

پیش‌بینی سیلاب‌های تاریخی رودخانه کشکان با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS

سید موسی حسینی* - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
منصور جعفر بیگلر - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
مجتبی یمانی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
فاطمه گراوند - دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۵/۱۲

چکیده

در مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبریز، پیش‌بینی، مهار و کاهش خسارت‌های ناشی از سیل اهمیت ویژه‌ای دارد. با اقدامات مناسب می‌توان شدت خسارت ناشی از سیل در حوضه را کاهش داده و در برنامه‌ریزی، طراحی و پیاده‌سازی سیستم هشدار سیل استفاده کرد. حوضه آبریز رودخانه کشکان واقع در استان لرستان دارای پتانسیل بالای سیل‌خیزی می‌باشد. در این پژوهش سعی شده است با کمک مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، میزان رواناب حاصل از بارش در این حوضه را شبیه‌سازی نمود. در این راستا، ابتدا مدل HEC-HMS توسط داده‌های ثبت شده بارش-رواناب روزانه طی دوره ترسالی، واسنجی و پارامترهای مورد نیاز بهینه شدند. سپس کارایی این مدل در پیش‌بینی سیلاب‌های تاریخی (با دوره بازگشت‌های ۲ تا ۱۰۰۰ ساله) با وارد نمودن بارش با دوره بازگشت‌های مختلف به عنوان ورودی مدل، مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه نتایج مدل، تحلیل فراوانی سیلاب داده‌های حداکثر دبی لحظه‌ای ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری نیز انجام گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل HEC-HMS دارای کارایی بالایی در شبیه‌سازی رواناب روزانه طی دوره ترسالی و همچنین در حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب به ازای دوره بازگشت‌های کمتر از ۳۰۰ سال را دارد. لذا به خوبی می‌توان از این مدل هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی رواناب روزانه و حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب به ازای دوره بازگشت‌های کوچک در حوضه مورد مطالعه استفاده نمود. اما به ازای دوره بازگشت‌های بالاتر از ۳۰۰ سال، فاصله بین دبی‌های سیلاب پیش‌بینی شده توسط مدل با مقادیر به دست آمده از تحلیل فراوانی بیشتر می‌شود. بنابراین برای پیش‌بینی سیلاب‌های تاریخی بزرگ توسط مدل HEC-HMS، باید ضریب اطمینان لازم را منظور و یا با توجه به عوارض ژئومورفولوژیک که شواهد عینی شرایط هیدرولوژیک حاکم بر رودخانه طی دوران متمادی می‌باشند، ضریب اصلاحی لازم را برای افزایش دقت مدل اعمال نمود.

واژگان کلیدی: رود کشکان، سیلاب تاریخی، مدل HEC-HMS، شبیه‌سازی سیلاب.

مقدمه

با تمام اهمیتی که آب در اقتصاد ایران دارد و خرابی‌هایی که هر سال از سیلاب‌ها به بار می‌آید و آب‌هایی که بدون استفاده از کشور خارج یا به کویر سرازیر می‌شود، هنوز آن‌چنان که باید برنامه‌ریزی اصولی در این زمینه صورت نگرفته است (علیزاده، ۱۳۸۸: ۳۳). بر اساس آمار منتشرشده در میان بلایای طبیعی، سیل بیشترین تلفات و خسارت‌ها را به جوامع بشری وارد آورده است (قدسیان، ۱۳۷۷: ۱۴). بررسی تغییرات ژئومورفولوژیکی مجاری رود، و سیلابی شدن برخی از آن‌ها، به علت تغییرات قابل‌توجه کاربری در بستر رودخانه به دلیل دخالت انسان به وجود آمده است (James, 1999: 259). بررسی آمار و اطلاعات خسارات سالانه ناشی از وقوع سیلاب‌ها در ایران و جهان بیانگر گستردگی صدمات ناشی از سیلاب به منابع طبیعی، انسانی و اقتصادی مناطق مختلف می‌باشد. لذا تدوین برنامه‌های جامع باهدف مهار، کنترل و بهره‌برداری بهینه با اعمال اقدامات مدیریتی، متناسب با کلیه عوامل دخیل در ایجاد و طغیان سیلاب‌های منطقه‌ای ضروری می‌باشد. چراکه بررسی‌ها و مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهند که علت افزایش خسارات سیل در دنیا، افزایش تکرر یا بزرگی طغیان‌ها نبوده، بلکه تشدید استفاده از اراضی سیلاب‌دشت‌ها و اراضی سیل‌گیر مجاور رودخانه‌ها می‌باشد. با عنایت به تأثیر عوامل مختلف در بروز سیل، انواع اقدامات مدیریتی مانند آبخیزداری و مدیریت کاربری اراضی، برنامه‌ریزی و مدیریت در مسیر رودخانه‌ها و مسیل‌ها، پیش‌بینی و هشدار سیل، اقدامات پیشگیری و حمایتی در مناطق سیل‌گیر و پهنه‌بندی خطر سیل، می‌توانند در کاهش خسارات ناشی از آن مؤثر باشند. از جمله اقدامات مدیریتی که می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش خسارات ناشی از وقوع سیلاب داشته باشد، پهنه‌بندی خطر سیل است (قمی‌اویلی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۰۷). عوامل متعددی در بروز سیل در مناطق مختلف مؤثر است، که از جمله این عوامل می‌توان به ویژگی‌های توپوگرافیک، مورفولوژی رودخانه و فعالیت‌های بشری اشاره کرد (Brooks, 1981: 246). از این‌رو کنترل و مقابله با سیل و شناخت عوامل و پارامترهای مؤثر بر سیلاب اهمیت بسیار زیادی دارد (Smith, 1992: 25).

شعبانلو و همکاران در سال (۱۳۸۷) با استفاده از آمار حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته ایستگاه‌های مورد مطالعه و نقشه‌های مورد نیاز و نرم‌افزار هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده کرده‌اند و به پهنه‌بندی سیلاب در شبکه رودخانه‌های استان گلستان با استفاده از GIS پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که میزان کاهش دبی اوج خروجی از حوضه لزوماً متناسب با مساحت زیر حوضه‌ها نبوده و زیرحوضه‌های با دبی بیشتر به همان نسبت بر دبی سیل خروجی تأثیرگذار نیستند و به تبع، مساحت پهنه‌های سیل‌گیر نیز لزوماً متناسب با دبی اوج تغییر نخواهد کرد و تابع سیل خروجی و پارامترهای دیگر است از جمله می‌توان به موقعیت مکانی و نحوه آرایش آبراه‌ها اشاره کرد.

نوری و همکاران در سال (۱۳۹۱) مدل HEC-HMS را در تخمین سیلاب حوضه‌های فاقد آمار مورد بررسی قراردادند. در این مطالعه به تخمین سیلاب حوضه آبریز قروه واقع در استان کردستان، پرداخته شده است. در این راستا ۴ رگبار را که دارای هیدروگراف و هیتوگراف متناظر هم انتخاب و توسط نرم‌افزار HEC-HMS و با استفاده از روش تجربی SCS هیدروگراف سیل حوضه شبیه‌سازی شده و شماره منحنی، زمان تأخیر و میزان تلفات توسط نرم‌افزار مورد واسنجی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که نرم‌افزار با توجه به واسنجی‌های صورت گرفته یک ابزار مفید جهت تخمین دبی اوج سیلاب در نقاط فاقد آمار حوضه‌های آبریز خواهد بود.

نوحه‌گر و همکاران در سال (۱۳۹۱) مدل HEC-HMS و حساسیت آن در برآورد مشخصه‌های هیدروگراف سیلاب را مورد ارزیابی قراردادند. در این تحقیق جهت واسنجی پارامتر شماره منحنی، از آمار ۴ رگبار مشاهده‌ای و سیل هم‌زمان آن‌ها استفاده شده است. نتایج نشان دادند که این مدل در خصوص پیش‌بینی دبی اوج و زمان مربوط به آن در خروجی حوضه واقع در ایستگاه هیدرومتری سرمقسم می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه نماید اما مدل در برآورد حجم سیلاب موفق نبود. نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد که به‌محض اضافه کردن ۵ درصد به شماره منحنی حوضه و

رسیدن به مقدار ۷۹/۲۷، دبی پیک سیل به شدت افزایش پیدا می‌کند. این نکته نشان داد که هرگونه عملیات کنترل سیلاب در محدوده مورد مطالعه، باید با مطالعه کافی و در جهت کنترل پوشش گیاهی صورت گیرد.

جعفرنیا و همکاران در سال (۱۳۹۲) به برآورد سیلاب حوضه آبریز رودخانه تالار (زیر حوضه کسلیان) با استفاده از مدل HEC-HMS پرداختند، و سعی شد با استفاده از مدل HEC-HMS سیلاب واقع در بالادست ایستگاه هیدرومتری ولیک‌بن زیر حوضه کسلیان واقع در استان مازندران برآورد گردد. برای کالیبره کردن مدل از داده‌های سیلاب اندازه‌گیری شده و هایتوگراف بارش منطقه استفاده شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که پیش‌بینی دبی اوج سیلاب در وقایع مختلف به روش SCS خطای اندکی داشته است. در مجموع مدل یادشده توانایی بسیار خوبی در پیش‌بینی دبی اوج سیلاب منطقه دارد. بنابراین از این مدل می‌توان برای پیش‌بینی سیلاب منطقه استفاده کرد.

میلر و همکاران در سال (۲۰۰۲) با تلفیق مدل‌های هیدرولوژیک و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، اثر تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی را برعکس العمل هیدرولوژیک دو حوضه آبخیز ایالات متحده آمریکا مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با استفاده از داده‌های مورد نیاز ارتفاعی، خاک، خصوصیات پوشش اراضی و تغییرات شماره منحنی (CN) را در طول زمان برای ورود به مدل هیدرولوژیک HEC-HMS تهیه کردند. بررسی روند تغییرات رواناب در محیط مدل HEC-HMS و با استفاده از روش شماره منحنی نشان داد که در حوضه آبخیز رودخانه سن پدرو با مساحت ۳۱۵۰ کیلومترمربع به علت کاهش سطح جنگل‌ها و ازدیاد اراضی کشاورزی و مناطق شهری بین سال‌های ۱۹۷۳ تا ۱۹۹۷، رواناب متوسط سالانه افزایش یافته است.

چنگ و همکاران در سال (۲۰۱۳) برای پیش‌بینی سیلاب‌های شدید در حوضه آبخیز شیمین در تایوان از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از داده‌های سه سیلاب خطرناک با دوره بازگشت‌های ۱ تا ۹۰ ساله رواناب حاصل از بارش‌های سیل‌آسا را در مدل HEC-HMS شبیه‌سازی کردند. آن‌ها با توجه به رضایت-بخش بودن یافته‌هایشان به این نتیجه رسیدند که مدل هیدرولوژیکی، کالیبره و تأییدشده HEC-HMS قادر به پیش-بینی سیلاب‌های تاریخی می‌باشد.

جو و همکاران در سال (۲۰۱۴) برای دو زیر حوضه باکیل و جانک‌پیونگ در کره جنوبی با استفاده از داده‌های تاریخی یک دوره آماری بین سال‌های (۲۰۰۹-۲۰۰۰)، ۸ سیلاب رخ داده در حوضه بوکیل و ۶ سیلاب در حوضه جانک‌پیونگ را با دو مدل هیدرولوژیکی ReFH و HEC-HMS شبیه‌سازی کردند. آن‌ها سپس یافته‌های دو مدل را باهم مقایسه کردند و نهایتاً با این نتیجه رسیدند که مدل ReFH محدودیت در شبیه‌سازی جریان اوج را نشان می‌دهد در حالی که مدل HEC-HMS شبیه‌سازی خوبی در هر دو حوضه نشان داد.

در حوضه مورد مطالعه‌ی این تحقیق، مطالعات معدودی در زمینه مدل‌سازی بارش-رواناب انجام شده است. در این زمینه تنها می‌توان به تحقیق نگارش و همکاران در سال (۱۳۹۰) اشاره نمود که ایشان با استفاده از داده‌های بارش و دبی روزانه به بررسی شدت سیل‌خیزی حوضه آبریز کشکان رود پرداختند که نتایج بررسی میانگین لغزان بارش سالانه در این حوضه بیانگر روند کاهش نامحسوس و غیر معنی‌دار بوده و بارش حوضه آبریز کشکان رود طی این دوره آماری به‌گونه‌ای تقریباً ثابت بوده است ولی روند تغییرات ضریب رواناب سالانه حوضه دارای روندی افزایشی، پرشیب و معنی‌دار بوده است. با توجه به سابقه محدود تحقیقات انجام شده در حوضه کشکان، در این تحقیق برای اولین بار سعی می‌شود که کارایی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب و همچنین پیش‌بینی سیلاب‌های تاریخی استفاده و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گیرد.

محدوده مورد مطالعه

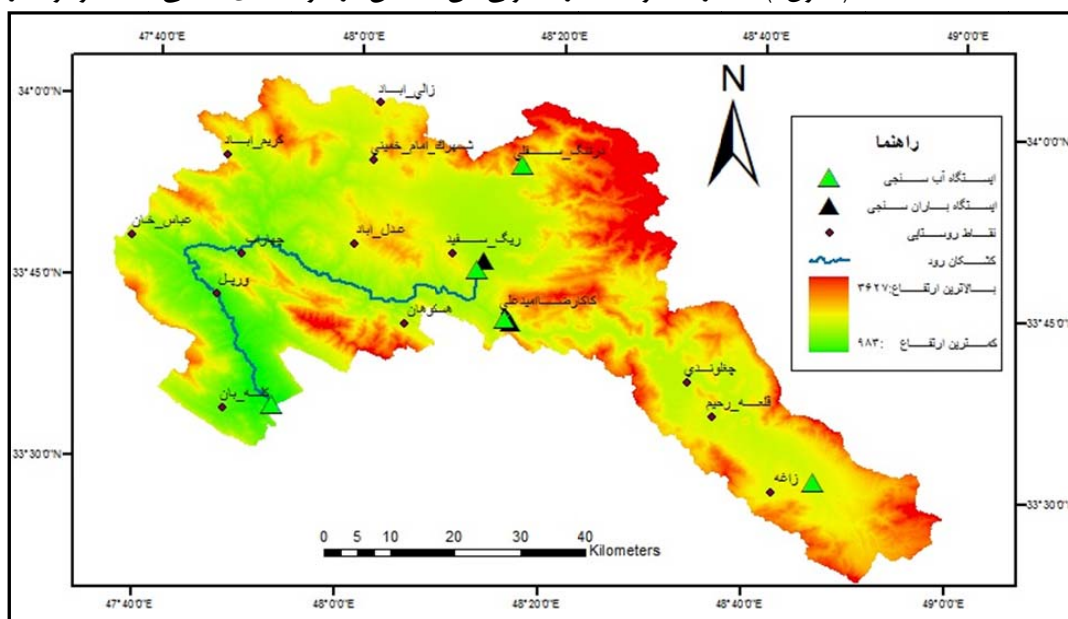
حوضه آبخیز رودخانه کشکان با وسعت ۹۲۷۶ کیلومتر مربع تماماً در استان لرستان و در ناحیه‌ی جنوب‌غربی ایران واقع گردیده است. این حوضه بخش مهمی از سرشاخه‌های پرآب رودخانه‌ی کرخه را تشکیل می‌دهد و حدود یک‌سوم از خاک استان لرستان را در برمی‌گیرد. سیستم اصلی رودخانه‌ی کشکان ابتدا از به هم پیوستن سرشاخه‌ی رودخانه‌های هرو و دوآب الشتر تشکیل می‌گردد. که این سرشاخه‌ها از دامنه‌ی کوه‌های مرتفع و برف‌گیر گرین و میش‌پرور سرچشمه می‌گیرند. این رودخانه در محل پل گاومیشان به رودخانه‌ی سیمره ملحق شده و رودخانه کرخه را تشکیل می‌دهد (سوری-نژاد، ۱۳۸۱: ۶۱). منطقه مورد مطالعه بخشی از این حوضه آبریز می‌باشد از ابتدای شروع سرشاخه‌های رودخانه کشکان تا پل باستانی کشکان به طول تقریبی ۹۵ کیلومتر واقع شده است. مختصات جغرافیایی محدوده مورد مطالعه بین طول‌های ۴۷ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۹ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۳ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲ دقیقه شمالی قرار دارد (شکل ۱). بر اساس آنالیز سری زمانی داده‌های موجود، متوسط دبی سالانه رود کشکان در ایستگاه پل کشکان، واقع در محدوده مورد مطالعه ۳۳/۲ مترمکعب بر ثانیه و میزان دبی ویژه این ایستگاه ۹/۰۲ لیتر بر ثانیه در هر کیلومتر مربع می‌باشد (سازمان آب منطقه‌ای استان لرستان، ۱۳۹۲). میانگین بارندگی سالیانه در این نواحی بین ۴۵۰ تا ۶۵۰ میلی‌متر است. منطقه مورد مطالعه بخشی از زیر حوضه کشکان، دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای است و ریزش‌های جوی اغلب به‌صورت باران در فصل زمستان رخ می‌دهد و باعث ایجاد سیلاب‌های شدیدی در منطقه می‌گردد (همان منبع). خصوصیات فیزیوگرافی حوضه مورد مطالعه بر اساس مدل رقوم ارتفاعی حوضه در نرم‌افزار Arc GIS محاسبه و خلاصه آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. حوضه رودخانه کشکان از نظر ژئومورفولوژی به واحدهای کوهستانی مرتفع و کم ارتفاع، تپه‌ها، فلات‌ها و تراس‌های فوقانی، دشت‌های پایکوهی صاف و هموار تقسیم‌بندی می‌گردد. واحدهای کوهستانی مرتفع با ساختمان سنگی و شیب بسیار زیاد و دیواره‌های قائم به‌صورت پرتگاه‌های فرسایشی است این سطوح عمدتاً در نواحی شمالی، مرکزی و در امتداد مسیر رود کشکان دیده می‌شوند و سهم بسزایی در رژیم هیدرولوژیکی آن بر جای می‌گذارد و به هنگام بارش‌های جوی، جریان آب سطحی بلافاصله بر روی دامنه آن‌ها ایجاد می‌شود (سوری‌نژاد، ۱۳۸۱: ۶۳). از نظر کاربری اراضی در این حوضه بیشترین درصد مساحت منطقه (بیش از ۷۰٪) مربوط به مراتع مرغوب و استپی با درخت‌های پراکنده می‌باشد. از نظر خاکشناسی نیز بیشتر سطح حوضه دارای خاک ریزدانه و نفوذناپذیر رس و سیلت است که پتانسیل تولید رواناب زیادی حین وقوع بارندگی دارند (کرمی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۰۱). در میان استان‌های کشور، استان لرستان به لحاظ قرارگیری در زاگرس میانی و شیب زیاد کوهستانی (با شیب متوسط حدود ۱۱ درصد)، ساختار زمین‌شناسی (چینه‌شناسی، تکتونیک و لیتولوژی)، شرایط اقلیمی و آب‌وهوایی و فیزیوگرافی حوضه‌های آبخیز از خطر بلایای طبیعی مستثنی نبوده است. که در طی دو دهه گذشته تاکنون سیلاب بالغ بر ۲۵۰ میلیارد تومان (بر پایه نرخ‌های همان سال خسارت) خسارات مستقیم و ملموس (بدون در نظر گرفتن خسارات مربوط به هدر رفت آب، خاک، فرسایش و پوشش گیاهی) به زیرساخت‌ها و بخش‌های مختلف اقتصادی استان وارد کرده است. از بین رودخانه دائمی لرستان از سال ۱۳۳۴ تاکنون در یک دوره ۵۸ ساله، رودخانه کشکان با ۱۶ سیلاب بالای ۱۰۰۰ مترمکعب در ثانیه، سیل خیزترین رودخانه استان است (جدول ۱). بزرگ‌ترین سیلاب ثبت شده استان، سیل ۱۵ بهمن سال ۱۳۸۴ رودخانه کشکان با آبدهی پیک ۳۰۹۰ مترمکعب در ثانیه بوده که میزان خسارات ناشی از آن در بخش‌های مختلف معادل ۸۰ میلیارد تومان بوده است. بر اساس آمار موجود سیل‌های رخ داده در حوضه موردنظر (جدول شماره ۱) و با توجه به شرایط فیزیوگرافی و دخالت عوامل انسانی از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان تغییرات کاربری اراضی (از بین بردن انواع پوشش‌های طبیعی گیاهی) و دخالت در حریم بستر رودخانه (شخم زدن بستر و تبدیل آن به اراضی کشاورزی) اشاره کرد که این عوامل باعث پتانسیل بالای سیل‌خیزی این حوضه شده است. چنین وضعیتی در این حوضه آبریز، لزوم استفاده از یک مدل هیدرولوژیکی کارآ و مطمئن را ایجاب می‌کند که بتواند با دقت و صحت بالایی بر اساس وضعیت بارش میزان رواناب

حاصل از آن را تخمین بزند و بتوان در امر برنامه‌ریزی، طراحی و پیاده‌سازی سیستم هشدار سیل از آن استفاده کرد. جهت نیل به این هدف مهم، در این پژوهش ابتدا فرآیند بارش-رواناب روزانه در حوضه رودخانه کشکان توسط مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS شبیه‌سازی شده و سپس کارآیی این مدل در پیش‌بینی سیلاب‌های تاریخی با دوره بازگشت‌های بالا مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده از هر بخش با مقادیر متناظر ثبت شده در حوضه و همچنین مقادیر به دست آمده از تحلیل فراوانی سیل مقایسه گردید.

جدول (۱): مشخصات سیلاب‌های لحظه‌ای رودخانه کشکان از سال ۱۳۸۸-۱۳۴۹ (سازمان آب منطقه‌ای لرستان، ۱۳۹۲)

تاریخ وقوع سیلاب	حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب (m^3/s)	تاریخ وقوع سیلاب	حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب (m^3/s)
۱۳۷۰/۱۲/۶	۱۰۲۰	۱۳۴۹/۱۲/۲۴	۱۳۰۰
۱۳۷۱/۱۱/۱۴	۱۹۰۰	۱۳۵۱/۱۱/۲	۱۲۰۸
۱۳۷۲/۹/۲	۲۳۲۵	۱۳۵۶/۹/۲۴	۱۱۴۰
۱۳۷۲/۱۱/۱۲	۲۶۶۷	۱۳۵۷/۹/۲۱	۱۵۰۰
۱۳۷۷/۱/۱۰	۱۱۶۰	۱۳۶۳/۹/۴	۱۲۶۵
۱۳۸۳/۱۲/۲۱	۱۶۳۰	۱۳۶۵/۲/۱۴	۲۱۸۰
۱۳۸۴/۱۱/۱۵	۳۰۳۰	۱۳۶۶/۱۰/۳۰	۱۳۴۵
۱۳۸۶/۱/۷	۱۲۹۰	۱۳۶۹/۱/۱۳	۱۲۲۰

از نظر ژئومورفولوژیکی نیز مقدار شاخص گرادیان طولی (SL) در حوضه رودخانه کشکان برابر با ۱۳۳ به دست آمده است که نشان‌دهنده فعالیت کم تکتونیک و قدرت فرسایشی ملایم آبراهه‌ها می‌باشد (جدول ۲). با بررسی‌های انجام گرفته میزان سینوسیته رودخانه ۲/۵۷ به دست آمده است (جدول ۲). همچنین شاخص تراکم سطحی آبراهه‌ها در حوضه مورد مطالعه برابر با $1/67 \text{ km/km}^2$ محاسبه شد (جدول ۲). علاوه بر این، مقدار شاخص انشعاب این حوضه برابر با $4/12$ محاسبه شده است (جدول ۲) که در محدوده مقدار معمولی این شاخص در حوضه‌های طبیعی ۳ تا ۵ وجود دارد.



شکل (۱): نقشه منطقه مورد مطالعه

جدول (۲): خصوصیات فیزیوگرافی حوضه مورد مطالعه

ویژگی	مقدار	ویژگی	مقدار
مساحت (Km ²)	۳۸۲۵/۴	شاخص سینوسی توپوگرافیک TSI	۰/۷۴
محیط (Km)	۵۱۶/۸۶	شاخص سینوسی هیدرولوژیک HSI	۰/۲۶
طول آبراهه اصلی (Km)	۹۴/۷	شاخص سینوسی استاندارد SSI	۱/۲
پایین‌ترین و بالاترین ارتفاع (m)	۹۸۳-۳۶۲۷	شاخص دره VI	۲/۴۴
نسبت ناهمواری	۱۴/۵	شاخص آبراهه CI	۲/۹۵
شاخص گرادبان طولی رودخانه SL	۱۳۲/۹	شاخص تراکم سطحی آبراهه‌ها P	۱/۶۷
شاخص سینوسی رودخانه اصلی S	۲/۵۷	شاخص انشعاب‌پذیری Br	۴/۱۲

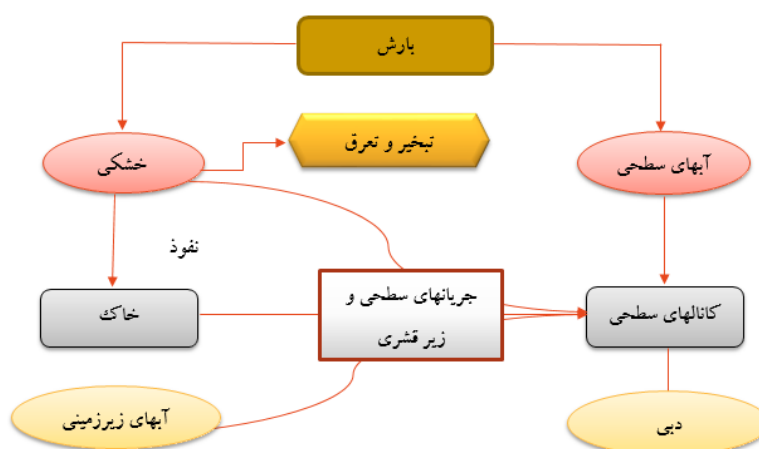
داده‌ها و روش‌ها

برای انجام این پژوهش ابتدا کلیه نقشه‌های بزرگ‌مقیاس منطقه شامل نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰، نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰، نقشه خاک‌شناسی، لایه کاربری اراضی و پوشش گیاهی و همچنین آمار دبی، بارش، دما و تبخیر در مقیاس روزانه در دوره‌ی آماری (۱۳۹۲-۱۳۴۶) از سازمان آب منطقه‌ای استان لرستان تهیه شد. و از بین ایستگاه‌های آب‌سنجی، داده‌های ایستگاه پل کشکان به دلیل قرارگیری در خروجی حوضه مورد مطالعه و داده‌های ایستگاه باران‌سنجی سراب صیدعلی در مرکز حوضه انتخاب شدند. از آنجاکه وقوع سیلی در اسفند ۱۳۷۰ با دبی پیک ۱۰۲۰ مترمکعب در ثانیه، موجب ویرانی این ایستگاه هیدرومتری شده و بعدازآن داده‌برداری انجام‌نشده است، لذا یک دوره‌ی آماری ۲۴ ساله داده‌های دبی روزانه و پارامترهای هواشناسی بین سال‌های (۱۳۷۰-۱۳۴۶) انتخاب شده است. مقادیر متوسط ماهانه پارامترهای اقلیمی (بارش، دما و تبخیر) و همچنین دبی متوسط ماهانه ایستگاه پل کشکان در جدول (۳) ارائه شده است. بر اساس آمار موجود بیشترین دبی در فروردین‌ماه است درحالی‌که بیشترین بارندگی در بهمن‌ماه رخ می‌دهد. همچنین کمترین مقدار تبخیر و دما مربوط به دی‌ماه می‌باشد که این عدم تقارن زمانی پارامترهای اقلیمی و هیدرومتری دال بر برف‌گیر بودن نواحی بالادست حوضه و تأثیرپذیری زیاد رژیم رودخانه از ذوب برف ارتفاعات می‌باشد.

جدول (۳): متوسط دبی، بارش، دما و تبخیر دوره آماری استفاده‌شده (شرکت آب منطقه‌ای لرستان، ۱۳۹۲)

ماه	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	بارش (میلی‌متر)	دما (سانتی‌گراد)	تبخیر (میلی‌متر)
مهر	۸/۰۴	۲۳/۳۷	۱۲/۴۷	۶/۰۷
آبان	۱۴/۰۷	۱۳۳/۴۵	۶/۹۹	۲/۷۱
آذر	۲۳/۸۱	۱۷۳/۰۵	۲/۲۱	۱/۱۹
دی	۲۷/۳۶	۱۴۹/۶۴	۱/۰۶	۰/۳۳
بهمن	۴۰/۱۲	۱۸۷/۲۸	۱/۴	۰/۳۳
اسفند	۷۶	۱۸۳/۷۲	۵/۳۸	۱/۱۱
فروردین	۱۰۲	۱۸۶/۶۳	۱۰/۳۷	۳/۲۵
اردیبهشت	۶۱/۰۴	۱۲۲/۹۳	۱۴/۷۷	۵/۱۷
خرداد	۱۹/۵۲	۶/۶۸	۱۸/۹۸	۷/۸۷
تیر	۱۰/۸۲	۰/۲۷	۲۳/۳۳	۱۰/۳۴
مرداد	۷/۸۲	۰/۱۷	۲۱/۵۶	۱۱/۱۴
شهریور	۶/۷۴	۰/۸۳	۱۷/۶۸	۸/۹۱

مدل هیدرولوژیک مورد استفاده در این تحقیق، مدل HEC-HMS می‌باشد که در واقع نسخه تحت ویندوز مدل HEC-1 است که در سال ۱۹۸۱ توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش ایالات متحده آمریکا برای تهیه هیدروگراف سیل ارائه شد و پس از آن اصلاحات زیادی روی آن صورت گرفت تا در سال ۱۹۹۸ به نام HEC-HMS و تحت ویندوز ارائه شد. این مدل دارای سه بخش اصلی به نام‌های مدل حوضه، مدل اقلیمی و شاخص‌های کنترلی است. همچنین این مدل قابلیت واسنجی و تخمین پارامترهای مورد نیاز در حوضه را نیز دارا می‌باشد. این مدل پس از اعتبارسنجی می‌تواند برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در حوضه و پیش‌بینی اثر تغییر پارامترها به کار رود. فرآیند مورد استفاده به منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب در مدل HEC-HMS مطابق با دیاگرام ارائه شده در شکل (۳) می‌باشد (گروه مهندسی ارتش آمریکا، ۲۰۰۰: ۱۳).



شکل (۲): دیاگرام شبیه‌سازی بارش-رواناب در مدل HEC-HMS

با اجرای متعدد این مدل به ازای داده‌های مشاهداتی بارش-رواناب و مقایسه نتایج آن‌ها، اقدام به شناسایی بهترین مدل-هایی که در این نرم‌افزار در حوضه آبریز مورد مطالعه بهترین جواب را ارائه می‌نمایند، گردید. این مدل‌ها عبارت‌اند از:

۱. برای تبدیل بارش به رواناب از روش CN سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) استفاده شود.
 ۲. برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل از مدل هیدروگراف واحد کلارک استفاده شود.
 ۳. افت جریان، به صورت ثابت ماهانه در نظر گرفته شود.
- همچنین به منظور ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی مقادیر سیلاب روزانه (طی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی)، معیارهای خطای ضریب تبیین (R^2)، شاخص پراکندگی (SI)، درصد خطای حجم (EV%)، درصد خطای برآورد دبی اوج (EQP %) و خطای زمان رسیدن به اوج سیلاب (ETP) در نظر گرفته شده است:

۱- ضریب تبیین (R^2):

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}] [Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim}]}{\sqrt{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}]^2 \sum_{t=1}^n [Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim}]^2}} \right)^2 \quad \text{(رابطه ۱)}$$

۲- شاخص پراکندگی داده‌های شبیه‌سازی شده حول میانگین مشاهداتی (SI):

$$SI = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)|}{\bar{Q}_{obs}} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

۳- درصد خطای حجم سیلاب ($\%EV$):

$$\%EV = \frac{V_{obs} - V_{sim}}{V_{obs}} \times 100 \quad \text{رابطه‌ی 3}$$

۴- درصد خطای پیش‌بینی دبی پیک ($\%EQP$):

$$\%EQP = \frac{(Q_P)_{obs} - (Q_P)_{sim}}{(Q_P)_{obs}} \times 100 \quad \text{رابطه‌ی 4}$$

۵- خطای پیش‌بینی زمان پیک سیلاب (ET_P):

$$ET_P = (T_P)_{obs} - (T_P)_{sim} \quad \text{رابطه‌ی 5}$$

که در آن‌ها $(Q_P)_{obs}$ مقدار دبی اوج مشاهداتی، $(\bar{Q}_P)_{obs}$ متوسط مقدار دبی اوج مشاهداتی، $(Q_P)_{sim}$ مقدار دبی اوج شبیه‌سازی‌شده، V_{obs} حجم دبی مشاهداتی، V_{sim} حجم دبی شبیه‌سازی‌شده، $(T_P)_{obs}$ زمان دبی اوج مشاهداتی و $(T_P)_{sim}$ زمان دبی اوج شبیه‌سازی‌شده می‌باشد.

تحلیل فراوانی سیلاب

به‌منظور بررسی کارایی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در شبیه‌سازی وقایع سیلابی تاریخی، لازم است تا آنالیز فراوانی بر روی داده‌های حداکثر بارش روزانه و حداکثر سیلاب لحظه‌ای ثبت شده در حوضه انجام شود. برای نیل به این هدف، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Easyfit بهترین توزیع برازشی به داده‌های حداکثر دبی لحظه‌ای و ماکزیمم بارش یک‌روزه انجام به دست آمد. پس از بررسی توزیع‌های مختلف آماری بر اساس آزمون نکویی برازش کلموگروف-اسمرینف در سطح اعتماد ۹۵٪ ($\alpha = 0/05$) مشخص شد که بهترین برازش توزیع برای حداکثر دبی لحظه‌ای، توزیع پیرسون تیپ پنج سه‌پارامتری است که نتایج برازش توزیع‌های مختلف به‌همراه مقادیر پارامترها و مقدار آماره کلموگروف-اسمرینف هر یک در جدول (۴) آمده است. تابع چگالی احتمال (PDF) توزیع پیرسون تیپ پنج سه‌پارامتری به‌قرار زیر می‌باشد:

$$f(x) = \frac{\frac{\beta}{e^{x-\gamma}}}{\beta \Gamma(\alpha) \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha+1}} \quad \text{رابطه‌ی 7}$$

که α ، β و γ پارامترهای توزیع و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است که از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (\alpha > 0) \quad \text{رابطه‌ی 8}$$

که پارامترهای توزیع فوق برابر با $\alpha = 2.3341$ ، $\beta = 410.06$ ، $\gamma = 21.638$ به‌دست آمده است. برای حداکثر بارش یک‌روزه، توزیع گامبل ماکزیمم به‌عنوان بهترین توزیع برازشی انتخاب شد. تابع چگالی احتمال (PDF) آن به‌صورت زیر می‌باشد:

$$f(x) = \frac{1}{\delta} e^{-z-e^{-z}} \quad \text{رابطه‌ی 9}$$

$$Z = \frac{x-\mu}{\delta} \quad \text{رابطه‌ی 10}$$

که در آن $\delta = 11.376$ و $\mu = 34.607$ به‌دست آمده است.

یافته‌های پژوهش

واسنجی و اعتبار سنجی مدل HEC-HMS

در این مرحله هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهده‌شده در دو مرحله واسنجی (بهبینه‌سازی) و شبیه‌سازی (اعتبارسنجی) مقایسه می‌شود. هدف از این مقایسه، قضاوت در مورد چگونگی برازش مدل HEC-HMS برای تخمین

پارامترهایی است که قابل اندازه‌گیری مستقیم در حوضه آبریز نیستند و لازم است توسط تکنیک‌های بهینه‌سازی و بر اساس داده‌های ورودی و خروجی داده‌شده به مدل تخمین زده شوند. اگر برازش رضایت‌بخش نبود، مدل به‌طور سیستماتیک، پارامترها را اصلاح می‌کند و کار دوباره تکرار می‌شود. وقتی که برازش مناسب باشد، مدل مقادیر بهینه را گزارش می‌کند. فرض اولیه این است که مقادیر بهینه‌شده پارامترها می‌تواند برای محاسبه رواناب یا روندیابی به کار رود. در این تحقیق بر اساس آزمون و خطای بسیار مدل‌های مناسب انتخاب و پارامترهای این مدل‌ها شامل زمان تأخیر^۱، تلفات اولیه^۲ و پارامتر شماره منحنی (CN) برای حوضه مورد مطالعه بهینه گردید. تابع هدف مورد استفاده برای واسنجی مقادیر پارامترها، مجموع مربعات باقی‌مانده می‌باشد که از ویژگی این تابع هدف، دادن وزن بیشتری به خطاهای بزرگ و مقادیر کمتری به خطاهای کوچک می‌باشد. که رابطه این تابع هدف (Z) به صورت زیر است:

$$Z = \sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)]^2 \quad \text{رابطه‌ی (6)}$$

تمامی متغیرهای موجود در رابطه‌ی (۶) قبلاً تعریف شده‌اند. از آنجایی که هدف، ارزیابی مدل هیدرولوژیکی برای پیش‌بینی سیلاب می‌باشد، لذا از بین سری زمانی داده‌های بارش و دبی روزانه موجود، دوره‌هایی ترسالی (دوره‌هایی که مقادیر سیلاب آن‌ها بالاتر از میانگین بعلاوه انحراف معیار داده‌ها باشد) تعیین گردید. در نهایت داده‌های بارش-رواناب مربوط به سال ۱۳۴۷ برای واسنجی پارامترها به مدل داده شد. نتایج به‌دست‌آمده از برآورد مقادیر پارامترها توسط روش‌های تجربی و همچنین مدل هیدرولوژیکی طی مرحله واسنجی در جدول (۴) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج تخمین پارامترها توسط مدل با مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های تجربی تطابق خوبی دارند. علاوه بر این، زمان تمرکز حوضه برابر ۳۵ ساعت و شماره منحنی آن برابر با ۴۵ نشان‌دهنده تأثیر غالب عوامل نفوذ آب در سطح حوضه و تلفات اولیه آن شامل تبخیر، نگهداشت سطحی (چالاب)، برگاب در حین وقوع بارش می‌باشد.

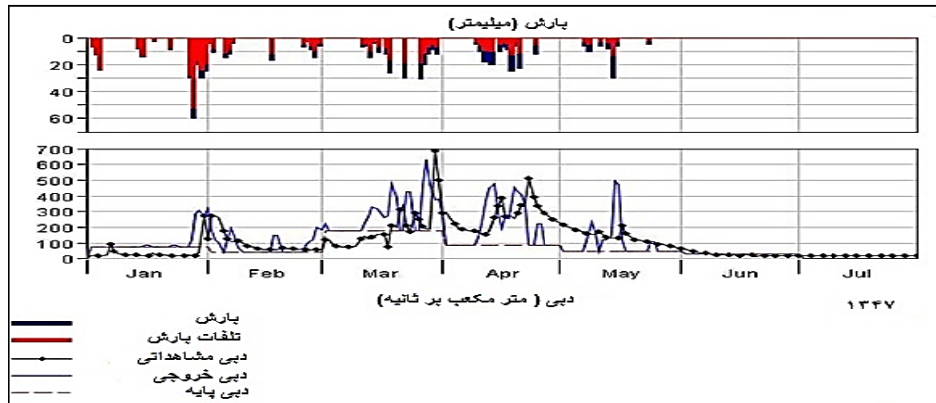
جدول (۴): نتایج بررسی حساسیت مدل‌های استفاده‌شده در HEC-HMS

پارامتر	روابط تجربی	مدل HEC-HMS	حساسیت تابع
زمان تأخیر(ساعت)	۲۲/۰	۲۱/۰۰	-۰/۰۲
زمان تمرکز(ساعت)	۳۷/۲	۳۵/۰۳	-۰/۰۱
شماره منحنی(-)	۴۸/۰	۴۵/۱۲	۰/۰۱
تلفات اولیه(میلی‌متر)	۴۰/۰	۴۱/۴۶	۰/۰۱

در شکل (۳) هایتوگراف بارش مازاد و تلفات بارش و هیدروگراف دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل HEC-HMS طی مرحله واسنجی (بر اساس آمار سال ۱۳۴۷) ارائه شده است.

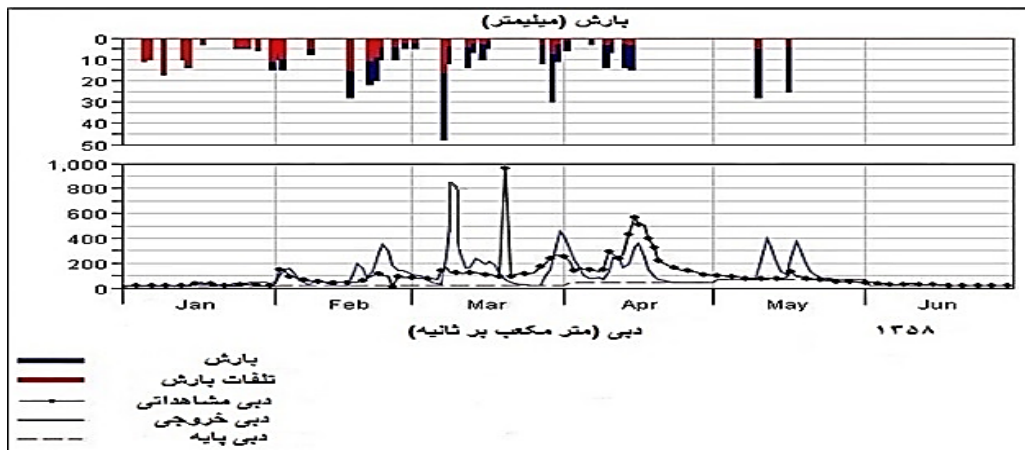
¹ Lag Time

² Initial Abstraction

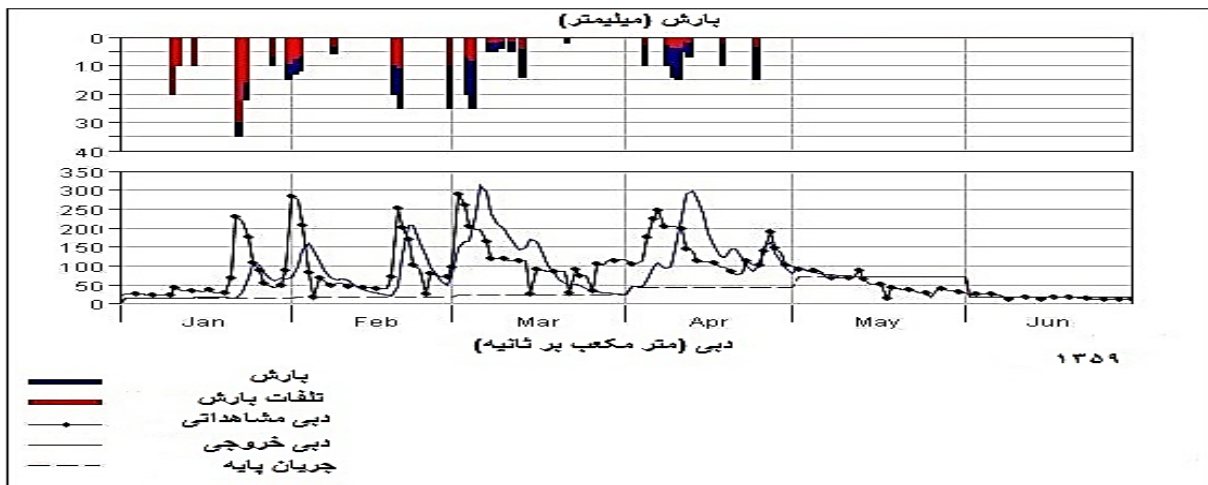


شکل (۳): نمودار بارش- رواناب برای دوره بهینه‌شده سال ۱۳۴۷

بر اساس مقادیر بهینه به‌دست‌آمده برای پارامترها در بخش واسنجی، به‌منظور ارزیابی عملکرد نکویی تخمین پارامترها توسط مدل، دو دوره ترسالی مربوط به سال‌های ۱۳۵۸ و ۱۳۵۹ نیز شبیه‌سازی شدند. هایدروگراف و هیدروگراف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در اشکال (۴) و (۵) نشان داده‌شده است.



شکل (۴): نمودار بارش- رواناب برای دوره شبیه‌سازی‌شده سال ۱۳۵۸



شکل (۵): نمودار بارش- رواناب برای دوره شبیه‌سازی‌شده سال ۱۳۵۹

به منظور ارزیابی کمی و دقیق‌تر مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی مقادیر بارش-رواناب در حوضه مورد مطالعه، معیارهای خطای ارائه شده در روابط (۱) تا (۵) محاسبه و نتایج آن در جدول (۵) ارائه شده است. میانگین درصد خطای حجم برابر ۲/۸- درصد و میانگین درصد خطای دبی اوج ۴- درصد محاسبه شده است (علامت منفی، نشان‌دهنده برآورد کمتر مدل نسبت به مقادیر مشاهداتی است). میانگین خطای زمان رسیدن به اوج ۳ روز می‌باشد. همچنین بالاترین شاخص آماری R^2 و SI به ترتیب ۰/۵۵ و ۰/۶۶ می‌باشد. که بیشترین مقدار درصد خطای مدل در شبیه‌سازی مقدار دبی اوج است که کمتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی شده است.

جدول (۵): نتایج معیارهای خطا برای ارزیابی نکویی برازش مدل HEC-HMS به داده‌های مشاهداتی در دو مرحله واسنجی و شبیه‌سازی

پارامترهای مورد ارزیابی	دوره واسنجی	دوره‌های شبیه‌سازی	دوره سیلاب
شاخص آماری R^2	سال ۱۳۴۷	سال ۱۳۵۸	سال ۱۳۵۹
شاخص آماری SI	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۴۲
حجم دبی اوج مشاهداتی	۵۲۹/۸۴	۴۰۸/۸۹	۳۳۳/۷۸
حجم دبی اوج شبیه‌سازی شده	۵۷۴/۸۳	۴۰۴/۶۱	۳۲۸/۳۶
درصد خطای حجم دبی اوج	۶٪	۱٪	۱/۵٪
مقدار دبی اوج مشاهداتی	۶۸۴	۹۶۲/۵	۲۸۹/۵
مقدار دبی اوج شبیه‌سازی شده	۶۳۰/۳	۸۳۴/۶	۳۱۳
درصد خطای دبی اوج	۷٪	۱۳٪	۸٪
زمان دبی اوج مشاهداتی	۲۹ اسفند	۱۹ اسفند	۱ اسفند
زمان دبی اوج شبیه‌سازی شده	۲۷ اسفند	۱۸ اسفند	۵ اسفند
خطای زمان رسیدن به اوج (به روز)	۲	۱	۴

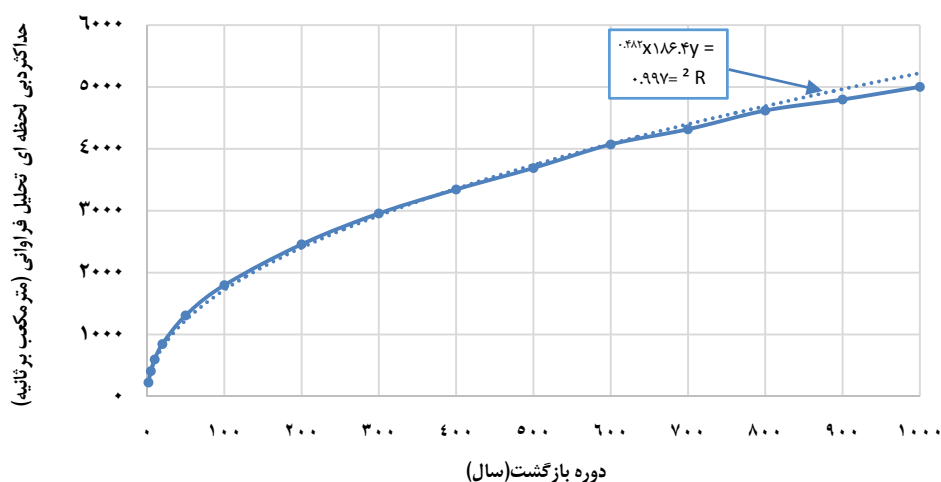
جدول (۶): نتایج برازش توزیع دبی حداکثر لحظه‌ای و حداکثر بارش یک‌روزه

متغیر	نام توزیع	پارامترهای توزیع	آزمون کلموگورف-اسمیرنوف		
			آماره	رتبه	P-Value
دبی حداکثر لحظه‌ای	Pearson 5 (3P)	a=2/3341 b=410/06 g=21/638	۰/۱۰۶۶	۱	۰/۸۹۸۹۲
	Lognormal (3P)	s=0/95433 m=5/0733 g=66/229	۰/۱۱۴۱۵	۲	۰/۸۴۹۵
	Pearson 6	a1=190/28 a2=2/87 b=3/1066	۰/۱۱۵۸۴	۳	۰/۸۳۳۳۵
	Pearson 5	a=2/8371 b=582/85	۰/۱۱۶۲۹	۴	۰/۸۳۴۰۶
	Gen. Pareto	k=0/1084 s=197/98 m=86/003	۰/۱۲۰۸۴	۵	۰/۷۹۹۲۷
	Log-Pearson 3	a=21/858 b=0/14058 g=2/4388	۰/۱۲۵۵۷	۶	۰/۷۶۱۰۹
	Gen. Extreme Value	k=0/30727 s=116/03 m=191/11	۰/۱۲۶۳۹	۷	۰/۷۵۴۲۴
	Log-Gamma	a=70/324 b=0/07837	۰/۱۳۷۶۵	۸	۰/۶۵۸۰۱
حداکثر بارش یک‌روزه	Gumbel Max	$\sigma=11/376 \mu=34/607$	۰/۱۰۷۹۲	۱	۰/۸۹۰۹
	Normal	$\sigma=14/59 \mu=41/173$	۰/۱۰۶۵۲	۲	۰/۸۹۹۳۸
	Pearson 5 (3P)	$\alpha=35/488 \beta=2867/1 \gamma=-41/959$	۰/۱۰۸۶۱	۳	۰/۸۸۶۵۸
	Pearson 6 (4P)	$\alpha_1=103/59 \alpha_2=36/151$ $\beta=24/616 \gamma=-31/372$	۰/۱۰۸۸۵	۴	۰/۸۸۵۱
	Lognormal (3P)	$\sigma=0/22506 \mu=4/1173 \gamma=-21/795$	۰/۱۰۹۵۸	۵	۰/۸۸۰۴۴
	Gamma (3P)	$\alpha=9/4205 \beta=4/6668 \gamma=-2/7908$	۰/۱۱۲۲۳	۶	۰/۸۶۲۸۷
	Gen. Gamma	k=1/0066 $\alpha=8/0748 \beta=5/1703$	۰/۱۱۴۲۳	۷	۰/۸۴۸۹۳
	Pearson 6	$\alpha_1=8/2126 \alpha_2=17850/0 \beta=89412/0$	۰/۱۱۴۲۶	۸	۰/۸۴۸۷۲

پس از تعیین بهترین توزیع برازشی به داده‌های دبی حداکثر لحظه‌ای و ماگزیمم بارش یک‌روزه، دوره بازگشت‌های مختلف این دو متغیر از دو تا ۱۰۰۰ ساله در نرم‌افزار Easy fit محاسبه شد و نتایج در جدول (۷) ارائه شده است. نمودار تغییرات دبی‌های حداکثر با دوره بازگشت‌های مختلف در شکل (۶) ارائه شده است. همان‌طور که در این دیده می‌شود یک تابع توانی با ضریب تبیین بالا $0/997$ را می‌توان به این داده‌ها برازش داد (خط منقطع در شکل ۶). هرچند که فاصله بین تابع برازشی و مقادیر به‌دست‌آمده از آنالیز فراوانی سیلاب، به ازای دوره بازگشت‌های بیشتر از ۸۰۰ سال افزایش می‌یابد.

جدول (۷): مقادیر دبی حداکثر لحظه‌ای و ماگزیمم بارش یک‌روزه به ازای دوره بازگشت‌های مختلف

دوره بازگشت (سال)	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰
دبی لحظه‌ای (مترمکعب بر ثانیه)	۲۲۵	۴۱۰	۵۹۸	۹۳	۱۳۰۸	۱۷۹۸	۲۴۵۷	۲۹۵۶	۳۳۴۳	۳۶۸۹	۴۰۶۹	۴۳۶۵	۴۶۱۷	۴۷۹۶	۵۰۰۱
ماگزیمم بارش یک‌روزه (میلی‌متر)	۳۸/۷۸	۵۱	۶۰	۷۱	۷۹	۸۷	۹۵	۱۰۰	۱۰۳	۱۰۵/۵	۱۰۷/۸	۱۰۹/۶	۱۱۱	۱۱۲	۱۱۳

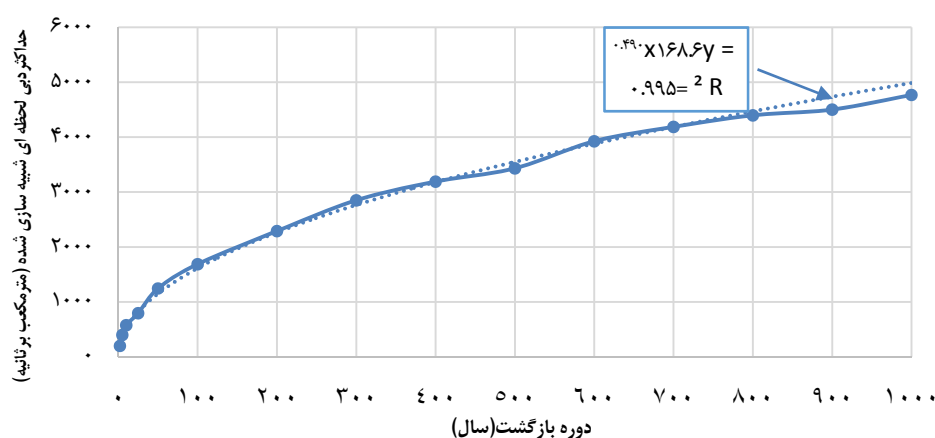


شکل (۶): نمودار تغییرات حداکثر دبی لحظه‌ای تحلیل فراوانی سیلاب به ازای دوره بازگشت‌های مختلف

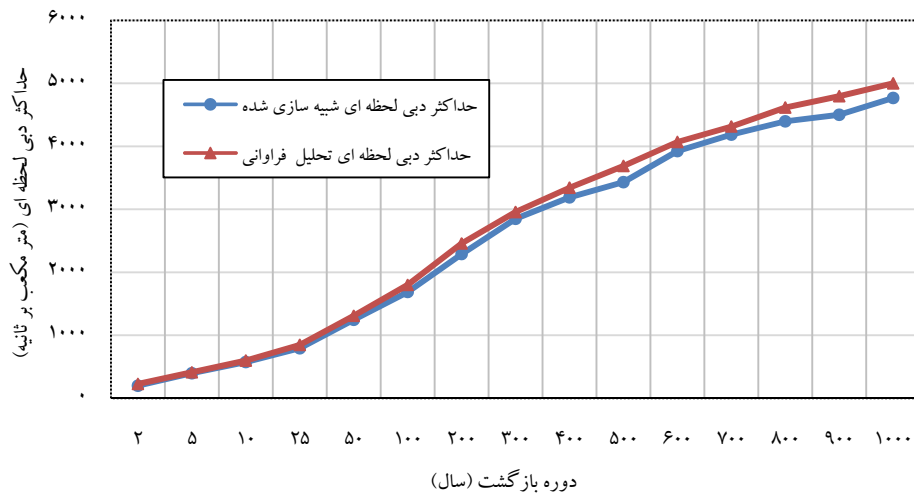
به‌منظور بررسی کارایی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در پیش‌بینی سیلاب‌های تاریخی (با دوره بازگشت‌های مختلف) داده‌های ماگزیمم بارش یک‌روزه با دوره بازگشت‌های مختلف که از تحلیل فراوانی داده‌های ثبت شده در حوضه به‌دست‌آمده (جدول ۷) به‌عنوان ورودی به مدل HEC-HMS داده شد. مقادیر پارامترهای مدل همان مقادیر به‌دست‌آمده در جدول (۴)، در نظر گرفته شدند. هیدروگراف سیلاب متناظر با دوره بازگشت‌های مختلف شبیه‌سازی شد و نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۸) و شکل (۷) ارائه شده است.

جدول (۸): تغییرات دبی حداکثر لحظه‌ای شبیه‌سازی شده HEC-HMS به ازای دوره بازگشت‌های مختلف

دوره بازگشت (سال)	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰
حداکثر دبی لحظه‌ای (مترمکعب بر ثانیه)	۱۹۸/۶	۳۹۸	۵۷۶	۸۹۴	۱۲۴۵	۱۶۸۷	۲۲۸۲/۵	۲۸۴۹/۸	۳۱۸۹/۶	۳۴۳۳	۳۹۲۵/۹	۴۱۸۷/۲	۴۳۹۷/۵	۴۵۰۱/۸	۴۷۶۹/۴



شکل (۷): نمودار تغییرات حداکثر دبی لحظه‌ای شبیه‌سازی شده توسط مدل HEC-HMS به ازای دوره بازگشت‌های مختلف مشابه با داده‌های حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف که از تحلیل فراوانی به دست آمده است (شکل ۶) در اینجا نیز می‌توان تابع تابعی با ضریب تبیین بالا ۰/۹۹۵ به مقادیر متناظر شبیه‌سازی شده توسط مدل HEC-HMS برازش داد. این مسئله در این مورد نیز برای دوره بازگشت‌های بالا، فاصله بین تابع برازشی و مقادیر شبیه‌سازی شده افزایش می‌یابد. سپس به منظور بررسی کارایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی سیلاب با دوره بازگشت‌های بالا و مقایسه نتایج آن با دبی‌های پیک لحظه‌ای سیلاب به دست آمده از تحلیل فراوانی (شکل ۶) هر دو نمودار در کنار یکدیگر در شکل (۸) رسم شده است. نزدیکی مقادیر دو نمودار نشان‌دهنده قابلیت مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب به ازای دوره بازگشت‌های کوچک (کمتر از ۳۰۰ سال) می‌باشد که در این محدوده، به خوبی می‌توان از این مدل هیدرولوژیکی استفاده نمود. اما به ازای دوره بازگشت‌های بیشتر از ۵۰۰ سال، فاصله بین دو نمودار بیشتر می‌شود (مقادیر به دست آمده از مدل هیدرولوژیکی کمتر از مقادیر متناظر محاسبه شده از تحلیل فراوانی سیلاب می‌باشد) که نشان‌دهنده رعایت جانب احتیاط در استفاده از این مدل هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی سیلاب‌های بزرگ‌تر از ۳۰۰ سال دارد.



شکل (۸): نمودار تغییرات حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب به‌دست‌آمده از تحلیل فراوانی سیلاب و شبیه‌سازی شده توسط مدل HEC-HMS به ازای دوره بازگشت‌های مختلف

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان داد که بر اساس معیارهای نکویی برازش محاسبه‌شده، مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS کارایی بالایی در شبیه‌سازی سیلاب‌های تاریخی با دوره بازگشت ۳۰۰ ساله (۳۰۳۰ مترمکعب در ثانیه) یا کوچک‌تر در حوضه کشکان رود را دارد. اما به ازای دوره بازگشت‌های بیشتر از ۵۰۰ سال، خطای این مدل بیشتر می‌شود. پارامترهای واسنجی شده توسط این مدل (مانند زمان تمرکز، شماره منحنی و زمان تأخیر) نزدیک به مقادیر تخمین زده‌شده توسط روش‌های تجربی می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که علیرغم کارایی بالای مدل HEC-HMS در حوضه مورد مطالعه، برای پیش‌بینی سیلاب‌های تاریخی با دوره بازگشت بالاتر که مشابه آن در طول دوره آماری ثبت شده موجود نمی‌باشد، بایستی ریسک استفاده از روش‌های تحلیل فراوانی و مدل‌های هیدرولوژیکی را نیز مدنظر قرارداد. در این راستا توجه به نوع عوارض ژئومورفولوژیکی تشکیل‌شده در مسیر رودخانه به‌عنوان شواهد عینی شرایط هیدرولوژیکی حاکم بر رودخانه طی میلیون‌ها سال که از عمر تشکیل رودخانه می‌گذرد می‌تواند در جهت تأیید و یا رد نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های فراوانی و یا مدل‌های هیدرولوژیکی کمک شایانی نماید و تصمیم‌گیرنده را در جهت اتخاذ برنامه‌ریزی صحیح مدیریت سیلاب رهنمون سازد. لذا پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی در حوضه مورد مطالعه برای برآورد مقدار سیل با دوره بازگشت‌های بزرگ، به شواهد ژئومورفولوژیکی در طول مسیر رودخانه نیز توجه شود.

فهرست منابع

- جعفر نیا، جابر و امامقلی زاده، صمد، ۱۳۹۲. برآورد سیلاب حوضه آبریز رودخانه تالار (زیر حوضه کسلیان) با استفاده از مدل HEC-HMS، کنفرانس ملی مدیریت سیلاب، تهران.
- سوری‌نژاد، علی، ۱۳۸۱. برآورد حجم رواناب حوضه آبخیز رودخانه کشکان با استفاده از GIS، پژوهش‌های-جغرافیایی، ۱۳۸۱ (۴۳): ۵۷-۸۰.
- شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان، ۱۳۹۲. اطلاعات و مشخصات رودخانه‌های استان لرستان.
- شعبانلو، سعید و حسین صدقی و بهرام تقفیان و حبیب موسوی جهرمی، ۱۳۸۷. پهنه‌بندی سیلاب در شبکه رودخانه‌های استان گلستان با استفاده از GIS. مجله پژوهش آب ایران ۲ (۳): ۱۱-۲۲.

- علیزاده، امین، ۱۳۸۸. اصول هیدرولوژی کاربردی، مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی.
- قدسیان، مسعود، ۱۳۷۷. مهار سیلاب و مهندسی زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- قمی اوپلی، فرشته و محمدصادق صادقیان و امیرحسین جاوید و سیداحمد میرباقری، ۱۳۸۹. شبیه‌سازی پهنه‌بندی سیل با استفاده از مدل HEC-RAS (مطالعه موردی: رودخانه کارون حداقل بند قیر تا اهواز). فصلنامه علوم و فنون منابع طبیعی، ۱۳۸۹ (۱): ۱۱۵-۱۰۵.
- کرمی، فریبا و هنگامه شیرواند و فاطمه درگاهیان، ۱۳۸۹. بررسی الگوی سینوپتیک سیل بهمن ۱۳۸۴ شهرستان پلدختر. فصلنامه جغرافیایی و مطالعات محیطی، ۲ (۴): ۹۹-۱۰۶.
- نگارش، حسین و تقی طاوسی و مهدی مهدی نسب، ۱۳۹۰. بررسی شدت سیل‌خیزی حوضه آبریز رودخانه کشکان. فصل‌نامه جغرافیایی لار، ۱۳۹۰ (۱۳): ۵۸-۴۹.
- نوحه‌گر، احمد و نسیم قشقایی‌زاده و ارشک حلی‌ساز، ۱۳۹۱. واسنجی و اعتبار یابی مدل HEC-HMS و آنالیز حساسیت آن در برآورد مشخصه‌های هیدروگراف سیلاب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز جاماش استان هرمزگان)، همایش ملی علوم مهندسی آب و فاضلاب، کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.
- نوری، فریده و جواد بهمنش و بایرامعلی محمدنژاد و حسین رضایی، ۱۳۹۱. ارزیابی مدل WMS/HEC-HMS در پیش‌بینی سیلاب حوضه آبریز قروه. مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، ۱۹ (۴): ۲۱۰-۲۰۱.
 - Brooks, K.N., Gregersen, H.M., Berglund, E.R. & Tayaa, M. 1981. Economic evaluation of watershed projects: an overview of methodology and application. *Water Resources Bulletin*, 18: 245-250.
 - Chang, C.H. Huang, W., 2013, Hydrological modeling of typhoon-induced extreme storm runoffs from Shihmen watershed to reservoir, Taiwan. *Nat Hazards* (2013) 67:747-761.
 - El Hamdouni, R. Irigaray, C. Fernandez, T. Chacón, J. & Keller, E. A., 2007- Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology* 96, 150-173.
 - James, A., (1999) Time and the Persistence of Alluvium: River engineering, fluvial geomorphology, and mining sediments California, *Geomorphology*, vol: 31, Pp: 256-290.
 - Joo, J. Kjeldsen, T. Kim, H. Lee, H., (2014), A Comparison of Two Event-based Flood Models (ReFH-rainfall Runoff Model and HEC-HMS) at Two Korean Catchments, Bukil and Jeungpyeong. - 330 - *KSCE Journal of Civil Engineering* (2014) 18(1):330-343.
 - Miller S.N. Kepner W.G. and Mehaffey M.H. 2002. Integration Landscape Assessment and Hydrologic Modeling for Land Cover Change Analysis. *Journal of the American Water Resources Association*. 38(4):919-929. 16- *US Army Corps of Engineers*. 1992. H
 - Smith, K., (1992), *Environmental Hazards, Assessing Risks and Reducing Disaster*, Routledge 254.
 - *US Army Corps of Engineers.*, (2000), *Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical Reference Manuals*. Hydrologic Engineering Center, USA.