



بهینه‌یابی موقعیت مکانی نقشه استاندارد سیل در پهنه‌بندی سیل با استفاده از مشخصه‌های ژئومورفولوژیکی

قاسم پناهی، سعیدرضا خداشناس^{*}، شیما عقابی، زهرا خسروی منش

گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۴
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:

پهنه‌بندی سیل
شاخص ژئومورفولوژیکی
نقشه رقومی ارتفاعی
کاربری اراضی
نقشه استاندارد سیل

خلاصه: استفاده از مشخصه‌های ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز، یکی از روش‌های نوین پهنه‌بندی سیلاب است که داده‌های هیدرولیکی-هیدرولوژیکی کمی برای پهنه‌بندی سیلاب نیاز دارد. در این روش به منظور افزایش دقت پهنه‌بندی سیلاب، از نقشه استاندارد سیلاب استفاده می‌شود. نقشه استاندارد سیلاب، نقشه سیل برای یک محدوده کوچک در حوضه آبریز مورد بررسی است. با توجه به تفاوت میزان بده جریان در نقاط مختلف حوضه آبریز، تعیین محلی برای نقشه استاندارد سیلاب، امری ضروری می‌باشد. در این پژوهش نقشه استاندارد سیلاب با دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال، برای سه زیرحوضه رادکان، جاغرق و آق‌دریند که از زیرحوضه‌های حوضه آبریز کشف‌رود می‌باشند، به منظور تعیین بهترین مکان برای نقشه استاندارد سیلاب مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام پهنه‌بندی سیلاب حوضه آبریز کشف‌رود از افزونه GFA در نرم افزار QGIS استفاده شد. نتایج پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از این افزونه برای هر سه نقشه استاندارد سیلاب، دارای نرخ مثبت صحیح (RTP) بیشتر از ۰/۹۳ و سطح زیر منحنی (AUC) بیشتر از ۰/۹۶ بود، که نشان از دقت بالای پهنه‌بندی سیلاب در حوضه آبریز کشف‌رود می‌باشد. با توجه به مقادیر نرخ مثبت صحیح بیش از ۰/۹۶ و سطح زیرمنحنی بیش از ۰/۹۹، زیرحوضه آق‌دریند به عنوان بهترین مکان برای نقشه استاندارد سیلاب در حوضه آبریز کشف‌رود تعیین شد. در ادامه با استفاده از نقشه استاندارد سیلاب زیرحوضه آق‌دریند، نقشه‌های خطر سیل با دوره بازگشت‌های مورد بررسی برای حوضه آبریز کشف‌رود تهیه شد. نتایج بررسی نقشه‌های خطر سیل در این حوضه نشان داد که به ازای رخ دادن سیل با دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله، به ترتیب ۱۲/۶۲، ۱۶/۳۰ و ۲۴/۶۴ درصد از کاربری‌های شهری و روستایی در معرض خطر سیل قرار خواهند گرفت.

۱- مقدمه

کیلومتری از رودخانه جامانا در بنگلادش با استفاده از دو مدل یک بعدی MIKE 11 و IRIC CERI^۱ پرداختند. ایشان بیان کردند که برای اجرای مدل‌سازی یک بعدی سیل با استفاده از مدل‌های مذکور به نقشه شبکه رودخانه‌ها، مشخصات مقاطع عرضی رودخانه، شرایط مرزی در رودخانه، ضریب زبری مانینگ، شرایط هیدرولیکی رودخانه، پارامترهای پیش‌بینی سیل و تراز ارتفاعی محدوده مطالعاتی نیاز است. ایشان با استفاده از داده‌های ورودی و داده‌های مشاهداتی، هر دو مدل را کالیبره و واسنجی نمودند. نتایج مدل‌سازی سیل ایشان نشان داد که مدل MIKE 11 نسبت به مدل IRIC CERI دارای دقت بالاتری است [۳]. پی‌تی و تی‌کا در سال ۲۰۲۰ با استفاده از مدل MIKE FLOOD به بررسی سیل در رودخانه پامبا در هندوستان پرداختند. ایشان بیان کردند که MIKE FLOOD

تحقیقات نشان می‌دهد که میزان خسارات ناشی از سیل ۳۱ درصد از کل خسارات ناشی از بلایای طبیعی را شامل می‌شود که بیشتر از خسارات طوفان و زلزله می‌باشد [۱]. بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی، بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷، سیل در سراسر جهان زندگی بیش از دو میلیارد انسان را تحت تاثیر قرار داده است [۲]. با توجه به خسارات جانی و مالی فراوان سیل‌ها، به منظور کاهش این خسارات در مناطق مختلف، بررسی و مطالعه سیل‌ها و تهیه نقشه خطر امری ضروری است. امروزه مدل‌سازی‌های نرم‌افزاری با توجه به سهولت و کم هزینه بودن توسعه بیشتری نسبت به مطالعات میدانی، آزمایشگاهی یافته است.

چادھاری و باری در سال ۲۰۲۱ به بررسی سیل محدوده‌ای ۱۵۰

1 International River Interface Cooperative - Civil Engineering Research Institute

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: khodashenas@um.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



بیان کردند که مهمترین مشخصه‌های مورد استفاده در زمینه پهنه‌بندی سیل با استفاده از شاخص‌های توپوگرافیک را اطلاعات ارتفاعی زمین، رطوبت خاک و همچنین کاربری اراضی می‌باشند [۱۰]. مانفردا و همکاران در سال ۲۰۱۱، شاخص توپوگرافیک را اصلاح کردند و با عنوان شاخص توپوگرافیک اصلاح شده^۶ معرفی نمودند [۱۱]. با توجه به تاثیر زیاد مشخصه‌های ژئومورفولوژیکی بر ایجاد سیل‌ها در حوضه آبریز، می‌توان از این مشخصه‌ها به عنوان جایگزینی برای مدلسازی سیل‌ها به جای روش‌های هیدرولیکی-هیدرولوژیکی استفاده کرد [۱۲]. بر همین اساس ساملا و همکاران با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون، یک افزونه^۷ برای برنامه QGIS به نام-Geo (morphologic Flood Area) طراحی کردند [۱۳]. ناقش کومارو همکاران تاثیر دقت نقشه‌های رقومی ارتفاعی را بر ضریب حد آستانه سیل حوضه آبریز ماهانادی^۸ در هندوستان را با استفاده از شاخص‌های توپوگرافیک اصلاح شده، مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. ایشان به منظور بدست آوردن ضریب حد آستانه بهینه برای این حوضه آبریز، نقشه‌های رقومی ارتفاعی محدوده مطالعاتی خود را با دقت‌های مکانی ۲۲۵، ۴۵۰ و ۹۰۰ متر تهیه و مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دقت مکانی نقشه‌های رقومی ارتفاعی، مقدار ضریب حد آستانه بهینه کاهش می‌یابد. وینگ و همکاران در سال ۲۰۱۷، به بررسی سیل مناطقی که تحت پوشش نقشه خطر آژانس مدیریت‌های اضطراری فدرال آمریکا نبودند، با استفاده از روش‌های عددی مبتنی بر مشخصه‌های توپوگرافی، پرداختند [۱۴]. نتایج بررسی ایشان نشان داد که استفاده از این روش، می‌تواند روند تهیه نقشه خطر سیل با دوره بازگشت‌های مختلف را تسریع کرده و از سویی توانایی افزایش دقت نقشه‌های خطر سیل را بالا ببرد.

جعفرزادگان و همکاران در سال ۲۰۱۸، با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی به بررسی سیل ۱۰۰ ساله در چند رودخانه در ایالات متحده پرداختند [۱۵]. نتایج ایشان نشان داد که بین نتایج پهنه‌بندی سیل ۱۰۰ ساله با استفاده از روش‌های ژئومورفولوژیکی و نتایج حاصله از مدلسازی همین سیل در نرم‌افزار HEC-RAS و همچنین نقشه‌های خطر سیل ۱۰۰ ساله ارائه شده توسط آژانس مدیریت‌های اضطراری فدرال آمریکا، تنها ۱۴ درصد اختلاف وجود دارد. بر این اساس بیان کردند که استفاده از این روش می‌تواند نتایج قابل قبولی برای احتمال وقوع سیل در این مناطق ارائه دهد.

پلتفرمی است که از ترکیب مدل‌های MIKE11 و MIKE21 ایجاد شده است و برای مدلسازی سیل، به داده‌های مکانی و زمانی دبی و تراز سطح آب رودخانه نیاز است. ایشان اظهار کردند که دقت داده‌های ورودی به این مدل هیدرولیکی برای مدلسازی سیل بسیار مهم بوده و تاثیر زیادی بر نتیجه خروجی از مدل می‌گذارد [۴]. رمالی و همکاران در سال ۲۰۱۸ با استفاده از مدل HECRAS، سیل با دوره بازگشت‌های مختلف را برای شهر سگمت^۱ در مالزی مورد بررسی قرار دادند. ایشان بیان کردند که برای اجرای مدلسازی سیل به داده‌های هندسی رودخانه و همچنین مشخصات جریان نیاز است و بدون داشتن این داده‌ها برای محدوده مطالعاتی، نمی‌توان مدلسازی سیل را برای محدوده مطالعاتی انجام داد. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که مدلسازی عمق سیل با استفاده از این مدل در مقایسه با سیل رخ داده در سال ۲۰۱۱ در همین منطقه، با دقتی بیش از ۹۱ درصد انجام شده است [۵]. پایه و اساس مدلسازی سیل با استفاده از این مدل‌ها، شبیه‌سازی هیدرولیکی-هیدرولوژیکی حوضه آبریز می‌باشد. استفاده از این مدل‌ها نیازمند داده‌های زیاد با دقت بالا می‌باشد. با توجه به اینکه داده‌برداری‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، هزینه بالایی دارد، معمولاً در سطح کلان نسبت به داده‌برداری این پارامترها اقدام نمی‌شود. همچنین به دلیل اینکه داده‌هایی با طول آماری کافی برای مدلسازی مناطق مختلف وجود ندارد، در نتیجه نمی‌توان از این مدل‌های نرم افزاری در سطح کلان مدیریتی برای مدلسازی سیل استفاده نمود [۶]. بر این اساس، نیاز به مدل‌هایی که به داده‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی زیادی نیاز نداشته باشند، بیش از پیش احساس می‌شود.

توسعه سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲ موجب تسریع در تولید، پردازش، تحلیل و مدیریت سیل‌ها شده است [۷]. از سویی دیگر پیشرفت در علوم فضایی و سنجش از دور^۳ در سال‌های اخیر موجب شده است تا تصاویر با دقت مکانی بالایی از سطح زمین در دسترس باشد [۸]. استفاده از مشخصه‌های توپوگرافیکی^۴ برای مدلسازی سیل‌ها، یکی از این روش‌هایی است که از نقشه‌های رقومی ارتفاعی^۵ برای مدلسازی سیل‌ها استفاده می‌کند. مطالعات مانفردا و همکاران نشان داد که بین شاخص توپوگرافیک و سیل در حوضه ارتباط معناداری وجود دارد که می‌توان از این مشخصه‌ها در مدلسازی سیل در سطح حوضه آبریز مورد مطالعه استفاده نمود [۹]. ناقش کومار و همکاران

- 1 SEGAMAT TOWN
- 2 Geographic Information System (GIS)
- 3 Remote Sensing (RS)
- 4 Topographic Index (TI)
- 5 Digital Elevation Model (DEM)

- 6 Modified Topographic Index (TI_m)
- 7 Plugin
- 8 Mahanadi
- 9 Federal Emergency Management Agency (FEMA)

چند حوضه آبریز بزرگ در کشورهای اسپانیا، ایتالیا، مجارستان و انگلیس نیز انجام دادند که به نتایج مشابهی دست یافتند.

فریدانی و همکاران در سال ۲۰۲۰، به بررسی سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله با استفاده از افزونه GFA⁶ برای سه حوضه سرباز، فریزی و شاپور در ایران پرداختند [۶]. ایشان برای تهیه نقشه استاندارد سیل که به منظور افزایش دقت محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد، سیل ۱۰۰ ساله را برای بخش‌های کوچکی از هر ۳ حوضه با استفاده از مدل هیدرولیکی CADDIES-2D استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از این افزونه، نتایج قابل قبولی برای پهنه‌بندی سیل و همچنین محاسبه ارتفاع سیل ارائه می‌دهد.

آلبانو و همکاران در سال ۲۰۲۰، نقشه خطر سیل ۱۰۰ ساله را برای کشور رومانی با استفاده از افزونه GFA بدست آوردند [۲۰]. اساس کار ایشان بر پایه تهیه نقشه خطر سیل بزرگ مقیاس برای مناطق فاقد داده‌های آماری کافی جهت مدلسازی سیل به روش‌های هیدرولیکی-هیدرولوژیکی بوده است. در گام اول مطالعات نقشه عمق سیل را بر اساس استفاده از شاخص‌های ژئومورفیکی بدست آوردند و پس از آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، نقشه کاربری اراضی کشور رومانی بدست آورده شد و در گام نهایی با استفاده از ابزار GIS نسبت به تهیه نقشه خطر سیل برای این کشور اقدام کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی به منظور تهیه نقشه خطر سیل، می‌تواند یک روش مقرون به صرفه برای مطالعات سیل بزرگ مقیاس و در ابعاد ملی باشد. حوضه آبریز کشف‌رود یکی از حوضه‌های آبریز بزرگ و مهم شرق ایران بوده و وجود کلانشهر زیارتی-توریستی مشهد در آن، بر اهمیت این حوضه آبریز افزوده است. به دلیل اهمیت زیاد حوضه آبریز کشف‌رود، مطالعات زیادی بر روی این حوضه آبریز انجام شده است، اما مطالعه و بررسی پهنه‌بندی سیلاب در این حوضه آبریز با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی حوضه برای این حوضه آبریز مهم انجام نشده است. در همین راستا، در این پژوهش به مطالعه و بررسی پهنه سیلاب با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز کشف‌رود پرداخته می‌شود.

برای افزایش دقت پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از مشخصه‌های ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز، از نقشه استاندارد سیل برای بخش کوچکی از حوضه آبریز مورد مطالعه، استفاده می‌شود. مساحت این بخش کوچک از حوضه آبریز که نقشه استاندارد سیلاب برای آن تهیه می‌شود، حداقل برابر

ترای و همکاران در سال ۲۰۱۹، به پهنه‌بندی سیل حوضه آبریز رودخانه مکنوگ^۱ با استفاده از شاخص‌های توپوگرافیکی پرداختند [۱۶]. ایشان پهنه‌بندی سیل مذکور را با استفاده از ۵ مشخصه مستقل و ۶ مشخصه ترکیبی بر اساس شاخص‌های توپوگرافیک اصلاح شده انجام دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که استفاده از این روش برای مشخص کردن پهنه سیل، نه تنها برای حوضه‌های کوچک کاربرد دارد، بلکه برای حوضه‌های بزرگ و همچنین حوضه‌های بدون داده‌های هیدرومتری نیز می‌توان با دقت مناسبی استفاده نمود.

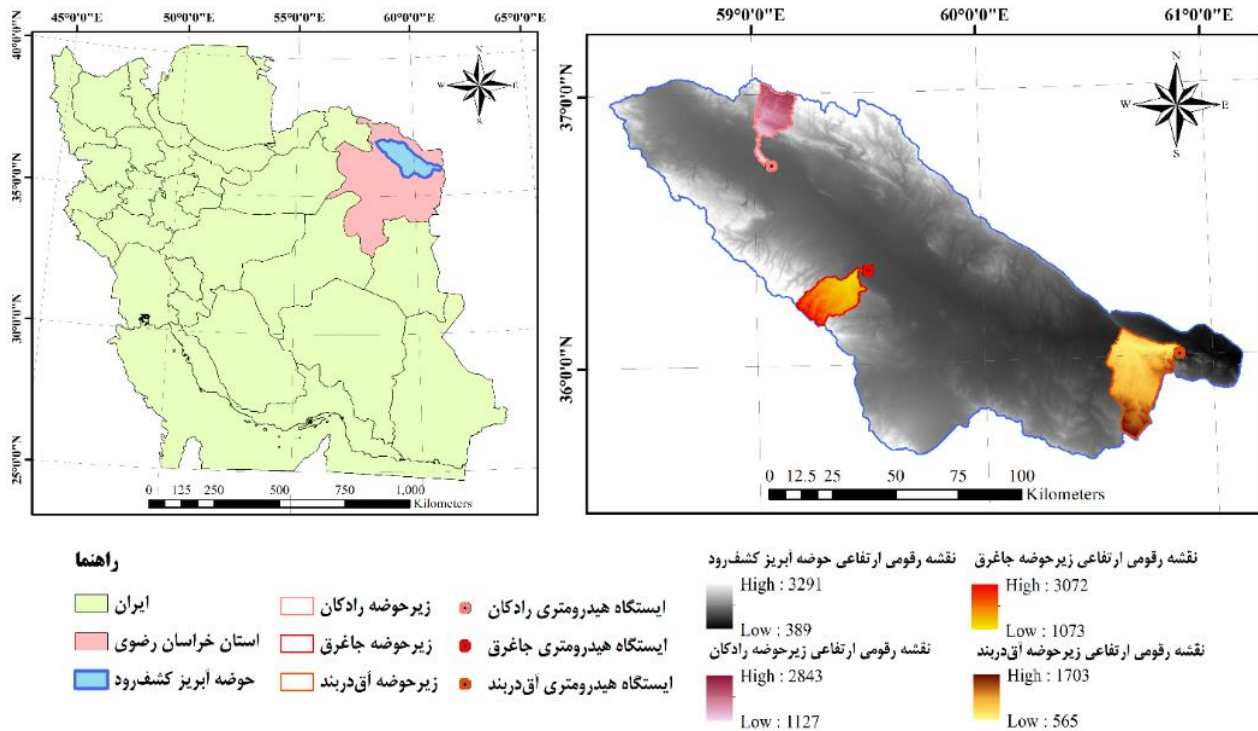
مانفردا و ساملا در سال ۲۰۱۹، سیل رودخانه برادانو^۲ در جنوب ایتالیا را با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. نتایج بررسی سیل این رودخانه توسط ایشان نشان داد که در شبیه‌سازی سیل با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی نتایج بسیار مشابهی در محاسبه عمق سیل نسبت به مدل‌های دینامیکی دو بعدی ارائه کرده است. همچنین بیان کردند که استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی می‌تواند برای حوضه‌های آبریز بزرگ و با داده‌های هیدرومتری کم و همچنین در مقیاس‌های ملی، قاره‌ای و جهانی مورد استفاده قرار داد.

بالاکو و همکاران سیل‌هایی با دوره بازگشت ۳۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ سال را برای سه منطقه در پاگلیا^۳، در جنوب ایتالیا مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. ایشان برای انجام این پژوهش از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی برای شبیه‌سازی سیل و بدست آوردن نقشه خطر استفاده کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی می‌تواند به عنوان یک روش مدلسازی سریع برای پهنه‌بندی سیل مورد استفاده قرار گیرد. همچنین بیان کردند که با توجه به اینکه داده‌های ورودی این روش نسبت به روش‌های هیدرولیکی کمتر است، می‌توان این روش را روشی مناسب و جایگزین روش‌های هیدرولیکی برای تصمیم‌گیری‌های سریع دانست.

انیس و همکاران در سال ۲۰۱۹، به بررسی پهنه‌بندی سیل با استفاده از شاخص‌های هیدروژئومورفولوژیکی حوضه آبریز رودخانه آرنو^۴ در ایتالیا پرداختند [۱۹]. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که نتایج حاصله در استفاده از این مشخصه برای پهنه‌بندی سیل به دو عامل دقت مکانی نقشه‌های ارتفاعی^۵ منطقه مورد بررسی و همچنین درجه انشعابات رودخانه بستگی دارد. همچنین برای بررسی صحت نتایج حاصل از این مطالعه، مدلسازی و بررسی را برای

- 1 Mekong
- 2 Bradano
- 3 Puglia
- 4 Arno
- 5 Digital Terrain Model (DTM)

6 Geomorphic Flood Area



شکل ۱. محل قرارگیری حوزه آبریز کشف‌رود و زیرحوضه‌های رادکان، جاجرگ و آق‌دربند

Fig. 1. The location of the Kashafrud basin and the Radkan, Jagharq and Agh-Darband sub-basins

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مطالعاتی

محدوده مطالعاتی در این پژوهش، حوزه آبریز کشف‌رود می‌باشد. حوزه آبریز کشف‌رود یکی از حوضه‌های بزرگ و مهم شرق کشور می‌باشد که بین $35^{\circ} 39'$ تا $37^{\circ} 03'$ عرض جغرافیایی و $58^{\circ} 21'$ تا $61^{\circ} 07'$ طول جغرافیایی و در استان خراسان رضوی قرار گرفته است. رودخانه کشف‌رود با طول ۲۹۰ کیلومتر، رودخانه اصلی این حوضه بوده که از آبریزهای جنوبی هزارمسجد و آبریزهای شمالی بینالود سرچشمه گرفته و پس از عبور از کلان‌شهر مشهد، در محل پل‌خاتون در شهرستان سرخس به رودخانه هریرود می‌پیوندد. حوزه کشف‌رود در منطقه‌ای با اقلیم گرم و خشک واقع شده و رودخانه کشف‌رود نیز جز رودخانه‌های سیلابی طبقه‌بندی می‌شود. زیرحوضه‌های رادکان، جاجرگ و آق‌دربند جزو زیرحوضه‌های حوزه آبریز کشف‌رود بوده که به منظور تهیه نقشه استاندارد سیلاب مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. شکل ۱ محل قرارگیری حوزه کشف‌رود و همچنین زیرحوضه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. در جدول ۱ نیز مشخصات هر یک از زیرحوضه‌ها و همچنین حوزه آبریز کشف‌رود آورده شده است.

با ۲٪ از کل مساحت حوزه مورد بررسی است [۲۱]. با توجه به اینکه نقشه استاندارد سیلاب در کدام بخش از حوزه آبریز قرار گرفته باشد، بده اوج سیل با دوره بازگشت‌های مختلف برای هر محدوده از حوزه آبریز مورد بررسی، متفاوت می‌باشد و همین مساله اهمیت موقعیت مکانی نقشه استاندارد سیل را در پهنه‌بندی سیل با استفاده از این افزونه مشخص می‌کند. با توجه به این که تا به حال، مطالعه‌ای بر روی جانمایی نقشه استاندارد سیل در حوزه آبریز صورت نگرفته است، مطالعه و بررسی این مساله لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

در نهایت، پس از بدست آوردن نقشه پهنه سیل با دوره بازگشت‌های مختلف برای حوزه آبریز کشف‌رود، با توجه به نقشه کاربری اراضی مناطق مختلف و همچنین مناطق شهری و روستایی موجود در این حوزه آبریز، کاربری‌های مختلف اراضی و همچنین مناطق شهری و روستایی که تحت تاثیر سیل با دوره بازگشت‌های مورد بررسی قرار خواهند گرفت، مشخص شده است.

جدول ۱. مشخصات حوضه آبریز کشفرود و زیرحوضه‌های رادکان، جاغرق و آق‌دربند

Table 1. Characteristics of Kashfroud basin and the Radkan, Jaghargh and Aghdarbandsub-basins

نام حوضه				مشخصه
آق‌دربند	جاغرق	رادکان	کشف‌رود	
۲۲۷	۲۶۰	۱۸۲	۲۱۸	بارش متوسط سالانه (میلیمتر)
۱۸/۴	۱۲/۱	۱۷/۷	۱۶/۴	دمای متوسط سالانه (درجه سلسیوس)
۱۷۰۳	۳۰۷۲	۲۸۴۳	۳۲۹۱	بیشترین ارتفاع (متر)
۵۶۵	۱۰۷۳	۱۱۲۷	۳۸۹	کمترین ارتفاع (متر)
۹۴۰/۶	۱۷۴۸/۱	۱۸۸۹/۸	۱۳۳۶/۱	ارتفاع متوسط (متر)
۴/۲	۱۰/۸	۱۰/۵	۲/۲	شیب متوسط حوضه (درصد)
۷۱۳/۴	۳۳۶/۵	۲۶۶/۶	۱۶۷۴۵/۱	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)
۱۸۷/۳	۱۳۶/۰	۱۶۳/۳	۷۷۰/۸	محیط حوضه (کیلومتر)

۲-۲- معرفی مدل مورد استفاده در این پژوهش

$$GFI = \ln \frac{h_r}{H}$$

$$A_r$$

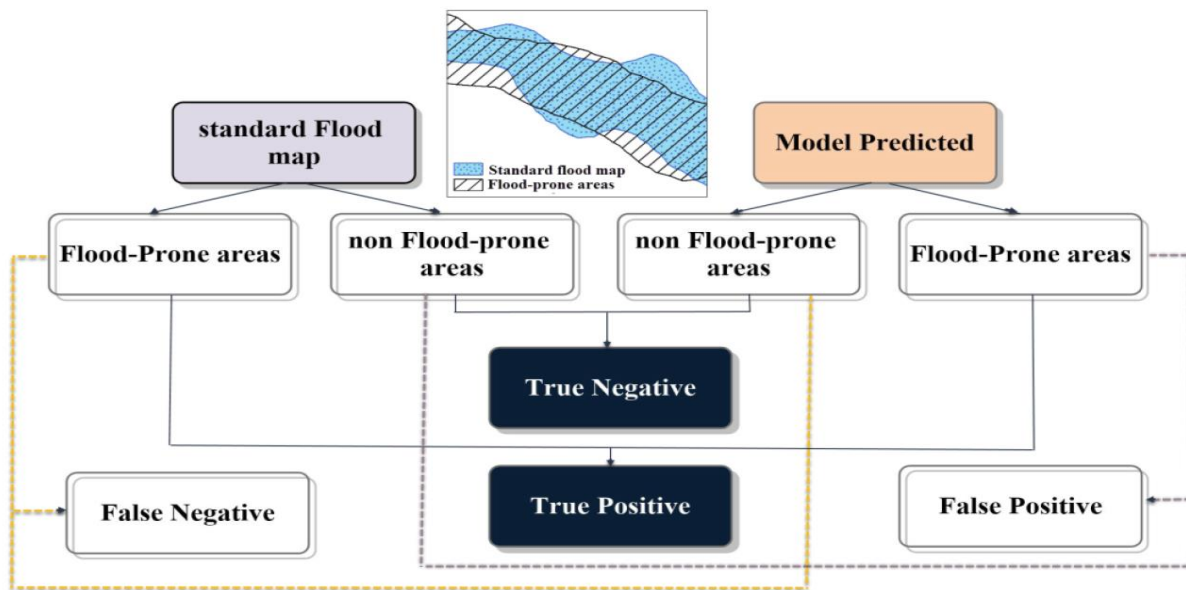
$$\tau = \ln \frac{a \cdot h_r^n}{H}$$

$$R_{TP}$$

$$R_{FP}$$

h_r به عنوان تابعی از مساحت بالادست هر نقطه مورد بررسی (A_r) که در ایجاد سیل مشارکت داشته است، بدست می‌آید که به صورت رابطه ۲ می‌باشد. در این رابطه، a و n ضرایب بدون بعد معادله بوده که برای حوضه‌های مختلف مقادیر متفاوتی دارند و می‌تواند بر اساس داده‌های هیدرومتری منطقه مورد بررسی محاسبه و کالیبره شوند. در روابط ۱ و ۲، مقادیر h_r و H بر حسب متر و A_r بر حسب کیلومتر مربع می‌باشد [۱۲].

ساملا و همکاران در سال ۲۰۱۷، بازده مشخصه ژئومورفولوژیکی که شامل ۵ شاخص مستقل و ۶ شاخص ترکیبی بود را به عنوان شاخص‌های مورد استفاده در مدل‌سازی سیل با استفاده از مشخصه‌های ژئومورفولوژیکی معرفی کردند [۱۲]. بر همین مبنای شاخص جدیدی با عنوان شاخص ژئومورفولوژیکی سیل (GFI) معرفی شد. شاخص ژئومورفولوژیکی سیل، یک رابطه لگاریتمی طبیعی بین دو مشخصه عمق آب (h_r) و اختلاف ارتفاع بین دو نقطه متوالی (H) است که رابطه آن‌ها به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۱۲]. در این رابطه، h_r تراز سطح آب نزدیک‌ترین رودخانه به هر نقطه مورد بررسی در سطح حوضه آبریز را نشان داده و مشخصه H نیز بیان کننده اختلاف ارتفاع بین این دو نقطه از یکدیگر می‌باشد.



شکل ۲. مقادیر مثبت و منفی اشتباه و مثبت و منفی صحیح در طبقه‌بندی دودویی خطی در پهنه‌بندی سیل با استفاده از افزونه GFA [۶]

Fig. 2. True Negative, True Positive, False Negative and False Positive values in linear binary classification in flood zoning using GFA plugin[6]

نقشه استاندارد سیل دارای سیل نبوده ولی بر اساس نتایج مدل، دارای سیل می‌باشند. به این خطا، خطای مثبت اشتباه گفته می‌شود. در ادامه با داشتن خطاهای مثبت و منفی اشتباه، با استفاده از روش طبقه‌بندی دودویی خطی، مقادیر خطاهای مثبت و منفی اشتباه کمینه می‌شوند. ضریب حد آستانه بهینه نیز با کمینه کردن مجموع مقادیر خطاهای مثبت اشتباه و خطاهای منفی اشتباه با استفاده از روش طبقه‌بندی دودویی خطی بدست می‌آید [۱۲]. شکل ۲ مقادیر خطاهای مثبت اشتباه و خطاهای منفی اشتباه را برای یک مدل‌سازی سیل با استفاده از افزونه GFA نشان می‌دهد [۶].

بر اساس روابط بیان شده برای محاسبه ضریب حد آستانه بهینه، ساملا و همکاران یک افزونه محاسباتی با نام Geomorphic Flood Area (GFA) در محیط نرم‌افزاری QGIS ارائه کرده‌اند [۱۳]. داده‌های ورودی این افزونه نقشه رقومی ارتفاعی منطقه مورد بررسی به منظور محاسبه مقادیر GFI و همچنین نقشه استاندارد سیل برای منطقه‌ی کوچکی از حوضه مورد بررسی به منظور افزایش دقت مدل‌سازی سیل در سطح حوضه است.

$$h_r \approx a.A_r^n \quad (2)$$

بر اساس رابطه ۱، مقدار GFI برای هر پیکسل به صورت یک ضریب که مقداری بین ۱ و -۱ دارد، بدست می‌آید ($-1 \leq \tau \leq 1$) که به این مقدار، ضریب حد آستانه گفته می‌شود [۶]. ضریب حد آستانه برای هر یک از نقاط مورد بررسی در سطح حوضه مورد مطالعه، قابل محاسبه می‌باشد. در نهایت با استفاده از ضریب حد آستانه تمام پیکسل‌های موجود در سطح حوضه مورد بررسی، به ازای سیل با دوره بازگشت مورد نظر برای هر حوضه آبریز، یک ضریب حد آستانه بهینه بدست آمده که به ازای این ضریب، پهنه‌بندی سیل با دوره بازگشت مورد نظر برای حوزه مورد بررسی انجام می‌شود. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، پیکسل‌هایی در محدوده آموزشی مدل وجود داشته که بر اساس نقشه استاندارد سیل، دارای سیل هستند ولی بر اساس نتایج مدل، این پیکسل‌ها دارای سیل نمی‌باشند. به این خطا، خطاهای منفی اشتباه گفته می‌شود. همچنین پیکسل‌هایی وجود دارند که بر اساس

دبی پیک سیل‌ها با دوره بازگشت‌های مختلف در هر یک از این زیرحوضه‌ها بود. در پهنه‌بندی سیل برای این سه زیرحوضه، به منظور افزایش دقت محاسبات در پهنه‌بندی سیل، از دو مش با ابعاد مختلف استفاده شد. ابعاد مش‌های استفاده شده برای رودخانه‌های موجود در این زیرحوضه‌ها ۳۰ متر (با توجه به دقت مکانی نقشه‌های رقومی ارتفاعی) و از مش‌هایی با اندازه ۱۰۰ متر برای سواحل این رودخانه‌ها استفاده شد. محل قرارگیری این زیرحوضه‌ها در حوضه آبریز کشف‌رود و مشخصات آن‌ها به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱، نشان داده شده است.

۲-۴- داده‌های هیدرومتری و محاسبه دبی اوج سیل با دوره بازگشت‌های مختلف

هدف اصلی در این پژوهش بررسی پهنه سیل با دوره بازگشت‌های مختلف و متعاقباً تهیه نقشه خطر سیل به ازای دوره بازگشت‌های مختلف برای حوضه آبریز کشف‌رود می‌باشد. از این رو، بر اساس داده‌های هیدرومتری ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری رادکان، جاغرق و آق‌دریبد، نسبت به محاسبه دبی اوج سیل با دوره بازگشت‌های مختلف برای این حوضه‌ها اقدام شد. برای محاسبه دبی اوج سیل به ازای دوره بازگشت‌های مختلف، داده‌های دبی پیک سالانه ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در قسمت خروجی حوضه‌های مذکور، مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به طول آماری ۴۶ ساله ثبت شده برای هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری، به منظور محاسبه سیل با دوره بازگشت‌های بیشتر از ۴۶ سال، باید از توزیع‌های آماری استفاده شود. بدین منظور از نرم‌افزار [Easy Fit v5.6] [23] برای محاسبه دوره بازگشت‌های مختلف برای هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده شد. آزمون نکویی برازش با روش Kolmogorov Smirnov برای مشخص کردن بهترین توزیع آماری از بین ۶۵ توزیع آماری موجود در نرم‌افزار Easy Fit انجام شد و توزیع‌های آماری Log-Wakeby، Pearson 3 و Dagum به ترتیب به عنوان بهترین توزیع‌های آماری برای ایستگاه‌های هیدرومتری رادکان، جاغرق و آق‌دریبد انتخاب شدند.

بر اساس استانداردهای وزارت نیرو در ایران [۲۴]، سیل‌ها بر اساس دوره بازگشت‌های مختلف و میزان خطرات احتمالی آن‌ها، به سه دسته کلی تقسیم شده‌اند. جدول ۲، طبقه‌بندی وزارت نیرو برای مطالعات سیل را نشان می‌دهد. با توجه به کم بودن تعداد سال‌هایی که داده‌های هیدرومتری برای آن وجود دارد و کاهش دقت برآورد دبی پیک سیل به ازای دوره بازگشت‌های طولانی، در این مطالعه دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال مورد بررسی قرار می‌گیرد. دوره بازگشت‌های مورد بررسی در این مطالعه بر

۲-۳- داده‌های ورودی برای مدل‌سازی سیل با استفاده از شاخص GFI

۲-۳-۱- نقشه رقومی ارتفاعی

در این مطالعه با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز کشف‌رود به کمک افزونه GFA در محیط نرم‌افزاری QGIS، به پهنه‌بندی سیل با دوره بازگشت‌های مختلف پرداخته شده و همچنین بهترین محل برای نقشه استاندارد سیل به منظور افزایش دقت پهنه‌بندی سیل حوضه آبریز کشف‌رود با دوره بازگشت‌های مختلف تعیین می‌شود. یکی از داده‌های ورودی مورد نیاز برای اجرای افزونه GFA، نقشه رقومی ارتفاعی حوضه آبریز مورد بررسی است. برای تهیه نقشه رقومی ارتفاعی حوضه آبریز کشف‌رود از نقشه‌های SRTM DEM با دقت مکانی ۳۰ متر استفاده شد. این نقشه‌ها، از سایت زمین‌شناسی آمریکا (earthexplorer.usgs.gov) دانلود شدند.

سه نقشه Flow Accumulation، Flow Direction، Filled DEM و Flow Accumulation از دیگر داده‌های ورودی این افزونه می‌باشند. این نقشه‌ها با استفاده از نقشه رقومی ارتفاعی منطقه مورد بررسی با کمک ابزار Hydrology در محیط نرم‌افزاری ArcGIS v10.2 تهیه شدند.

۲-۳-۲- نقشه استاندارد سیل

یکی دیگر از داده‌های ورودی برای اجرای افزونه GFA، نقشه استاندارد سیل است. نقشه استاندارد سیل، نقشه‌ای است که با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی-هیدرولوژیکی همچون HECRAS، FLO2D و ... برای بخش کوچکی از حوضه آبریز مورد مطالعه تهیه شده و برای افزایش دقت محاسبات و کالیبره کردن مدل به عنوان یکی از داده‌های ورودی به افزونه GFA معرفی می‌شود [۲۲]. در این پژوهش برای تولید نقشه استاندارد سیل، از زیر برنامه RAS-Mapper در نرم‌افزار HEC-RAS v5.0.7، استفاده شده است. این زیر برنامه، قابلیت تولید هندسه منطقه و رودخانه را به صورت یک بعدی و دو بعدی با استفاده از نقشه‌های رقومی ارتفاعی دارد. در این مدل‌سازی برای تولید نقشه هندسه منطقه و رودخانه از SRTM DEM با دقت مکانی ۳۰ متر استفاده شد. با توجه به اینکه هدف اصلی از این پژوهش، بررسی و تعیین بهترین محل برای نقشه استاندارد سیل برای استفاده در پهنه‌بندی سیل با استفاده از افزونه GFA است، نقشه استاندارد سیل برای سه زیرحوضه‌ی رادکان، جاغرق و آق‌دریبد بدست آمد. انتخاب زیرحوضه‌های نام برده شده بر اساس موقعیت مکانی آن‌ها در حوضه آبریز کشف‌رود بوده و به گونه‌ای انتخاب شدند که در بخش‌های ابتدایی، میانی و انتهایی حوضه آبریز کشف‌رود قرار گیرند. دلیل این انتخاب، اختلاف زیاد در

جدول ۲. طبقه‌بندی خطرات سیل‌ها بر اساس دوره بازگشت‌های مختلف [۲۴]

Table 2. Classification of flood risks based on different return periods [24]

دوره بازگشت پیشنهادی سیل (سال)	میزان خطر
۲، ۱۰ و ۲۵	کم
۵۰ و ۱۰۰	متوسط
۲۰۰ و ۵۰۰	زیاد

قرار گرفته در حوضه آبریز کشف‌رود را مشخص نموده و بر اساس پهنه سیل‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله بدست آمده برای حوضه آبریز کشف‌رود، مناطق شهری و روستایی در معرض خطر سیل را تعیین نمود.

۲-۵- روش انجام پژوهش

هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌یابی جانمایی نقشه استاندارد سیل در استفاده از افزونه GFA به منظور پهنه‌بندی سیل در حوضه آبریز کشف‌رود می‌باشد. پس از تعیین بهترین موقعیت مکانی برای نقشه استاندارد سیل، پهنه‌بندی سیل با دوره بازگشت‌های مختلف برای حوضه آبریز کشف‌رود با استفاده از افزونه GFA انجام شده و در نهایت بر اساس نقشه پهنه سیل نسبت به تهیه نقشه خطر سیل برای کاربری‌های مختلف اراضی که در معرض خطر سیل قرار خواهند گرفت اقدام می‌شود. روند کلی انجام این پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

همانطور که گفته شد، از نرم‌افزار Easy Fit به منظور انتخاب بهترین توزیع آماری بر اساس داده‌های هیدرومتری ثبت شده در هر ایستگاه و محاسبه دوره بازگشت سیل استفاده شد. جدول ۳، بهترین توزیع آماری هر ایستگاه و دبی اوج سیل به ازای دوره بازگشت‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

با توجه به دبی پیک محاسبه شده سیل با دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله، با استفاده از نرم افزار HEC-RAS، سیل‌های مورد نظر برای زیرحوضه‌های رادکان، جاغرق و آق‌در بند مدلسازی شد. نتایج مدلسازی سیل با دوره بازگشت‌های مورد بررسی برای سه زیرحوضه رادکان، جاغرق و

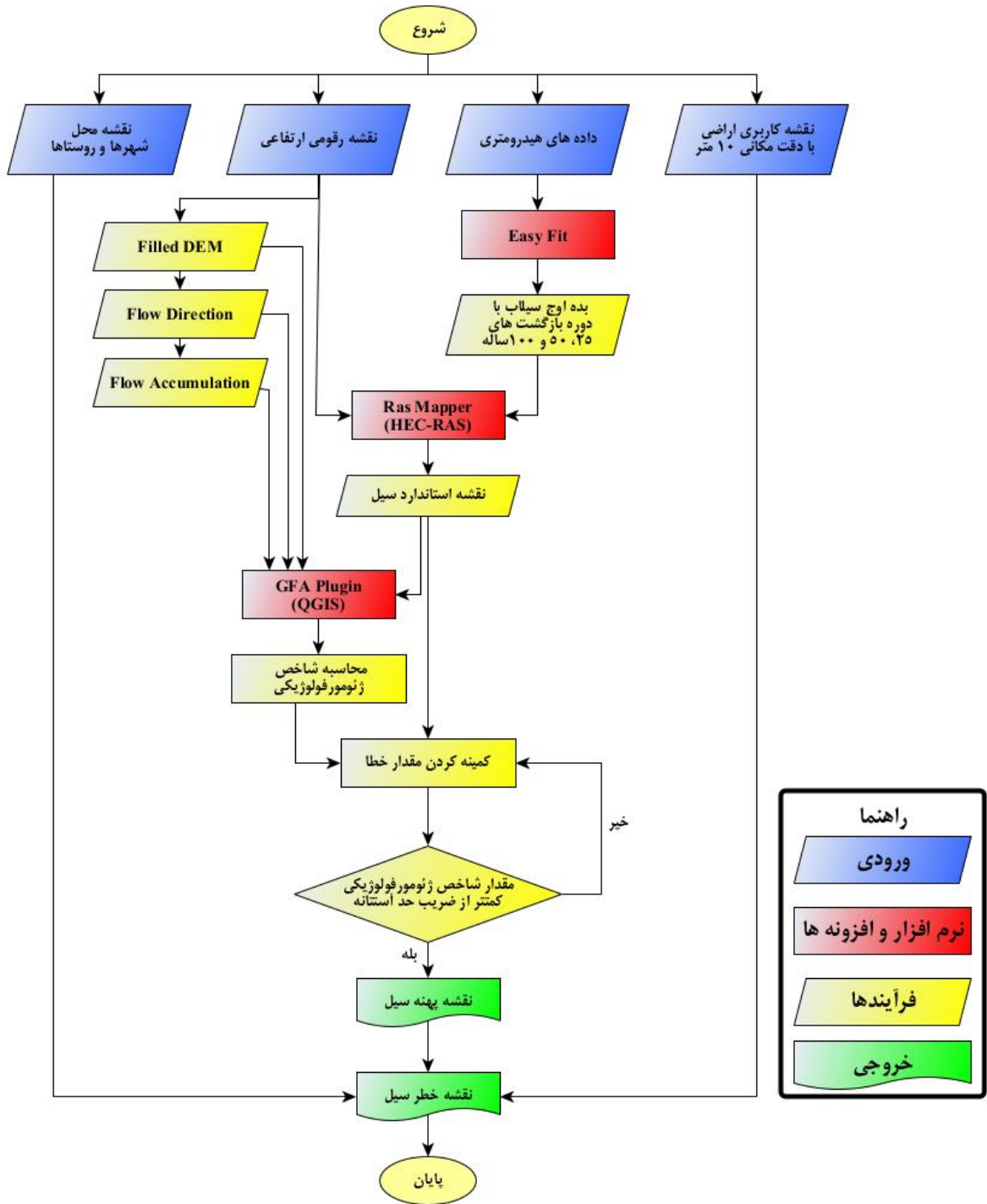
اساس طبقه‌بندی وزارت نیرو، در کلاس‌های با خطر کم و متوسط قرار دارند. پس از محاسبه دبی پیک سیل با دوره بازگشت‌های مختلف، با ابزار RAS- [Mapper] [25] نقشه استاندارد سیل تهیه شده و پس از آن با استفاده از افزونه GFA در محیط نرم افزاری QGIS نسبت به پهنه‌بندی سیل با دوره بازگشت‌های مختلف برای حوضه آبریز کشف‌رود اقدام شد.

۲-۴-۱- نقشه کاربری اراضی

نقشه کاربری اراضی از جمله نقشه‌هایی است که فعالیت‌های انسانی و طبیعی اراضی محدوده مطالعاتی مورد نظر را مشخص می‌کند. در این مطالعه، به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز کشف‌رود، از نقشه کاربری اراضی با دقت مکانی ۱۰ متر که توسط کمپانی ESRI ارائه شده است، استفاده شد [۲۶]. این نقشه کاربری اراضی، با استفاده از شش باند Shortwave Infrared، Near Infrared، Blue، Green، Red و دو باند Shortwave Infrared از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 L2A/B در ۱۰ کلاس مختلف (پهنه آبی، جنگل، علفزار، پوشش گیاهی آبی، پوشش‌های گیاهی، بوته‌زار، اراضی شهری و روستایی، اراضی بایر، پوشش‌های برفی و یخ) برای تمامی مناطق زمین در سال ۲۰۲۰ ارائه شده است. بر اساس اظهارات تیم مطالعاتی این پروژه، به طور کلی دقت این نقشه کاربری اراضی برای کل زمین ۸۶٪ بیان شده است که با توجه به عرض جغرافیایی دقت این نقشه برای مناطق مختلف زمین متغیر می‌باشد [۲۷].

۲-۴-۲- نقشه پراکندگی شهرها و روستاها

نقشه پراکندگی شهرها و روستا برای سال ۱۴۰۰، از سازمان آمار ایران [۲۸] دریافت شد. با استفاده از این نقشه می‌توان شهرها و روستاهای



شکل ۳. نمودار روش انجام پژوهش

Fig. 3. Research method diagram

جدول ۳. بهترین توزیع‌های آماری هر ایستگاه هیدرومتری و دبی اوج سیل با دوره بازگشت‌های مختلف

Table 3. The best statistical distributions of each hydrometric station and flood peak flow with different return periods.

دبی اوج سیل ۱۰۰ ساله (m ³ /s)	دبی اوج سیل ۵۰ ساله (m ³ /s)	دبی اوج سیل ۲۵ ساله (m ³ /s)	بهترین توزیع آماری	ایستگاه هیدرومتری
۱۴۳/۱۸	۱۱۲/۵۷	۸۶/۵۴	Wakeby	رادکان
۱۹۷/۶۳	۱۳۳/۰۱	۸۶/۶۰	Log-Pearson 3	جاغرق
۹۳۰/۲۲	۶۲۵/۲۷	۴۱۷/۸۸	Dagum	آق‌دربند

صحيح^۲ را برای نقشه سیل نشان می‌دهند. نرخ مثبت اشتباه، نشان دهنده نرخ پیکسل‌هایی است که پهنه سیل را نشان می‌دهند در صورتی که بر اساس نقشه استاندارد سیل جز پیکسل‌های دارای پهنه سیل نباید قرار گرفته شوند. نرخ مثبت صحیح نیز نشان دهنده نرخ پیکسل‌هایی است که دارای سیل هستند و بر اساس صحت‌سنجی با استفاده از نقشه استاندارد سیل نیز دارای پهنه سیل بوده‌اند. با توجه به مقادیر R_{TP} و R_{FP} می‌توان بیان کرد که مدل مورد استفاده در حوضه آبریز کشف‌رود به منظور پهنه‌بندی سیل، از عملکرد خوبی برخوردار بوده است. مقادیر AUC^3 ، سطح زیر نمودار دقت مدلسازی را نشان می‌دهد. مقدار AUC بین ۰/۵ تا ۱ بوده و هرچه این مقدار به ۰/۵ نزدیک باشد، نشان دهنده طبقه‌بندی تصادفی پهنه‌بندی سیل و هر چه به عدد ۱ نزدیک باشد، نشان دهنده طبقه‌بندی نظارت شده‌تر و دقیق‌تر می‌باشد [۱۳].

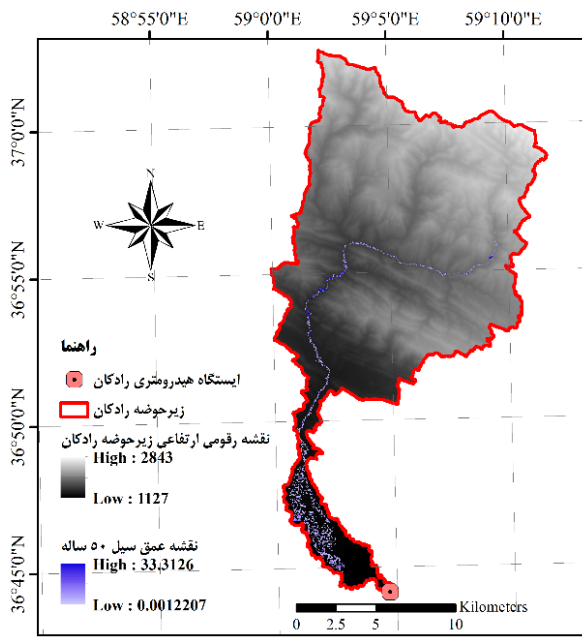
آخرین ستون در جدول ۴ که مقدار سطح زیر منحنی یا AUC را نشان می‌دهد، عملکرد شبیه‌سازی پهنه سیل با استفاده از افزونه GFA را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مقدار ۰/۵ طبقه‌بندی تصادفی و مقدار ۱ طبقه‌بندی موثر را نشان می‌دهد، می‌توان بیان کرد که پهنه‌بندی سیل حوضه آبریز کشف‌رود با استفاده از نقشه استاندارد سیل در سه زیرحوضه رادکان، جاغرق و آق‌دربند، بصورت نظارت شده و دقیق محاسبه شده است. مقادیر نرخ منفی اشتباه ارائه شده در جدول ۴، نشان می‌دهد که خطای مدلسازی با استفاده

آق‌دربند به ترتیب در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. پس از مدلسازی سیلاب با دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله برای زیرحوضه‌های رادکان، جاغرق و آق‌دربند با استفاده از ابزار RAS-MAPPER، به منظور تعیین جانمایی بهینه نقشه استاندارد سیل برای پهنه‌بندی سیل با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی، با استفاده از افزونه GFA نسبت به پهنه‌بندی سیل اقدام شد. عملکرد مدلسازی پهنه سیل به کمک مشخصه‌های ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز کشف‌رود با استفاده از افزونه GFA ، در جدول ۴ نشان داده شده است. خروجی این افزونه، یک نقشه رستری است که هر پیکسل آن بر اساس یک ضریب ($\tau = GFI = \ln \frac{a.h_r^n}{H}$) مشخص می‌شود. این نقشه رستری همان نقشه GFI اصلاح شده است. مقادیر هر پیکسل از این تصویر دارای ارزشی بین ۱ و -۱ می‌باشد. به این مقادیر ضریب حد آستانه گفته می‌شود. با توجه به ضریب حد آستانه بدست آمده برای هر پیکسل، با کمیته کردن خطای مثبت اشتباه و خطای منفی اشتباه، یک مقدار بهینه برای ضریب حد آستانه محاسبه می‌شود که پهنه‌بندی سیل در حوضه مورد بررسی بر اساس این ضریب انجام می‌شود. در صورتی که مقدار ارزش هر پیکسل از مقدار ضریب حد آستانه بهینه کمتر باشد، در آن پیکسل سیل اتفاق خواهد افتاد و در صورتی که مقدار ارزش پیکسل کمتر باشد، آن پیکسل جزء پهنه سیل قرار نخواهد گرفت. R_{TP} و R_{FP} نیز به ترتیب نرخ خطای مثبت اشتباه^۱ و نرخ مثبت

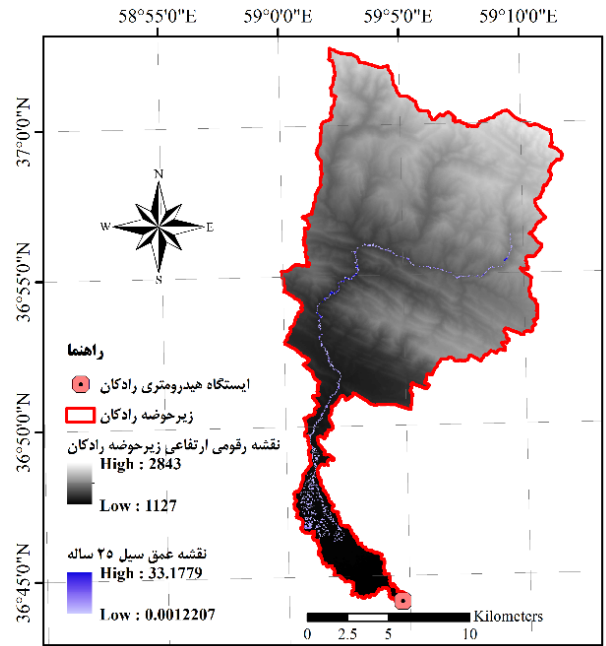
2 True Positive Ratio

3 Area Under Curve

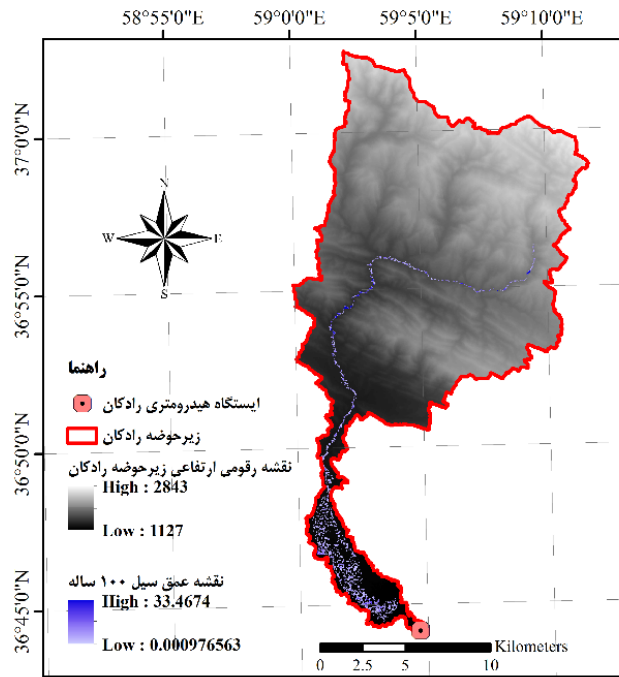
1 False Positive Ratio



ب.



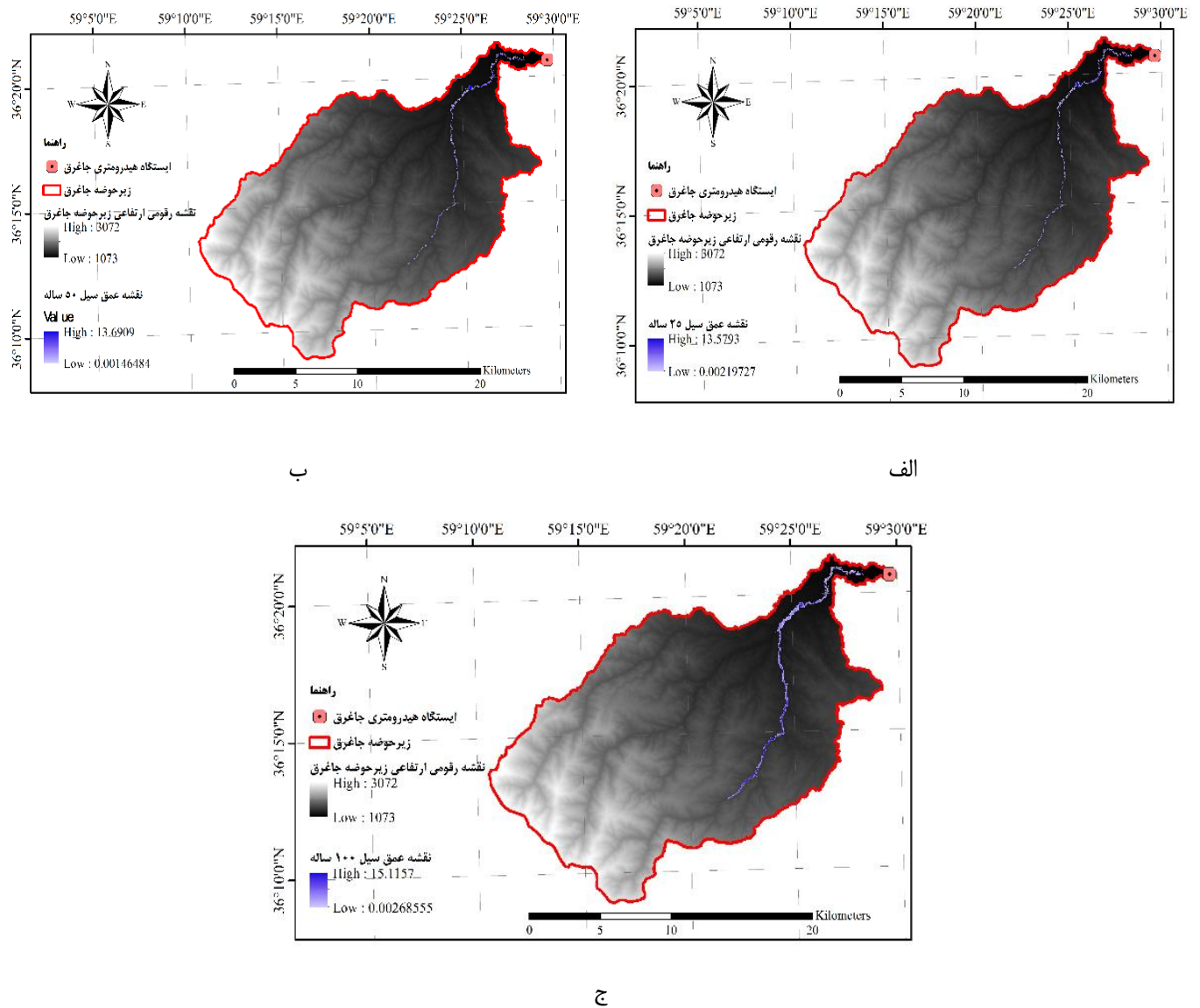
الف



ج

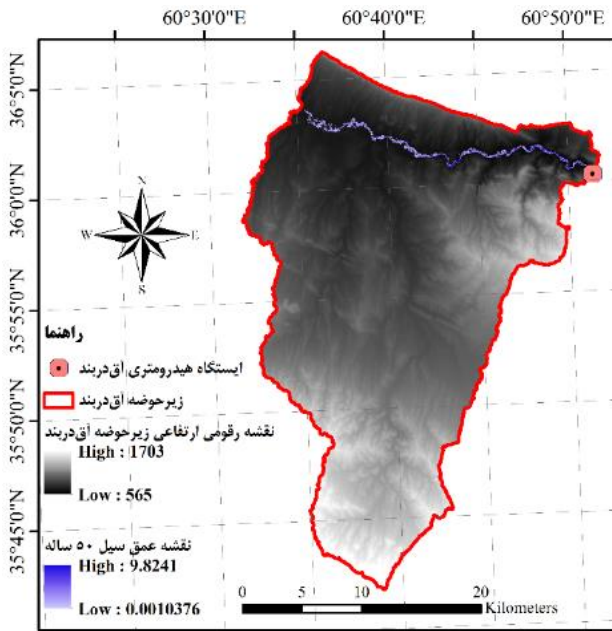
شکل ۴. نقشه پهنه سیل زیرحوضه رادکان با دوره بازگشت الف) ۲۵ ساله، ب) ۵۰ ساله، ج) ۱۰۰ ساله.

Fig. 4. Flood zone map of Radkan sub-basin with a) 25-, b) 50-, c) 100-year flood.

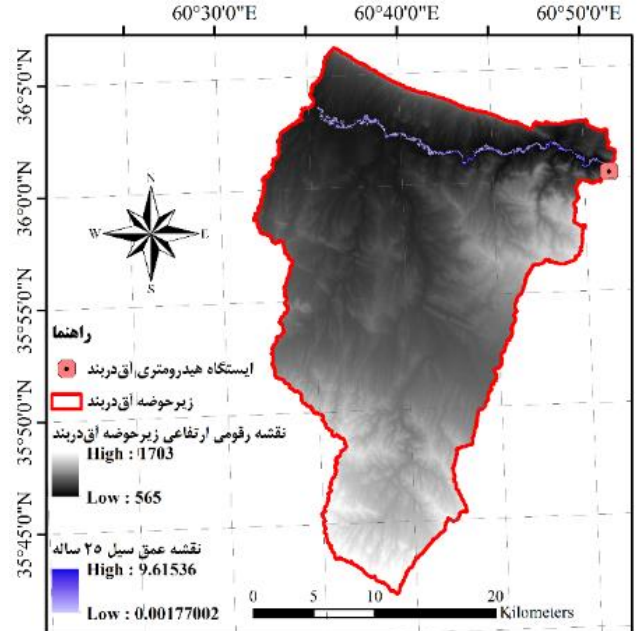


شکل ۵. نقشه پهنه سیل زیرحوضه جاغرق با دوره بازگشت الف) ۲۵ ساله، ب) ۵۰ ساله، ج) ۱۰۰ ساله.

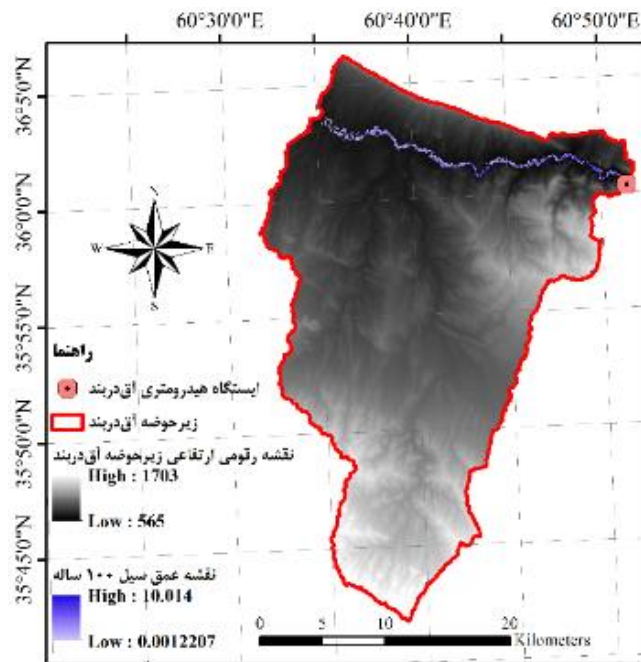
Fig. 5. Flood zone map of Jaghargh sub-basin with a) 25-, b) 50-, c) 100-year flood.



الف



ب



ج

شکل ۶. نقشه پهنه سیل زیرحوضه آق دربند با دوره بازگشت الف) ۲۵ ساله، ب) ۵۰ ساله، ج) ۱۰۰ ساله.

Fig. 6. Flood zone map of Agh-Darband sub-basin with a) 25-, b) 50-, c) 100-year flood.

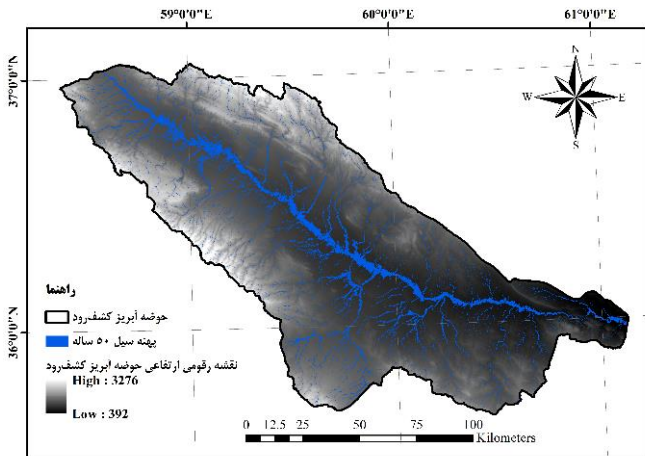
جدول ۴. عملکرد افزونه GFA در پهنه‌بندی سیل در حوضه آبریز کشف‌رود

Table 4. The performance of GFA plugin in flood zoning of kashafroud basin

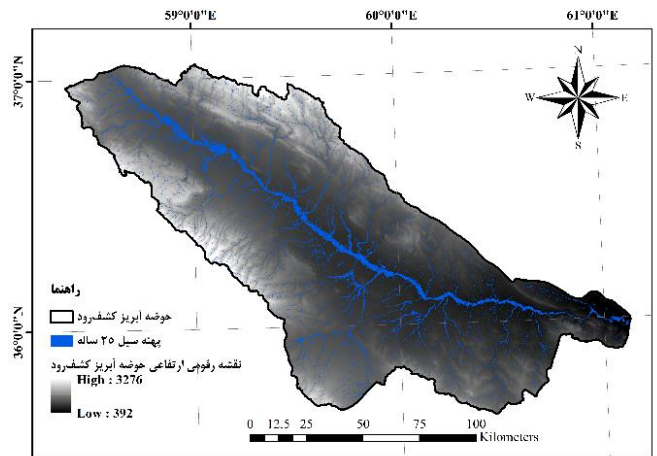
سطح زیر منحنی (AUC)	نرخ خطای منفی (R _{FP})	نرخ مثبت صحیح (R _{TP})	ضریب حد آستانه بهینه (τ_{opt}) (Optimum Threshold)	دوره بازگشت سیل (Return) (Flood)	زیرحوضه مورد بررسی
۰/۹۷۳	۰/۰۸۶	۰/۹۳۷	-۰/۳۳۴	۲۵	رادکان
۰/۹۷۴	۰/۰۸۵	۰/۹۳۸	-۰/۳۳۵	۵۰	
۰/۹۶۹	۰/۰۹۷	۰/۹۳۶	-۰/۳۴۷	۱۰۰	
۰/۹۸۱	۰/۰۷۱	۰/۹۸۵	-۰/۳۲۵	۲۵	جاغرق
۰/۹۸۸	۰/۰۵۳	۰/۹۸۰	-۰/۳۲۹	۵۰	
۰/۹۷۹	۰/۰۸۷	۰/۹۶۳	-۰/۳۳۰	۱۰۰	
۰/۹۹۴	۰/۰۴۴	۰/۹۸۳	-۰/۳۳۵	۲۵	آق‌دربند
۰/۹۹۴	۰/۰۴۱	۰/۹۸۰	-۰/۳۶۳	۵۰	
۰/۹۹۲	۰/۰۴۲	۰/۹۶۸	-۰/۴۱۲	۱۰۰	

حجم سیل مقدار ضریب حد آستانه بهینه کاهش پیدا می‌کند [۱۲]. همانطور که جدول ۴ مشاهده می‌شود، با مقایسه مقادیر ضریب حد آستانه بهینه می‌توان دریافت که با افزایش دوره بازگشت سیل، ضریب حد آستانه سیل در مدل‌سازی با استفاده از مشخصه‌های ژئومورفولوژیکی حوضه مورد بررسی کاهش می‌یابد که این نتیجه با نتایج ساملا و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۱۲] همخوانی دارد. با افزایش دوره بازگشت سیل، دبی اوج سیل افزایش یافته و در نتیجه تراز سیل جاری شده در سطح حوضه آبریز افزایش می‌یابد. با توجه به افزایش تراز سطح سیل در حوضه آبریز، اختلاف ارتفاع موجود بین تراز سطح سیل با نقاط اطراف آن (H) کاهش می‌یابد. در نتیجه مقادیر ضریب حد آستانه بهینه ($\tau = \ln \frac{a \cdot h_r^n}{H}$) برای نقاط درون و اطراف رودخانه کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه پیکسل‌هایی که مقدار ضریب حد آستانه آن‌ها بیشتر از ضریب حد آستانه بهینه باشد در پهنه سیل قرار می‌گیرند [۱۲]، کاهش پیکسل‌های بیشتری از نقشه رستری GFI اصلاح شده در محدوده سیلابی قرار خواهد گرفت و در نتیجه پهنه سیل افزایش خواهد یافت. شکل ۷، نتایج پهنه‌بندی سیل با استفاده از نقشه استاندارد سیل در زیرحوضه آق‌دربند را به ازای دوره بازگشت‌های مورد بررسی نشان می‌دهد.

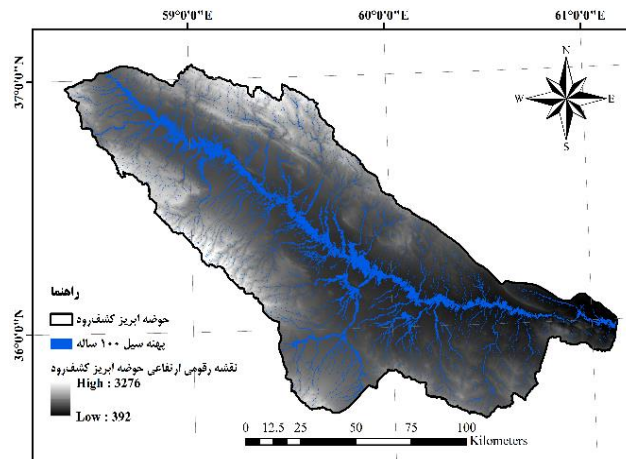
از نقشه استاندارد سیل در هر سه زیرحوضه، کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد که نشان دهنده دقت بالایی مدل در پهنه‌بندی سیل با دوره بازگشت‌های مختلف می‌باشد. مقادیر نرخ مثبت صحیح برای هر سه زیرحوضه مورد بررسی بیشتر از ۹۳ درصد بوده که دقت بالایی مدل‌سازی پهنه سیلاب را نشان می‌دهد. در مقایسه تاثیر نقشه استاندارد سیل در سه زیرحوضه رادکان، جاغرق و آق‌دربند در پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی توسط افزونه GFA، زیرحوضه آق‌دربند با نرخ مثبت صحیح بیشتر از ۹۶ درصد، نرخ منفی اشتباه کمتر از ۵ درصد و مقادیر AUC بیشتر از ۰/۹۹ به ازای هر سه دوره بازگشت مورد بررسی، عملکرد بهتری نسبت به نقشه استاندارد سیل در زیرحوضه‌های رادکان و جاغرق نشان می‌دهد. با توجه به موقعیت مکانی هر سه زیرحوضه که در شکل ۱ نشان داده شده است و مقایسه نتایج ارائه شده در جدول ۴، می‌توان بیان کرد که موقعیت مکانی نقشه استاندارد سیل، هرچه به بخش انتهایی حوضه آبریز مورد بررسی نزدیک‌تر باشد، پهنه‌بندی سیل با استفاده از افزونه GFA، عملکرد بهتری نشان می‌دهد. لذا در ادامه روند این مطالعه، پهنه‌بندی سیل برای حوضه آبریز کشف‌رود با استفاده از نقشه استاندارد سیل در زیرحوضه آق‌دربند، انجام شد. در پژوهشی ساملا و همکاران در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که با افزایش



ب



الف



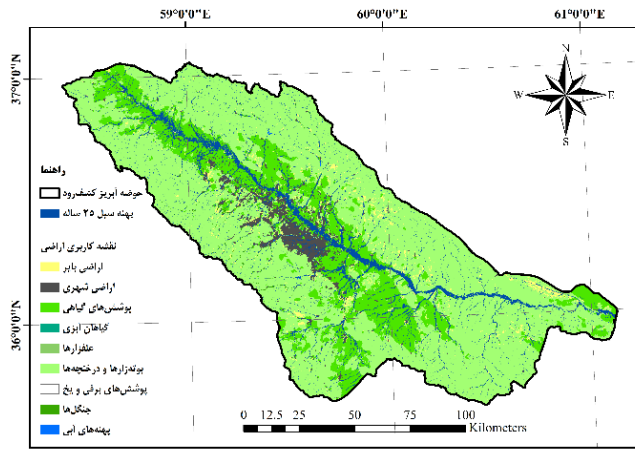
ج

شکل ۷. نقشه پهنه سیل حوضه آبریز کشفرود با دوره بازگشت الف) ۲۵ ساله، ب) ۵۰ ساله، پ) ۱۰۰ ساله.

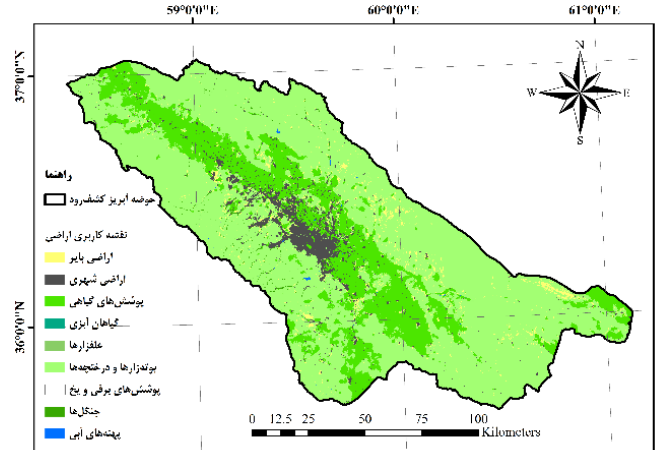
Fig. 7. a) 25-, b) 50-, c) 100-years flood zone map of Kashafroud basin.

کشفرود، کاربری‌های نام برده شده به ترتیب بیشترین به کمترین عبارتند از بوته‌زار ($11741/01 \text{ km}^2$)، پوشش گیاهی ($3780/83 \text{ km}^2$)، اراضی شهری و روستایی ($725/05 \text{ km}^2$)، اراضی بایر ($4373/73 \text{ km}^2$)، جنگل ($49/89 \text{ km}^2$)، پهنه آبی ($9/80 \text{ km}^2$)، علفزار ($2/11 \text{ km}^2$)، پوشش گیاهی آبی ($0/03 \text{ km}^2$) و پوشش برف و یخ ($0/00 \text{ km}^2$). نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز کشفرود و همچنین کاربری‌های تحت تاثیر سیل با دوره بازگشت‌های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است.

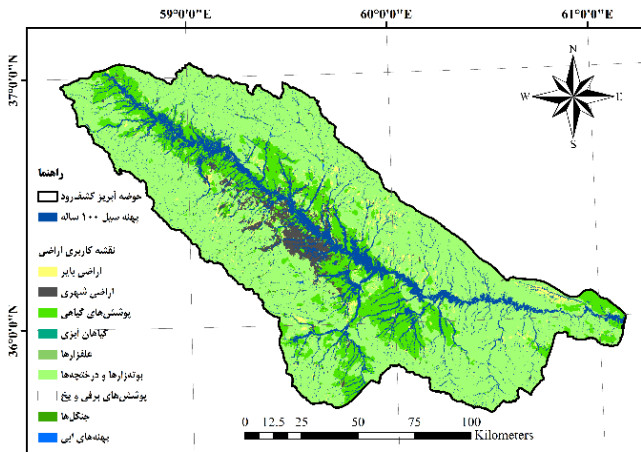
حال با داشتن نقشه پهنه سیل با دوره بازگشت‌های مختلف، می‌توان کاربری‌های مختلف اراضی که در معرض خطر سیل‌ها قرار می‌گیرند را مشخص کرد. به این منظور، از نقشه‌های کاربری اراضی تهیه شده توسط کمپانی ESRI با دقت مکانی ۱۰ متر استفاده شد. این نقشه کاربری اراضی شامل ۹ کلاس پهنه آبی، جنگل، علفزار، پوشش گیاهی آبی، پوشش‌های گیاهی، بوته‌زار، اراضی شهری و روستایی، اراضی بایر، پوشش‌های برفی و یخ می‌باشد [۲۶]. بر اساس نقشه کاربری اراضی تهیه شده برای حوضه آبریز



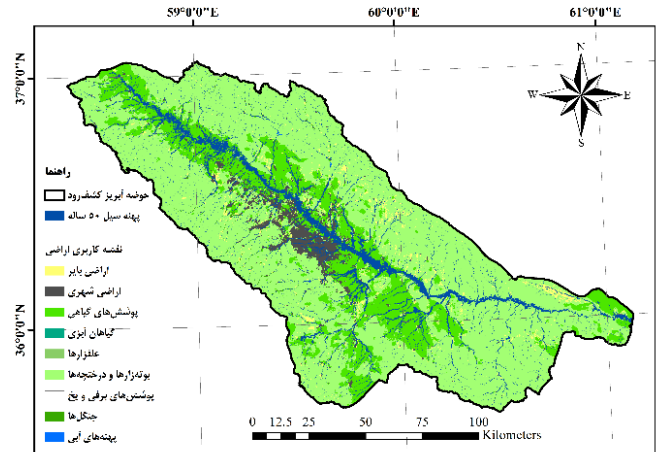
ب



الف



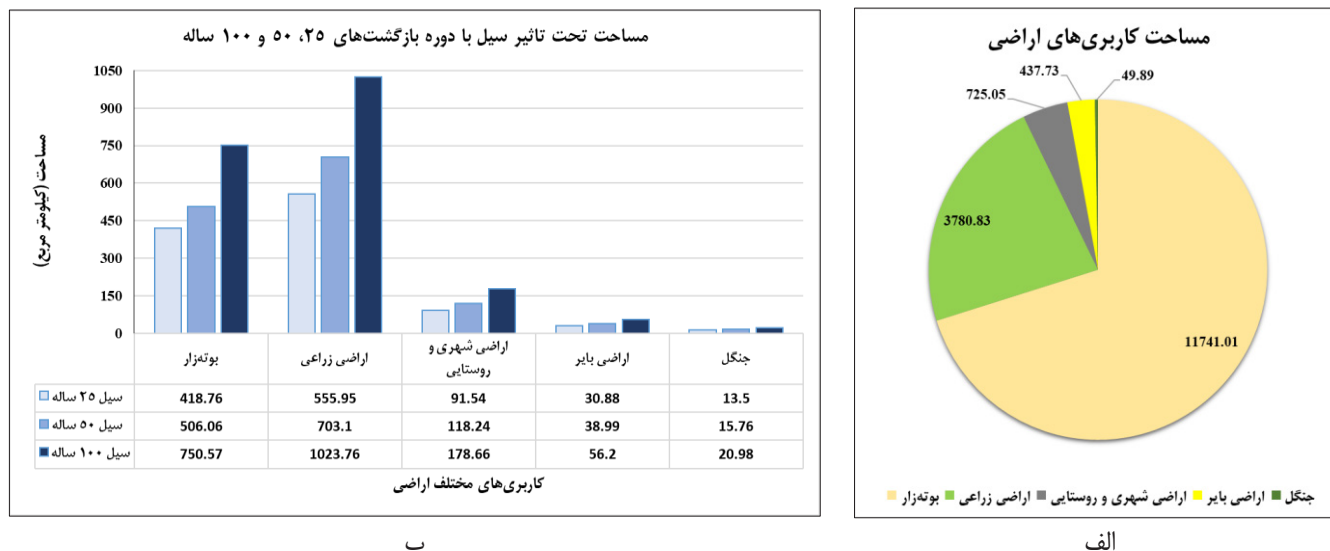
د



ج

شکل ۸. الف) نقشه کاربری ارضی حوضه آبریز کشفرود. کاربری‌های ارضی تحت تاثیر سیل با دوره بازگشت ب) ۲۵ سال، ج) ۵۰ سال، د) ۱۰۰ سال.

Fig. 8.A) Kashafroud basin LULC. LULC that affected by b)25-, C)50-, and D)100-year flood.

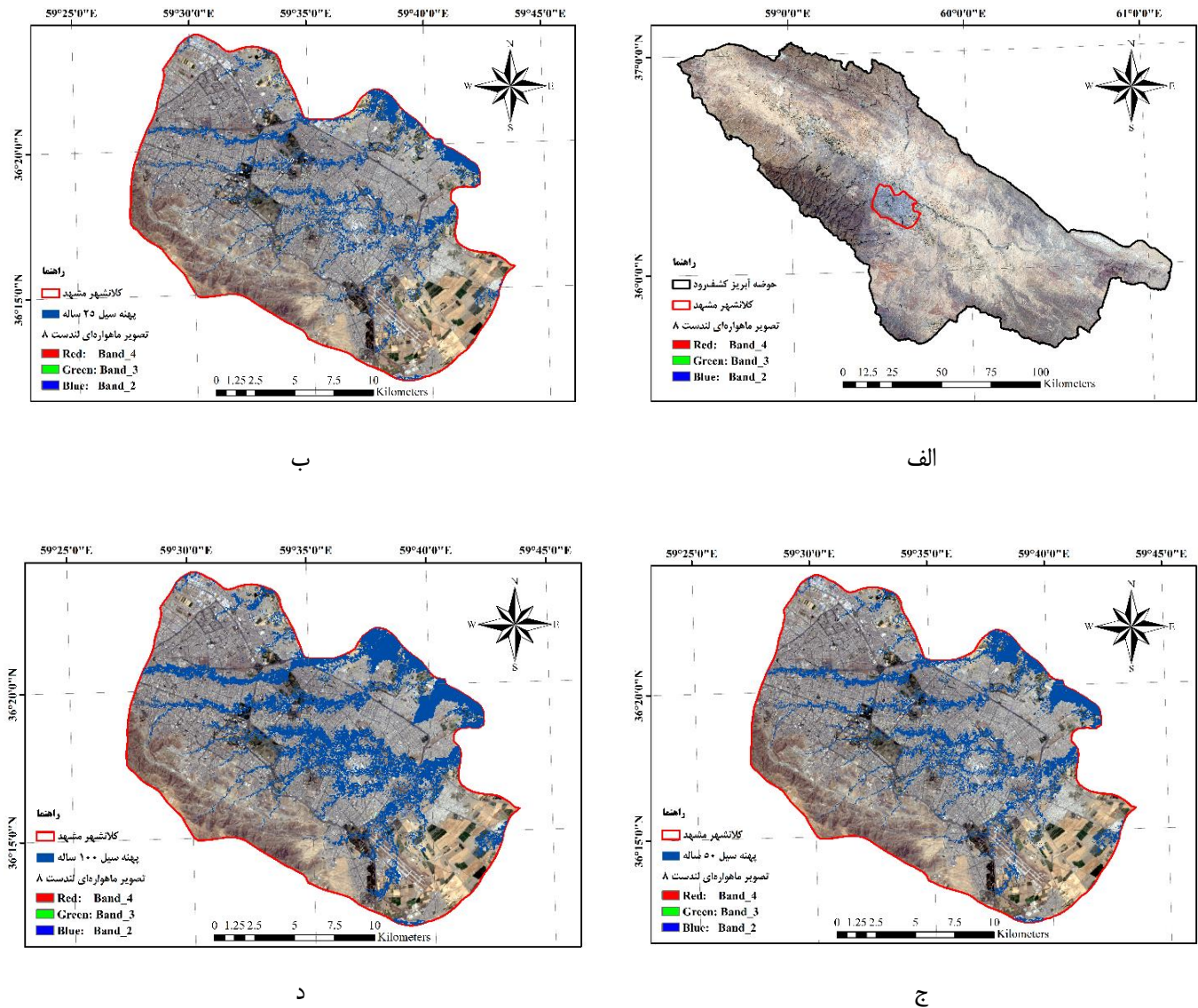


شکل ۹. الف) نمودار مساحت هر یک از کاربری‌های اراضی. ب) نمودار مساحت کاربری‌های اراضی تحت تاثیر سیل با دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله

Fig. 9. A) The area of each LULC. b) LULC area that affected by 25-, 50- and 100-years flood.

دادن سیل‌هایی با دوره بازگشت ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال در این حوضه، به ترتیب ۵۵۵/۹۵، ۷۰۳/۱ و ۱۰۲۳/۷۶ کیلومتر مربع از اراضی زراعی تحت تاثیر سیل قرار خواهند گرفت که با توجه به سرعت و ارتفاع سیل رخ داده، میزان خسارات وارده به این کاربری متفاوت خواهد بود. پس از پوشش‌های گیاهی، اراضی شهری و روستایی بیشترین مساحت را بین کاربری‌های مختلف اراضی در این حوضه آبریز دارند. شکل ۹ نشان می‌دهد که ۹۱/۵۴، ۱۱۸/۲۴ و ۱۷۸/۶۶ کیلومتر مربع از سطح اراضی شهری و روستایی به ازای رخ دادن سیل‌هایی با دوره بازگشت ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله در این حوضه آبریز، تحت تاثیر قرار خواهند گرفت. کلانشهر مشهد با مساحتی بیش از ۳۰۰ کیلومتر مربع و جمعیتی بالغ بر سه میلیون نفر، یکی از کلانشهرهای ایران است که در این حوضه آبریز قرار گرفته است. شکل ۱۰، محل قرارگیری این کلانشهر در حوضه آبریز کشف‌رود و همچنین پهنة سیل با دوره بازگشت‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. به ازای سیل با دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله به ترتیب ۸/۹۸، ۱۱/۸۵ و ۱۸/۳۵ درصد از مساحت این کلان شهر تحت تاثیر سیل قرار خواهد گرفت. با توجه به تراکم جمعیتی بالای این کلانشهر می‌توان بیان کرد که این درصد از مساحت شهری که درگیر سیل

با توجه به پهنة سیل با دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال برای حوضه آبریز کشف‌رود و همچنین نقشه کاربری اراضی، می‌توان کاربری‌های در معرض خطر سیل را تعیین کرده و بیان کرد که چه مساحتی از هر یک از این کاربری‌ها در معرض خطر سیل قرار خواهند گرفت. با توجه به مساحت کم کاربری‌های اراضی پهنة آبی، علفزار، پوشش گیاهی آبی و پوشش برف و یخ از محاسبه مساحت تحت تاثیر سیلاب برای این کاربری‌های اراضی صرف نظر شده است. در شکل ۹، مساحت هر یک از کاربری‌های اراضی و مساحت تحت تاثیر سیل برای هر یک از کاربری‌های اراضی با دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله قرار می‌گیرند را نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، اراضی زراعی در حوضه آبریز کشف‌رود پس از بوته‌زارها، بیشترین مساحت از کل حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به اینکه حوضه آبریز کشف‌رود دارای اقلیمی گرم و خشک می‌باشد، بیشتر اراضی زراعی در اطراف رودخانه اصلی این حوضه آبریز قرار دارند. در صورت رخ دادن سیل در حوضه آبریز کشف‌رود با توجه به فاصله کم اراضی زراعی از این رودخانه، خسارات زیادی به این کاربری وارد خواهد شد. با توجه به قسمت ب در شکل ۹ می‌توان بیان کرد که به ازای رخ



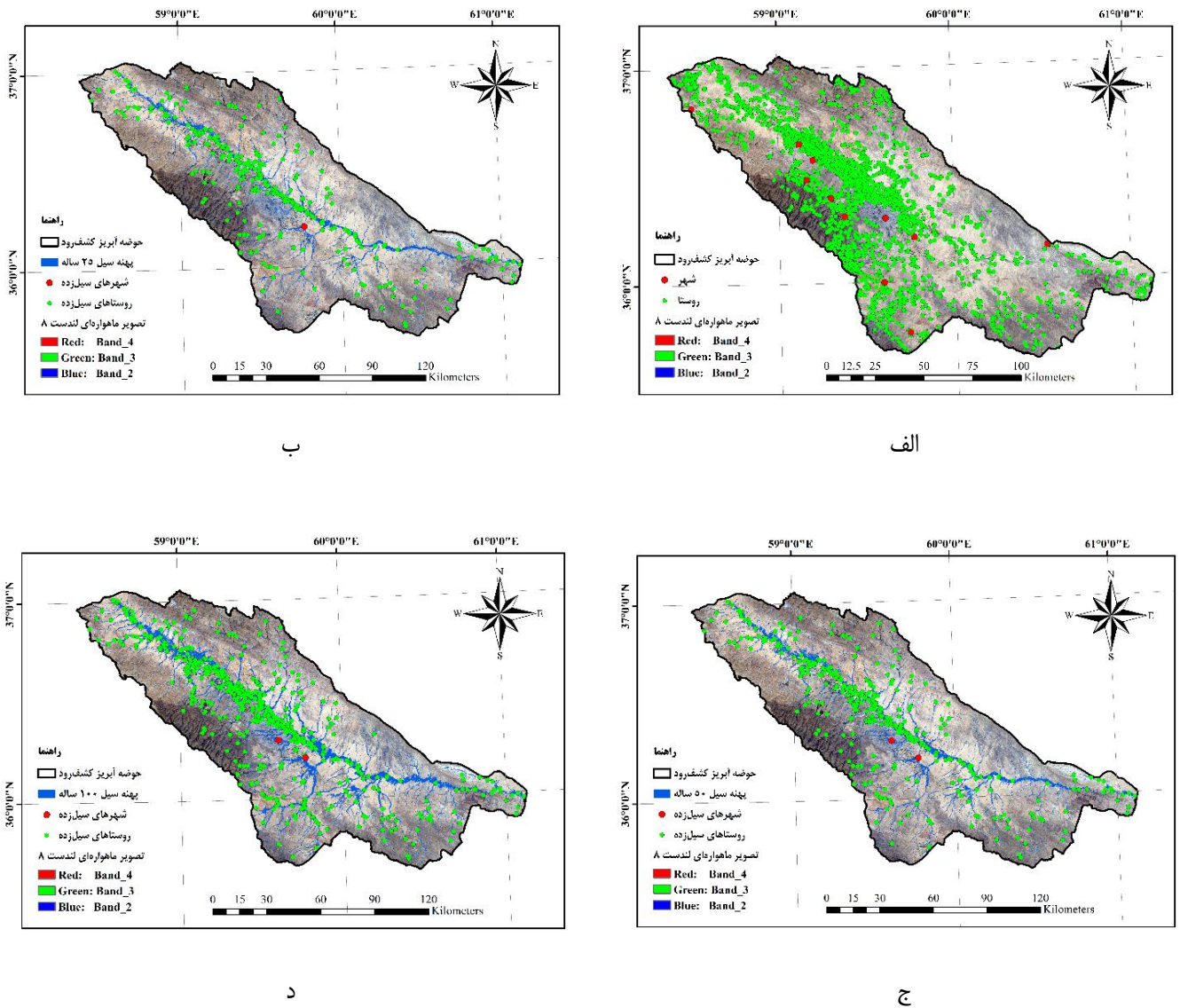
شکل ۱۰. الف) موقعیت کلانشهر مشهد در حوضه آبریز کشفرود. ب) سیل ۲۵ ساله، ج) سیل ۵۰ ساله، د) سیل ۱۰۰ ساله در کلانشهر مشهد.

Fig. 10. A) The location of Mashhad metropolis in the Kashafrud basin. b) 25-year flood, c) 50-year flood, d) 100-year flood in Mashhad metropolis.

به نظر می‌رسد. در شکل ۱۱ مناطق شهری و روستایی موجود در حوضه آبریز کشفرود و همچنین شهرها و روستاهای تحت تاثیر سیل با دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله را نشان می‌دهد. همانطور که در قسمت الف شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در حوضه آبریز کشفرود ۱۰ شهر و ۱۸۸۰ روستا وجود دارد. در قسمت‌های ب، ج و د شکل ۱۱، به ترتیب شهرها و روستاهای تحت تاثیر سیل با دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، با رخ دادن

می‌باشد، علاوه بر خسارات مالی، خسارات جانی نسبتاً زیادی را نیز در پی خواهد داشت.

همانطور که اشاره شد، بخش قابل توجهی از مناطق شهری و روستایی در حوضه آبریز کشفرود با رخ دادن سیل‌هایی با دوره بازگشت‌های مورد بررسی تحت تاثیر خسارات سیل قرار می‌گیرند. لذا بررسی شهرها و روستاهایی که در معرض خطر سیل با دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله که در این پژوهش مورد بررسی قرارگرفت، امری لازم و ضروری

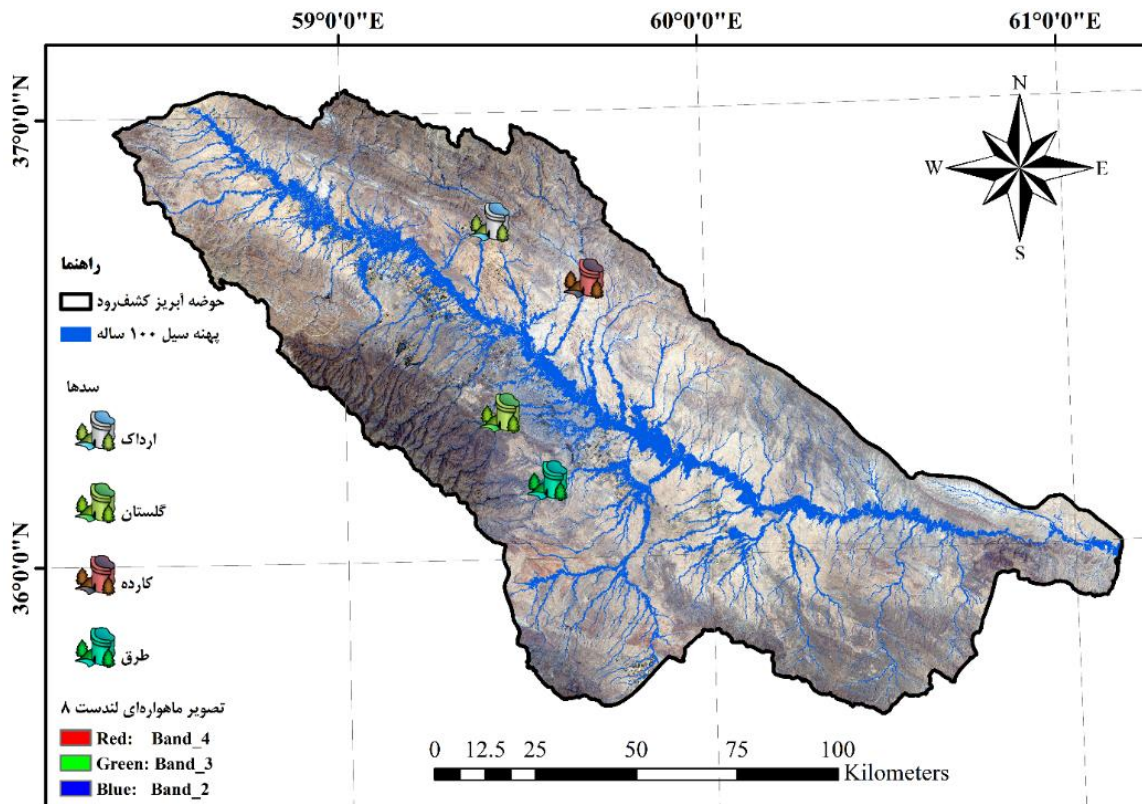


شکل ۱۱. الف) شهرها و روستاهای موجود در حوضه آبریز کشفرود. شهرها و روستاهای در معرض خطر سیل ب) ۲۵ ساله، ج) ۵۰ ساله، د) ۱۰۰ ساله.

Fig. 11. A) Cities and villages in the Kashafroud basin. Cities and villages at risk b) 25 years, c) 50 years, d) 100 years Flood.

خسارات مالی و جانی بسیاری به همراه خواهد داشت. سدهای ارداک، گلستان، کارده و طرق، چهار سدی هستند که در حوضه آبریز کشفرود قرار دارند. محل قرار گیری این سدها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. بررسی پهنه سیل به دست آمده به ازای دوره بازگشت های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله برای حوضه آبریز کشفرود، نشان داد که در صورت رخ دادن سیل هایی با دوره بازگشت های مورد بررسی، چهار سد فوق الذکر تحت تاثیر سیل قرار خواهند گرفت. میزان خطری که سیل برای این سدها ایجاد

سیل ۲۵ ساله کلانشهر مشهد به همراه ۳۰۳ روستا تحت تاثیر سیل قرار خواهند گرفت. با رخ دادن سیل ۵۰ ساله علاوه بر کلانشهر مشهد، شهر رضویه به همراه ۳۸۱ روستا و در صورت رخ دادن سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ سال، شهرهای مشهد و رضویه به همراه ۵۴۷ روستا تحت تاثیر سیل قرار خواهند گرفت. در صورت رخ دادن سیل با دوره بازگشت های مورد بررسی، با توجه به قرار گرفتن کلانشهر مشهد و تعداد زیادی روستا در مسیر سیل، می توان نتیجه گرفت که رخ دادن چنین سیل هایی در حوضه آبریز کشفرود،



شکل ۱۲. محل قرارگیری سد های طرق، ارداک، کارده و بند گلستان در حوضه آبریز کشفرود

Fig. 12. The location of Torogh, Ardak, Karde and Golestan Dams in the Kashafrud basin

هیدرولوژیکی، نیازمند حجم زیادی از داده‌ها و اطلاعات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی منطقه مورد بررسی هستند. با توجه به اینکه داده‌های مورد نیاز برای استفاده از مدل‌های هیدرولیکی-هیدرولوژیکی در بیشتر مناطق دارای طول آماری کافی نبوده یا برداشت نشده‌اند، استفاده از روش‌های جایگزین که نیاز زیادی به این داده‌ها برای مدلسازی سیل ندارند، بیش از پیش احساس می‌شود. استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی به منظور پهنه‌بندی سیل با توجه استفاده از نقشه‌های رقومی ارتفاعی و همچنین عدم نیاز به داده‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی زیاد، می‌توان از این روش به عنوان جایگزینی برای مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی شبیه‌سازی سیل استفاده کرد.

با توجه به مقادیر سطح زیر منحنی (AUC) محاسبه شده برای

می‌کند، با توجه میزان خالی بودن مخازن سد‌ها و همچنین ظرفیت انتقال سرریز سد‌ها متفاوت می‌باشد. در شرایطی که سرریزهای این سد‌ها توانایی انتقال سیل‌ها را نداشته باشند، به دلیل رخ دادن پدیده روگذری و همچنین تجاوز مقدار تنش در بدنه سد از تنش مجاز، بدنه سد دچار گسستگی شده و این سازه‌ها تخریب می‌شوند. با توجه به قرارگیری کلان شهر مشهد در پایین دست دو سد طرق و گلستان و همچنین قرار داشتن تعداد زیادی روستا در پایین دست سد های ارداک و کارده، در صورت شکست این سد‌ها، میزان خسارات جانی و مالی در این مناطق قابل توجه بود.

۴- نتیجه‌گیری

پهنه‌بندی سیل با دقت بالا با استفاده از روش‌های هیدرولیکی و

منابع

- [1] H. Mirmousavi, H. Esmaeili, Zoning of flood-prone areas using geographic information system (GIS) and remote sensing (RS), (case study: Darab city), Natural environment hazards, 10(27) (2021) 21-46. (in Persian)
- [2] W.H. Organization, Floods, in, 2020.
- [3] A. Chowdhury, S. Reshad, M. Kumruzzaman, Hydrodynamic Flood Modelling for the Jamuna River using HEC-RAS & MIKE 11, in: Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE-2020), Chattogram, Bangladesh, 2020, pp. 21-23.
- [4] D.D. TK, D.N. PT, Flood Modelling of Pamba River Using MIKE FLOOD, (2020).
- [5] N.S. Romali, Z. Yusop, A.Z. Ismail, Application of HEC-RAS and Arc GIS for floodplain mapping in Segamat town, Malaysia, GEOMATE Journal, 15(47) (2018) 7-13.
- [6] F. Faridani, S. Bakhtiari, A. Faridhosseini, M.J. Gibson, R. Farmani, R. Lasaponara, Estimating Flood Characteristics Using Geomorphologic Flood Index with Regards to Rainfall Intensity-Duration-Frequency-Area Curves and CADDIES-2D Model in Three Iranian Basins, Sustainability, 12(18) (2020) 7371.
- [7] V. Demir, O. Kisi, Flood hazard mapping by using geographic information system and hydraulic model: Mert River, Samsun, Turkey, Advances in Meteorology, 2016 (2016).
- [8] W. Fu, J. Ma, P. Chen, F. Chen, Remote sensing satellites for digital earth, Manual of digital earth, (2020) 55-123.
- [9] S. Manfreda, A. Sole, M. Fiorentino, Can the basin morphology alone provide an insight into floodplain delineation?, WIT Transactions on Ecology and the Environment, 118 (2008) 47-56.
- [10] D. Nagesh Kumar, A.R. Shastri, K. Srinivasa Raju, Delineation of flood-prone areas using modified topographic index for a river basin, h2oj, 3(1) (2020) 58-68.
- [11] S. Manfreda, M. Di Leo, A. Sole, Detection of flood-

نقشه‌های استاندارد سیل در زیرحوضه‌های رادکان، جاغرق و آق‌دربند که در جدول ۴ نشان داده شده است و همچنین جانمایی این سه زیرحوضه در بخش‌های ابتدایی، میانی و انتهایی حوضه آبریز کشف‌رود، می‌توان بیان کرد که بهترین نتایج پهنه‌بندی سیل با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی در حوضه آبریز کشف‌رود، برای زیرحوضه آق‌دربند که در بخش‌های انتهایی این حوضه آبریز قرار گرفته است، بدست آمد. بر اساس این نتایج می‌توان بیان کرد که بهترین عملکرد افزونه GFA به ازای نقشه استاندارد سیلی بدست می‌آید که در بخش‌های انتهایی حوضه آبریز مورد بررسی قرار داشته باشد.

بالاترین مقدار نرخ مثبت صحیح (R_{TP}) بدست آمده برای پهنه‌بندی سیل با استفاده از نقشه استاندارد سیل در زیرحوضه آق‌دربند بدست آمده است. با توجه به اینکه این مقادیر بالای ۰/۹۶ می‌باشند، نشان از دقت بالای این روش برای پهنه‌بندی سیل در این حوضه آبریز را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر مساحت زیر منحنی مشخصه عامل دریافتی (AUC) برای این مدل‌سازی به ازای تمامی دوره بازگشت‌های مورد بررسی بالای ۰/۹۹ بود که نشان‌دهنده پهنه‌بندی موثر در این حوضه آبریز می‌باشد. بر این اساس می‌توان بیان کرد که استفاده از مشخصه‌های ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز به منظور پهنه‌بندی سیل نتایج بسیار خوبی ارائه می‌کند. با توجه به اینکه حوضه آبریز کشف‌رود یکی از حوضه آبریز بزرگ ایران می‌باشد و همچنین با توجه به نتایج خوبی که از پهنه‌بندی سیل در این حوضه آبریز بدست آمده است، می‌توان بیان کرد که این روش را می‌توان برای حوضه‌های آبریز بزرگ و همچنین در ابعاد بزرگ مقیاس مدل‌سازی و پهنه‌بندی سیل بکار برد. همانطور که در شکل‌های ۸، ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، نتایج این بررسی نشان داد که رخ دادن سیل‌هایی با دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله در حوضه آبریز کشف‌رود باعث تحت تاثیر قرار دادن بخش قابل توجهی از پوشش‌های گیاهی، اراضی شهری و روستایی و همچنین ۴ سد موجود در این حوضه آبریز می‌شود که هر کدام باعث بوجود آمدن خسارات جانی و مالی فراوانی خواهد شد. لذا با توجه به پهنه سیل بدست آمده به ازای سیل با دوره بازگشت‌های مورد بررسی، باید با استفاده از روش‌های سازه‌ای مانند احداث سیل‌بندها، انحراف سیلاب، اصلاح و بهسازی مسیر و ... و همچنین روش‌های غیر سازه‌ای مانند مدیریت حوضه آبریز، احداث جنگل‌های مصنوعی در بالادست مناطق شهری و روستایی و ... تمهیدات لازم جهت جلوگیری از این خسارات اندیشیده شود.

- hydrogeomorphic floodplain mapping performance with varying DTM resolution and stream order, *Hydrological Sciences Journal*, 64(5) (2019) 525-538.
- [20] R. Albano, C. Samela, I. Crăciun, S. Manfreda, J. Adamowski, A. Sole, A. Sivertun, A. Ozunu, Large scale flood risk mapping in data scarce environments: An application for Romania, *Water*, 12(6) (2020) 1834.
- [21] C. Samela, S. Manfreda, T.J. Troy, Dataset of 100-year flood susceptibility maps for the continental US derived with a geomorphic method, *Data in brief*, 12 (2017) 203-207.
- [22] C. Samela, R. Albano, A. Sole, S. Manfreda, GEOMORPHIC FLOOD AREA (GFA) TOOL: A QGIS PLUGIN FOR A COST-EFFECTIVE DELINEATION OF THE FLOOD-PRONE AREAS.
- [23] K. Schittkowski, EASY-FIT: a software system for data fitting in dynamical systems, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 23 (2002) 153-169.
- [24] Power_Ministry, A guide to preparing flood hazard maps, in, 2020, pp. 186. (in Persian)
- [25] U. Nations, Step by Step: Flood Hazard Mapping Using HEC-RAS Mapper, in, 2021.
- [26] Esri, A ten class global land use/land cover (LULC) map for the year 2020 at 10 meter resolution, in, 2020.
- [27] K. Karra, C. Kontgis, Z. Statman-Weil, J.C. Mazzariello, M. Mathis, S.P. Brumby, Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning, in: 2021 IEEE international geoscience and remote sensing symposium IGARSS, IEEE, 2021, pp. 4704-4707.
- [28] Statistical_Center_of_Iran, Data and statistical information, in, 2021. (in Persian)
- prone areas using digital elevation models, *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(10) (2011) 781-790.
- [12] C. Samela, T.J. Troy, S. Manfreda, Geomorphic classifiers for flood-prone areas delineation for data-scarce environments, *Advances in water resources*, 102 (2017) 13-28.
- [13] C. Samela, R. Albano, A. Sole, S. Manfreda, A GIS tool for cost-effective delineation of flood-prone areas, *Computers, Environment and Urban Systems*, 70 (2018) 43-52.
- [14] O.E. Wing, P.D. Bates, C.C. Sampson, A.M. Smith, K.A. Johnson, T.A. Erickson, Validation of a 30 m resolution flood hazard model of the conterminous United States, *Water Resources Research*, 53(9) (2017) 7968-7986.
- [15] K. Jafarzadegan, V. Merwade, S. Saksena, A geomorphic approach to 100-year floodplain mapping for the Conterminous United States, *Journal of Hydrology*, 561 (2018) 43-58.
- [16] S. Try, G. Lee, W. Yu, C. Oeurng, Delineation of flood-prone areas using geomorphological approach in the Mekong River Basin, *Quaternary International*, 503 (2019) 79-86.
- [17] S. Manfreda, C. Samela, A digital elevation model based method for a rapid estimation of flood inundation depth, *Journal of Flood Risk Management*, 12 (2019) e12541.
- [18] G. Balacco, V. Totaro, A. Gioia, A.F. Piccinni, Evaluation of geomorphic descriptors thresholds for flood prone areas detection on ephemeral streams in the metropolitan area of Bari (Italy), in: *International Conference on Computational Science and Its Applications*, Springer, 2019, pp. 239-254.
- [19] A. Annis, F. Nardi, R. Morrison, F. Castelli, Investigating

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Gh. Panahi, S. R. Khodashenas, Sh. Oghabi, Z. Khosravimanesh, *Optimizing the location of the standard flood map in flood zoning using geomorphological characteristics*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(9) (2023) 1765-1786.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21664.7790

