

## پهنه‌بندی سیلاب و شبیه‌سازی رفتار هیدرولیک رودخانه با استفاده از نرم‌افزار HEC RAS (مطالعه موردی: رودخانه مارون - جنوب غرب ایران)

خسرو شفیعی مطلق<sup>۱</sup>، ناصر عبادتی<sup>۲\*</sup>

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، واحد دهدشت، دانشگاه آزاد اسلامی، دهدشت، ایران

۲. دانشیار گروه زمین‌شناسی، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۹/۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۲/۷)

### چکیده

تحقیق حاضر با هدف پهنه‌بندی سیلاب و تعیین حد بستر و حریم رودخانه مارون با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS در محیط GIS پی‌ریزی شد. با استفاده از نرم‌افزار GIS نقشه‌های کاربری اراضی، توپوگرافی، و مدل رقومی ارتفاع تهیه شد. در گام بعد، مشخصات شبکه رودخانه‌ای و مشخصات هندسی رودخانه با استفاده از نرم‌افزار HEC-GeoRAS استخراج شد. در نهایت، با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS اقدام به مدل‌سازی و تخمین دبی سیلاب شد. در گام سوم، نتایج مربوط به مدل HEC-HMS همراه با مشخصات هندسی استخراج‌شده از مدل HEC-GeoRAS به مدل HEC-RAS برای مدل‌سازی هیدرولیکی رودخانه مارون وارد شد. در مرحله بعد، نتایج به‌دست‌آمده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS به نرم‌افزار Arc GIS منتقل شد و با استفاده از داده‌های موجود، عمل پهنه‌بندی سیلاب برای سیلاب با دوره بازگشت‌های ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ سال صورت گرفت. از ۵ رویداد سیل که در ایستگاه آب‌سنجی و ایستگاه باران‌نگار تنگ‌تکاب که داده‌های ثبت‌شده مناسبی داشتند، ۲ رویداد برای واسنجی و ۳ رویداد برای ارزیابی در نظر گرفته شد. نتایج مدل با شاخص RMSE به عنوان تابع هدف صحت‌سنجی شد. نتایج تحقیق نشان داد مساحت سیل‌خیزی برای دوره‌های بازگشت ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله به ترتیب برابر با ۱۲۶۵، ۱۶۵۱، ۲۳۳۴ و ۴۴۵۰ هکتار و تعداد روستاهای در معرض خطر به ترتیب برابر با ۵، ۳، ۲ و ۹ هستند.

کلیدواژگان: حوضه مارون، سیلاب، HEC-RAS، Arc GIS

## مقدمه

سیلاب همواره یکی از بلایای طبیعی با خطرهای جانی و مالی زیاد بوده است. ۹۱ میلیون هکتار از سطح کشور در تولید رواناب مستقیم و سریع تأثیر داشته که حدود ۴۲ میلیون هکتار آن شدت سیل خیزی متوسط تا خیلی زیاد دارند. از این نظر ۵۹۲ شهر، ۶۶ هزار روستا، ۲ هزار رشته قنات، یک میلیون هکتار از اراضی زراعی و بخش بزرگی از جاده‌های کشور و تأسیسات صنعتی در معرض خطر سیل‌گیری و تخریب قرار دارند [۱]. سیل به دلیل جریان‌های تقریباً زیاد رودخانه که به طور موقت زمین و سکونت را به خطر می‌اندازد، شایع‌ترین پدیده طبیعی است. سیل‌های ویرانگر نه تنها به خطر جانی منجر می‌شوند، بلکه به خسارت‌های بزرگ اقتصادی و ایجاد احساس ناامنی و ترس در ذهن افراد ساکن در دشت‌های سیلاب می‌انجامند [۲].

اطلاع از خصوصیات مانده حداکثر دبی سیل برای طراحی سازه‌های آبی مانند سدها، سرریزها، پل‌ها و زیرگذرها به منظور کاهش خسارت‌های احتمالی و همچنین پیش‌بینی زمان رسیدن به دبی اوج در بازه‌های پایین دست در بحث هشدار سیل ضروری است [۳]. در این زمینه، نکته نگران‌کننده، روند افزایشی تلفات و خسارت‌های سیلاب در جهان در دهه‌های اخیر بوده است. افزایش جمعیت و دارایی‌ها در دشت‌های سیلابی، تغییرات سیستم‌های آبی و آثار مخرب فعالیت‌های انسانی از دلایل عمده این روند افزایشی بوده است. شهرنشینی نیز از جمله دخالت‌های انسان در طبیعت است که سبب تشدید پدیده سیل می‌شود [۴]. با توجه به شرایط موجود و پیچیدگی بیشتر سیستم‌های هیدرولوژیکی و عدم امکان شناخت کامل آنها، استفاده از روش یا روش‌هایی که بتوان به کمک آنها میزان رواناب حاصل از بارندگی را در حوضه‌های فاقد آمار یا دارای آمار ناقص تخمین زد، اهمیت درخور توجهی دارد. همچنین، با توجه به قابلیت‌های مدل‌های هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی فرایندهایی که در برخی حوضه‌ها آمار کاملی دارند، می‌توان فرایندهای هیدرولوژیکی مانند رواناب را شبیه‌سازی کرد و با کمترین هزینه و حداقل زمان برای برآورد رواناب در حوضه‌های بدون آمار به کار برد [۵]. اطلاع از خصوصیات مانده حداکثر دبی سیل برای طراحی سازه‌های آبی، مانند سدها، سرریزها، پل‌ها و زیرگذرها به منظور کاهش خسارت‌های احتمالی و همچنین پیش‌بینی زمان رسیدن به

دبی اوج در بازه‌های پایین دست در بحث هشدار سیل ضروری است [۳]. همچنین، شبیه‌سازی جریان رودخانه کر و سیوند با استفاده از مدل HEC-HMS نشان می‌دهد مدل یادشده قابلیت‌های خوبی در مطالعه کارهای آبی به‌ویژه هشدار سیل دارد [۶]. فراز جو و همکاران با تلفیق GIS و HEC-HMS آثار تغییر پوشش گیاهی را طی سال‌های ۱۳۴۶-۱۳۷۵ بر دبی اوج و حجم سیلاب حوضه آبخیز سد گلستان بررسی کرده و واکنش هیدرولوژیک حوضه به ازای گزینه‌های مختلف کاربری اراضی را پیش‌بینی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بر اثر تغییرات کاربری و تخریب جنگل‌ها و مراتع، دبی و حجم سیل روند افزایش داشته است [۷]. صادقی و همکاران به منظور پهنه‌بندی سیلاب در بخشی از حوضه آبخیز شهری تهران از ترکیب مدل‌های GIS و HEC-RAS استفاده کردند و نقشه مناطق سیل‌گیر را به ازای دوره‌های برگشت ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله تهیه کرده و بر کارایی مدل‌های GIS و HEC-RAS تأکید کردند [۸]. خلیقی و همکاران (۱۳۸۳) در بررسی میزان تأثیر تغییر کاربری اراضی بر مشخصات هیدرولوژیکی آب‌های سطحی، پس از انجام مراحل مدل‌سازی، واسنجی و اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی رفتار حوضه مطالعه شده نشان دادند دبی اوج سیل بیشتر از حجم سیل افزایش یافته و زمان تمرکز و زمان تأخیر کاهش یافته است [۹]. سیدکابلی و آخوند علی (۱۳۸۸) با ارزیابی روش‌های تلفات باران در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در حوضه آبریز کسلیان نشان دادند در برآورد زمان اوج، نوع روش‌های تلفات تأثیر چندانی ندارند [۱۰]. آذری و همکاران (۱۳۹۰) تأثیر اقدامات آبخیزداری بر رفتار سیلاب در حوضه آبخیز جاغرق در استان خراسان رضوی با تلفیق مدل‌های HEC-RAS و HEC-HMS را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد با افزایش دوره بازگشت سیلاب، تأثیر اقدامات انجام‌شده بر کاهش دبی اوج و پهنه سیلاب کم می‌شود [۱۱]. نوری و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از زیرمدل HEC-HMS نشان دادند روش SCS در شبیه‌سازی دبی اوج هیدروگراف با داده‌های مشاهداتی تطابق بهتری دارد [۱۲].

نخستین اقدامی که برای کاهش خطر سیل مطرح می‌شود، مهار سیل در سرمنشأ آن یعنی زیرحوضه‌های آبخیز است. بی‌شک برای انجام این کار نیاز به شناسایی مناطق سیل‌خیز داخل حوضه است. به این منظور، از مدل‌های رایانه‌ای متنوعی که برای شبیه‌سازی حوضه‌های آبخیز ارائه شده است

سازمان‌های دولتی، سبب کاهش ظرفیت مجراهای رودخانه شده و در نهایت، سبب وقوع سیل می‌شود. با توجه به شرایط خاص آب و هوایی در ایران و بروز سالانه سیل‌های مختلف در مناطق مختلف، پیش‌بینی وقوع این فجایع توسط سازمان‌های مسئول باید با برنامه‌ریزی لازم انجام شود [۱۹]. ایجاد نوعی سامانه جامع فراقوه‌ای نظام‌نامه مدیریت و کنترل سیل، توجه هر چه بیشتر به اقدامات آبخیزداری و آبخوان‌داری و نیز توجه به اصول و مبانی مهندسی رودخانه‌زیستی، اجرای دقیق حد و حریم بستر و در صورت لزوم، بازنگری در قانون مربوط به آن به منظور افزایش حدود بستر، بازنگری و طراحی اصولی سازه‌های تقاطعی، بازسازی و احیای هر چه بیشتر مسیل‌ها، چالاب‌ها و تالاب‌های طبیعی و رفع تعدی و تجاوز به آنها، احیای مراتع، از جمله مهم‌ترین و ضروری‌ترین اقدامات برای پیشگیری و بهبود مدیریت و کنترل بهتر سیل است [۲۰]. تحقیق حاضر در حوضه آبخیز مارون به‌عنوان یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه کارون است که از کنار شهرهای بزرگی همچون دهدشت، لنده، بهبهان و امیدیه گذر می‌کند. بستر و مسیر این رودخانه در گذشته تا کنون به علت اقدامات توسعه شهری دستخوش تغییرات متعددی شده است. همچنین، مناطق بالادست این حوضه به علت شیب زیاد و خروجی زیاد از سرچشمه‌های آبخیز استان کهگیلویه و بویراحمد به این رودخانه، یکی از مناطق سیل‌خیز استان است. در نتیجه، در مواقع بارانی احتمال سیل‌خیزی این رودخانه زیاد است، همان‌طور که در گذشته نیز چنین بوده است. به این منظور، در پروژه حاضر با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و استفاده از نقشه‌های توپوگرافی استان کهگیلویه و بویراحمد و اطلاعات جمع‌آوری شده از ادارات هواشناسی و آب منطقه‌ای، نقشه‌های مورد نیاز تهیه شد. همچنین، با کاربرد مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب HEC-HMS اقدام به برآورد هیدروگراف سیلاب شد. در نهایت، پهنه‌های سیل‌گیر با نرم‌افزار HEC-RAS و نرم‌افزار GIS تهیه شد.

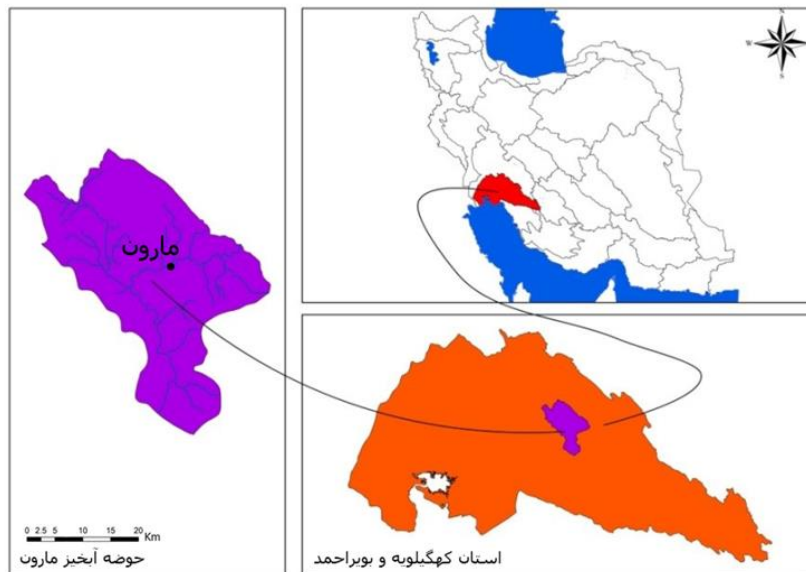
### مواد و روش‌ها

حوضه آبخیز مارون در جنوب غربی ایران در استان کهگیلویه و بویراحمد در محدوده جغرافیایی ۳۰° ۳۹' تا ۳۱° ۷' عرض شمالی و ۵۰° ۷' تا ۵۰° ۳۷' طول شرقی، واقع شده است. رودخانه مارون که آبراه خروجی این حوضه است، یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه کارون است (شکل ۱).

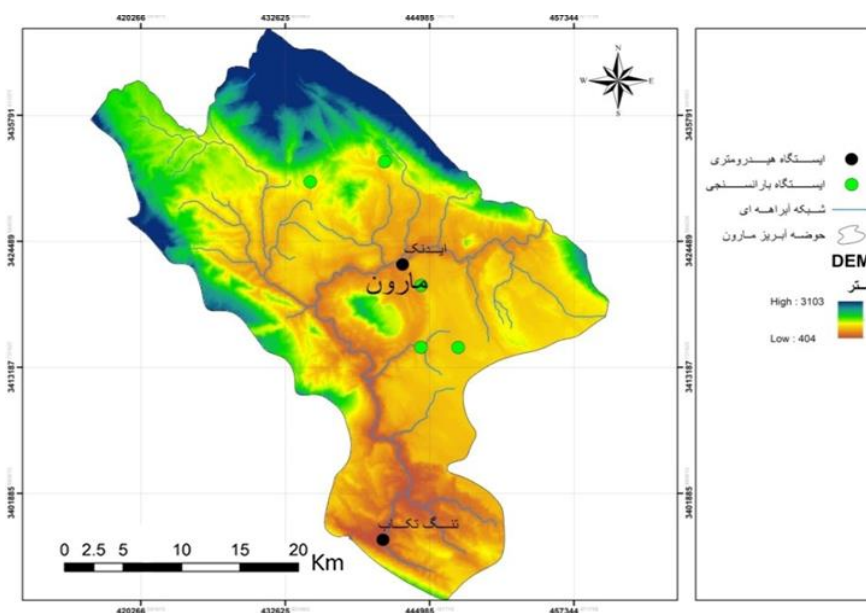
می‌توان استفاده کرد. این مدل‌ها به‌طور گسترده‌ای برای پیش‌بینی سیلاب به کار گرفته شده‌اند. خسارت‌های گسترده ناشی از طغیان رودخانه‌ها طی سال‌های اخیر در مناطق مختلف کشور ایجاب می‌کند برنامه‌های جامعی در این زمینه تهیه و تدوین شود. پهنه‌بندی خطر سیل بدون اطلاع از بزرگی سیل و رفتار جریان سیلابی در مسیر و دشت سیلابی ممکن نیست [۱۳]. تلفیق سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی با مدل HEC-RAS در تحلیل مناطق سیل‌خیز بسیار توانمند و کارا هستند [۱۴]. همچنین، دولتی و همکاران (۱۳۹۶) شکست سد مخزنی سفارود و تأثیر آن بر منطقه رضوانشهر در استان گیلان را با استفاده از مدل HEC-RAS شبیه‌سازی کردند و نشان دادند آنالیز پارامترهای شکست، تأثیر زیادی بر مقدار پیک جریان خروجی از شکاف شکست سد و سرعت و ارتفاع و اندازه جریان می‌گذارد [۱۵]. قمی و همکاران (۱۳۸۹) هیدروگراف سیل خروجی در بالادست حوضه کارون و زیرحوضه‌های موجود در مسیر مد نظر را با استفاده از روش‌های هیدروگراف واحد و شاخص سیلاب تعیین کردند و همچنین محدوده و میزان اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی که در صورت وقوع سیلاب به مخاطره خواهند افتاد را برای سیلاب‌هایی با دوره بازگشت‌های مختلف مشخص کردند [۱۶]. راد و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه آبخیز خرم‌آباد واقع در استان لرستان با معرفی شرایط مرزی جریان، دبی حداکثر لحظه‌ای با دوره بازگشت‌های مختلف، مقاطع عرضی و فاصله آنها و ضریب زبری مانینگ برای هر مقطع به مدل هیدرولیکی HEC-RAS، این مدل را اجرا و نیم‌رخ سطح آب در دوره‌های بازگشت مختلف را سیل به دست آوردند و مشاهده کردند که بیشترین سطح درگیر سیل به ترتیب به اراضی زراعی دیم، مراتع، جاده، اراضی مسکونی و زمین‌های رهاشده مربوط می‌شود [۱۷]. شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه‌ها، برای پیش‌بینی خسارت‌های ناشی از سیل در شرایط مختلف، اجرای طرح‌های مهندسی رودخانه، مطالعات توجیهی اقتصادی-اجتماعی برنامه‌های کنترل و مهار سیل و دیگر مطالعات وابسته به سامانه رودخانه‌ها ضرورت دارد [۶]. توسعه مناطق مسکونی و شهری در حاشیه رودخانه‌ها و تغییر کاربری اراضی زراعی به اراضی مسکونی سبب می‌شود که رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز شهری نسبت به حوضه‌های طبیعی، غیرعادی و نامنظم باشد [۱۸]. توسعه کشاورزی و ساخت‌وسازهای غیرقانونی توسط افراد بومی و

ارتفاع ۴۰۴ متر و حداکثر ارتفاع ۳۱۰۳ متر می‌شود. همچنین، میانگین بارندگی سالانه حوضه ۴۴۱ میلی‌متر و دمای میانگین سالانه ۲۲ درجه سانتی‌گراد است. شکل ۲ نقشه طبقات ارتفاعی محدوده حداقل تا حداکثر ارتفاع حوضه آبخیز مارون را نشان می‌دهد. مطالعه حاضر با استفاده از اطلاعات موجود تا سال ۱۳۹۸ تهیه شده و دو قسمت مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری دارد. شکل ۳ موقعیت هر یک از ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.

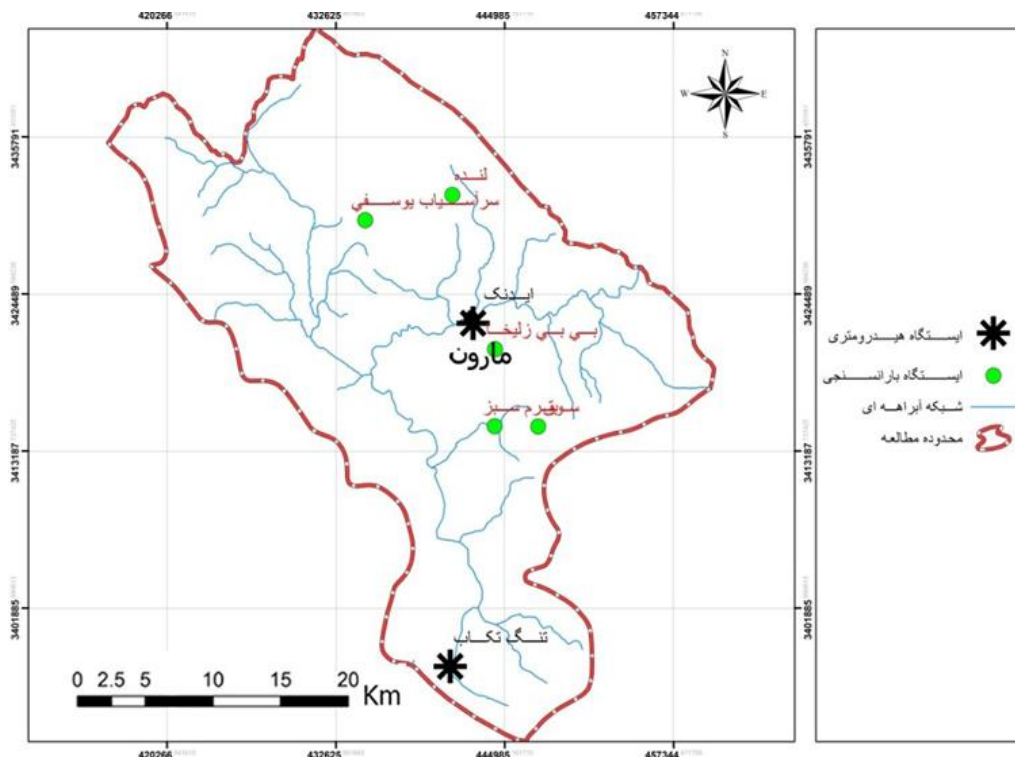
مشخصات فیزیوگرافی از عوامل تعیین‌کننده در یک حوضه است و اغلب مطالعات یک حوضه مانند هواشناسی، خاک‌شناسی، پوشش گیاهی، زمین‌شناسی و... ارتباط مستقیمی با خصوصیات فیزیوگرافی دارد. خصوصیات فیزیوگرافی یک حوضه می‌تواند به طور مستقیم بر جریان آب، فرسایش و رسوب اثر بگذارد و یا با تأثیر غیرمستقیم بر آب‌وهوا، موجب تغییر رژیم آبی حوضه شود. خصوصیات فیزیوگرافی حوضه شامل مساحت ۱۰۰۴ کیلومترمربع و طول بزرگ‌ترین رودخانه اصلی ۶۷ کیلومتر و حداقل



شکل ۱. موقعیت رودخانه و حوضه آبخیز مارون



شکل ۲. طبقات ارتفاعی حوضه آبخیز مارون

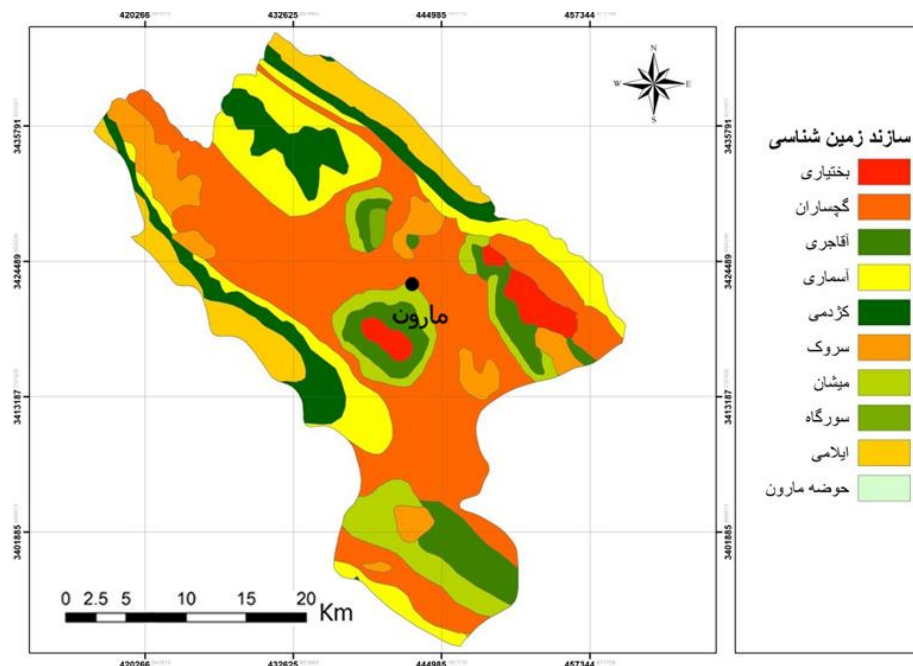


شکل ۳. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در حوضه آبخیز مارون

از فرسایش محسوب می‌شود. حوضه آبخیز مارون در دنباله کوه‌های زاگرس واقع شده و از ته‌نشست‌های دوره کوتاه تا پلیوسن تشکیل شده است. این ته‌نشست‌ها بقایای دریایی کم‌عمق هستند که منطقه گسترش یافته‌اند. غالب سنگ‌های تشکیل‌دهنده شامل مارن، شیل، گچ، کنگلومرا و آهک می‌شود. ته‌نشست‌های اخیر از آبرفت‌های رودخانه‌ای، دشت‌های سیلابی و مخروط‌های افکنه تشکیل شده و حوضه‌های ناودیسسی اغلب توسط نهشته‌های آبرفتی که حاصل فرسایش تشکیلات قدیمی هستند، پوشیده شده است. بر اساس مطالعات چینه‌شناسی، رسوب‌هایی که در محدوده توسعه رودخانه مارون وجود دارند، متعلق به دوره‌های ائوسن، الیگوسن، میوسن و پلیوسن هستند. سازندهای تشکیل‌دهنده حوضه مارون شامل سازند سروک، پابده، گورپی، آسماری، میشان، آجاجاری و واحد سنگی آبرفتی یادشده است. به منظور تهیه اطلاعات زمین‌شناسی، از نقشه ۱:۵۰۰۰۰ دهدشت استفاده شد. وضعیت زمین‌شناسی حوضه‌های آبخیز در شکل ۴ ارائه شده است [۲۱].

رودخانه مارون (ایستگاه ایدنک): در دوره مطالعاتی سال‌های ۱۳۴۸-۱۳۹۸ بر اساس آمار ایستگاه ایدنک متوسط آبدهی رودخانه برابر ۲۰ مترمکعب بر ثانیه یا معادل ۶۲۹ میلیون مترمکعب در سال است که حداکثر و حداقل آبدهی به ترتیب برابر با ۳۱ و ۷ مترمکعب بر ثانیه، با ضریب تغییرات ۶۱ درصد است. ارتفاع رواناب معادل آورد سالیانه برابر با ۴۳۰ میلی‌متر و دبی ویژه ۱۵ لیتر بر ثانیه در کیلومترمربع است. در ایستگاه تنگ تکاب متوسط آبدهی رودخانه برابر ۲۵ مترمکعب بر ثانیه یا معادل ۸۰۶ میلیون مترمکعب در سال است که حداکثر و حداقل آبدهی به ترتیب برابر با ۴۰ و ۱۱ مترمکعب بر ثانیه، با ضریب تغییرات ۱۵ درصد است. ارتفاع رواناب معادل آورد سالیانه برابر با ۸۶۵ میلی‌متر است.

**زمین‌شناسی:** مطالعات ارزیابی منابع و قابلیت اراضی و آگاهی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سازند‌های زمین‌شناسی یکی از ارکان اصلی در تعیین استعداد و قابلیت زمین به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع اراضی در شرایط متفاوت کاربری و به‌ویژه حفاظت خاک و جلوگیری



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی حوضه آبخیز مارون و وضعیت پراکندگی سازندهای زمین‌شناسی

مستقیم: در HEC-HMS دو مدل رواناب مستقیم، برای تعیین رواناب مستقیم پیش‌بینی شده است، که شامل مدل هیدروگراف واحد و مدل موج کینماتیک می‌شود. در تحقیق حاضر از مدل هیدروگراف واحد در بهینه‌سازی و ارزیابی مدل استفاده شده است.

**تهیه مدل بارش:** مدل بارش شامل مجموعه اطلاعات مورد نیاز برای تعیین بارش‌های استفاده شده در شبیه‌سازی می‌شود که به صورت مرتبط با مدل حوضه عمل می‌کند. روش‌های مختلفی برای ورود داده‌های بارش به مدل از جمله روش وزنی مجذور عکس فاصله، روش وزنی دلخواه و روش هیتوگراف بارش ارائه شده است که در مطالعه حاضر از روش هیتوگراف بارش برای ورود داده‌های بارش به مدل استفاده شد. تاریخ و زمان شروع و پایان بارش - رواناب و گام‌های زمانی داده‌های مربوطه را تعریف می‌کند. ابتدا برای هر یک از بخش‌های مدل حوضه، مدل بارش و شاخص‌های کنترل مربوطه به مدل معرفی شده و سپس مدل اجرا شد. به این ترتیب، برای محاسبه میزان تلفات و آب پایه به ترتیب از روش شماره منحنی و ثابت ماهیانه استفاده شد. مقدار رواناب مستقیم نیز بر اساس روش هیدروگراف واحد (SCS) تحلیل شد و برای روندیابی سیلاب در مقاطع مختلف رودخانه از روش روندیابی هیدرولوژیکی ماسکینگام استفاده شد. داده‌های هواشناسی با مؤلفه مدل هواشناسی تحلیل

#### مدل HEC-HMS

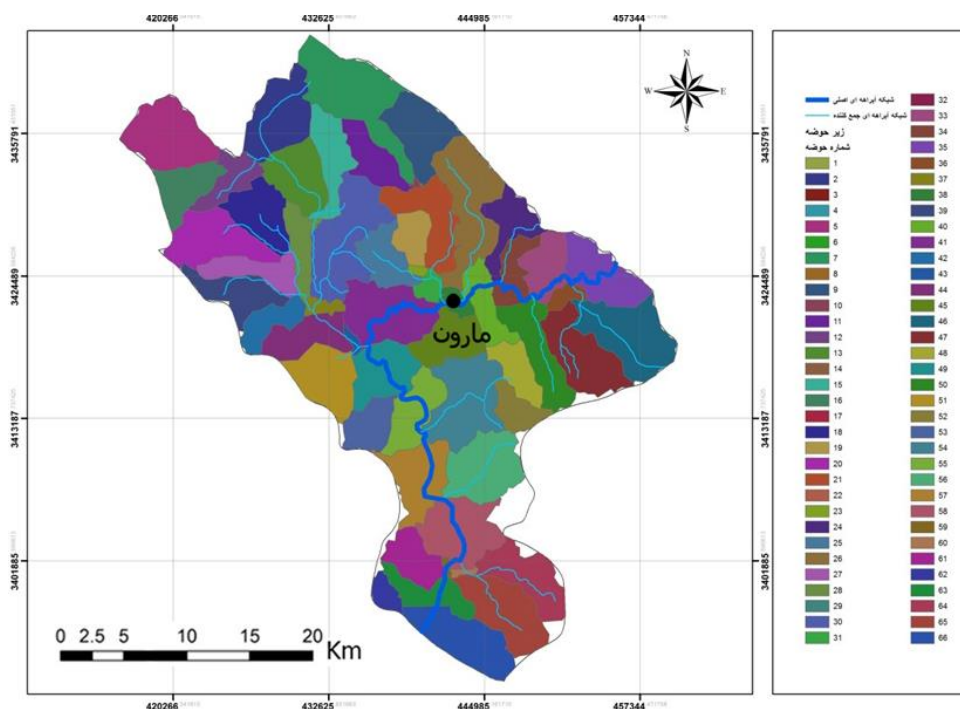
اجرای پروژه‌ها با مدل HEC-HMS با ایجاد حداقل یک مدل حوضه، یک مدل هواشناسی و یک مشخصه کنترل امکان‌پذیر است. در مدل حوضه پس از معرفی المان‌های هیدرولوژیکی، در هر زیرحوضه سه بخش تلفات، رواناب مستقیم و آب پایه تعیین شد. مدل حوضه پارامترها و داده‌های مرتبط با عناصر هیدرولوژیکی حوضه است. عناصر مختلفی از جمله زیرحوضه، بازه، محل اتصال آبراهه‌ها، مخازن، چشمه، و محل انحراف آب در مدل قرار گرفته‌اند. در مطالعه حاضر با توجه به وضعیت حوضه آبخیز مارون، فقط سه عنصر زیرحوضه، بازه و اتصال در نظر گرفته شده است. برای هر یک از زیرحوضه‌ها مقادیر CN، میزان هدرفت اولیه، درصد اراضی نفوذناپذیر و زمان تأخیر تعریف شد. در ضمن، برای هر بازه ضریب  $X$  و  $K$  محاسبه شده و به مدل وارد شد. (۱) انتخاب مدل تلفات حوضه: در این بررسی از مدل تلفات شماره منحنی استفاده شد. مدل شماره منحنی روشی ساده و مناسب برای پیش‌بینی است و به پارامتری که به گروه هیدرولوژیکی خاک، چگونگی استفاده از اراضی و رطوبت پیشین خاک، بستگی دارد. این مدل به طور وسیعی در آمریکا پذیرفته شده و خصوصیات محیطی و داده‌های مربوط به آن به آسانی در دسترس است. (۲) مدل رواناب



### تهیه اطلاعات مدل

به منظور شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک حوضه و تبدیل داده‌های بارش به رواناب در مرحله اول، نقشه توپوگرافی از حوضه مطالعه شده تهیه شد. این نقشه با استفاده از نقشه توپوگرافی به مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح تهیه شد. سپس، بر اساس موقعیت حوضه نسبت به شناسایی ایستگاه‌های باران‌سنجی داخل و اطراف حوضه اقدام شد که در مجموع، ۲۴ ایستگاه باران‌سنجی شناسایی شد. با استفاده از نقشه‌های رقومی به مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ مرز هیدرولوژیکی آبخیز تعیین و شبکه آبراهه‌های آبخیز استخراج شد. با توجه به وضعیت زهکشی و به منظور افزایش دقت در مدل‌سازی هیدرولوژیک، آبخیز مطالعه شده به چندین واحد هیدرولوژیک تقسیم شد. در ادامه، پارامترهای مورد نیاز فیزیوگرافی برای انجام تحقیق، در هر یک از واحدهای هیدرولوژیک، محاسبه شد. با توجه به روش‌های انتخابی در این مدل اقدام به شناسایی ورودی‌های مدل شد. برای تبدیل بارش به رواناب از روش شماره منحنی یا CN استفاده شد. به منظور برآورد زمان‌های تمرکز و تأخیر حوضه به عنوان دو متغیر دیگر مورد نیاز برای اجرای مدل از روش کریچ استفاده شد. در شکل ۵ مرزهای هیدرولوژیک زیرحوضه‌های حوضه آبخیز مارون به تعداد ۶۶ زیرحوضه، ارائه شده است.

می‌شود. این مؤلفه شامل اطلاعات بارندگی و تبخیر-تعرق و ذوب برف می‌شود. با توجه به اینکه داده‌های بارش رواناب انتخاب شده برای مدل به صورت رگبارهای کوتاه‌مدت است، بنابراین میزان تبخیر و تعرق در محدوده مطالعاتی تأثیر چندانی بر شبیه‌سازی بارش رواناب ندارد. برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS ابتدا نقشه‌های توپوگرافی، پوشش گیاهی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک در محیط ArcGIS9.3 تهیه شد. در مرحله بعد، از تلفیق نقشه کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک نقشه CN حوضه به دست آمد. سپس، با ورود مقادیر لازم در بخش تلفات و در بخش رواناب مدل اجرا شد. در بخش رواناب روش SCS، در بخش تلفات در هر مرحله بعد کالیبراسیون مدل با استفاده از چندین واقعه که در عرصه ثبت شده است، بررسی شد. در این فرایند ابتدا مقدار اولیه‌ای برای هر پارامتر در نظر گرفته شد و تابع هدف مشخص شد. سپس، در تکرارهای بعدی مقادیر پارامترها در دامنه خود آن قدر توسط کاربر تغییر داده شد تا تابع هدف به کمترین مقدار خود برسد. اعتباریابی مدل نیز بر اساس واقعه‌ای که در کالیبراسیون دخالت داده نشده بود، انجام گرفت.



شکل ۵. مرزهای هیدرولوژیک زیرحوضه‌های حوضه آبخیز مارون

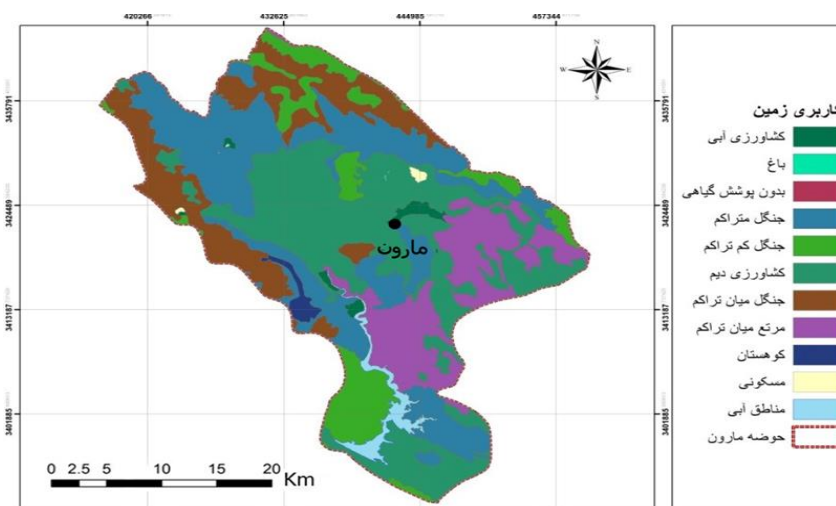
منطقه شد. به کمک خطوط توپوگرافی و استفاده از دستورالعمل تحلیل مکانی، نقشه مدل ارتفاع رقومی زمین (DEM) تهیه شد (شکل ۲).

به دلیل اینکه همواره یکی از عوامل مؤثر بر میزان رواناب در حوضه‌های آبخیز، نوع کاربری فعلی اراضی موجود در حوضه آبخیز است و به دلیل اینکه عامل کاربری یکی از عوامل تعیین میزان شماره منحنی است، در نتیجه نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز در نرم‌افزار ARC GIS9.3 شد. شکل ۶ نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز مارون را نشان می‌دهد.

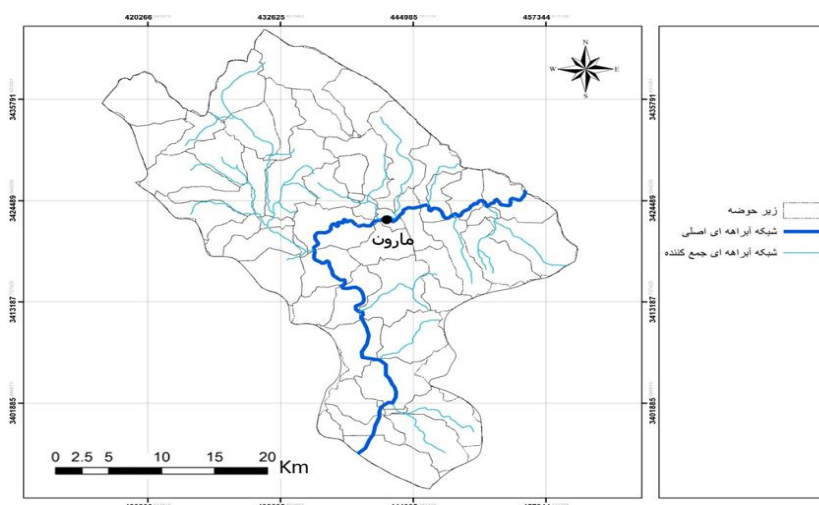
یکی از مراحل ضروری، تهیه نقشه رودخانه‌های حوضه آبخیز مارون است. بنابراین، نقشه شبکه جریان حوضه آبخیز مارون با استفاده از نرم‌افزار HEC-GeoHMS در این مرحله تهیه شد که در شکل ۷ نشان داده شده است.

برای تهیه نقشه CN حوضه از تلفیق نقشه‌های پوشش گیاهی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و کاربری اراضی استفاده شد و در نهایت، مقدار CN وزنی هر یک از زیرحوضه‌ها از نقشه نهایی استخراج شد. کلیه آبراهه‌های اصلی و فرعی موجود در حوضه و زیرحوضه‌ها از روی نقشه‌های توپوگرافی به عنوان لایه دیگر از مشخصات فیزیکی حوضه آبخیز رقومی تهیه شد. طول و شیب آبراهه‌های اصلی در هر زیرحوضه و حوضه اصلی، مساحت هر یک از زیرحوضه‌ها و سایر پارامترهای مورد نیاز تعیین شد.

**نقشه رقومی ارتفاعی منطقه (DEM):** نقشه رقومی ارتفاع (DEM) یکی از نقشه‌های پایه در GIS است که به طور وسیعی استفاده می‌شود. نقشه خطوط میزان منطقه به کمک انجام عملیات میان‌یابی تبدیل به نقشه (DEM)



شکل ۶. نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز مارون



شکل ۷. نقشه زیرحوضه‌های همراه با شبکه هیدروگرافی حوضه آبخیز مارون



نیاز به ایجاد حداقل یک مدل حوضه، یک مدل هواشناسی و یک مشخصه کنترل است. در مدل حوضه پس از معرفی المان‌های هیدرولوژیکی، در هر زیرحوضه سه بخش تلفات، رواناب مستقیم و آب پایه تعیین شد. به این ترتیب، برای محاسبه میزان تلفات و آب پایه به ترتیب از روش شماره منحنی و روش ثابت ماهیانه استفاده شد. مقدار رواناب مستقیم نیز بر اساس روش هیدروگراف واحد SCS تجزیه و تحلیل شد. همچنین، برای روندیابی سیلاب در مقاطع مختلف رودخانه، از روش روندیابی هیدرولوژیکی ماسکینگام استفاده شد. داده‌های هواشناسی با مؤلفه مدل هواشناسی تحلیل می‌شود و این مؤلفه شامل اطلاعات بارندگی است. با توجه به اینکه داده‌های بارش - رواناب انتخاب شده برای مدل به صورت رگبارهای کوتاه مدت است، بنابراین میزان تبخیر و تعرق در محدوده مطالعاتی نقش چندانی در شبیه‌سازی بارش - رواناب ندارد. همچنین، سیلاب‌های انتخاب شده هیدروگراف با تاج واحد است. از مجموع ۱۸۵ سیل ثبت شده از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۸ در ایستگاه هیدرومتری تنگ تکاب که در محل خروجی حوضه واقع شده است. ۷۳ سیل قرائت اشل انجام شده است از میان سیلاب‌ها فقط ۳۸ رویداد بارش‌های فراگیر در کل منطقه داشته و در ایستگاه تنگ تکاب برای آن هیتوگراف وجود داشت که ۲ رویداد برای واسنجی و ۳ رویداد برای اعتبارسنجی مدل HEC-HMS استفاده شده است. در مدل حوضه آبخیز شماتیکی نرم‌افزار HEC-HMS المان‌های حوضه آبخیز مارون شامل دو زیرحوضه، سه بازه و دو خروجی تعریف شده است. با تعریف عناصر بازه و زیرحوضه به عنوان طرح شماتیک حوضه آبخیز باید مقادیر پارامترهای این عناصر برای ورودی مدل مشخص شود.

#### نتایج واسنجی مدل HEC-HMS

چون هدف از اجرای مدل، تولید باران‌نگار خروجی حوضه مطابق با شرایط واقعی است، باید بتوان تمام فراسنج‌های مدل را برای حوضه مطالعه شده به طور دقیق محاسبه کرد تا نتایج به دست آمده بیشتر به مقادیر واقعی تطبیق داده شوند. مدل HEC-HMS پارامترهایی دارند که به وسیله اندازه‌گیری یا مشاهده نمی‌توان آنها را تعیین کرد. بنابراین، برای اینکه بتوان مقادیر مناسبی را برای این گونه پارامترها به دست آورد، نیاز به واسنجی مدل است. عمل

**ورود اطلاعات به مدل (HEC-RAS):** به منظور تأمین اهداف مطالعه حاضر و ضرورت دستیابی به پهنه‌های سیلابی از الحاقیه HEC-GeoRAS در محیط GIS برای آماده‌سازی و ورود اطلاعات به نرم‌افزار HEC-RAS استفاده شد. پس از انجام تحلیل هیدرولیکی جریان در HEC-RAS نمایش پهنه‌های سیلابی دوباره در محیط GIS و با نرم‌افزار ArcView انجام شد. به این منظور، ابتدا نقشه نقطه‌ای مربوط به نقاط برداشت شده از مقاطع عرضی رودخانه به عنوان نقاط معرف بستر و دشت سیلابی تهیه شد. در مرحله بعد با استفاده از آن نقشه TIN بازه مورد مطالعه تهیه شد. سپس، با استفاده از امکانات موجود در الحاقیه HEC-GeoRAS و نقشه‌های تهیه شده اطلاعات هندسی مربوط به بازه شامل مسیر جریان، ساحل چپ و راست، مقاطع عرضی در قالب لایه‌های اطلاعاتی جدید در GIS معرفی و برای تجزیه و تحلیل هیدرولیکی به مدل HECRAS معرفی شد. ضریب زبری هر یک از مقاطع و ضرایب مربوط به همگرایی و واگرایی کانال برای تمام مقاطع عرضی نیز پس از تعریف وضعیت هندسی بازه تعیین شد [۲۲].

#### ورود اطلاعات مربوط به دبی جریان و شرایط مرزی در مقاطع عرضی

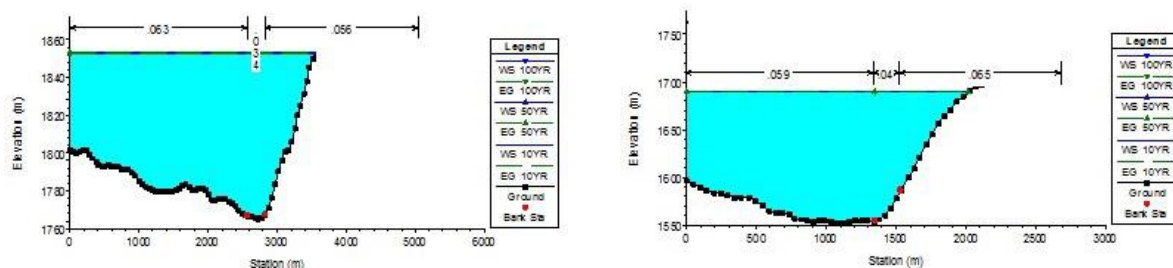
در مطالعه حاضر پهنه‌های سیلابی مربوط به سه دوره بازگشت ۵، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال محاسبه می‌شود. به این منظور، از اطلاعات مربوط به جریان و دبی اوج هر یک از دوره بازگشت‌های یادشده به مدل معرفی شد و شرایط مرزی جریان برای جریان دائمی و رژیم مختلف وارد مدل شد که برای تعریف شرایط مرزی در مقطع بالادست و پایین دست از روش عمق نرمال استفاده شد [۱۴]. در این مرحله کلیه لایه‌هایی که در محیط Arcview تهیه شده است، مانند مسیر اصلی جریان، سواحل چپ و راست، مرزهای تعیین کننده، ناحیه سیلاب گیر و اطلاعات تکمیلی دیگر، به نرم‌افزار HEC-RAS معرفی می‌شود. پس از مدل کردن و اجرای برنامه، تراز سطح آب در هر مقطع به دست می‌آید. مرحله آخر، انتقال این نتایج از مدل هیدرولیکی HEC-RAS به نرم‌افزار Arcview است. در این مرحله با استفاده از داده‌های موجود، عمل پهنه‌بندی سیلاب برای سیلاب با دوره بازگشت‌های یادشده صورت می‌گیرد. برای شبیه‌سازی بارش - رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS

HEC-GeoRAS برای آماده کردن ویژگی‌های هندسی بازه مطالعه شده استفاده شد. سپس، خروجی‌های مدل HEC-GeoRAS به منظور تحلیل جریان وارد مدل HEC-RAS شد و محاسبات هیدرولیکی انجام شد. شکل ۱۱ نقشه TIN حوضه آبخیز مارون و بازه‌های آن به عنوان پایه استخراج مقاطع عرضی را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ نقشه پهنه‌بندی سیلاب با دوره بازگشت‌های ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ سال را نشان می‌دهد.

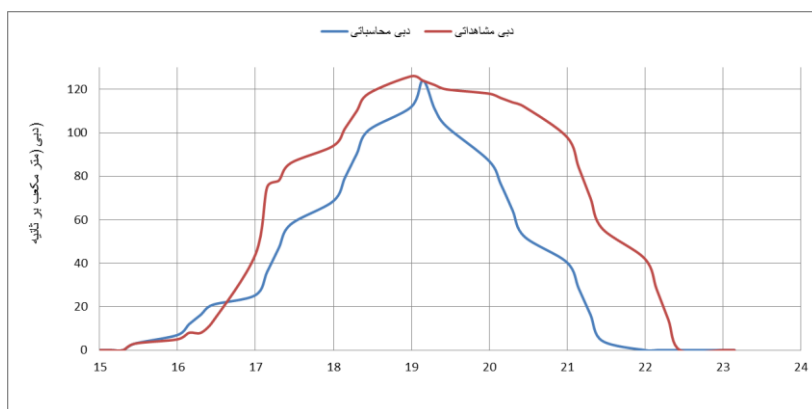
واسنجی زمانی میسر می‌شود که داده‌های واقعی باران و جریان موجود باشد. در نرم‌افزار HEC-HMS بعد از تعیین ورود تمامی المان‌ها و مقادیر پارامترهای مورد نیاز المان‌ها، اقدام به اجرای مدل شد. شکل ۹ نیز مقادیر مشاهداتی و محاسباتی را در رگبارهای مد نظر برای اعتبارسنجی ارائه کرده است.

**نتایج مربوط به شبیه‌سازی رفتار هیدرولیک**

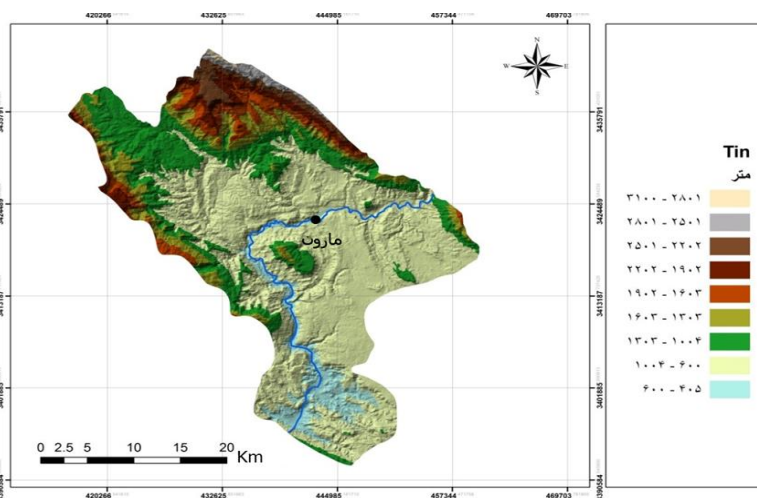
همان گونه که گفته شد، در مطالعه حاضر از الحاقیه



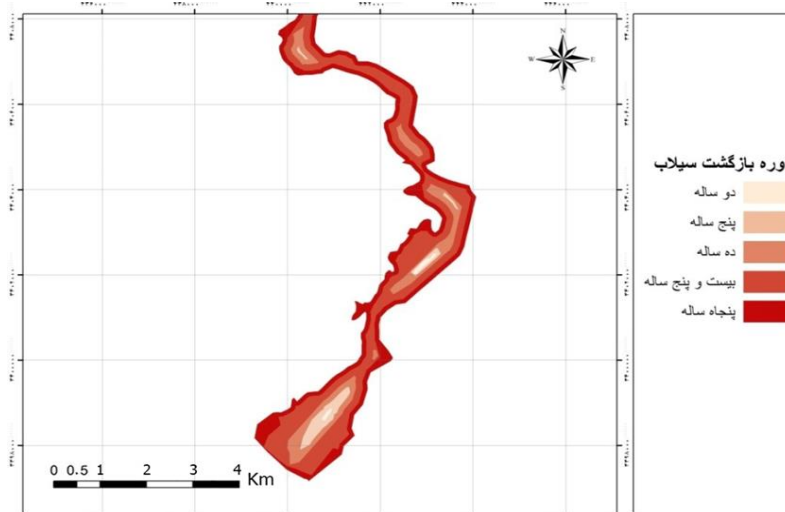
شکل ۸. نمودار مقاطع عرضی شبیه‌سازی شده خروجی نرم‌افزار در دوره بازگشت‌های ۵ تا ۱۰۰ سال رودخانه مارون



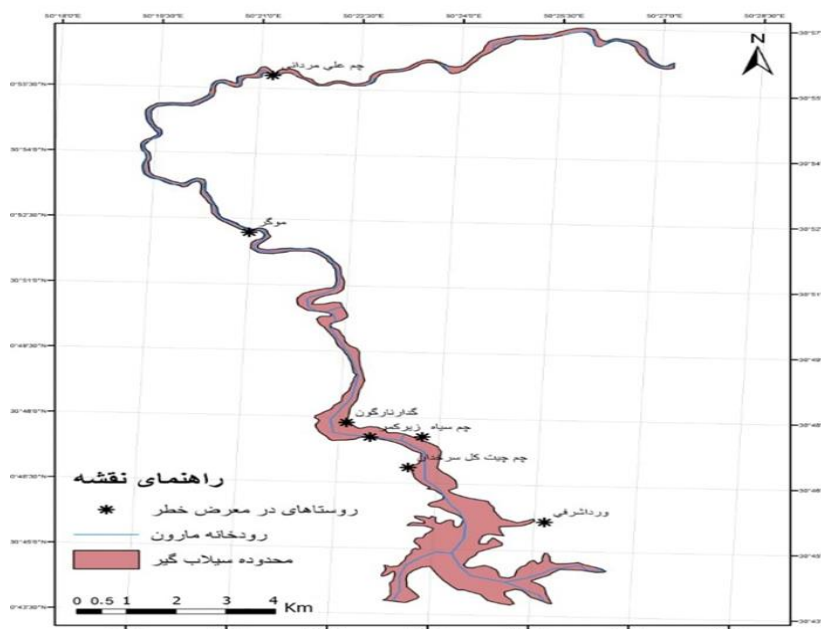
شکل ۹. هیدروگراف سیلاب مشاهداتی و محاسباتی برای رویداد رگبار در سال ۱۳۹۸



شکل ۱۰. نقشه TIN حوضه آبخیز مارون استخراج شده از GIS



شکل ۱۱. نقشه پهنه‌بندی سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف در رودخانه مارون



شکل ۱۲. موقعیت روستاهایی که در دوره بازگشت ۵۰ ساله سیلاب آسیب پذیرند

جدول ۱. مساحت سیل‌خیزی با دوره‌های بازگشت مختلف

تعداد روستای آسیب‌دیده	مساحت سیل‌خیزی (هکتار)	دوره بازگشت (سال)
۲	۱۲۶۵	۵
۳	۱۶۵۱	۱۰
۵	۲۳۳۴	۲۵
۹	۴۴۵۰	۵۰

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد در دوره‌های بازگشت ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله وسعت منطقه سیل‌گیر به ترتیب برابر با ۵۰، ۱۵۴، ۵۶۷ و ۱۰۳۰ هکتار است. بر اساس میزان خسارت وارد شده به ازای سیل با دوره بازگشت مختلف ملاحظه شد که با افزایش دوره بازگشت، وسعت منطقه سیل‌گیر افزایش یافته و میزان خسارت وارد شده نیز افزایش می‌یابد و این ارقام با همپوشانی نقشه‌های کاربری اراضی با نقشه‌های پهنه‌بندی سیل استخراج شده است.

## نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر مؤید قابلیت مدل‌سازی سامانه هیدرولوژیکی HEC- RAS در پیش‌بینی پهنه‌بندی سیل بوده و نرم‌افزار قدرتمندی در پیش‌بینی و هشدار است. پهنه بندی سیلاب با استفاده از مدل‌های ترکیبی GIS و HEC- HMS و HEC- RAS نتایج بسیار نزدیک به واقعیت را نشان می‌دهد. با همپوشانی نقشه‌های کاربری اراضی با نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب میزان خسارت وارد شده به ازای سیل با دوره بازگشت مختلف استخراج شده و مشاهده شد با افزایش دوره بازگشت، وسعت منطقه سیل‌گیر افزایش و میزان خسارت وارد شده افزایش می‌یابد. با توجه به ضریب تبیین  $(R^2)$  ۰/۸۵ و ۰/۸ و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) ۱۱/۲ و ۱۵/۲۵ در سیلاب ارزیابی می‌توان نتیجه گرفت که مدل توانایی شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب در حوضه مطالعه شده را دارد. میزان حساسیت مدل HEC-HMS به پارامترهای شماره منحنی، تلفات و زمان تأخیر برای سیل ۹۸، به ترتیب ۰/۱، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ بوده، بنابراین هیدروگراف خروجی حوضه به شماره منحنی حساسیت بیشتری دارد. نتایج حاصل از واسنجی ضرایب هیدرولیکی و هیدرولوژیکی در زیرحوضه‌ها نشان می‌دهد میزان CN از ۶۳ تا ۶۷ و مطابق پهنه‌بندی سیل با دوره بازگشت ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ سال که در نقشه‌های خروجی در Arc GIS نمایش داده شد، تلفات اولیه از ۹ تا ۱۴ در تغییر است.

## تشکر و قدردانی

به این وسیله از شرکت آب منطقه‌ای استان کهگیلویه و بویراحمد که جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز پژوهش حاضر با حمایت و پشتیبانی آن شرکت صورت گرفت، تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع

- [3]. Karimi, M. Malekinejad, H. Abghari, H. Azizian, M. Evaluation of Different Methods of Fluid Hydrograph Simulation Using HEC-HMS. (Case Study: Chehelzai Watershed). Iranian Journal of Water Research, 2011; 5 (9): 1-6. [Persian].
- [4]. Benavides, J. A., Pietruszewski, B., Kirsch, B and Bedient, Ph. Analyzing Flood Control Alternatives for the Clear Creek Watershed in A Geographic Information System Framework. World Water and Environmental Resources Congress. 2011. 340pp.
- [5]. Chidaz, A. Mohseni, M. VafaKah, M. Evaluation of HEC-HMS Model for Estimation of Flood Hydrograph in Kasilian Watershed. Journal of Watershed Research. 2009; 4 (3): 54-63. [Persian].
- [6]. Roshan, H. Vahabzadeh, Gh, Soleimani. K, Farhadi. R. Simulation of River Hydraulic Behavior Using HEC-RAS Model in GIS (Case Study: Bashar River, Kohgiluyeh and Boyerahmad Province). Watershed Management Research; 2013. 4 (7): 70-84. [Persian].
- [7]. Farazjo, h. Investigation and change of vegetation on flood hydrograph. Golestan Dam Watershed. Using (GIS) and HEC -HMS model. MSc thesis. Gorgan Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources. 2003; 176 p. [Persian].
- [8]. Sadeghi, S. Jalali Rad, R. Alimohammadi Sarab, AS. Flood Zoning Using Software (HEC-RAS) and Geographic Information System (Case Study: Darabad Urban Watershed, Tehran), Caspian Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources. 2003; 2: 34-47. [Persian].
- [9]. Khaliqi Cigaroodi, Sh. Investigation of land use change on hydraulic properties of surface waters. PhD Thesis, Faculty of Natural Resources, University of Tehran. 2005. 224 p. [Persian].
- [10]. Seyed Cablis, K. Akhund ali, A. Evaluation of Rain Loss Methods in Flood Hydrograph Simulation (Case Study: Casillian Basin). Water and Soil Journal. 2011. 23 (4). 65. [Persian].
- [11]. Azeri, M. Tellurie, A. Evaluation of the Impact of Watershed Management on Flood Properties Using Integration of HEC-HMS and HEC-RAS Models in GIS (Case Study: Jagark Watershed). Journal of Watershed Sciences and Engineering. 2011; 5 (15): 69-72. [Persian].
- [12]. Noori, F. Bahmanesh, J. Mohammad Nejad, B. Ziaei, H. Evaluation of WMS / HEC-HMS Model in Qorveh Basin Flood Forecasting. Journal of Soil and Water Conservation Research, 2012; 19 (4): 201-210. [Persian].
- [1]. Ilkhchi, A. Haj Abbasi, M. Jalalian, A. The effect of land use change on dryland production on runoff production. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. 2003 ;(4): 36-33. [Persian].
- [2]. Kumar Parhi, P. Flood Management in Mahanadi Basin using HEC-RAS and Gumbel's Extreme Value Distribution. Journal of the Institution of Engineers (India): 2018, 99, (4), Page 751-752.

- [13]. Darwishi, L, Brahmand, B. Flood Zoning Simulation Using HEC-RAS Model (Case Study: Karun River, Sayed Sharif Basin). 5th Iranian Water Resources Management Conference. Tehran. Iran Water Resources Science and Engineering Association. Shaheed Beheshti University. 2014. 342p. [Persian].
- [14]. Hosseinzadeh, A. Ahmadi, M. Flood zoning using HEC-RAS hydraulic model in GIS environment. 5th Iranian Hydraulic Conference. Kerman. Bahonar University of Kerman. 2004; 142-153. [Persian].
- [15]. Dolati, B. Lima, M. Flood zoning due to dam failure and its impact on downstream area using HEC-RAS software. 5th comprehensive flood management and engineering conference. Tehran. Ministry of Roads and Urban Planning - Ministry of Water Research Institute. Ministry of Natural Resources - Permanent Secretariat of the Conference. 2018. 452p. [Persian].
- [16]. Qomi, F. Sadghian, M. Flood Zoning Simulation Using HEC-RAS Model Case Study: Karun River Intermediate qir - Ahvaz Dam). Natural Resources Science and Technology, 2010; 5 (1): 105-116 [Persian].
- [17]. Rad, M. Vafa Khah, M. Gholam Ali Fard, M. Flood zoning using HEC-RAS hydraulic model downstream of Khorramabad watershed. Hazards of the Natural Environment. 2017. 7 (16): 211-226. [Persian].
- [18]. Zeraatkar, Z. Hasanpour, F. Birjand Urban Flood Simulation Using HEC-RAS and ARC-GIS Model. Watershed Research, 2016; 29 (3): 41-56. [Persian].
- [19]. Peyravi MR, Peyvandi A, Khodadadi A, Ahmadi Marzaleh M. Flood in the South-West of Iran in 2019; Causes, Problems, Actions and Lesson Learned. Bull Emerg Trauma. 2019; 7(2):199-200.
- [20]. Rajabizadeh, Y, Ayobzadeh, S, Zahiri, AS. Investigation of Golestan province flood in 2019-2020 and presenting its future control and management strategies. Ecohydrology, 2020; 6 (4): 921-942. [Persian].
- [21]. Final Report of the Watershed Research and Evaluation Research Plan for the preparation of Watersheds of Kohgiluyeh and Boyerahmad Province in 2005; 534p. [Persian].
- [22]. Ahmadpour, A. Mir Hashimi, S., Haghghat Joe, P. Prediction of daily runoff in Marun basin using HEC-HMS model. Water and Wastewater Science and Engineering, 2017; 4 (1): 4-13. [Persian].