (وزن ۰/۱۵-۰/۲۲)، ۴۹ درصد از منطقه (۵۰۵ کیلومتر مربع) دارای توان سیل‌خیزی متوسط (وزن ۰/۱-۰/۱۵) و ۱۳ درصد (۱۳۸ کیلومتر مربع) دارای خطر کم (وزن ۰/۰۶۵-۰/۱) است. بر اساس شکل ۱۰ زیرحوضه سقزچای (H) با



شکل ۸. وزن نهایی هر یک از زیرمعیارها به روش WLC

است که مزایای بسیاری دارد که می‌توان به طور خلاصه به موارد زیر اشاره کرد: ۱. در نظر گرفتن اثر ترکیبی عوامل فیزیکی و اقلیمی روی سیل‌خیزی؛ ۲. تعیین سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها بر مبنای ارزش کمی به ترتیب اهمیت؛ ۳. تعیین مناطق دارای خطر سیل‌خیزی بالا بر مبنای ارزش کمی. بنابراین، یکی از مزایای مهم روش حاضر، تعیین خطر سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها همراه شناسایی و تعیین مناطق مولد سیل در هر یک از زیرحوضه‌هاست.

۱۴ درصد مساحت کل و وزن متوسط ۰/۲۲۷، به‌منزله سیل‌خیزترین زیرحوضه آبخیز بالقلی‌چای تعیین شد. زیرحوضه آقلاقان‌چای (E) با ۱۶ درصد مساحت کل و متوسط وزن ۰/۱۶۸ و زیرحوضه بالقلوچای با ۷ درصد مساحت حوضه و وزن متوسط ۰/۱۶۳ به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم از نظر سیل‌خیزی قرار دارد. زیرحوضه لاطران‌چای (A) ۵ درصد از مساحت کل و متوسط وزن ۰/۰۸۷ در کلاس آخر سیل‌خیزی قرار دارد. روش به‌کاربرده‌شده در این مطالعه، ساده و کارآمد



شکل ۱۰. متوسط وزن سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها

یادداشت‌ها

1. Analytical Hierarchy Process
2. Digital Elevation Model
3. Circular Model
4. Spherical model
5. Exponential model
6. Gaussian Model
7. Cross-validation
8. Pairwise Comparison Matrix
9. Weighted Linear Combination Method
10. Consistency Index
11. Consistency Ratio
12. Random Index

منابع

- امیدوار، ک. و کیان‌فر، آ. ۱۳۸۹. پهنه سیل‌بندی پتانسیل کنجانچم‌خیزی حوضه آبریز. مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۲، ص ۷۳-۹۰.
- ثقفیان، ب. و فرامرزجو، ح. ۱۳۸۶. تعیین مناطق مولد سیل و اولویت سیل‌بندی‌خیزی واحدهای هیدرولوژیک حوزه گلستان سد. مجله علمی و پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال اول، شماره ۱، ص ۱-۱۱.
- ثقفیان، ب. و قرمزچشمه، ب. ۱۳۸۷. تغییرات مکانی شدت سیل‌خیزی. مجله تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۱، ص ۲۸-۳۹.
- ثروتی، م. ۱۳۹۰. برآورد پتانسیل سیلاب با تأکید بر ویژگی‌های ژئومورفولوژیک در دو حوضه آبخیز زیلکی و فیره‌رود با استفاده از روش SCS. فصل‌نامه علمی و پژوهشی جغرافیای سرزمین، سال هشتم، شماره ۳۰، ص ۳۳-۴۷.
- علایی‌طالقانی، م. و همایونی، ص. ۱۳۹۰. پهنه حوضه‌بندی دینور از نظر تولید سیلاب با استناد به مؤلفه ژئومورفولوژی. پژوهش‌نامه جغرافیایی، شماره ۱، ص ۳۹-۴۹.
- علیزاده، ا. ۱۳۸۸. اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ بیست و ششم، انتشارات دانشگاه امام رضا، ص ۴۳۹-۸۰۷.
- ملکیان، آ. افتادگان‌خوزانی، ا. و عشورنژاد، غ. ۱۳۹۱. پهنه حوزه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی آبخیز اخترآباد با استفاده از روش تحلیل سلسله. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۴۴، شماره ۴، ص ۱۳۱-۱۵۲.
- ملکی‌نژاد، ح. و کوثری، م. ر. ۱۳۸۷. تجزیه و تحلیل حساسیت و بررسی نسبی اهمیت عوامل مؤثر در دبی اوج در روش شماره منحنی. مجله علمی و پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال دوم، شماره ۵، ص ۳۱-۴۰.
- مهدوی، م. ۱۳۸۸. هیدرولوژی کاربردی، جلد دوم، چاپ ششم، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۱۴۷-۱۸۲.
- نجفی، ع. و نصری، م. ۱۳۸۸. عوامل مؤثر در سیلاب حوزه آبخیز اصفهان-سیرجان به روش تحلیل عاملی. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۰، شماره پیاپی، ۳۶، شماره ۴، ص ۱۰۸-۱۱۸.
- Agarwal, C.S. 1998. Study of drainage pattern through aerial data in Naugarh area of Varanasi district. U.P. J. Ind. Soc. Remote Sensing, 26(4): 169-175.
- Braud, I., Fernandez, P. and Bouraoui, F. 1998. Study of the rainfall-runoff process in the Andes region using a continuous distributed model. Journal of Hydrology, 216: 155-171.
- Chang, L.F., Lin, CH. and Su, M.D. 2008. Application Of geographic weighted regression to establish flood-damage functions reflecting spatial variation. Water SA, Vol 34 No 2, pg, 209-216.
- Djokic, D. 2008. Comprehensive Terrain Preprocessing Using Arc Hydro Tools. ESRI.
- Ezemonye, M.N. And Emeribe, C.N. 2011. Flood Characteristics and management adations in parts of the IMO RIVER system. Journal of Environmental Studies and Management Vol. 4 No 3, pg.: 56-64.
- Martin, O., Rugumayo, R. and O vcharovichova, J. 2012, Applicatin of HEC HMS/RAS and GIS tools iv fliid m odeling: a case Study for river Sironko-Uganda. Global Journal of Engineering, Design and Technology (G.J. E.D.T), Vol. 1(2):pp. 19-31.
- Miller, V.C. 1953. A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Columbia University, Department of Geology, Technical Report, No.3, Contract N6 ONR 271-300.
- Mukand, N.M.D., Huynh, S.B. and T. Luong. 2011. Evaluation of food risk param eters in the Day River Flood Diversion Area, Red River Delta, Vietnam. Nat Hazards, 56:169-194.

Narmatha, T., Jeyaseelan, A., Mohan, S.P., Mahalingam, S. and Natchimuthu, S. 2013. Morphometric analysis of upper part of Pambar watershed, Ponnaiyar river basin, Tamil Nadu, India using Geographical Information System. *J. Acad. Indus. Res.* Vol. 1(11), p. 726-729.

Pawattana, C., Tripathi, N. K., and Htwe, S.L. 2009. Development of Potential Floodwater Retention Zones using AHP and GIS: A Case Study in the Chi River Basin, Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, Vol 5, No 4, 17-25.

Saini, S.S and Kaushik, S.P. 2012. Risk and vulnerability assessment of flood hazard in part of Ghaggar Basin: A case study of Guhla block, Kaithal, Haryana, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, Vol 3, no 1, 42-54.

Saaty, T. L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw Hill.

Sarhadi, A., Soltani, S. and Modarres, R. 2012. Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: Linking GIS techniques and frequency analysis. *Journal of Hydrology* 458-459, Pp. 68-86.

Sinnakaudan, S.H. K., Ghani, A.A., Mohd Sanusi S.A. and Nor Azazi, Z. 2003. Flood Risk Mapping for Pari River Incorporating Sediment Transport. *Environmental Modeling & Software*, Vol. 18, No. 2, PP. 119-130.

Stefanidis, S. and Stathi s, D., 2013. Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). *Nat Hazards*, 68:569-585.

Strahler, A.N. 1964. Quantitative Geomorphology of Basins and Channel Networks. In: Chow, V.T. (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology*. Mcgraw Hill Book Company, NewYork.

Yang, X.L., Ding, J. H. and Hou, H. 2013. Application of a triangular fuzzy AHP approach for flood risk evaluation and response measures analysis, *Nat Hazards* (2013) 68:657-674.