

پتانسیل یابی سیل خیزی زیرحوضه‌های حوضه معرف امامه

فاطمه کریمی صحنه سرایی^{۱*} و علی محمد آخوند علی^۲

چکیده

با توجه به اینکه در اغلب حوضه‌های آبریز کشور، وقوع سیل و خسارت‌های ناشی از آن روند افزایشی دارد، تعیین مناطق مولد سیل و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها برای اجرای پروژه‌های کنترل سیلاب از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش، با تلفیق ArcGIS و HEC-HMS، پتانسیل سیل‌خیزی و تولید رواناب زیرحوضه‌های حوضه آبریز امامه بررسی شده است. این حوضه در شمال شرق تهران و در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی واقع شده است. برای رسیدن به اهداف پژوهش، از روش تکرار حذف انفرادی زیرحوضه‌ها از مدل بارش- رواناب استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان مشارکت زیرحوضه‌ها در دبی خروجی کل حوضه تنها تحت تأثیر مساحت و دبی اوج زیرحوضه نیست و اثر متقابل عواملی همچون موقعیت مکانی زیرحوضه‌ها، فاصله تا خروجی، شکل حوضه، پروفیل طولی آبراهه، CN که خود تابعی از شیب، کاربری اراضی، نوع خاک، پوشش گیاهی و ... است، هم‌زمانی دبی اوج زیرحوضه‌ها و نقش روندیابی در رودخانه اصلی تأثیر بسزایی در تولید رواناب و سیل‌خیزی بودن زیرحوضه‌ها دارند. در مجموع، زیرحوضه‌های واقع در بالادست و میانه حوضه بیشترین سهم را در دبی اوج خروجی به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین، توصیه می‌شود عملیات اصلاحی و کنترل سیلاب در این مناطق متمرکز شود.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل‌یابی، حوضه امامه، سیل‌خیزی، ArcGIS، HEC-HMS.

ارجاع: کریمی صحنه سرایی ف. و آخوند علی ع. م. ۱۳۹۷. پتانسیل‌یابی سیل‌خیزی زیرحوضه‌های حوضه معرف امامه. مجله پژوهش آب ایران. ۳۱: ۶۱-۷۳.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲- استاد، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

* نویسنده مسئول: karimi.sahnehsaraee@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۰۲

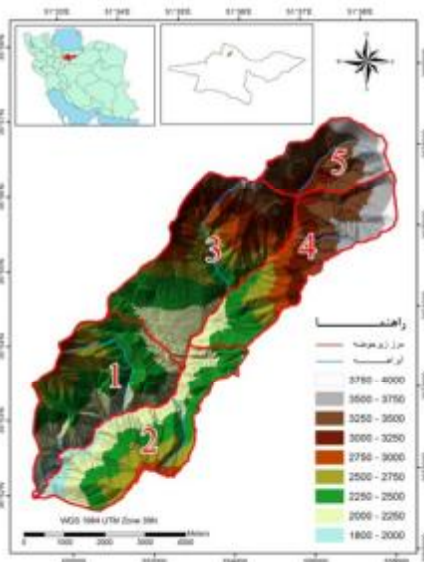
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۰۲

مقدمه

سیلاب، پدیده‌ای است که دلیل عمده آن عوامل طبیعی است و دخالت بشر نیز باعث برهم خوردن تعادل طبیعت شده و وقوع این پدیده و خسارات ناشی از آن را تشدید کرده است. با توجه به علل مختلف و مؤثر در بروز سیل، می‌توان با به‌کارگیری روش‌ها و راهکارهای علمی و عملی، از وقوع بسیاری از سیل‌ها جلوگیری کرد. در مواقعی هم که نتوان از وقوع آن جلوگیری نمود، امکان انجام اقدامات مختلف، از جمله عملیات آبخیزداری و پهنه‌بندی مناطق سیل‌خیز و به دنبال آن تعیین کاربری مناسب برای این مناطق به‌منظور کاهش خسارات ناشی از سیل، وجود خواهد داشت. اولین اقدامی که برای کاهش خطر سیل مطرح می‌شود، مهار سیل در سرمنشأ آن، یعنی زیرحوضه‌ها است؛ ولی به دلیل وسعت و گستردگی حوضه‌ها انجام عملیات اصلاحی به علت هزینه بالا و کمبود نیروی انسانی و تدارکات در سراسر حوضه امکان‌پذیر نیست. این موضوع همراه با روند افزایشی وقوع سیل و خسارت‌های ناشی از آن در اغلب حوضه‌های کشور، ضرورت مطالعات پتانسیل‌یابی، تعیین مناطق مولد سیل و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها را برای اجرای پروژه‌های کنترل سیلاب و مدیریت جامع حوضه‌های آبریز بیش از پیش نمایان می‌سازد. اولین روش‌های تجربی محاسبه دبی سیل براساس برخی خصوصیات فیزیکی حوضه، از جمله مساحت، شیب و زمان تمرکز بنا شده‌اند. در این نوع برآورد، توزیع مکانی بارش و سایر خصوصیات حوضه در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین، مدل‌های یکپارچه برای توزیع‌های مکانی مختلف بارش مازاد، نتایج یکسانی به دست می‌دهند. به‌تدریج با معرفی داده‌ها و منابع نوینی همچون تصاویر ماهواره‌ای و سامانه اطلاعات جغرافیایی، شبیه‌سازی پاسخ حوضه به یک بارش با خصوصیات معین با روش‌های ارتقا یافته توزیعی و با دقتی نسبتاً بالا انجام گرفت. از جمله، می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد که به روش‌های مختلف به شبیه‌سازی سیلاب و برآورد رواناب، پهنه‌بندی خطر سیلاب و شناسایی نواحی سیل‌خیز پرداخته‌اند: شکری (۱۳۹۰) به بررسی نقش مشارکت زیرحوضه‌ها در شدت سیل‌خیزی حوضه آیدنک واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد پرداخت و نشان داد که زیرحوضه‌های میانه حوضه نقش بیشتری در سیلاب خروجی دارند؛ دلیل آن را هم این‌گونه بیان کرد که

زمانی که دبی اوج در خروجی حوضه اتفاق می‌افتد، سیلاب مناطق پایین‌دست از منطقه خارج شده و اوج سیلاب مناطق بالادست هم هنوز به خروجی نرسیده و این سیلاب مناطق میانی است که مسبب دبی اوج در خروجی حوضه محسوب می‌شود. محمدی‌مطلق و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی نقش مشارکت زیرحوضه‌ها در شدت سیل‌خیزی حوضه دالکی واقع در حد فاصل استان‌های فارس و بوشهر پرداختند و به این نتیجه رسیدند که زیرحوضه‌های واقع در مناطق بالادست و میانی حوضه، بالاترین پتانسیل سیل‌خیزی را دارا هستند؛ دلیل آن را نیز شدت و عمق بارندگی، همچنین بالابودن شیب و شماره منحنی دانستند که باعث کاهش زمان تمرکز این زیرحوضه‌ها می‌شود. رشما و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از تکنیک‌های SCS، CN و MUSKINGUM-CUNGE به شبیه‌سازی رواناب حوضه پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل ایجاد شده برای شبیه‌سازی رواناب حوضه قابلیت بالایی دارد. اسماعیل و سانیول (۲۰۱۳) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل جریان تجمعی به بررسی پتانسیل سیل‌خیزی و شناسایی نواحی مستعد تولید سیلاب بخشی از رودخانه کادانا پرداختند و منطقه را به سه طبقه با خطر بالا، خطر متوسط و خطر پایین تقسیم کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که نقشه پتانسیل سیل‌خیزی می‌تواند در اطلاع‌رسانی عمومی، برنامه‌ریزی برای رویارویی با بلایای طبیعی و مدیریت خطر سیلاب به طور مؤثر مورد استفاده قرار گیرد. رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از GIS و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و مقایسه با نتایج حاصل از مدل‌های هیدرولوژیکی به تعیین و شناسایی نواحی سیل‌خیز منطقه یاسوج پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تکنیک مذکور، روشی امیدوارکننده در شناسایی مناطق سیل‌خیز و ارزیابی پتانسیل وقوع سیل است. هدف از انجام پژوهش پیش رو، پتانسیل‌یابی سیل‌خیزی زیرحوضه‌های حوضه امامه، بررسی نقش مشارکت آن‌ها در تولید سیلاب و مشخص کردن مناطقی است که بیشترین تأثیر را در تولید رواناب حوضه دارند. برای نیل به این اهداف، از سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) و مدل HEC-HMS استفاده شده است. مطالعات گوناگونی بر روی حوضه مزبور توسط محققین مختلف صورت گرفته است. نایب عباسی (۱۳۷۲) به بررسی روابط و تعیین

ابتدا، شبکه آبراه‌های استخراج‌شده از مدل ارتفاع رقومی^۱ حوضه، به‌عنوان یک لایه اطلاعاتی وارد محیط‌های Arc Hydro و HEC-GEO HMS شد. پس از ایجاد وکتور واحدهای همگن و تعیین موقعیت ایستگاه بر روی آن‌ها، فرایند ترسیم زیرحوضه‌های بالادست ایستگاه آب‌سنجی امامه با استفاده از یکی‌شدن واحدهای همگن و همچنین رسیدن آبراهه‌ها به آبراهه اصلی صورت پذیرفت. در نهایت، با توجه به وضعیت زهکش‌ها و وسعت حوضه و به‌منظور افزایش دقت در مدل‌سازی هیدرولوژیک، حوضه مورد مطالعه به ۵ زیرحوضه تقسیم شد. سپس، خصوصیات فیزیوگرافی مورد نیاز از مدل ارتفاع رقومی حوضه استخراج گردید. شکل ۱، شبکه آبراهه اصلی و زیرحوضه‌های استخراج‌شده و جدول ۱، خصوصیات فیزیوگرافی مربوط به هر یک از واحدهای هیدرولوژیک را نشان می‌دهد.



شکل ۱- استخراج شبکه آبراهه اصلی و زیرحوضه‌های آبریز حوضه امامه با استفاده از مدل ارتفاع رقومی

انتخاب، واسنجی و اعتباریابی مدل

در سال‌های اخیر، عمومیت یافتن روش‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیک باعث افزایش تعداد مدل‌های بارش- رواناب شده است. انتخاب بهترین مدل بستگی به مسائل مورد بررسی دارد. از آنجا که یک مدل مناسب، نیازمند تطبیق آن با شرایط و اطلاعات موجود حوضه و هدف طرح می‌باشد؛ به همین جهت، باید مدلی که تأمین‌کننده این

شماره منحنی برای برآورد رواناب سطحی در حوضه امامه پرداخت و در نهایت، روش توزیع زمانی CN را روشی مناسب برای تخمین دبی اوج منطقه تشخیص داد. حاجی‌زاده و نورانی (۱۳۹۰) یک مدل بارش-رواناب ژئومورفولوژیکی را بر اساس مفهوم مخازن آبشاری غیرخطی ارائه کردند. نامبردگان در تحقیق خود، حوضه را به چند قسمت تقسیم کرده و هر قسمت را توسط یک مخزن غیرخطی مدل کردند. ایشان در نهایت، Cascade Reservoirs را مدلی کارآمد برای نیل به اهداف خود معرفی نمودند. شریفی و همکاران (۱۳۹۲) ترکیب بهینه متغیرها را برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبخیز امامه با استفاده از آزمون گاما مورد ارزیابی قرار داده و نشان دادند که هنگام آزمایش مدل، روش ANN از دقت بیشتری نسبت به روش LLR برخوردار است. احمدی و همکاران (۱۳۹۲) نیز تأثیر توسعه شهری مناطق مجاور رودخانه‌ها را در افزایش دبی پیک سیلاب‌های حوضه امامه مورد مطالعه قرار دادند. بدین‌منظور، از مدل نرم‌افزاری HEC- HMS (USACE) برای شبیه‌سازی فرایند بارندگی - رواناب استفاده شد. ابتدا، مدل حوضه در HEC- HMS ایجاد شد و این مدل بر اساس هیدروگراف سیلاب‌های ثبت شده حوضه، مورد واسنجی قرار گرفت. برای بررسی آثار شهری‌سازی از روش تلفات SCS استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزایش پنج درصدی CN حوضه باعث ۷۵ درصد افزایش دبی اوج سیلاب در حوضه امامه می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه معرف امامه، اولین حوضه معرف کشور است که در سال ۱۳۴۹ تأسیس شده و به لحاظ تقسیمات سیاسی تماماً در استان تهران قرار گرفته است. رودخانه امامه، یکی از سرشاخه‌های رودخانه جاجرود می‌باشد که از ارتفاعات جنوبی دره لار سرچشمه گرفته و در برای شمال شرقی به جنوب غربی از میان حوضه عبور کرده و به شاخه اصلی رودخانه جاجرود می‌پیوندد. مساحت حوضه امامه $37/2$ کیلومتر مربع، ارتفاع بلندترین نقطه آن از سطح دریا 3877 متر و پایین‌ترین نقطه 1792 متر می‌باشد. در این حوضه، دو ایستگاه هیدرومتری باغ‌تنگه و کمرخانی وجود دارد. برای تعیین خصوصیات فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها در

1- Digital Elevation Model

بازگشت‌های مختلف و تداوم بارش که برابر زمان تمرکز فرض می‌شود (شاه‌محمدی و جهانی، ۱۳۹۰)، حداکثر بارش در تداوم مورد نظر به دست آمد و نقشه خطوط هم‌باران با دوره بازگشت‌های مختلف و تداوم مزبور ترسیم شد.

تعیین الگوی توزیع مکانی و زمانی بارش

برای واسنجی مدل HEC-HMS لازم است که داده‌های واقعی بارش و سیلاب متناظر آن آماده شوند. اطلاعات به‌دست‌آمده از باران‌سنج‌ها، نشانگر مقدار و شدت بارش در نقاط اندازه‌گیری است و در یک حوضه و نواحی اطراف آن به سبب تنوع بارندگی از نظر مقدار و مدت، چند ایستگاه باران‌سنجی وجود دارد. از این‌رو، برای تبدیل داده‌های نقطه‌ای بارندگی به میانگین منطقه‌ای، نیاز به روش‌های زمین‌آماری است. در مطالعه^۲ پیش رو، برای ترسیم خطوط هم‌باران و تعیین الگوی توزیع مکانی بارش‌ها از روش عکس مجذور فاصله^۲ در محیط ArcGIS استفاده شد. همچنین، با استفاده از داده‌های ایستگاه باران‌نگار امامه، الگوهای توزیع زمانی بارش برای تداوم ۲۴ ساعته و به روش میانگین ترسیمی استخراج شد. بدین‌منظور، رگبارها به صورت ۱۵ دقیقه‌ای از روی گراف‌های باران‌نگار ایستگاه استخراج و در ۸ پایه زمانی ۱، ۲، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعت طبقه‌بندی شدند. همچنین، در هر تداوم، رگبارهایی با مجموع بارش بیش از میانگین به‌عنوان بارش شدید انتخاب و بی‌بعد شدند. مقادیر بارندگی تجمعی بی‌بعد تمام رگبارها در هر تداوم برای فاصله‌های ۵ درصد زمانی از طریق درون‌یابی و میانگین بارندگی تمامی رگبارها نیز از صفر تا ۱۰۰ درصد زمانی محاسبه و در نهایت، نمودار میانگین بارندگی بی‌بعد برحسب مقادیر زمانی بی‌بعد (۰، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰) در هر تداوم ترسیم شد.

سهم زیر حوضه‌ها در تولید سیلاب

در شناسایی مناطق با پتانسیل تولید سیلاب، روندیابی آب‌نمود زیرحوضه‌ها تا محل خروجی حوضه حایز اهمیت است. بنابراین، سعی شده است با در نظر گرفتن این نکته، میزان مشارکت زیرحوضه‌ها در ایجاد سیل خروجی حوضه تعیین و زیرحوضه‌ها از نظر سیل‌خیزی اولویت‌بندی شوند. بدین‌منظور، از روش تکرار حذف انفرادی زیرحوضه^۳

شرایط باشد، در نظر گرفته شود. با توجه به کارآمدی مدل HEC-HMS و استقبال و توصیه بسیاری از محققین به استفاده از آن در مطالعه و ارزیابی رفتارهای هیدرولوژیکی، در این پژوهش نیز از مدل مذکور استفاده شده است. برای واسنجی و ارزیابی این مدل، آزمون ساده تقسیم نمونه‌ها^۱ (یون و پارکین، ۱۹۹۶) به کار گرفته شده است. در این روش، سیلاب‌های مشاهده‌ای به دو گروه تقسیم می‌شوند. پارامترهای مدل با یک گروه از داده‌ها و با استفاده از توابع هدف حداقل‌سازی خطا واسنجی می‌شوند. سپس، اعتباریابی مدل از طریق اجرای آن با پارامترهای واسنجی‌شده برای گروه دوم انجام می‌شود و هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

منحنی‌های IDF

برای به دست آوردن منحنی‌های IDF، ابتدا داده‌های بارندگی ایستگاه امامه را مورد بررسی قرار داده شد؛ سپس، یک دوره آماری ۴۹ ساله را (از سال آبی ۴۷-۱۳۴۶ تا ۹۵-۱۳۹۴) که دارای داده‌های مناسب است، انتخاب و با استفاده از داده‌های ۱۵ دقیقه‌ای بارندگی موجود، برای هر بارندگی مقادیر حداکثر بارندگی برای تداوم زمانی ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ دقیقه و ۲، ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴ ساعته به دست آورده شد. به این ترتیب، در هر سال آبی، یک مقدار عددی برای حداکثر بارندگی در تداوم مورد نظر به دست می‌آید. مقادیر حداکثر بارش روزانه نیز به صورت جداگانه تعیین شدند. برای تعیین روابط شدت، مدت و فراوانی بارندگی و ترسیم منحنی آن ابتدا با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل فراوانی هیدرولوژیکی (HYFA و Freq) برای هر گروه از داده‌ها در بازه‌های زمانی مختلف تحلیل فراوانی صورت گرفت. سپس، بارندگی برای هر بازه زمانی و دوره بازگشت‌های انتخابی (۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ سال) محاسبه شد. در مرحله بعد، نسبت مقادیر حداکثر رگبار در تداوم‌های مختلف به حداکثر رگبار روزانه برای دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه و سپس رابطه همبستگی بین نسبت‌های فوق و زمان تداوم بارندگی تعیین شد. در انتها، روابط شدت-مدت-فراوانی، تعیین و اقدام به ترسیم منحنی IDF شد. با استفاده از این روابط و تعیین ضرایب ثابت و همچنین با داشتن حداکثر بارندگی روزانه با دوره

2- Inverse Distance Weighted (IDW)
3 - SSSE

1- Simple- Split Sample Test

که در آن‌ها F ، سهم مشارکت زیرحوضه در دبی خروجی کل حوضه (درصد)، ΔQ ، مقدار کاهش در دبی خروجی کل حوضه در اثر حذف زیرحوضه مورد نظر (مترمکعب بر ثانیه)؛ Q_p ، دبی خروجی کل حوضه (مترمکعب بر ثانیه)؛ f ، سهم مشارکت زیرحوضه در دبی خروجی کل حوضه به ازای واحد سطح و A ، مساحت زیرحوضه در دبی خروجی کل حوضه (کیلومتر مربع) می‌باشد (ثقفیان و فرامرزو، ۱۳۸۶).

استفاده شد. برای حذف اثر مساحت در اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها، میزان تأثیر در واحد سطح زیرحوضه در سیل خروجی نیز محاسبه می‌شود. بنابراین، دو نمایه سیل‌خیزی مورد استفاده به صورت زیر تعریف می‌شوند:

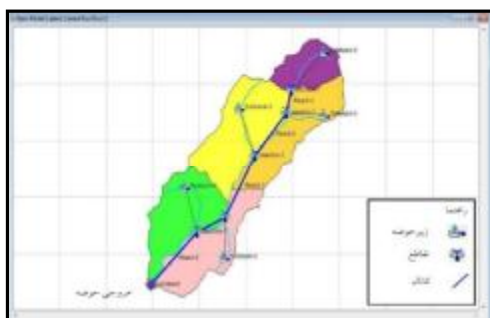
$$F = \left(\frac{\Delta Q_p}{Q_p} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$f = \frac{\Delta Q_p}{A} \quad (2)$$

جدول ۱- مشخصات فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها

شماره زیر حوضه	مساحت (km ²)	محیط (km)	شیب متوسط حوضه (%)	طول آبراهه اصلی (km)	ضریب فشردگی	عرض مستطیل معادل (km)	طول مستطیل معادل (km)	نسبت دایره‌ای	طول حوضه (km)	ضریب شکل حوضه	ارتفاع متوسط حوضه (m)
۱	۸/۳	۱۴/۵	۴۲/۵	۳/۴	۱/۴	۱/۴	۵/۸	۰/۵	۱۴/۱	۱/۱	۲۳۲۰
۲	۷/۵	۱۶/۵	۵۰/۴	۲/۲	۱/۷	۱	۷/۲	۰/۳	۱۶/۲	۲/۳	۲۳۰۰
۳	۱۰/۵	۱۵/۹	۹۴/۱	۳/۴	۱/۴	۱/۷	۶/۳	۰/۵	۱۵/۹	۰/۹	۲۶۴۰
۴	۷/۵	۱۵/۹	۱۳۴/۵	۱/۷	۱/۶	۱/۱	۶/۹	۰/۴	۱۵/۹	۱/۹	۳۱۲۰
۵	۴	۸/۶	۳۳۹/۹	۲/۶	۱/۲	۱/۴	۲/۹	۰/۷	۸/۵	۱/۷	۳۴۰۰
کل	۳۷/۹	۳۲	۶۴/۶	۱۴/۵	۰	۲/۹	۱۳/۱	۰/۵	۳۱/۵	۲۶/۲	۲۵۰۰

شکل نشان داده شده‌اند.



شکل ۲- مدل حوضه امامه در محیط HEC-HMS

سیلاب مورخ ۱۳۷۸/۱۱/۲۵ با میانگین پارامترهای حاصل از واسنجی شبیه‌سازی شد. نتایج ارزیابی مدل در جدول ۵ و شکل ۴ ارائه شده است. شاخص درصد خطای دبی اوج $9/7$ - درصد می‌باشد که برای عملیات ارزیابی مقدراری مناسب محسوب می‌شود. این مدل بعد از عملیات واسنجی و ارزیابی به‌ویژه در خصوص پیش‌بینی دبی اوج سیلاب می‌تواند نتایج قابل قبولی ارائه دهد؛ به طوری که در مرحله واسنجی و ارزیابی اختلاف دبی اوج هیدروگراف

نتایج و بحث

مدل‌سازی، واسنجی و اعتباریابی مدل

برای اجرای مدل، ابتدا زیرحوضه‌ها، بازه‌ها و نحوه اتصال آن‌ها به هم، مشخصات آن‌ها شامل مساحت، ضرایب روش‌های محاسبه تلفات، روندیابی ماسکینگام و ضرایب X و K بازه‌ها وارد مدل شدند. پس از واردکردن اطلاعات، مدل اجرا شد. این مدل در نهایت، شامل ۵ زیرحوضه، ۵ بازه و ۶ گره بود. شکل ۲، مدل حوضه در محیط HEC-HMS را نشان می‌دهد.

از میان ۴ رگبار فراگیر حوضه که دارای آب‌نمود مشاهده‌ای خروجی متناظر با آن بودند، ۳ واقعه برای واسنجی و یک واقعه برای ارزیابی مدل انتخاب شد. جدول ۲، نشان‌دهنده مشخصات این رگبارهاست. با استفاده از الگوی واقعی در ایستگاه باران‌نگار امامه با تداوم ۱۵ دقیقه‌ای واسنجی مدل انجام شد. این مقادیر به همراه داده‌های آب‌نمود مشاهده‌ای به مدل داده شدند. نتایج واسنجی مدل در جدول ۳ و پارامترهای واسنجی شده در جدول ۴ ارائه شده‌اند. آب‌نمودهای مشاهده‌ای نیز در

مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده همواره کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات وقایع بارش - رواناب واقعی برای واسنجی و ارزیابی مدل

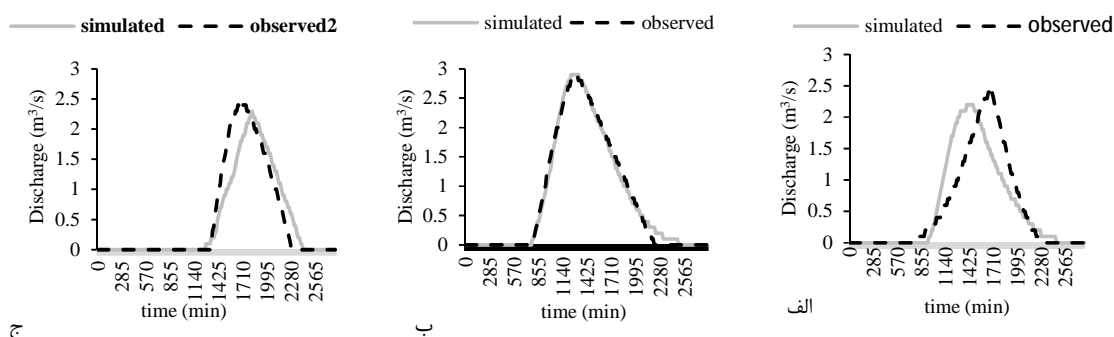
ردیف	تاریخ سیلاب	شرایط رطوبت قبلی خاک	دبی اوج سیلاب (m ³ /s)	حجم رواناب (m ³ ×10 ⁶)	متوسط عمق بارندگی کل حوضه (mm)	نوع عملیات
۱	۱۳۹۱/۰۸/۲۴	خشک	۲/۴	۲/۴	۵۱	واسنجی
۲	۱۳۷۶/۰۱/۱۶	متوسط	۲/۹	۳/۵	۲۹/۵	واسنجی
۳	۱۳۷۳/۰۸/۱۶	خشک	۲/۵	۲/۲	۲۱/۷	واسنجی
۴	۱۳۷۸/۱۱/۲۵	متوسط	۵/۲	۵/۲	۶۵	ارزیابی

جدول ۳- تعیین درصد خطا در حجم، دبی اوج و زمان رسیدن دبی اوج هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده

واقع	پارامترهای محاسبه شده	شبیه‌سازی شده	مشاهده شده	تفاوت	درصد تفاوت
۱۳۹۱/۰۸/۲۴	حجم رواناب (m ³)×10 ⁶	۲/۵	۲/۴	-۰/۴	۱/۵
۱۳۷۶/۰۱/۱۶	دبی اوج (m ³ /s)	۲/۲	۲/۵	-۰/۳	-۱۱
۱۳۷۳/۰۸/۱۶	حجم رواناب (m ³)×10 ⁶	۳/۵	۳/۵	۰/۰	۰/۲
۱۳۷۳/۰۸/۱۶	دبی اوج (m ³ /s)	۲/۹	۲/۹	۰	۰
۱۳۷۳/۰۸/۱۶	حجم رواناب (m ³)×10 ⁶	۲	۲/۲	-۰/۲	-۹/۷
۱۳۷۳/۰۸/۱۶	دبی اوج (m ³ /s)	۲/۲	۲/۵	-۰/۳	-۱۱

جدول ۴- پارامترهای بهینه‌شده حاصل از واسنجی برای زیر حوضه‌ها و بازه‌های روندیابی

واقع	شماره زیر حوضه	شماره منحنی	زمان تأخیر (min)	K (hr)	X
۱۳۹۱/۰۸/۲۴	۱	۵۵/۶۱	۷/۴۷	۱/۷۶	۰/۴۵
	۲	۵۷/۳۱	۷/۴۳	۲/۲۸	۰/۴۵
	۳	۵۷/۱۰	۱۲/۲۹	۰/۹۸	۰/۱۶
	۴	۶۴/۶۱	۳۶/۰۷	۱/۰۱	۰/۳۰
	۵	۷۷/۶۳	۲۳۰/۵۲	۱/۵۴	۰/۳۸
۱۳۷۶/۰۱/۱۶	۱	۵۵/۶۱	۷/۴۷	۱/۷۴	۰/۳۹
	۲	۵۷/۳۱	۷/۴۳	۲/۲۶	۰/۲۷
	۳	۵۷/۱۰	۱۲/۲۹	۰/۹۷	۰/۱۵
	۴	۸۲/۹۴	۲۲/۶۳	۰/۹۹	۰/۲۸
	۵	۹۷/۹۰	۲۵۵/۲۷	۱/۵۳	۰/۳۵
۱۳۷۳/۰۸/۱۶	۱	۵۵/۶۱	۷/۴۷	۲/۶۷	۰/۴۴
	۲	۵۷/۳۱	۷/۴۳	۲/۳۲	۰/۴۴
	۳	۵۷/۱۰	۱۲/۲۹	۱/۰۰	۰/۱۶
	۴	۶۴/۶۱	۳۶/۰۷	۱/۰۳	۰/۲۸
	۵	۹۹/۰۰	۳۵۰/۸۷	۱/۵۷	۰/۳۷



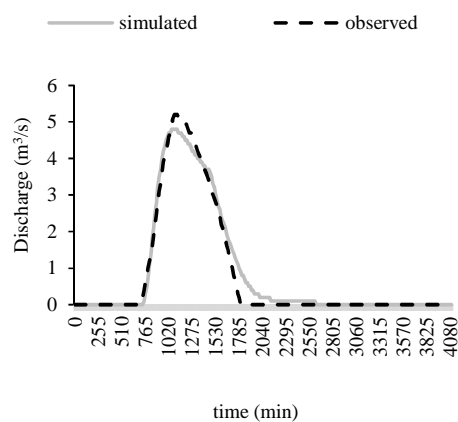
شکل ۳- آب نمود وقایع الف) ۱۳۹۱/۰۸/۲۴ ب) ۱۳۷۶/۰۱/۱۶ ج) ۱۳۷۳/۰۸/۱۶. این نمودارها پیش‌بینی قابل قبولی از میزان دبی اوج سیلاب و زمان رسیدن به آن ارائه می‌دهند؛ به طوری که اختلاف دبی اوج هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده همواره حدود ۱۰ درصد است. تغییر و نوسان فاکتورها و عوامل مؤثر بر میزان تولید رواناب در سیلاب‌های مختلف، باعث ایجاد اختلاف در دبی، حجم رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج می‌شود.

جدول ۵- نتایج حاصل از عملیات ارزیابی

واقعہ	پارامتر	شبیه‌سازی شده	مشاهده شده	تفاوت	درصد تفاوت
۱۳۷۸/۱۱/۲۵	حجم رواناب $10^6 (m^3)$	۵/۶۱	۵/۲۲	-۰/۳۹	۷/۵
	دبی اوج (m^3/s)	۴/۷	۵/۲	-۰/۵	-۹/۶

جدول ۶- معادلات مقدار - مدت - فراوانی برای حوضه امامه

R^2	معادله	دوره بازگشت (yT)
۰/۹۷۹۵	$P_t^2 = 0.2532t^{0.6542}$	۲
۰/۹۹۳۹	$P_t^5 = 0.3703t^{0.6839}$	۵
۰/۹۷۹۷	$P_t^{10} = 0.5351t^{0.6672}$	۱۰
۰/۹۴۰۷	$P_t^{20} = 0.6734t^{0.667}$	۲۰
۰/۹۲۴۹	$P_t^{25} = 0.7206t^{0.6668}$	۲۵
۰/۸۶۵	$P_t^{50} = 0.8258t^{0.6769}$	۵۰
۰/۸۰۹۲	$P_t^{100} = 1.1315t^{0.6635}$	۱۰۰



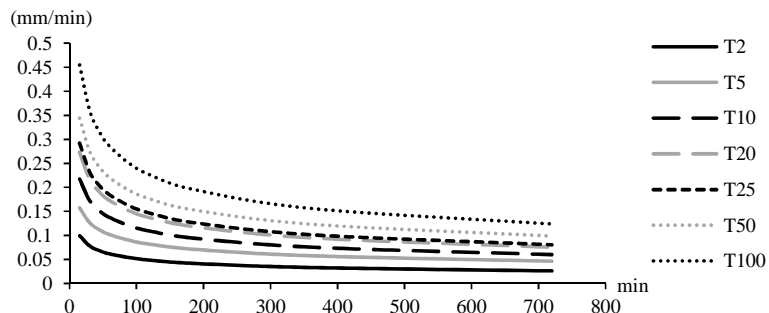
شکل ۴- هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای ارزیابی مدل در تاریخ ۱۳۷۸/۱۱/۲۵

توزیع مکانی و زمانی بارش

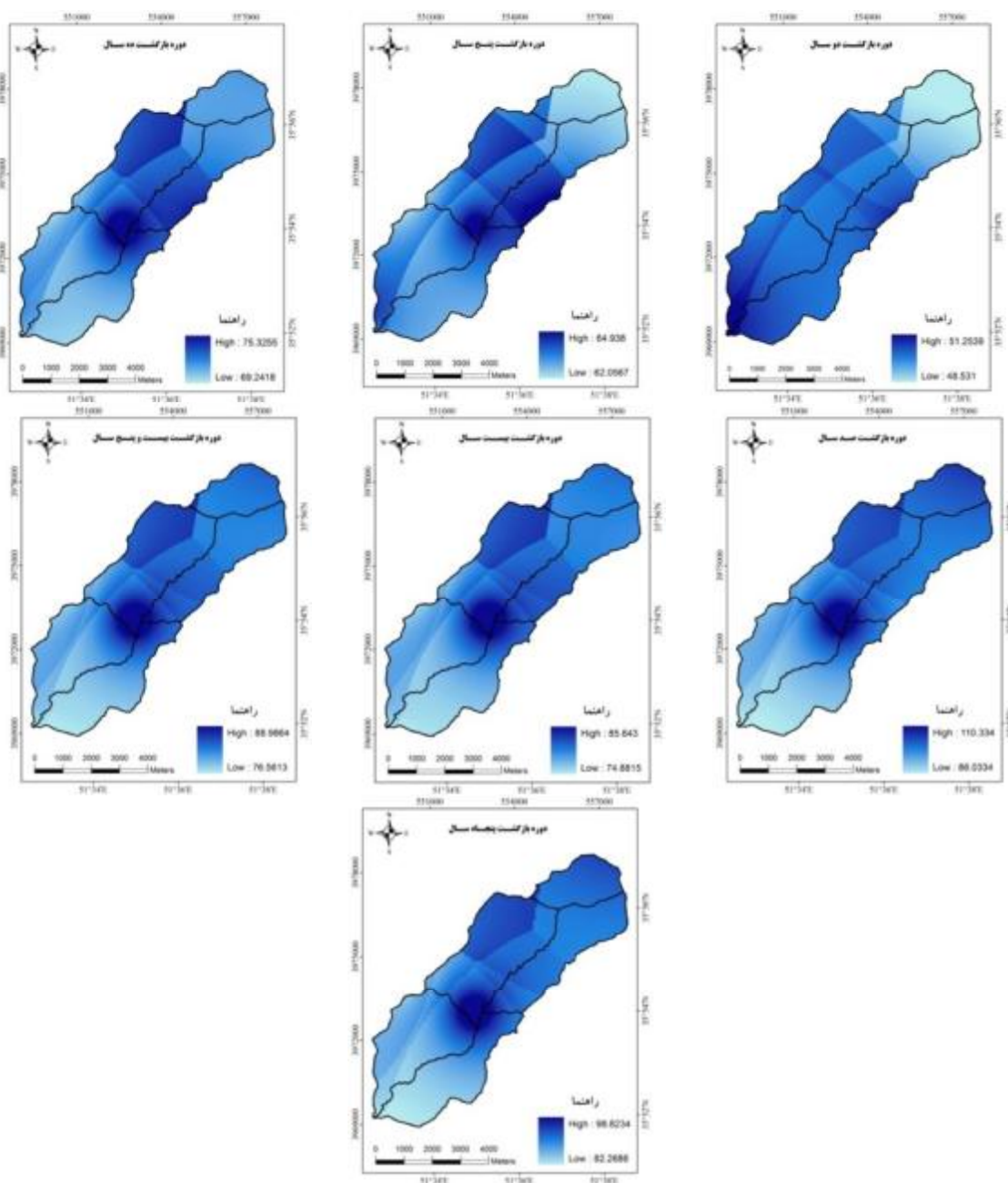
چنانچه اشاره شد، در این مطالعه برای ترسیم نقشه‌های خطوط هم‌باران و تعیین الگوی توزیع مکانی بارش‌ها از روش عکس مجذور فاصله در محیط ArcGIS استفاده شده است. این نقشه‌ها که برای دوره‌های بازگشت‌های مختلف تهیه و ترسیم شده‌اند، در شکل ۶ ارائه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نواحی مرکزی و نیمه‌شمالی محدوده از بالاترین میزان بارش در دوره بازگشت‌های مختلف برخوردار هستند.

منحنی‌های IDF

جدول ۶، معادلات بین حداکثر بارش در تداوم‌های ۱۵ دقیقه تا ۱۲ ساعت را با حداکثر بارش روزانه در دوره بازگشت‌های ۲ تا ۱۰۰ سال نشان می‌دهد. ضریب تبیین بالا در تمامی معادلات نشان‌دهنده مناسب بودن معادلات در برآورد حداکثر بارش در تداوم‌های مختلف می‌باشد.



شکل ۵- نمودار شدت-مدت- فراوانی برای حوضه امامه

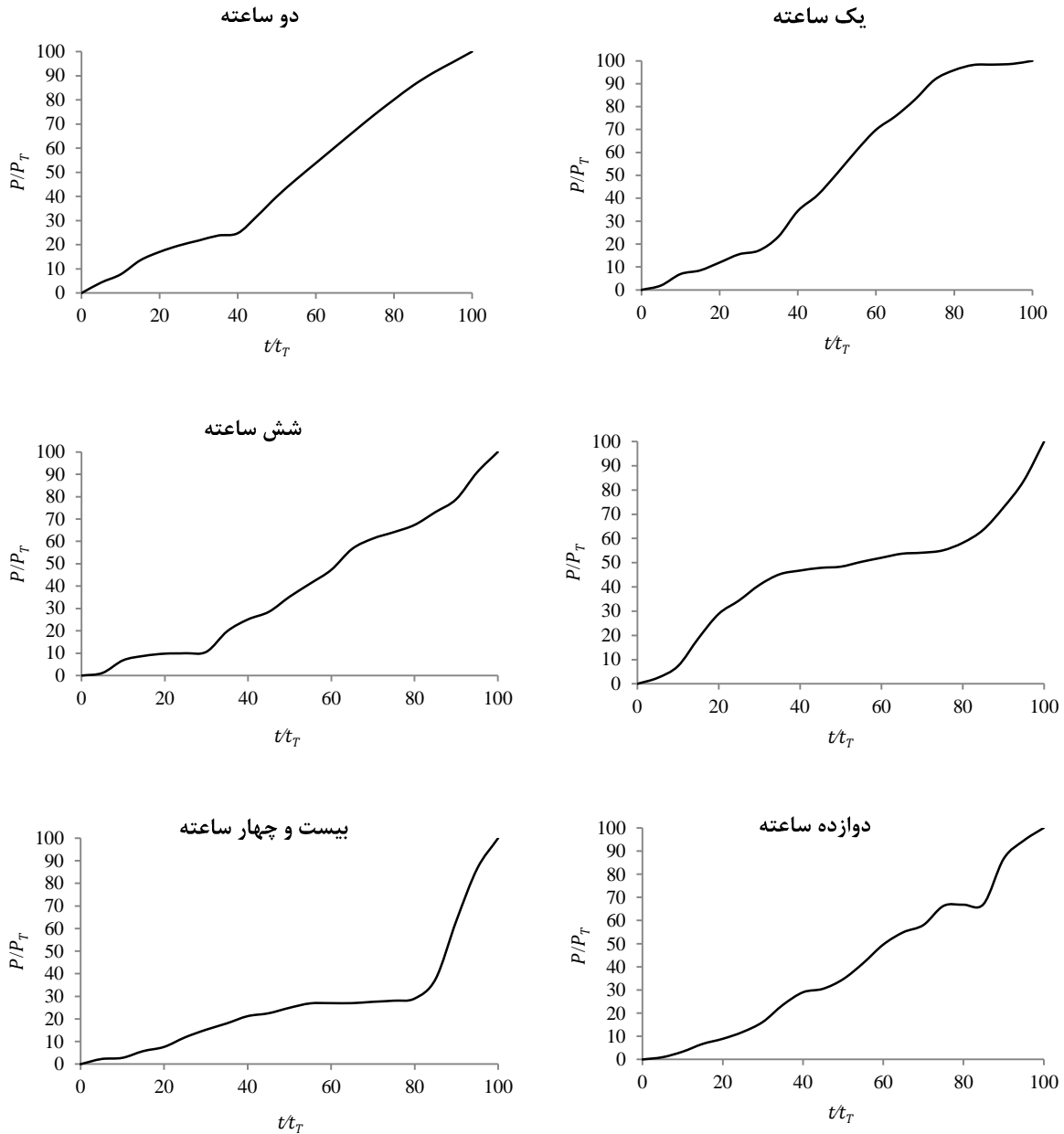


شکل ۶- نقشه نقاط هم‌باران برای دوره بازگشت‌های مختلف

توزیع مکانی و زمانی بارش

به منظور استخراج منحنی‌های بی‌بعد بارش نیز، ۱۲ رگبار مولد سیلاب طرح انتخاب شد. به کمک میانگین بی‌بعد

منحنی‌ها، توزیع زمانی حداکثر بارش روزانه حوضه امامه برای دوره بازگشت‌های مختلف به دست آمد. در شکل ۷، توزیع‌های زمانی با تداوم‌های مختلف ارائه شده است.



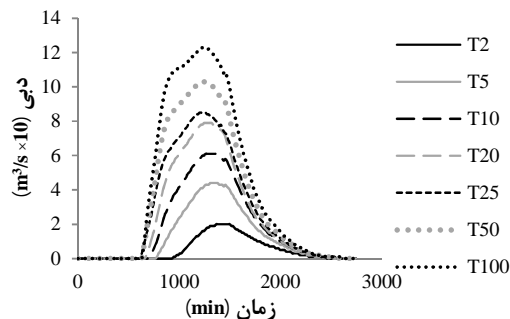
شکل ۷- نحوه تغییرات شدت بارش در طول مدت بارندگی با تداوم‌های مختلف. همان‌طور که ملاحظه می‌شود شدت بارش پس از شروع بارندگی روندی افزایشی را نشان داده و در برخی بازه‌های زمانی که شیب منحنی کاهش می‌یابد، از شدت بارش نیز کاسته می‌شود.

سیلاب طرح

پس از آنکه کلیه پارامترهای لازم برای برآورد سیلاب طرح به صورت کالیبره شده محاسبه شد، با استفاده از مدل HEC-HMS میزان تولید رواناب و آب‌نمود آن برای باران طرح با دوره بازگشت‌های مختلف برآورد شد. شکل

۸، هیدروگراف سیلاب را برای دوره بازگشت‌های مختلف بارش طراحی و جدول ۷، دبی اوج سیلاب را برای دوره بازگشت‌های مختلف نشان می‌دهد.

سیلابی ممکن است بخش قابل توجهی از حجم جریان به طور موقت در بستر اصلی و دشت‌های سیلابی نگهداری شوند و این حالت برای تمام زیرحوضه‌ها وجود نداشته باشد. این بخش از دبی اوج که در کنارها ذخیره می‌شوند، ارتفاع اوج را کاهش داده و زمان پایه آب‌نمود را طولانی‌تر می‌کنند. از طرف دیگر، ممکن است پس از روندیابی در آبراهه‌های اصلی، هم‌زمانی حضور دبی دو یا چند زیرحوضه در محل خروجی کل حوضه و تأثیرهای متقابل آن‌ها بر یکدیگر، نحوه مشارکت آن‌ها در ایجاد سیل خروجی حوضه را دستخوش تغییراتی کند. به این ترتیب، تفکیک مکانی مناطق همگن برای بررسی پتانسیل تولید رواناب در قالب زیرحوضه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. چنانچه در جدول ۸ ملاحظه می‌شود، زیرحوضه‌های ۳، ۴ و ۵ تأثیر یکسانی بر دبی اوج خروجی دارند؛ این درحالی است که مساحت این حوضه‌ها متفاوت است. زیرحوضه ۲، مساحت کمتری نسبت به زیرحوضه ۱ دارد؛ با این وجود، بر دبی اوج خروجی اثر بیشتری می‌گذارد. شیب، وضعیت توپوگرافی، کاربری اراضی، نوع خاک، پوشش گیاهی، رطوبت قبلی حوضه و ... از جمله عوامل مؤثر بر میزان نفوذپذیری و شماره منحنی هر زیرحوضه محسوب می‌شوند که می‌توانند نقش مساحت در تولید رواناب را تحت تأثیر قرار دهند. در دوره بازگشت ۵۰ سال، زیرحوضه ۵ بیشترین مقدار f را دارد و نشان می‌دهد عملیات کنترل سیلاب در این زیرحوضه بیشترین بازدهی را دارد. به طور مشابه، جدول ۸ برای دیگر دوره‌های بازگشت نیز تهیه شده است. شکل ۹، مشارکت زیرحوضه‌ها را در سیل خیزی حوضه بر اساس شاخص‌های F و f نشان می‌دهد. در جدول ۹؛ نیز اولویت‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها بر اساس فاکتور f و برای دوره بازگشت‌های مختلف ارائه شده است. شکل ۱۰، این اولویت‌بندی را به صورت نقشه و برای دوره بازگشت ۵۰ سال نشان داده است. در مجموع، میزان مشارکت زیرحوضه‌ها در دبی خروجی کل حوضه در دوره بازگشت‌های مختلف متفاوت است. اما به طور کلی، زیرحوضه‌های بالادست دارای بالاترین پتانسیل تولید رواناب و بیشترین اهمیت در کنترل سیلاب هستند. همچنین، با افزایش دوره بازگشت، میزان تولید رواناب و پتانسیل سیل‌خیزی حوضه روندی افزایشی را نشان می‌دهد.



شکل ۸- هیدروگراف سیلاب برای دوره بازگشت‌های مختلف

جدول ۷- دبی اوج سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف

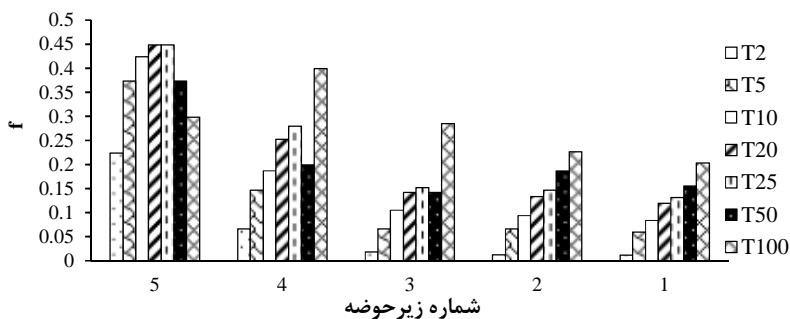
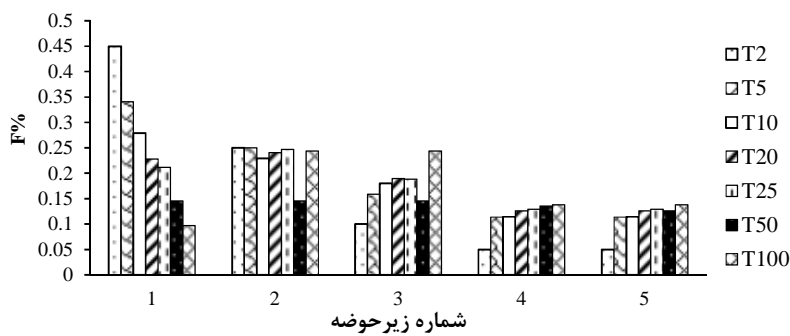
دبی اوج (m ³ /s)	دوره بازگشت (yr)
۲	۲
۴/۴	۵
۶/۱	۱۰
۷/۹	۲۰
۸/۵	۲۵
۱۰/۳	۵۰
۱۲/۳	۱۰۰

سهم زیرحوضه‌ها در تولید سیلاب

جدول ۸، اولویت‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها را برای دوره بازگشت ۵۰ سال نشان می‌دهد. در این دوره بازگشت، زیرحوضه ۱ دارای کمترین تأثیر در دبی اوج حوضه می‌باشد. ستون ۹، اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس نمایه F نشان می‌دهد. در مواردی که مساحت زیرحوضه، پتانسیل سیل‌خیزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، می‌توان اولویت‌بندی را به ازای واحد سطح زیرحوضه انجام داد (ستون ۱۰). نتایج نشان می‌دهد زمانی که میزان تأثیر دبی زیرحوضه‌ها پس از حذف در روندیابی در دبی اوج خروجی کل حوضه در نظر گرفته می‌شود، نسبت تأثیر آن‌ها تنها به مساحت و دبی اوج زیرحوضه بستگی ندارد؛ بلکه اثر متقابل عوامل مؤثر، مثل موقعیت مکانی زیرحوضه‌ها نیز می‌تواند نقش مهمی داشته باشد. بنابراین، لزوماً زیرحوضه‌ای که مساحت بزرگ‌تر و یا دبی بیشتری داشته باشد، در سیل خروجی کل حوضه تأثیر بیشتری ندارد؛ به عبارتی، مناطق با پتانسیل تولید رواناب بالا در سطح حوضه با توجه به موقعیت مکانی خود در محل خروجی کل حوضه لزوماً رفتار خطی از خود بروز نمی‌دهند؛ چرا که در جریان انتقال دبی‌های مناطق بالادست به طرف پایاب حوضه، به دلیل عبور از دشت‌های

جدول ۸- اولویت بندی سیل خیزی زیر حوضه‌ها (دوره بازگشت ۵۰ سال)

۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
اولویت بندی f	اولویت بندی F	اولویت بندی براساس دبی	اولویت بندی مساحت	f (cms/km ²)	F %	مقدار کاهش در دبی (m ³ /s)×10 ⁶	دبی خروجی کل با حذف زیر حوضه	مساحت (km ²)	زیر حوضه
۴	۳	۳	۲	۰/۱۵۸۵	۱۲/۶۲	۱/۳	۹	۸/۳۴	۱
۳	۲	۲	۴	۰/۱۸۶۹	۱۳/۵۹	۱/۴	۸/۹	۷/۴۹	۲
۵	۱	۱	۱	۰/۱۴۲۷	۱۴/۵۶	۱/۵	۸/۸	۱۰/۵	۳
۲	۱	۱	۲	۰/۱۹۹۸	۱۴/۵۶	۱/۵	۸/۸	۷/۵	۴
۱	۱	۱	۵	۰/۲۷۳۶	۱۴/۵۶	۱/۵	۸/۸	۴/۰۱	۵



شکل ۹- مقایسه مشارکت زیر حوضه‌ها بر اساس نمایه‌های (F) و (f) برای دوره بازگشت‌های مختلف

جدول ۹- اولویت بندی سیل خیزی زیر حوضه‌ها بر اساس

فاکتور f برای دوره بازگشت‌های مختلف

اولویت بر اساس فاکتور f	دوره بازگشت (سال)						
	۱۰۰	۵۰	۲۵	۲۰	۱۰	۵	۲
۱	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۴
۲	۵	۴	۴	۴	۴	۴	۵
۳	۳	۲	۳	۳	۳	۲	۳
۴	۲	۱	۲	۲	۲	۳	۲
۵	۱	۳	۱	۱	۱	۱	۱



شکل ۱۰- نقشه اولویت بندی پتانسیل سیل خیزی زیر حوضه‌ها برای دوره بازگشت ۵۰ سال

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که با تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های هیدرولوژیک می‌توان اثر متقابل عوامل اقلیمی و فیزیوگرافی را بر پتانسیل سیل‌خیزی حوضه‌ها بررسی کرد و تأثیر تغییرات زمانی و دوره بازگشت‌های مختلف بر میزان رواناب بالقوه زیرحوضه‌ها را به نحوی مطلوب مورد ارزیابی قرار داد. نتایج حاکی از این است که میزان مشارکت زیرحوضه‌ها در دبی خروجی کل حوضه تنها تحت تأثیر مساحت و دبی اوج زیرحوضه نیست و اثر متقابل عواملی همچون موقعیت مکانی زیرحوضه‌ها، فاصله تا خروجی، شکل حوضه، پروفیل طولی آبراهه، CN که خود تابعی از شیب، کاربری اراضی، نوع خاک، پوشش گیاهی و ... است، هم‌زمانی دبی اوج زیرحوضه‌ها و نقش روندیابی در رودخانه اصلی تأثیر بسزایی در تولید رواناب و سیل‌خیز بودن زیرحوضه‌ها دارند. در مجموع، زیرحوضه‌های واقع در بالادست و میانه حوضه که از بیشترین مقدار شیب و شماره منحنی و کمترین میزان نفوذپذیری برخوردار هستند، بالاترین سهم را در دبی اوج خروجی به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین توصیه می‌شود عملیات اصلاحی و کنترل سیلاب در این مناطق متمرکز شود. همچنین، اولویت‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها در دوره بازگشت‌های مختلف تغییر می‌کند. در واقع، رفتار هیدرولوژیک حوضه با تغییر شرایط اقلیمی و برای میزان بارندگی‌های مختلف متفاوت است. بنابراین، برای کاهش اثر سیل زیرحوضه‌ها در خروجی حوضه باید یک دوره بازگشت معقول را در نظر گرفت تا اجرای عملیات آبخیزداری برای تخفیف سیل با اطمینان بالاتری انجام گیرد. در پایان پیشنهاد می‌شود برای تعیین دقیق میزان تأثیر و نقش پارامترهای مختلف بر شدت تولید سیلاب، آنالیز حساسیت پارامترهای مذکور در مطالعات آتی انجام شود. همچنین، با توجه به اهمیت پتانسیل‌یابی سیل‌خیزی و تعیین نقش مشارکت زیرحوضه‌ها در تولید سیلاب، پیشنهاد می‌شود این نوع مطالعات در سایر حوضه‌های سیل‌خیز کشور نیز انجام شود.

منابع

۱. مطالعه موردی: حوضه آبریز امامه، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، ۱۱ ص.
۲. ثقفیان ب. و فرامرزو ج. ۱۳۸۶. تعیین مناطق مولد سیل و اولویت‌بندی سیل‌خیزی واحدهای هیدرولوژیک حوضه سد گلستان. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱(۱): ۱-۱۱.
۳. حاجی‌زاده م. و نورانی و. ۱۳۹۰. ارائه یک مدل بارش-رواناب ژئومورفولوژیکی بر اساس مفهوم مخازن آبخیزی غیرخطی. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان. ۸ ص.
۴. شاه‌محمدی ز. و جهانی س. ۱۳۹۰. تعیین الگوی و منحنی‌های شدت-مدت- فراونی حوضه آبریز گرگان‌رود. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران. ۱۲ ص.
۵. شریفی ع. دین پژوه ی. فاخری فرد ا. و مقدم‌نیا ع. ۱۳۹۲. ترکیب بهینه متغیرها برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبخیز امامه با استفاده از آزمون گاما. نشریه دانش آب و خاک. ۲۳(۴): ۵۹-۷۲.
۶. شگری کوچک س. ۱۳۹۰. بررسی نقش مشارکت زیرحوضه‌های آبریز در شدت سیل‌خیزی زیرحوضه آیدنک در حوضه آبریز رودخانه مارون. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۵۵ ص.
۷. محمدی مطلق ر. جلال کمالی ن. و جلال کمالی ا. ۱۳۹۲. بررسی نقش مشارکت زیرحوضه‌های آبریز در شدت سیل‌خیزی، مطالعه موردی: حوضه آبریز دالکی. فصلنامه علمی- پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۴(۱۳): ۶۵-۸۰.
۸. نایب عباسی م. ۱۳۷۲. بررسی روابط و تعیین شماره منحنی برای برآورد رواناب سطحی در حوضه امامه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری. دانشگاه تربیت مدرس. ۱۶۲ ص.
9. Bakhtyari Kia M. Pirasteh S. Pradhan B. Mahmud A. R. Sulaiman WNA. and Moradi A. 2012. An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia, Environmental Earth Sciences. 67(1): 251-264.
10. Ewen. J. and Parkin G. 1996. Validation of Catchment Models for Prediction Land Use and Climate Change Impacts: 1. Method, Journal of Hydrology. 175: 583-564.

۱. احمدی ا. علی‌محمدی س. امینی ا. و مورکی علی‌آباد ه. ۱۳۹۲. تأثیر توسعه شهری مناطق مجاور رودخانه‌ها در افزایش دبی اوج سیلاب‌ها

11. Isma'il M. and Saanyol IO. 2013, Application of remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS) in flood vulnerability mapping: case study of River Kaduna, International Journal of Geomatics and Geosciences. 3(3): 618-627.
12. Rahmati O. Pourghasemi H. R. and Zeinivand H. 2016. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran, Journal of Geocarto International. 31(1): 42-70.
13. Reshma T. Kumar P. S. Ratna Kanth Babu M. J. and Sundara Kumar K. 2010. Simulation of runoff in watersheds using scs-cn and Muskingum- cunge methods using remote sensing geographical information systems. International Journal of Advanced Science and Technology. 25: 31-42.

