

بررسی سیلاب شهری اهواز با استفاده از تلفیق تحلیل‌های مکانی و هیدرولوژیک در GIS و افزونه HEC-RAS

محمدصادق دنیاری^۱، محمدحسن وحیدنیا^{۲*}، شهرام بیک‌پور^۳

۱. کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و

تحقیقات، تهران

۲. استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۳. رئیس مرکز تحقیقات زمین‌شناسی پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۵/۱۳؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۱۰/۲۲)

چکیده

بررسی آمار و اطلاعات خسارت‌های سالانه ناشی از وقوع سیلاب‌ها در ایران بیانگر گستردگی صدمات ناشی از آن به منابع طبیعی است. استفاده از فناوری‌های اطلاعات مکانی و سنجش از دور می‌تواند در کاهش این خسارت‌ها و برنامه‌ریزی بهتر بسیار سودمند باشد. در پژوهش حاضر از این فناوری‌ها برای پهنه‌بندی سیلاب در رودخانه کارون و محدوده شهر اهواز استفاده شده است. پهنه‌بندی منطقه مطالعه شده با تلفیق مدل هیدرولیکی و نرم‌افزار ArcGIS از طریق الحاقیه HEC-Geo RAS در طول ۳۳ کیلومتر از این رودخانه صورت گرفت. به منظور استخراج مرز سواحل رودخانه در بازه شهری اهواز، از طبقه‌بندی نظارت‌شده و تصاویر ماهواره لندست ۸ استفاده شد. پس از معرفی اطلاعات هندسی رودخانه به مدل، مقدار ضریب زبری مانینگ برای بازه‌های مختلف تعریف و سپس، دوره بازگشت‌های ۲، ۵۰ و ۱۰۰ ساله محاسبه شد. بیشینه سرعت در دوره بازگشت‌های ۲، ۵۰ و ۱۰۰ ساله به ترتیب معادل ۲/۶، ۶/۱۵ و ۷/۲ متر بر ثانیه حاصل شد. به این معنا که در صورتی که سواحل رودخانه ساماندهی و دیوارسازی شده باشد، آب‌شستگی، فرسایش و رسوب‌گذاری اتفاق نمی‌افتد. در مقایسه با محدوده واقعی سیل، انطباق ۸۷ درصد در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله حاصل شد. تهیه سامانه‌های هشدار سیلاب بر اساس بارش‌های با دوره بازگشت بالا، دیواره‌سازی، ساحل‌سازی و ساماندهی رودخانه در مقاطع ناپایدار و فرسایش‌پذیر و اصلاح شیب بستر و لایروبی کانال در مقاطع مورد نیاز، از جمله راهکارهای اجرایی پیشنهادی برای ساماندهی رودخانه کارون هستند.

کلیدواژگان: پهنه‌بندی سیلاب، رودخانه کارون، GIS، سنجش از دور، ضریب مانینگ، HEC-RAS.

مقدمه

رودخانه‌ها به عنوان یکی از موهبت‌های جغرافیای طبیعی برای تأمین آب شرب، آبیاری کشاورزی، تولید برق، حمل‌ونقل رودخانه‌ای^۱ (مثل رودخانه کارون)، تهیه غذا و تجارت مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی ویژگی‌های رودخانه‌ها همانند ناآرامی، پویایی و دامنه گسترده آنها، که از کوهستان‌ها تا دشت‌ها ادامه می‌یابد، امکان حفاظت، کنترل، نظارت و تعیین حدود آنها را حتی در گستره قلمروی ملی به عنوان یک زیستگاه بسیار دشوار می‌سازد [۱]. تغییرات و جابه‌جایی‌هایی که بر اثر عوامل طبیعی یا مصنوعی در ظاهر فیزیکی رودخانه رخ می‌دهد، نتیجه منطقی واکنش سامانه رودخانه برای برقراری موازنه جدید بین عواملی مانند فرسایش و رسوب‌گذاری^۲ است. از این‌رو، انجام دادن اقدامات ساماندهی و دخالت در نظام رودخانه‌ای مستلزم شناخت قواعد خاص حاکم بر آن بوده و پیش‌بینی واکنش رودخانه قبل از هر اقدامی ضروری است. در این میان، به‌ویژه تغییرات رودخانه‌ای ناشی از ساخت سازه‌های آبی بسیار بااهمیت است. ساخت سازه‌های آبی در مسیر رودخانه موجب تغییر رژیم طبیعی رودخانه می‌شود و رودخانه برای انطباق و سازگاری مقاطع طولی و عرضی خود با شرایط جدید با رسوب‌گذاری یا فرسایش، وضعیت موجود را تغییر می‌دهد. در چنین شرایطی، عوامل مهم رودخانه‌ای از جمله شیب، تراز کف، عرض بستر و عمق جریان ممکن است تا رسیدن به وضعیت پایدار دستخوش تغییرات شود [۲].

اهداف مدل‌سازی جریان رودخانه‌ها، شامل بررسی تأثیر سازه‌های حفاظتی روی الگوی جریان، بررسی پایداری دیواره‌های رودخانه و عملکرد سازه‌های نصب‌شده بر دیواره رودخانه است. در کنار این موارد، درک و شناخت دقیق مکانیزم‌های انتقال رسوب به علت وجود سازه‌های هیدرولیکی، ارزیابی و بررسی تغییرات موضعی تراز بستر رودخانه به علت وجود سازه‌های هیدرولیکی، بررسی تغییرات دلتای رودخانه‌های جزر و مدی، شبیه‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری در خم رودخانه‌ها و بررسی تغییرات بستر بر اثر برداشت شن و ماسه در مطالعه طغیان رودخانه‌ها و وقوع سیل دارای اهمیت هستند. به

این‌منظور، استفاده از مدل‌های یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی بسته به اطلاعات اولیه موجود و اهمیت طرح امکان‌پذیر است [۳]. با توجه به اهمیت موضوع وقوع سیل در استان خوزستان، تحلیل مناطق سیل‌گیر و اتخاذ رویکردهای پیشگیرانه می‌تواند به جلوگیری از وقوع بحران در منطقه و یا دست‌کم کاهش اثرات آن کمک کند. این مسئله به موضوع اصلی تحقیق پیش رو تبدیل می‌شود و ارائه روشی مبتنی بر تحلیل‌های مکانی و هیدرولوژیکی در دستور کار قرار می‌گیرد.

پیشینه تحقیق

در این بخش به برخی از مهم‌ترین پژوهش‌های صورت‌گرفته در حوزه تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل و تحلیل‌های مکانی و هیدرولوژیکی مرتبط با اهداف این تحقیق پرداخته می‌شود. در پژوهشی اسماعیلی و حسونی‌زاده (۲۰۰۸) رفتار هیدرولیکی رودخانه کن چانچم استان ایلام را در مقابل سیلاب‌های احتمالی برای کاهش خسارت واردشده مورد مطالعه قرار دادند [۴]. آنها به‌منظور نمایش محدوده مطالعه‌شده و استخراج اطلاعات مورد نیاز در تحلیل هیدرولیکی، از نرم‌افزار HEC-RAS الحاقیه HEC-GeoRAS استفاده کردند.

افتخاری و همکاران (۲۰۱۰) نیز در پژوهشی مشابه، به‌منظور پهنه‌بندی خطر سیل و تعیین ضریب خطرپذیری نقاط روستایی حریم رودخانه گران‌رود از مدل HEC-GeoRAS استفاده کردند [۵]. آنها میزان تأثیر افزایش یا کاهش ضریب زبری مانینگ بر پهنه سیل و تراز سطح آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها بیانگر این بود که افزایش ضریب زبری، مهم‌ترین تأثیر روی پیش‌بینی پهنه سیل و ویژگی‌های جریان را دارد.

غفاری و امینی (۲۰۱۰) برای مدیریت ۴/۵ کیلومتر از دشت سیلابی قزل‌اوزن، اقدام به پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از مدل HEC-RAS کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد ۸۶ درصد از کل مساحت تحت تأثیر سیل ۲۰۰ ساله، مستعد سیل‌گیری توسط زیرسیل‌های ۲۵ ساله است [۶].

در همین راستا، کلاتری اسکوتی و همکاران (۲۰۱۴) با ارائه راه‌حلی برای استفاده از مدل هیدرولوژیکی ماد کلارک در محیط HEC-HMS در ایران و تهیه ورودی‌های مدل به تعیین شدت سیل‌خیزی، اولویت‌بندی و پتانسیل

مقاطع عرضی و هیدرولیک جریان، شبیه‌سازی شود. به کمک نتایج حاصل از شبیه‌سازی، جریان ناپایدار سری‌های زمانی دبی به دست آمد.

رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، نقشه پتانسیل سیلاب منطقه یاسوج را بررسی کردند و سپس، نتایج آن را با مدل هیدرولیکی HEC-RAS مورد مقایسه قرار دادند [۱۲]. این نقشه‌ها در پیش‌بینی سیلاب برای سناریوهای مختلف سیلاب در سال‌های آینده قابل استفاده خواهند بود. نتایج پژوهش یادشده نشان داد استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی در تهیه نقشه‌های پیش‌بینی‌کننده، همراه با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند.

چن و همکاران (۲۰۲۰) پاسخ هیدرولوژیک حوضه را نسبت به جریان‌های سیلابی مختلف بررسی کردند [۱۳]. آنها از مدل ارتفاع نسبی (REM)^۱ به جای نقشه‌های LiDAR^۲ برای تهیه نقشه کاربری اراضی و تعیین پلان و مقاطع عرضی سواحل رودخانه استفاده کردند. با بررسی روابط بین جریان‌ها و متغیرهای دشت، نشان داده شد که می‌توان از این روش برای مدیریت رودخانه از جمله تنظیم جریان، اثرات اکوسیستم و نیازهای احیای رودخانه سود برد. شرتا و همکاران (۲۰۲۰) به مقایسه مدل یک‌بعدی HEC-RAS و MIKE در توانایی پهنه‌بندی سیلاب پرداختند [۱۴]. مورفولوژی کانال و ویژگی‌های جریان برای دوره بازگشت مختلف هنگام مدل‌سازی گنجانده شده و داده‌های ثبت‌شده USGS برای کالیبراسیون مدل‌ها استفاده می‌شود. پژوهش یادشده بیان می‌دارد مدل HEC-RAS نسبت به مدل‌های مشابه نتایج دقیق‌تری برای پهنه‌بندی سیلاب‌ها به محققان ارائه می‌دهد.

هوتانو و همکاران (۲۰۲۰) از مدل یک‌بعدی HEC-RAS و تصاویر LiDAR برای تهیه نقشه پهنه‌بندی سیلاب استفاده کردند [۱۵]. آنها نتیجه گرفتند در صورتی که قدرت تفکیک مکانی تصاویر ماهواره‌ای مناسب باشد، امکان پهنه‌بندی سیلاب به کمک نرم‌افزار HEC-RAS با دقت کافی و هزینه بسیار کم وجود دارد. ضمن اینکه این نقشه می‌تواند شاخص بسیار مناسبی برای هشدار سیلاب به‌خصوص در نواحی شهری و روستایی باشد.

وقوع سیل در حوضه آبخیز قزل اوزن در استان آذربایجان شرقی پرداختند [۷].

در پژوهشی دیگر، یمانی و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه و پهنه‌بندی بالادست سد طالقان با استفاده از افزونه تحلیل هیدرولیکی HEC-RAS اقدام کردند [۸]. آنها به این منظور، از نقشه‌های رقومی ۱:۴۰۰، آمار دبی ایستگاه طالقان‌رود، اطلاعات مربوط به ویژگی پل‌های منطقه، ویژگی‌های مورفولوژی بستر و مقاطع عرضی که طی عملیات میدانی جمع‌آوری شده، استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد از کل درصد مستعد مساحت در قلمروی سیل ۲۰۰ ساله حدود ۸۸ درصد سیل‌گیری توسط سیل‌های با دوره بازگشت ۲۵ سال و کمتر از آن است، که بخش زیادی از اراضی کشاورزی و بخشی از سکونت‌گاه‌ها را شامل می‌شود.

در تحقیق دیگری شیخ علیشاهی (۲۰۱۶) با هدف تلفیق مدل هیدرولیکی HEC-RAS با نرم‌افزار GIS از طریق الحاقی HEC-GeoRAS به برآورد پهنه سیل در حوضه آبریز منشان یزد پرداخته است [۹]. در این مطالعه گستره سیلاب در اراضی حاشیه رودخانه برای سیلاب با دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال محاسبه شد. بررسی‌ها نشان داد پهنه سیلاب محاسبه‌شده دارای مساحت حدود ۹ کیلومتر شده است که با زمین‌های کشاورزی تلاقی دارد.

محرمزاده و خراسانیان (۲۰۱۷) نیز در تحقیقی به پهنه سیل در بازه‌های از رودخانه کشف‌رود در محدوده روستای صدرآباد در استان خراسان با تلفیق مدل هیدرولیکی HEC-RAS و GIS اقدام کردند [۱۰]. در این پژوهش با استفاده از نقشه توپوگرافی، گستره سیلاب در اراضی حاشیه رودخانه برای سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ ساله تعیین شده است. مشاهده شد که تلفیق سیستم‌های GIS با مدل هیدرولیکی HEC-RAS در تحلیل مناطق سیل‌گیر باعث تسهیل محاسبات و کاهش عملیات میدانی است.

مختاری و همکاران (۲۰۱۷) پهنه‌بندی جریان سیلابی و غیر سیلابی در رودخانه مربوط به مناطق خشک و نیمه‌خشک را با مدل HEC-RAS و HEC-GeoRAS شبیه‌سازی کردند [۱۱]. آنها رودخانه بن رود در حوضه آبخیز قمصر را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه برای تهیه نقشه‌های سیل‌گرفتگی باید کانال رودخانه و مورفولوژی آن به‌منظور استخراج پارامترهای سه‌بعدی

1. Relative Elevation Model
2. Light Detection and Ranging

ماهورهای برای پهنه‌بندی سیلاب در رودخانه کارون در شهر اهواز استفاده می‌شود. برای این منظور، پارامترهای هیدرولیکی وارد مدل HEC-RAS می‌شود و سپس، به کمک افزونه HEC-GeoRAS پهنه‌بندی منطقه مطالعه شده در طول ۳۳ کیلومتر از این رودخانه صورت می‌گیرد. HEC-RAS یک برنامه رایانه‌ای است که هیدرولیک جریان آب در رودخانه‌های طبیعی و سایر کانال‌ها را مدل‌سازی می‌کند [۱۸]. به خلاف نسخه‌های اولیه که تنها مدل‌سازی یک‌بعدی را امکان‌پذیر می‌ساخت، در نسخه‌های جدید امکان مدل‌سازی دوبعدی، سه‌بعدی و همچنین، جریان رسوب‌ها را نیز ممکن می‌سازد. در حقیقت، مرکز مهندسی هیدرولوژیک^۱ (HEC) مدلی با نام سیستم تحلیل رودخانه^۲ (RAS) توسعه داد که با توجه به جامع بودن این مدل نرم‌افزار HEC-RAS شکل گرفت [۱۸]. این مدل بر اساس اطلاعات مقاطع طولی و عرضی رودخانه، اطلاعات دبی، موانع موجود مانند پل‌ها و سازه‌ها و ضریب زبری و غیره تشکیل می‌شود. محاسبات اصلی مدل بر اساس حل معادله انرژی یک‌بعدی است. افت انرژی با استفاده از اصطکاک (رابطه مانینگ) و ننگ‌شدگی/بازشدگی، ارزیابی می‌شود. HEC-GeoRAS نیز در واقع تجسم و ویرایش دوبعدی و سه‌بعدی داده‌ها با نرم‌افزار HEC-RAS است و برای مطالعات مهندسی کنترل سیل و کاهش سیل استفاده می‌شود [۱۹]. در حقیقت، این افزونه تبادل داده‌های مکانی با ArcGIS و تهیه نقشه را امکان‌پذیر می‌سازد. نرم‌افزار الحاقی HEC-GeoRAS مجموعه‌ای از روش‌ها، ابزارها و خدمات برای پردازش داده‌های مکانی در ArcGIS با استفاده از یک رابط گرافیکی کاربر است. رابط کاربر امکان آماده‌سازی داده‌های هندسی برای ورود به HEC-RAS و پردازش نتایج شبیه‌سازی استخراج شده از HEC-RAS را می‌دهد. شکل ۱ مراحل اجرایی تحقیق را نشان می‌دهد. ابتدا تصاویر ماهواره‌ای به کمک ماهواره لندست ۸ و با هدف تعیین نقشه کلی رودخانه کارون و نوع پوشش منطقه هدف دریافت می‌شود. سپس، این تصویر به روش طبقه‌بندی ISODATA کلاس‌های کاربری منطقه را نشان می‌دهد [۲۰]. ISODATA یک روش نظارت نشده است

دسالگن و مولو (۲۰۲۱) در مطالعه خود برای تهیه نقشه مناطق سیلابی در امتداد رودخانه Fetam از GIS و HEC-RAS استفاده کردند [۱۶]. در این تحقیق، با استفاده از داده‌های گذشته در سواحل رودخانه‌ها و انتشار سیل‌های قبلی در کنار داده‌های توپوگرافی، نقشه‌هایی برای نشان دادن مناطق وقوع سیل تهیه شد. آنها نشان دادند مناطق ساخته‌شده و مزارع کشاورزی که در امتداد ساحل رودخانه واقع شده‌اند، بسیار مستعد سیل هستند.

مونا و همکاران (۲۰۲۱) وقوع سیلاب در کشور بنگلادش را مورد مطالعه قرار دادند [۱۷]. برای این منظور، از مقادیر انحنا (CN)، رواناب مستقیم منطقه و حداکثر مقدار تخلیه برای دوره‌های مختلف بازگشت استفاده کردند. آنها داده‌های هندسی و تخلیه پیک را به مدل HEC-RAS وارد کردند تا عمق سیل و گسترش سیل به دست آید. در نهایت، شبیه‌سازی HEC-GeoRAS به نقشه دشت سیلابی منجر شد. نتایج نشان داد در صورت طغیان رودخانه، بر اساس نقشه، ۶/۳۴ درصد از کل منطقه مورد مطالعه برای ۲ سال دوره بازگشت را پوشش می‌دهد.

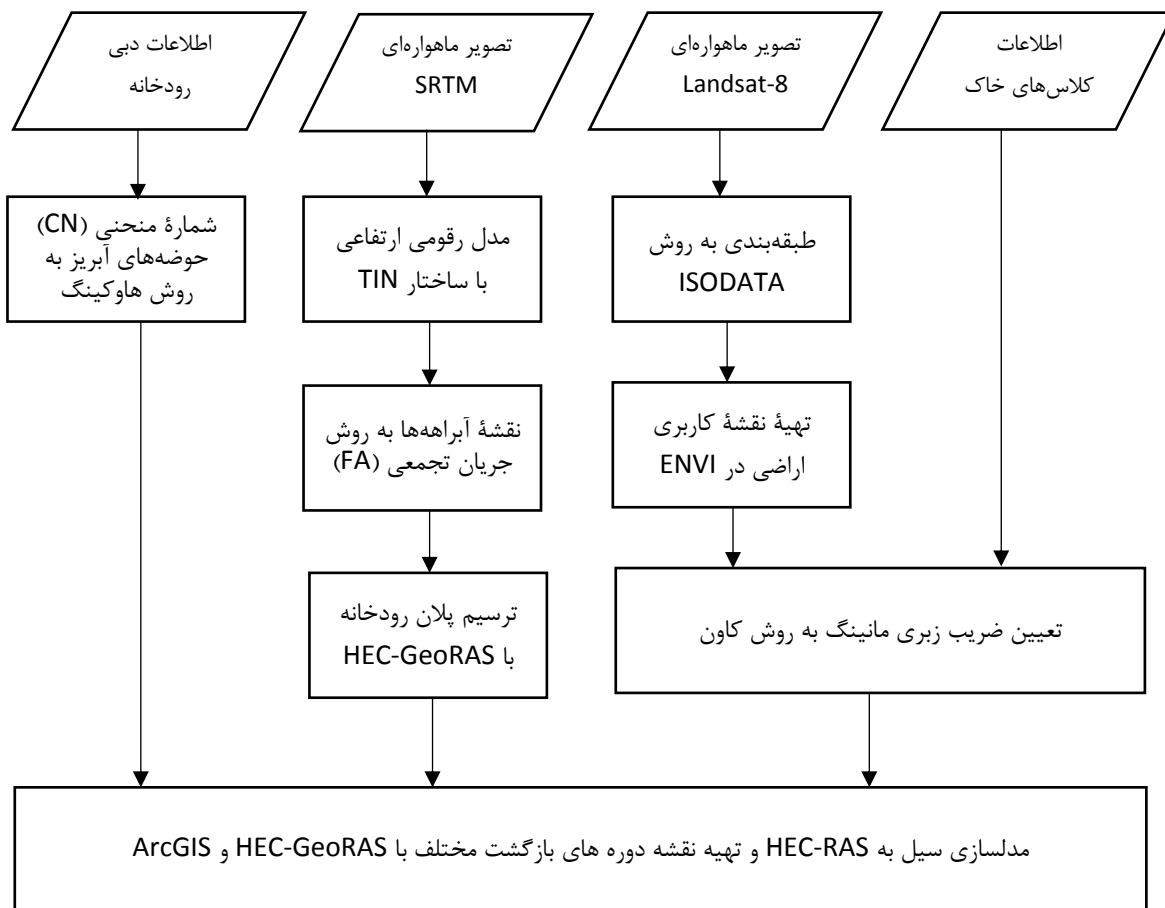
هدف از مطالعه حاضر، بررسی و پایش سیلاب‌های رودخانه کارون به کمک مدل‌های مکانی و هیدرولیکی و به منظور جلوگیری از بروز خسارت‌های سیل در محدوده مورد نظر است. از جمله نوآوری‌ها و مشارکت‌های اصلی این مطالعه نسبت به سایر پژوهش‌های مطرح شده می‌توان به مدل سیل با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای برای تعیین محدوده رودخانه و کاربری اراضی و HEC-RAS برای مدل‌سازی هیدرولیک سیلاب در بازه‌های مختلف زمانی اشاره کرد. همچنین، به‌رغم اهمیت موضوع سیل در استان خوزستان، تا کنون مطالعات اندکی با شیوه‌های مهندسی مطرح شده صورت گرفته است. نتایج چنین پژوهش‌هایی مسئولان امر را قادر می‌سازد تا بتوانند پیش از احداث سازه‌ها و زمین‌های کشاورزی کناری رودخانه، بهترین تصمیم‌های پیشگیرانه را برای کاهش صدمات ناشی از سیلاب‌های احتمالی اتخاذ کنند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از سیستم اطلاعات مکانی (GIS) و تحلیل‌های مکانی هیدرولوژیکی به همراه داده‌های تصاویر

تقسیم کلاس‌ها را انجام می‌دهد. گروه‌های هیدرولوژی خاک نیز به صورت میدانی و بر اساس اطلاعات موجود از منطقه تعیین شدند.

که در این پژوهش از همه ۱۱ باند تصویر ماهواره‌ای برای انجام طبقه‌بندی در آن استفاده شد. این روش نیاز به معرفی تعداد کلاس‌ها ندارد و در صورت لزوم، تلفیق یا



شکل ۱. فلوچارت روش تحقیق

هیدرولیکی اطمینان بیشتری داشت. در پژوهش حاضر به منظور برآورد ضریب زبری مانینگ، از روش تجربی کاون استفاده شده است [۲۲]. این روش با ارائه چندین فاکتور اصلی تأثیرگذار بر ضریب زبری، رابطه‌ای را برای برآورد n پیشنهاد کرده است که عبارت است از (رابطه ۱):

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5 \quad (1)$$

در رابطه ۱ n_0 ضریب مانینگ پایه بر اساس دانه‌بندی موارد تشکیل‌دهنده جدار آبراهه و یا سیلاب دشت است. n_1 ضریب مانینگ تعدیلی برای درجه بی‌نظمی سطح آبراهه و یا سیلاب دشت است. n_2 ضریب مانینگ تعدیلی برای تغییرات مقاطع عرضی است. n_3 نشان‌دهنده ضریب مانینگ تعدیلی برای موانع آبراهه اصلی و سیلاب دشت

اطلاعات نوع کاربری و اطلاعات کلاس‌های هیدرولوژی خاک که از منطقه موجود بودند، برای تعیین ضریب زبری مانینگ استفاده شدند. ضریب زبری مانینگ یکی از پارامترهای مهم در مدل HEC-RAS است. در هیدرولیک رودخانه، عوامل متعددی در سرعت، عمق و نیروی تنش آب مؤثرند که از آن جمله می‌توان به ضریب زبری هیدرولیکی رودخانه یا ضریب مانینگ^۱ اشاره کرد [۲۱]. ضریب زبری هیدرولیکی رودخانه که به اختصار تحت عنوان «ضریب زبری» یاد می‌شود، به درجه مقاومت در مقابل جریان گفته می‌شود. در برآورد این پارامتر هرچه دقت بیشتری صورت پذیرد، می‌توان به نتایج محاسبات

1. Manning Coefficient

جدول‌های تعیین ضرایب، از رابطه کاون ضریب زبری به دست می‌آید. نمونه‌ای از اطلاعات کمکی برای برآورد پارامترهای روش کاون با توجه به ویژگی‌های منطقه در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

است. n4 ضریب مانینگ تعدیلی برای پوشش گیاهی آبراهه اصلی و سیلاب دشت است. m نیز ضریب اصلاحی بر اساس درجه پیچان رودی آبراهه اصلی است. در این مطالعه با استفاده از اطلاعات دانه‌بندی موجود از منطقه و

جدول ۱. جدول چگونگی برآورد پارامترهای مربوط به روش کاون

مقدار پارامتر	پارامتر	ردیف
n0 مقدار	مواد بستر	
۰/۰۲	خاک	۱
۰/۰۲۵	سنگ	۲
۰/۰۲۴	شن ریز	۳
۰/۰۲۵	شن درشت	۴
n1 مقدار	درجه همواری در سطح بستر	
۰	صاف	۱
۰/۰۰۵	کمی صاف	۲
۰/۰۱	صاف متوسط	۳
۰/۰۲	زبر سخت	۴
n2 مقدار	تغییرات در سطح مقطع کانال	
۰	تغییرات تدریجی	۱
۰/۰۰۵	تغییرات متناوب ولی کم	۲
۰/۰۱۵ - ۰/۰۱۸	تغییرات متناوب ولی زیاد	۳
n3 مقدار	اثر موانع در کانال	
۰	ناچیز	۱
۰/۰۱ - ۰/۰۱۵	کم	۲
۰/۰۲ - ۰/۰۳	قابل ملاحظه	۳
۰/۰۴ - ۰/۰۶	کاملاً زیاد	۴
n4 مقدار	ارتفاع گیاهان	
۰/۰۰۵ - ۰/۰۱	کوتاه	۱
۰/۰۱ - ۰/۰۲۵	متوسط	۲
۰/۰۲۵ - ۰/۰۵	بلند	۳
۰/۰۵ - ۰/۱	خیلی بلند	۴

از آن، ترسیم پلان رودخانه و تهیه خروجی مقاطع مرکزی، مقاطع عرضی و سواحل رودخانه به کمک مدل رقومی ارتفاعی زمینی (DEM) و به کمک الحاقیه HEC-GeoRAS امکان پذیر است.

از جمله داده‌های مورد نیاز دیگر برای ورود به مدل HEC-RAS، تغییرات دبی آب در سال‌های اخیر است که بر اساس اطلاعات موجود در قالب فایل اکسل آماده می‌شود. پارامتر دیگر، برآورد پارامتر شماره منحنی (CN) حوضه آبریز است که از دغدغه‌های اصلی هیدرولوژیست‌ها است. برآورد CN در زیر حوضه‌ها مستلزم آگاهی از

مرحله بعد شامل تهیه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) به فرمت TIN در منطقه و ترسیم پلان رودخانه به کمک ابزار HEC-GeoRAS است. برای تهیه مدل رقومی ارتفاعی از یک تصویر ماهواره SRTM استفاده می‌شود. سپس، به کمک تحلیل تجمعی جریان^۱ در نرم‌افزار ArcGIS مسیر آبراهه‌ها تعیین می‌شود [۲۳]. در روش تحلیل تجمعی جریان، به کمک ورودی DEM در هر سلول در منطقه جهت جریان به سلول‌های مجاور تعیین شده و طی فرایند تکرار مسیرهای تجمع و جریان آب مشخص می‌شود. پس

1. Flow Accumulation

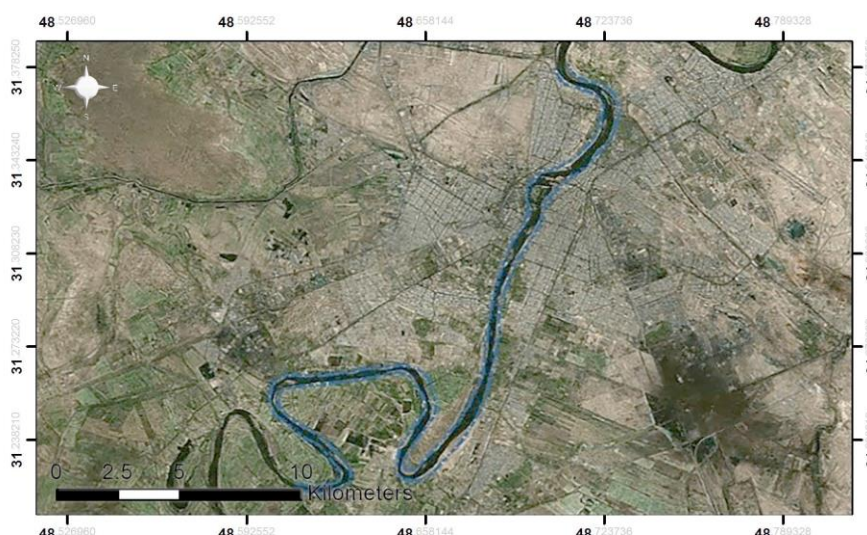
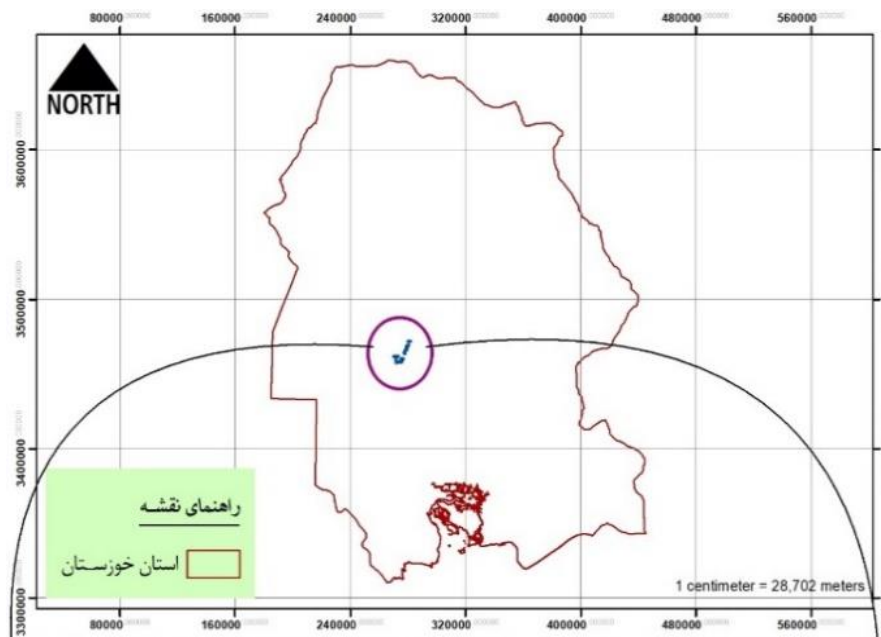
دو حوضه آبریز در تقسیم‌بندی حوضه‌های ایران، حوضه فرعی به شمار می‌روند و زیرمجموعه حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان است. مساحت حوضه کرخه، ۵۱۴۰۰ کیلومتر مربع و مساحت حوضه کارون بزرگ ۶۷۱۱۲ کیلومتر مربع است. رود کرخه که رود اصلی حوضه آبریز کرخه است، از کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد و پس از طی مسیری حدود ۷۵۵ کیلومتر، در جنوب غربی به تالاب هورالعظیم در مرز ایران و عراق می‌ریزد. رود کارون نیز که رود اصلی حوضه کارون بزرگ و بزرگ‌ترین رودخانه ایران است، از کوه‌های زاگرس مرکزی سرچشمه می‌گیرد و در نزدیکی شوشتر به آب دز می‌پیوندد و از آنجا به بعد کارون بزرگ نامیده می‌شود. این رود در نزدیکی خرمشهر به دو شاخه بهمن‌شیر و حفار تقسیم می‌شود. حفار از طریق بهمن‌شیر و اروندرود مستقیم به خلیج فارس می‌پیوندد. روی رودخانه کارون از بالادست به سمت پایین‌دست، سدهای کارون ۴، کارون ۳، شهید عباسپور، مسجد سلیمان و گتوند واقع شده است.

در هفته نخست فرودین‌ماه ۱۳۹۸ هجری شمسی، به دلیل افزایش آب خروجی سدهای دز و کرخه، روستاها و اراضی حاشیه این دو سد با مشکلات زیادی مواجه شدند. بر اساس گزارش‌های رسمی سازمان آب منطقه‌ای استان خوزستان، از ابتدای بهمن‌ماه ۱۳۹۷ تا انتهای فروردین ۱۳۹۸، حجمی معادل ۸۰۰۰ میلیون مترمکعب به مخزن سد کرخه وارد شده که نزدیک به ۶۰۰۰ میلیون متر مکعب آن خارج شده است. حدود ۶۰ درصد از حجم ورودی به سد، در ماه فروردین وارد مخزن شده است. از ابتدای مهرماه ۱۳۹۷ تا انتهای فروردین‌ماه ۱۳۹۸، ۲۲۲۴۲ میلیون مترمکعب وارد سدهای حوضه آبریز کارون شده است که از این میزان ۱۶ هزار مترمکعب از طریق دریاچه‌های خروجی رهاسازی شده و ۶۲۴۰ مترمکعب آن نیز ذخیره‌سازی شده است. بنا بر گزارش‌های رسمی سازمان آب منطقه‌ای تا تاریخ ۲۰ فروردین‌ماه ۱۳۹۸، سدهای گتوند، کارون ۳ و ۴، شهید عباسپور، مسجدسلیمان، کرخه و دز بالای ۹۰ درصد پرشدگی داشتند و فقط مخزن سد سیمره حدود ۷۰ درصد پرشدگی داشت [۲۵].

خصوصیات سطح حوضه است و می‌توان از مدل هاوکینگ و جدول‌های ارائه‌شده برای این منظور استفاده کرد [۲۴]. به این دلیل در تعیین CN ضروری است که نوع استفاده از زمین وضعیت هیدرولوژیکی تعیین شود. چنانچه در برآورد پارامترهای مهم آن مانند کاربری اراضی از فناوری‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شود، صحت و سرعت در دستیابی به نتایج بیشتر خواهد شد. در مرحله پایانی مدل اجرا می‌شود و با توجه به دوره‌های بازگشت مختلف ۲، ۵۰، و ۱۰۰ ساله، نقشه سطوح سیل گیر استخراج شده و به کمک HEC-GeoRAS از این نقشه‌ها خروجی گرفته می‌شود. به عنوان شاخص ارزیابی نیز سطوح حاصل از دوره‌های بازگشت مختلف با محدوده واقعی سیل مورد مقایسه قرار می‌گیرد و صحت نتایج ارزیابی می‌شود. در انتها نیز راهکارهای اجرایی پیشنهادی برای ساماندهی رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز ارائه خواهد شد.

منطقه مطالعه شده

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، بازه مطالعه شده از رودخانه کارون، ۳۳ کیلومتر از محدوده شهری اهواز است که از بالادست خان‌آباد آغاز می‌شود و تا بالادست ام الطمیر ادامه دارد. بازه مطالعه شده ۸ سازه تقاطعی شامل شیب‌سکن، بند و پل را در بر می‌گیرد و به تالاب هورالعظیم می‌ریزد و در انتها، به خلیج فارس می‌پیوندد. هنگام بارش‌های سیل‌آسا، حجم زیادی آب از سدهای بالادست کارون و کرخه آزادسازی شده است تا مخزن سد آماده مهار سیلاب‌های آتی باشد. این میزان از سیلاب به همراه آورد رودخانه و رواناب سطحی محدوده شهری وارد رودخانه کارون در محوطه شهری اهواز شده و این شهر را به یکی از کانون‌های سیلاب در کشور تبدیل کرده است. بنابراین، بررسی پهنه سیلابی و حدود قانونی بستر و حریم رودخانه در این محدوده، به منظور جلوگیری از تصرفات بیشتر و آزادسازی تصرفات، ضروری به نظر می‌رسد و می‌تواند راهکاری عملی برای برنامه‌های کنترل سیلاب و جلوگیری از خسارت‌های بیشتر به جان و مال مردم باشد. استان خوزستان با مساحت ۶۴۰۵۷ کیلومتر مربع و متوسط بارش درازمدت سالیانه ۳۵۸ میلی‌متر دربرگیرنده بخشی از دو حوضه آبریز کرخه و کارون بزرگ است. این



شکل ۲. منطقه مورد مطالعه رودخانه کارون در شهر اهواز

خوزستان ۳۱۸ میلی‌متر بوده که در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ به ۵۵۹ میلی‌متر افزایش داشته است.

پیااده‌سازی و نتایج

در این بخش نتایج پیااده‌سازی مدل معرفی شده ارائه می‌شود. کلیه فرایندهای جمع‌آوری اطلاعات، تجزیه و تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی هیدرولیکی، در پاییز و زمستان ۱۳۹۹ صورت گرفته است. در ادامه، در هر بخش به شرح فعالیت‌های اصلی صورت گرفته پرداخته می‌شود.

بارش گسترده، شدید و هم‌زمان در دو حوضه بزرگ کرخه و کارون، موجب سیلابی بسیار شدید در فروردین ۱۳۹۸ در استان خوزستان شد. همین امر موجب شد تا سیلاب حدود یک ماه در محدوده استان خوزستان فعال باشد و خسارت‌های طولانی‌مدت به تأسیسات زیربنایی از جمله راه آهن، خطوط انتقال آب و نفت، حمل‌ونقل، بازرگانی و کشاورزی و دامداری وارد کرده است. از سوی دیگر، بارش‌هایی که در بهمن ۱۳۹۷ تا فروردین ۱۳۹۸ در استان خوزستان اتفاق افتاده، بی‌سابقه بوده و افزایش چشمگیری داشته است. میانگین بارش ده‌ساله استان

تعیین ضریب زبری مانینگ

با توجه به اینکه تعیین ضریب زبری نیاز به شناخت منطقه دارد و وسعت منطقه اجازه چنین شناختی را در بازه زمانی کوتاه مدت نمی‌دهد، از طبقه‌بندی تصویر Landsat-8 به روش ISODATA استفاده شده و کاربری‌ها شناسایی شدند. سپس، با اطلاعات گونه‌های خاک موجود در مسیر رودخانه و از جدول‌های موجود که در بخش روش شناسی ارائه شد، ضرایب معادله زبری تعیین شدند. ضریب زبری در این تحقیق طبق توضیحات ارائه شده در بخش روش شناسی با مدل تجربی کاون به دست آمد. با توجه به تغییرات جداره و

بستر رودخانه در طول ۳۳ کیلومتر رودخانه کارون از بالادست تا پایین دست شهر اهواز، مقادیر ضریب زبری مانینگ نیز برای این رودخانه در بازه‌های مختلف متغیر تعریف شده است. به گونه‌ای که در بازه‌های بالادست و پایین دست شهر که رودخانه حالت طبیعی دارد، یک ضریب برای جداره‌ها و یک ضریب برای کف و در محدوده شهری که دیواره‌سازی به صورت مصالح سنگ و سیمان صورت گرفته، ضریب مانینگ متغیر تعریف شده است. در جدول ۲ مقادیر ضریب زبری به دست آمده از روش کاون و شیوه معرفی آنها به مدل HEC-RAS نمایش داده شده است.

جدول ۲. مقادیر ضریب زبری برای بازه‌های مختلف رودخانه کارون

ردیف	کیلومتر ابتدا	کیلومتر انتها	نام محل ابتدا	نام محل انتها	ضریب زبری دیواره‌ها	ضریب زبری کف
۱	۰+۰۰۰	۴+۸۰۰	خان‌آباد	ابتدای محدوده شهری	۰,۰۳۵	۰,۰۲۵
۲	۴+۸۰۰	۲۶+۲۵۰	ابتدای محدوده شهری	انتهای محدوده شهری	۰,۰۲۵	۰,۰۲۵
۳	۲۶+۲۵۰	۳۳+۱۲۰	انتهای محدوده شهری	ام الطمیر	۰,۰۴۵	۰,۰۳۵

شماره منحنی حوضه‌های آبریز و مقدار دبی

مطابق توضیحات ارائه شده در روش تحقیق، برای تعیین پارامتر CN از روش هاوکینگ استفاده شد. در این روش با توجه به پوشش گیاهی، نفوذپذیری و غیره حوضه مورد نظر به چندین واحد هیدرولوژیک اصلی تقسیم‌بندی می‌شود. واحد هیدرولوژیک خاک خود نیز می‌تواند به واحدهای کوچک‌تر تقسیم شود. در جدول ۳ گروه‌بندی خاک از لحاظ نفوذپذیری ارائه شده است. در جدول ۴ مقدار تخمینی CN با توجه به نفوذپذیری خاک و پوشش آن آمده است. همچنین، مقادیر دبی نیز با توجه به اطلاعات موجود در گزارش‌های رسمی سازمان آب منطقه‌ای استان خوزستان استخراج و به مدل HEC-RAS معرفی شد. به دلیل حجم زیاد اطلاعات، از آوردن آن در مقاله اجتناب می‌شود.

جدول ۳. گروه‌بندی خاک حوضه بر حسب نفوذپذیری [۲۴]

گروه	حداقل نفوذپذیری (میلی متر در ساعت)
A	۱۱/۵ - ۷/۵
B	۷/۵ - ۳/۸
C	۳/۸ - ۱/۳
D	۱/۳ - ۰

تهیه پلان رودخانه و پروفیل‌ها عرضی

در این لایه خط مرکزی رودخانه طی بازه مورد نظر از بالادست به سمت پایین دست رودخانه ترسیم می‌شود. همچنین، در این قسمت می‌توان رودخانه‌های فرعی که به رودخانه اصلی متصل می‌شوند را نیز مشخص کرد. با توجه به هدف مدل‌سازی در پژوهش حاضر (شکست سد)، هیچ‌گونه آبراهه فرعی تعیین نشده و در نتیجه، مدل‌سازی نشده است. خط مرکزی رودخانه کارون به صورت دقیق و یکپارچه با رعایت تمامی قوس‌ها و مماندرها^۱ به طول کلی ۳۳۱۲۰ متر برای رودخانه کارون از محل خان‌آباد تا ام الطمیر ترسیم شد. برای تهیه لایه سواحل رودخانه، ابتدا ساحل سمت چپ از بالادست تا پایین دست رودخانه تعیین شده و سپس، ساحل راست نیز به همین روال تعیین شد. دقت ترسیم سواحل رودخانه در تعیین مقطع رودخانه و ارتفاع سطح آب هنگام سیلاب تأثیر بسزایی دارد. استفاده از پس‌زمینه تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در محیط ArcGIS می‌تواند دقت تعیین سواحل را تا حد امکان بالا ببرد. در شکل ۳ سواحل رودخانه و خط مرکزی رودخانه در بازه‌های از رودخانه کارون به همراه تصویر پس‌زمینه در محیط HEC-GeoRAS نمایش داده شده است.

جدول ۴. مقدار CN برای حوضه‌های مختلف با توجه به نفوذپذیری خاک [۲۴]

D	C	B	A	ویژگی
خصوصیات پوشش سطح حوضه				
۷۹	۷۳	۶۰	۳۶	پوشش جنگلی متوسط
۷۷	۷۰	۵۵	۲۵	پوشش جنگلی خوب
۸۴	۷۹	۶۹	۴۹	مراتع طبیعی با پوشش متوسط
۸۰	۷۴	۶۱	۳۹	مراتع طبیعی با پوشش خوب
اراضی کشاورزی				
۸۳	۷۸	۶۹	۵۵	زیر کشت حبوبات
۸۸	۸۴	۷۶	۶۵	زیر کشت غلات (ردیف‌های مستقیم)
۸۴	۸۱	۷۳	۶۰	زیر کشت غلات (ردیف‌ها به موازات خطوط تراز)
زیر کشت گیاهان ردیفی				
۹۱	۸۸	۸۱	۷۲	ردیف‌های مستقیم با پوشش متوسط
۸۹	۸۵	۷۸	۶۷	ردیف‌های مستقیم با پوشش خوب
ردیف‌های به موازات خطوط تراز				
۸۸	۸۴	۷۹	۷۰	با پوشش متوسط
۸۶	۸۲	۷۵	۶۵	با پوشش خوب
۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	پشت‌بام‌ها، پارکینگ‌ها و دیگر جاهای آسفالتی
۹۲	۹۰	۸۵	۷۷	مناطق مسکونی با ۶۵ درصد آسفالت
۸۴	۷۹	۶۸	۵۱	مناطق مسکونی با ۲۰ درصد آسفالت
۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	خیابان‌ها و جاده‌های آسفالتی
۸۹	۸۷	۸۲	۷۲	جاده‌های خاکی
۹۱	۸۹	۸۵	۷۶	جاده‌های شوسه

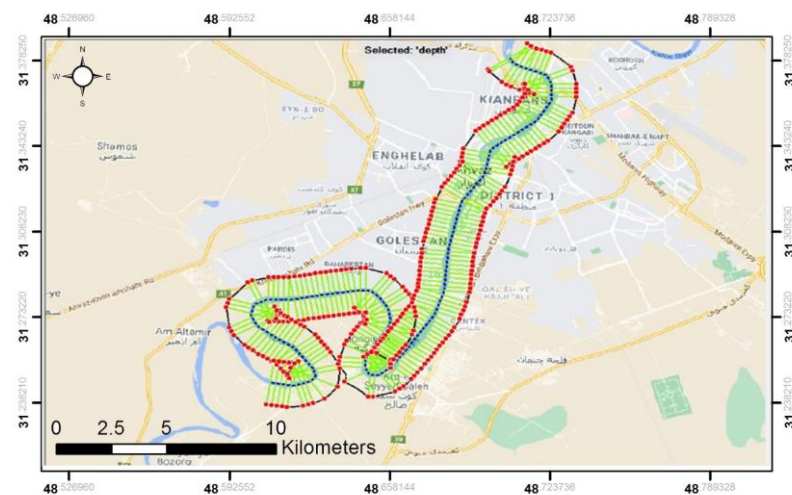
هیچ‌یک از داده‌های هندسی آماده‌سازی شده تا این مرحله، دارای ارتفاع نیستند و برای این منظور، داده‌های TIN آماده شده از تصویر SRTM استفاده می‌شود. بنابراین، به منظور ترسیم پروفیل طولی در مقاطع عرضی و همچنین، ارتفاع‌دار کردن خط مرکزی رودخانه و سواحل، نیاز است که کلیه خطوط به وسیله فایل رقومی که ابتدا به داده‌ها معرفی شده است، دارای مشخصه ارتفاع نیز باشند. داده‌هایی که باید در نرم‌افزار الحاقی HEC-GeoRAS آماده‌سازی و به نرم‌افزار HEC-RAS انتقال یابند، در بخش قبلی معرفی شدند. سایر داده‌ها اعم از ضریب زبری مانینگ، سازه برخط و دبی هیدروگراف ورودی با توجه وجود جدول‌های جداگانه در نرم‌افزار HEC-RAS تعریف می‌شوند. همچنین، در ابزار RAS Mapper نرم‌افزار HEC-RAS مطابق شکل ۳، مدل رقومی و مقاطع عرضی رودخانه ترسیم شده است تا نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب و تغییرات پارامترهای هیدرولیکی به همراه پس‌زمینه تصاویر ماهواره‌ای نشان داده شود. به منظور بررسی پهنه

در الحاقی HEC-GeoRAS فرایند ترسیم مقاطع عرضی به صورت دستی انجام می‌گیرد. مهم‌ترین معایب این فرایند عبارت‌اند از: یکسان نبودن فاصله میان مقاطع عرضی، یکسان نبودن طول مقاطع عرضی در دو ساحل چپ و راست و زمان‌بر بودن با توجه به طولانی بودن بازه مطالعه شده. نظر به معایب یادشده، از نرم‌افزار HEC-RAS استفاده شده است تا مقاطع عرضی با کمترین میزان خطا در این بخش ترسیم شوند. در چنین حالتی مقاطع عرضی با عرض ۲ هزار متر و با فاصله طولی ۲۰۰ متر ترسیم شده و بنابراین، در طول رودخانه، ۱۶۷ مقطع مورد بررسی قرار گرفته است. مقاطع ترسیم‌شده در الحاقی HEC-GeoRAS به عنوان مقاطع عرضی^۱ معرفی می‌شوند. در چنین شرایطی هم معایب ترسیم دستی مقاطع عرضی حذف شده و هم مراحل آماده‌سازی داده‌های هندسی به کمک الحاقی HEC-GeoRAS گام‌به‌گام رعایت شده است.

1. XS Cutlines

میانگین هر ساله در رودخانه اتفاق می‌افتد. دوره بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ نیز به ترتیب برای بررسی میزان تأثیر سیلاب بر شهر اهواز و روستاها و شهرهای اطراف آن پیش‌بینی شده است.

سیل‌گیر رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز، دوره بازگشت‌های ۲، ۵۰ و ۱۰۰ ساله انتخاب و مدل بر اساس آنها اجرا شده است. دوره بازگشت ۲ ساله بیانگر سیلاب‌های متداول و رایج رودخانه است که به طور

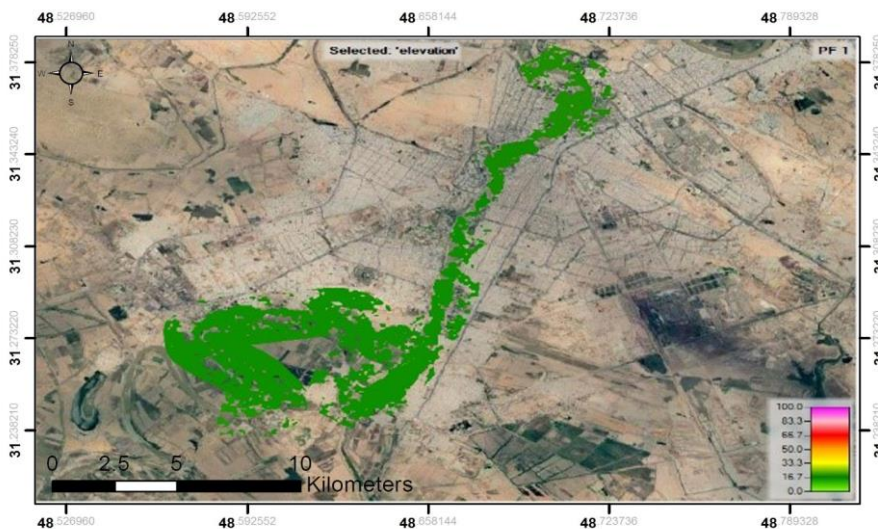


شکل ۳. مقاطع عرضی در بازه مدل‌سازی رودخانه کارون در نرم‌افزار HEC-RAS

بیشینه در خط القعر رودخانه نزدیک به خط مقاطع عرضی در بازه مدل‌سازی بخش مرکزی رودخانه و کمینه در کناره‌ها نزدیک به خط ساحل اتفاق افتاده است. بیشترین، کمترین و میانگین عرض سطح آب معادل ۲۰۰۰، ۳۷/۶۱ و ۱۱۲۷/۷ متر است که نشان می‌دهد حتی در سیلاب‌هایی با دوره بازگشت پایین نیز عرض سطح آب بالای ۱ هزار متر است و قسمت‌هایی از شهر اهواز را در بر می‌گیرد.

دوره بازگشت ۲ ساله

مطابق پهنه سیلابی با دوره بازگشت ۲ ساله، بیشینه، کمترین و میانگین سرعت جریان در بازه مورد مطالعه معدل ۲/۶، ۰/۴ و ۰/۲۸ متر بر ثانیه بوده است که نشان‌دهنده سرعت پایین جریان به دلیل عرض و همچنین، شیب کم بازه مطالعه شده رودخانه کارون است. بیشترین، کمترین و میانگین عمق معادل ۱۲/۱، ۰/۵۸ و ۵/۰۶ متر است که

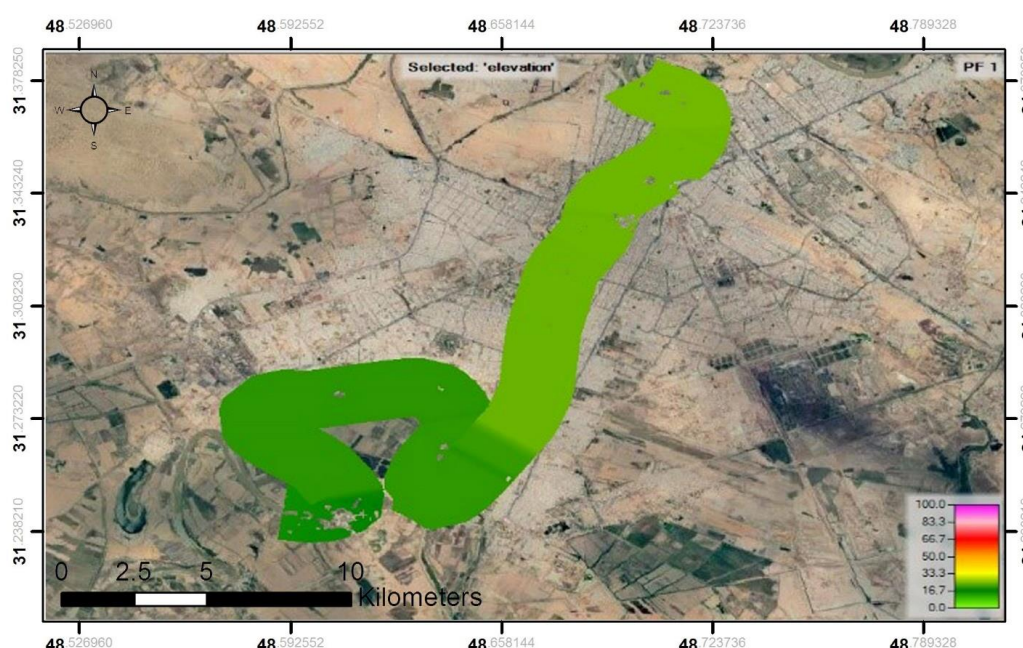


شکل ۴. پهنه سیل‌گیر رودخانه کارون در دوره بازگشت ۲ ساله (ارتفاع رواناب بر حسب سانتی‌متر است)

دوره بازگشت ۵۰ ساله

۰/۱۸ و ۰/۶ متر بر ثانیه بوده است که در محدوده سرعت‌های مجاز جریان سیلابی قرار دارد و در هیچ نقطه‌ای سرعت فوق بحرانی دیده نشده است. در چنین محدوده سرعتی، استفاده از دیواره‌های سنگ و سیمان برای حفاظت از سواحل رودخانه با رعایت عمق فرسایش مناسب پیشنهاد می‌شود. بیشترین، کمترین و میانگین عرض سطح آب نیز معادل ۲۰۰۰، ۱۴۷/۲ و ۱۸۵۸ متر است که در صورت نبود دیوارهای مناسب، قسمت‌هایی از شهر اهواز را در بر می‌گیرد.

با توجه به عمق استخراج‌شده در سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ ساله، باید نسبت به ایجاد دیواره‌های ساماندهی با ارتفاع مناسب در محدوده شهر اهواز اقدام شود. بر همین اساس، بیشترین، کمترین و میانگین عمق جریان در بازه مطالعه شده معادل ۱۷/۸۲، ۱/۷۵ و ۱۰/۷۷ متر بوده است که با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد، باید ارتفاع آزاد دیوار نسبت به خط القعر، ۱۲ متر باشد تا محوطه شهری اهواز را از گزند سیلاب‌های رودخانه کارون در امان دارد. بیشترین، کمترین و میانگین سرعت جریان معادل ۶/۱۵،



شکل ۵. پهنه سیل‌گیر رودخانه کارون در دوره بازگشت ۵۰ ساله (ارتفاع رواناب بر حسب سانتی‌متر است)

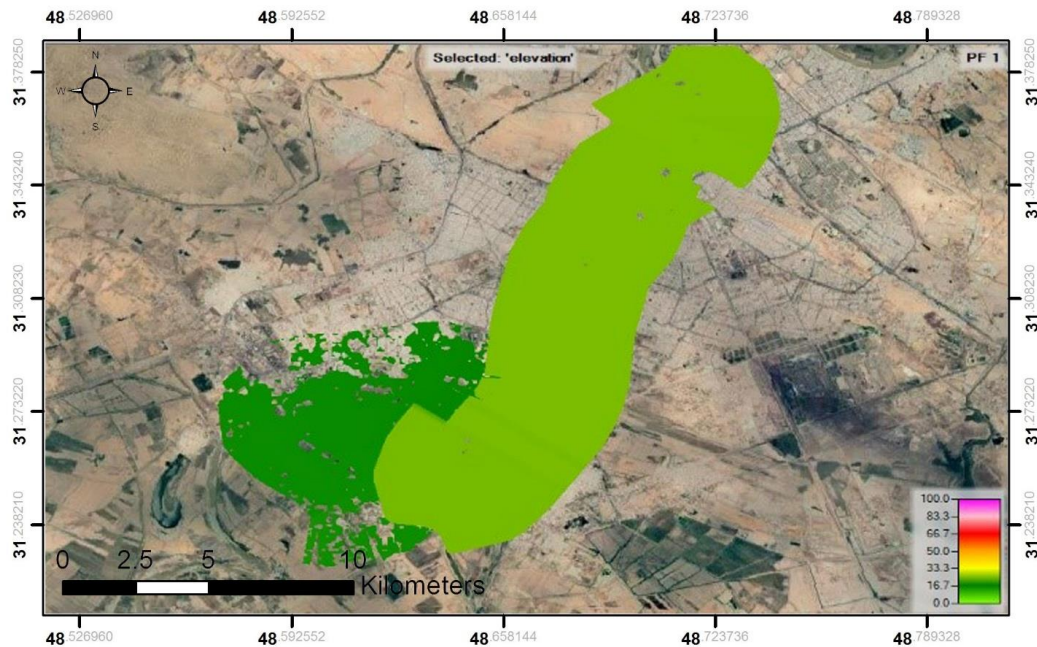
دوره بازگشت ۱۰۰ ساله

نیز با این سیلاب‌ها یکی شده و مشکلاتی نظیر آنچه در سالیان گذشته به مراتب در شهر اهواز به وقوع پیوسته، اتفاق می‌افتد. بیشترین، کمترین و میانگین سرعت جریان معادل ۲، ۷، ۰/۰۸، ۰/۴۳ و ۰/۴۳ متر بر ثانیه است که نقش مهم وسعت عرض و کم بودن شیب در منطقه را تأیید می‌کند. بیشترین، کمترین و میانگین عمق جریان معادل ۲۴۸۲، ۱/۹۵ و ۱۲/۳۵ متر است که با لحاظ کردن ارتفاع آزاد سیلاب، ارتفاع دیواره اگر بر اساس دوره بازگشت ۱۰۰ ساله تعیین شود، معادل ۱۳ تا ۱۴ متر از خط القعر رودخانه خواهد بود. با توجه به بحران آب‌گرفتگی و سیلاب‌های شهری اهواز، دوره بازگشت ۱۰۰ ساله برای

پهنه سیل‌گیر رودخانه کارون در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در شکل ۶ نمایش داده شده است. این پهنه سیل‌گیر نشان می‌دهد در صورت وقوع سیلابی با این حجم، قسمت‌های زیادی از شهر اهواز در بر گرفته می‌شود و از خط مرکزی رودخانه به هر طرف، ۲ هزار متر به عنوان پهنه سیلابی در نظر گرفته می‌شود. به این معناست که محدوده وسیعی از شهر اهواز شامل خیابان‌های شریعتی جنوبی، بهارستان، گلستان، کیان پارس و محله‌های کوت سیدصالح و جنگیه تحت تأثیر سیلاب قرار گرفته و دچار آب‌گرفتگی شدید خواهند شد. رواناب‌های سطحی محدوده

طرف دچار آب‌گرفتگی و سیلاب می‌شود. این به معنای لزوم برنامه‌ریزی هرچه سریع‌تر برای جلوگیری از اتفاق‌هایی نظیر پلدختر یا دیگر سیلاب‌های عظیم کشور است.

ضریب اطمینان بیشتر پیشنهاد می‌شود. بیشترین، کمترین و میانگین عرض سطح آب معادل ۴۰۰۰، ۹۸ و ۳۵۸۲ متر است که به طور میانگین در بازه ۳۳ کیلومتری رودخانه کارون، از خط مرکزی رودخانه تا ۱۷۵۰ متر هر

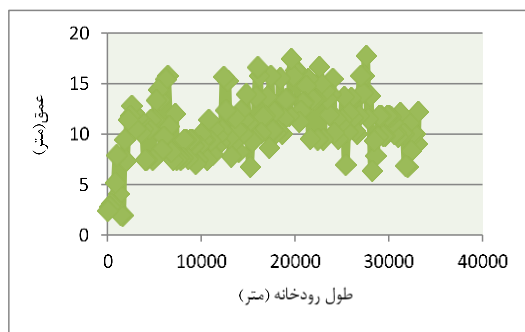


شکل ۶. پهنه سیلابی رودخانه کارون با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله (ارتفاع رواناب بر حسب سانتی‌متر است)

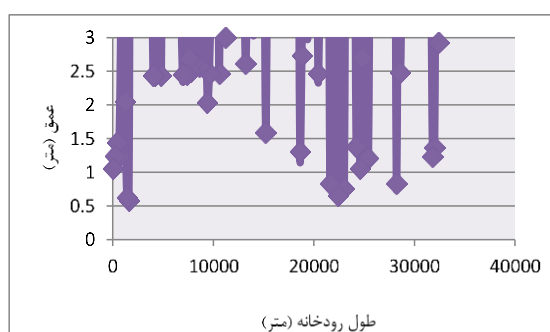
است که در بالادست ام‌الطمیر و در قوس داخلی رودخانه اتفاق می‌افتد. با توجه به نزدیکی این منطقه به مناطق مسکونی و اراضی، باید اقدامات لازم برای امنیت اهالی صورت گیرد.

در نمودارهای شکل ۷ تغییرات عدد فرود نیز نشان داده شده است. در بازه‌های محدودی از رودخانه، جریان حالت فوق بحرانی پیدا کرده و در بقیه موارد، رژیم جریان بحرانی و زیر بحرانی است. در بررسی مناطقی که دارای عدد فرود بیشتر از یک هستند، این نتیجه حاصل شد که به دلیل زیاد بودن سرعت، تنش برشی افزایش پیدا می‌کند و شستگی سواحل و تخریب دیواره‌های رودخانه را در پیش خواهد داشت.

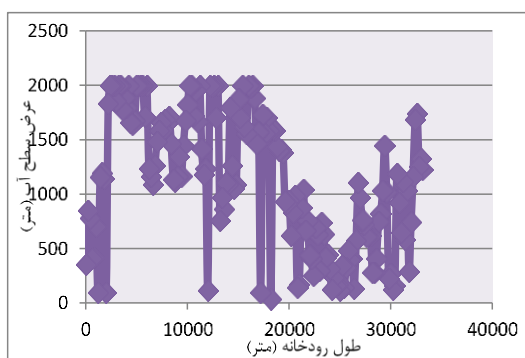
در شکل ۷ تغییرات عمق در بازه‌های مختلف رودخانه کارون نمایش داده شده است. قبل از پل‌های شهر اهواز، عمق آب به دلیل کاهش سرعت آب افزایش یافته و در همه دوره بازگشت‌ها بیشترین عمق مربوط به قبل از پل‌های شهر اهواز است. با توجه به اینکه تعداد پایه‌های این پل‌ها در رودخانه زیاد است، مانند بند عمل می‌کند و سطح آب قبل و بعد از این پل‌ها اختلافی ۱ تا ۴ متر دارد. بلافاصله بعد از پایه‌های پل، سرعت آب افزایش یافته و عمق کاهش می‌یابد. در این قسمت، کف کنی رودخانه به دلیل سرعت زیاد و ظرفیت حمل رسوبات بالا، اتفاق می‌افتد. بیشینه عمق جریان در دوره بازگشت‌های ۲، ۵۰ و ۱۰۰ ساله به ترتیب معادل ۱۲/۱، ۱۷/۸۲ و ۲۴/۸۲ متر



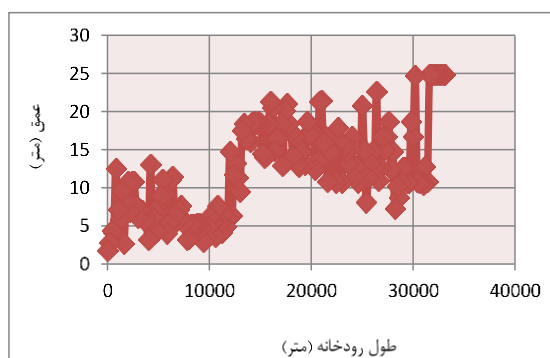
ب



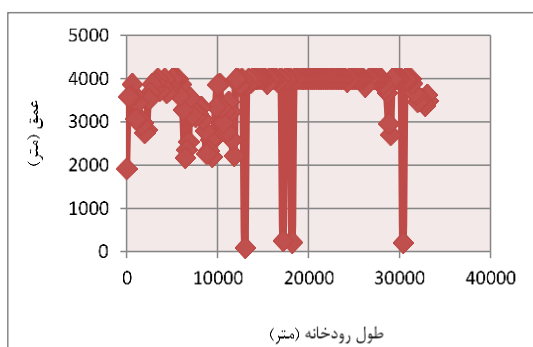
الف



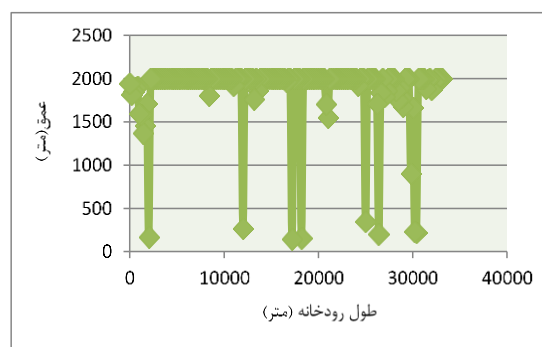
د



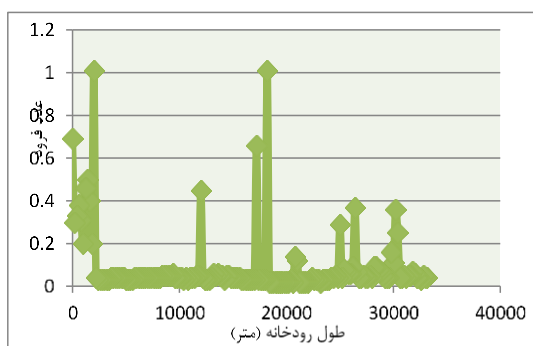
ج



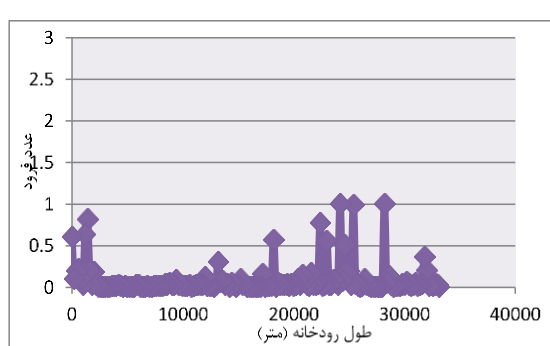
و



ه



ح



ز

شکل ۷. تحلیل‌های انجام‌شده برای عمق، عرض و عدد فرود: الف) عمق در بازه‌های مختلف بر اساس دوره بازگشت ۲ ساله (ب) عمق در بازه‌های مختلف بر اساس بازگشت ۵۰ ساله؛ ج) عمق در بازه‌های مختلف بر اساس بازگشت ۱۰۰ ساله؛ د) عرض سطح آب در بازه‌های مختلف بر اساس دوره ۲ ساله؛ ه) عرض سطح آب در بازه‌های مختلف بر اساس دوره ۵۰ ساله؛ و) عرض سطح آب در بازه‌های مختلف بر اساس بازگشت ۱۰۰ ساله؛ ز) عدد فرود در بازه‌های مختلف بر اساس بازگشت ۲ ساله؛ ح) عدد فرود در بازه‌های مختلف بر اساس دوره بازگشت ۵۰ ساله

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از نرم‌افزار HEC-RAS برای پهنه‌بندی سیلاب در رودخانه کارون بازه شهر اهواز استفاده شده است. پهنه‌بندی منطقه مطالعه شده از طریق تلفیق مدل هیدرولیکی HEC-RAS با نرم‌افزار ArcGIS از طریق الحاقیه HEC-Geo RAS در طول ۳۳ کیلومتر از این رودخانه صورت گرفته است. به منظور اصلاح یا کشف مسیر آبراهه‌ها در منطقه از تحلیل‌های هیدرولوژیکی مکانی روی مدل رقومی ارتفاعی منطقه شامل جهت جریان، انباشت جریان و مسیر جریان استفاده شده است. پس از معرفی اطلاعات هندسی رودخانه به مدل از طریق الحاقیه، مقدار ضریب زبری مانینگ برای بازه‌های مختلف تعریف و سپس، دوره بازگشت‌های ۲، ۵۰ و ۱۰۰ ساله به مدل معرفی شده‌اند. در نهایت با استخراج پارامترهای هیدرولیکی، نتایج زیر به عنوان رؤس مطالب نتیجه‌گیری شده است:

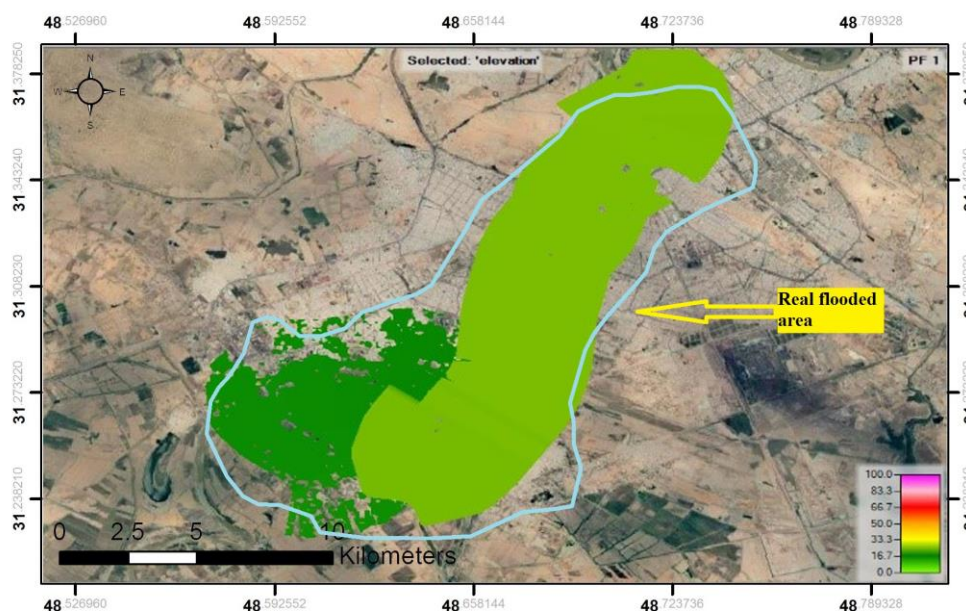
مطابق پهنه سیلابی با دوره بازگشت ۲ ساله، بیشترین، کمترین و میانگین سرعت جریان در بازه مورد مطالعه معادل ۲/۶، ۰/۰۴ و ۰/۲۸ متر بر ثانیه بوده است. این میزان از سرعت نشان‌دهنده وسعت عرض و همچنین، شیب کم بازه مورد مطالعه رودخانه کارون است. بیشترین، کمترین و میانگین عمق معادل ۱۲/۱، ۰/۵۸ و ۵/۰۶ متر است که بیشینه در خط القعر رودخانه نزدیک به خط مرکزی رودخانه و کمینه در کناره‌ها نزدیک به خط ساحل اتفاق افتاده است. همچنین، بیشترین، کمترین و میانگین عرض سطح آب معادل ۳۷/۶۱ و ۱۱۲۷/۷ متر است. این میزان عرض سطح آب نشان می‌دهد حتی در سیلاب‌هایی با دوره بازگشت پایین نیز عرض سطح آب بالای ۱ هزار متر است و قسمتهایی از شهر اهواز را در بر می‌گیرد. بر اساس دوره بازگشت ۵۰ ساله، بیشترین، کمترین و میانگین عمق جریان در بازه مورد مطالعه معادل ۱۷/۸۲، ۱/۷۵ و ۱۰/۷۷ متر بوده است. بیشترین، کمترین و میانگین سرعت جریان معادل ۶/۱۵، ۰/۱۸ و ۰/۶ متر بر ثانیه بوده است که در محدوده سرعت‌های مجاز جریان سیلابی قرار دارد و در هیچ نقطه‌ای سرعت فوق بحرانی دیده نشده است. از جمله نتایج دیگر آن است که بیشترین، کمترین و میانگین عرض سطح آب نیز معادل ۲۰۰۰، ۱۴۷/۲ و ۱۸۵۸ متر است که در صورت نبود دیوارهای مناسب، قسمت‌هایی از شهر اهواز را در بر

می‌گیرد. بیشترین، کمترین و میانگین سرعت جریان در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله معادل ۷/۲، ۰/۰۸ و ۰/۴۳ متر بر ثانیه است که نقش مهم وسعت عرض و کم بودن شیب در منطقه را تأیید می‌کند. همچنین بیشترین، کمترین و میانگین عمق جریان معادل ۲۴۸۲، ۱/۹۵ و ۱۲/۳۵ متر است که با لحاظ کردن ارتفاع آزاد سیلاب، ارتفاع دیواره اگر بر اساس دوره بازگشت ۱۰۰ ساله تعیین شود، معادل ۱۳ تا ۱۴ متر از خط القعر رودخانه خواهد بود.

با توجه به بحران آب‌گرفتگی و سیلاب‌های شهری اهواز، دوره بازگشت ۱۰۰ ساله برای ضریب اطمینان بیشتر پیشنهاد می‌شود. بیشترین، کمترین و میانگین عرض سطح آب معادل ۴۰۰۰، ۹۸ و ۳۵۸۲ متر است که به طور میانگین در بازه ۳۳ کیلومتری رودخانه کارون، از خط مرکزی رودخانه تا ۱۷۵۰ متر هر طرف دچار آب‌گرفتگی و سیلاب می‌شود. این به معنای لزوم برنامه‌ریزی هرچه سریع‌تر برای جلوگیری از اتفاقاتی نظیر پلدختر یا دیگر سیلاب‌های عظیم کشور است. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، بیشینه سرعت در دوره بازگشت‌های ۲، ۵۰ و ۱۰۰ ساله به ترتیب معادل ۲/۶، ۶/۱۵ و ۷/۲ متر بر ثانیه است که در محدوده سرعت‌های مجاز سیلاب قرار دارد. به این معناست که در صورتی که سواحل رودخانه ساماندهی و دیوارسازی شده باشد، آب‌شستگی، فرسایش و رسوب‌گذاری اتفاق نمی‌افتد و آب در مجرای اصلی بدون تخریب جریان می‌یابد. البته، باید توجه داشت این سرعت در پیچ‌ها یا نزدیکی پایه‌های پل‌ها، موجب آب‌شستگی و جریان پیچشی می‌شود که برای جلوگیری از این موضوع، باید قوس‌های خارجی رودخانه با عمق فرسایش مناسب ساماندهی شده و همچنین، اطراف پایه‌های پل، توری‌های سنگی ایجاد شود. همچنین، برای مقایسه دوره‌های بازگشت حاصل با محدوده واقعی تحت تأثیر سیل در سال ۱۳۹۸، مساحت تقاطع سطحی مشترک به عنوان معیار ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس، دوره بازگشت ۱۰۰ ساله انطباق بیشتری با واقعیت داشته و ۸۷ درصد مساحت محدوده مشترک نشان‌دهنده صحت کار است. این شاخص برای دوره ۵۰ ساله ۶۳ درصد و برای دوره بازگشت ۲ ساله ۳۵ درصد حاصل شد که در جدول ۵ مشاهده می‌شود. همچنین، شکل ۸ نمایشگر چگونگی تقاطع است، روی نقشه است.

جدول ۵. مقایسه درصد سطوح مشترک با محدوده واقعی سیل در دوره‌های بازگشت ۲، ۵۰ و ۱۰۰ ساله

دوره بازگشت	درصد سطح مشترک
۲ ساله	۳۵
۵۰ ساله	۶۳
۱۰۰ ساله	۸۷



شکل ۸. مقایسه محدوده سطحی دوره بازگشت ۱۰۰ ساله با محدوده واقعی سیل (بر اساس اطلاعات حاصل از تصاویر ماهواره‌ای)

- تلفیق مدل‌های مکانی هیدرولوژیکی در GIS و مدل HEC-RAS راهکاری کارآمد برای استخراج نقشه‌های محدوده سیل است.
- با مدل پیشنهادی می‌توان با دقت بیش از ۸۰ درصد (با در نظر گرفتن دوره بازگشت ۱۰۰ ساله) محدوده‌های سیل‌گیر را با توجه به دبی رودخانه، منحنی پیش‌بینی کرده و از شدت اثرات بحران کاست. با توجه به مدل‌سازی جریان هیدرولوژیکی رودخانه کارون در شهر اهواز به کمک مدل HEC-RAS، پیشنهادهای زیر جهت پژوهش‌های آتی توضیح می‌شود:
- استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی مناسب به عنوان روش به‌صرفه برای مقایسه داده‌های نقشه‌برداری زمینی
- ارزیابی سدهای کارون و کرخه در مهار سیلاب‌ها با دوره بازگشت‌های بالا و میزان کنترل رسوبات
- تهیه و تصویب نقشه حد بستر و حریم رودخانه کارون بر اساس مدل‌سازی صورت گرفته برای استفاده در فرایند آزادسازی تصرفات رودخانه

نتایج پژوهش حاضر با مطالعات حجازی و همکاران [۲۶] مقایسه شد. در پژوهش یادشده به مانند پژوهش حاضر بیان شده است که دقت نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب به کمک الحاقیه HEC-GeoRAS بسیار مناسب است و ورود اطلاعات توسط کاربر این امکان را می‌دهد تا خطاهای احتمالی نرم‌افزار حذف شده و ورودی‌های مدل به‌درستی تعریف شود تا خروجی مناسبی تعریف شود. همچنین، در پژوهش شفیع‌ی مطلق و عبادتی [۲۷] بیان شده است که قابلیت مدل‌سازی سامانه هیدرولوژیکی HEC-RAS در پیش‌بینی پهنه‌بندی سیلاب بسیار زیاد است و ترکیب آن با سامانه اطلاعات جغرافیایی، نتایج بسیار نزدیک به واقعیت را نشان می‌دهد.

در این تحقیق معادلات جریان در رودخانه به عنوان فرضیات قابل قبول برای بررسی جریان در رودخانه پذیرفته شده و موارد ساده‌سازی‌های این معادلات پذیرفته شده است. بنابراین، در مجموع می‌توان موارد زیر را نتیجه گرفت:

- معادلات حاکم بر هیدرودینامیک جریان برای شبیه‌سازی جریان سیلابی کفایت می‌کنند.

- آگاهی‌سازی نسبت به اثرات مخرب سیلاب‌های با دوره بازگشت بالا
- فرهنگ‌سازی نسبت به رعایت حدود رودخانه و حفظ حق اهالی پایین‌دست
- تهیه بروشور، برنامه‌های تلویزیونی، ارائه سخنرانی و... به منظور آگاه‌سازی مردم نسبت به حدود و اکوسیستم رودخانه
- ایجاد انگیزه برای بخش خصوصی به منظور مشارکت در امر آزادسازی بستر رودخانه و اجاره بستر در غالب طرح‌ها و مجتمع‌های تفریحی - فرهنگی - اقامتی

منابع

- [1]. Rehman J, Sohaib O, Asif M, Pradhan B. Applying systems thinking to flood disaster management for a sustainable development. International journal of disaster risk reduction. 2019;36(1):101-102.
- [2]. Shrestha BB, Okazumi T, Miyamoto M, Sawano H. Flood damage assessment in the P ampanga river basin of the P hilippines. Journal of Flood Risk Management. 2016;9(4):355-69.
- [3]. Anees MT, Abdullah K, Nawawi MN, Ab Rahman NN, Piah AR, Zakaria NA, et al. Numerical modeling techniques for flood analysis. Journal of African Earth Sciences. 2016;124(1):478-86.
- [4]. Esmaili F, Hasoonizadeh H. Flood risk zoning using mathematical model and GIS (Case study: Konchanchem (cow) river in Ilam province. Second National Conference on Hydroelectric Dams and Power Plants. 2008 Apr, Tehran, Iran. [Persian]
- [5]. Roknoddin Eftekhari A, Sadeghloo T, Ahmadabadi A, Sojasi Qidari H. Zoning of Rural Regions in Flood Hazard with Use of HEC-GeoRAS Model in GIS Sphere (Case study: flooded villages of Gorganrud Basin). Community Development (Rural and Urban Communities). 2010;1(1):157-182. [Persian]
- [6]. Ghaffari G, Amini A. Flood Plain Management Using Geographic Information System (GIS) (Case Study of Ghezel Ozan River). Geographical Space. 2010;32(1):17-34. [Persian]
- [7]. Kalantari Oskuei A, Sagafian B, Alesheikh AA. A GIS-based Solution for using Hec-HMS Modclark Hydrologic Model in Iran. Journal of Geospatial Information Technology. 2014;1(2):1-14. [Persian]

- ارزیابی پس‌زدگی آب دریا به رودخانه در میزان شوری و سایر پارامترهای کمی و کیفی رودخانه
- در طرح ساماندهی رودخانه، گزینه‌های طراحی نباید ارتباط آب سطحی و آب زیرزمینی را قطع کند. بنابراین، پوشش کامل کف رودخانه از مصالح نفوذناپذیر، توصیه نمی‌شود و از طرفی، باید امکان دسترسی مردم به رودخانه وجود داشته باشد. این موضوع در انتخاب گزینه طرح بسیار مؤثر خواهد بود. بنابراین، دیوارهای مرکب امکان دسترسی به رودخانه را به وجود می‌آورد. بنابراین، یکی از گزینه‌های مناسب مقاطع مرکب هستند که در آنها فاکتورهای یادشده رعایت شده باشد. هزینه زیباسازی با دیوار مرکب معمولاً بیشتر از گزینه‌های ایجاد دیوار قائم است. بنابراین، با توجه به تسریع در توسعه منطقه و زیباسازی و ایجاد پتانسیل گردشگری در منطقه، این هزینه‌ها قابل توجیه هستند.

- در بازه‌های که فضای کافی وجود دارد یکی از گزینه‌های مناسب برای جایگزینی در مقاطع مرکب دیوار گابیونی است. در موقعیت‌های که فضای کافی برای احداث مقاطع مرکب و گابیونی وجود نداشته باشد، در محدوده‌های شهری احداث دیوارهای بتنی مسلح و غیر شهری ساخت دیوارهای قائم سنگ و ملات گزینه‌های مناسب برای اجرا است.

برنامه‌ها و راهبردهای عملیاتی که مطابق با مدل‌سازی صورت‌گرفته ارائه شده‌اند، به شرح زیر است:

- تهیه سامانه‌های هشدار سیلاب بر اساس بارش‌های با دوره بازگشت بالا که منجر به سیلاب‌های حدی می‌شود.
- دیوارسازی، ساحل‌سازی و ساماندهی رودخانه در مقاطع ناپایدار و فرسایش‌پذیر رودخانه
- اصلاح شیب بستر و لایروبی کانال در مقاطع مورد نیاز
- ایجاد کانال با ابعاد هندسی مناسب برای عبور سیلاب با ضریب اطمینان بالا
- تهیه نقشه اراضی واقع‌شده در بستر رودخانه به عنوان متجاوزان به بستر سیلابی رودخانه

- [8]. Yamani M, Turani M., Chazaghe S. Determination of the flooding zones by using HEC-RAS model (Case study: Upstream the Taleghan dam). *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 2012;1(1):1-16. [Persian]
- [9]. Sheikh Alishahi N, Jamali AA, Hassanzadeh Neftoi M. Flood zoning using hydraulic model of river analysis (Case study: Manshad catchment - Yazd province). *Geographic space*. 2016;16(53):77-96. [Persian]
- [10]. Moharramzadeh Geliani N, Khorasanian H. Flood management by combining Hec-Ras hydraulic model and GIS (Case study of Kashfarud river) 16th Iran Hydraulic Conference, 2017, Ardabil, Iran. [Persian]
- [11]. Mokhtari F, Honarbakhsh A, Soltani S. Flood and non-flood flow zoning in arid and semi-arid rivers using HEC-RAS and HEC-GEO RAS models. 16th Iran Hydraulic Conference, 2017, Ardabil, Iran. [Persian]
- [12]. Rahmati O, Zeinivand H, Mosa Besharat M. Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2016;7(3):1000-1017. [Persian]
- [13]. Chen YH, Mossa J, Singh KK. Floodplain response to varied flows in a large coastal plain river. *Geomorphology*. 2020;354(1):107035.
- [14]. Shrestha A, Bhattacharjee L, Baral S, Thakur B, Joshi N, Kalra A, et al. Understanding suitability of MIKE 21 and HEC-RAS for 2D floodplain modeling. In *World Environmental and Water Resources Congress 2020: Hydraulics, Waterways, and Water Distribution Systems Analysis 2020 May 14* (pp. 237-253). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- [15]. Huțanu E, Mișu-Pintilie A, Urzica A, Paveluc LE, Stoleriu CC, Grozavu A. Using 1D HEC-RAS Modeling and LiDAR Data to Improve Flood Hazard Maps Accuracy: A Case Study from Jijia Floodplain (NE Romania). *Water*. 2020;12(6):1624.
- [16]. Desalegn H, Mulu A. Mapping flood inundation areas using GIS and HEC-RAS model at Fetam River, Upper Abbay Basin, Ethiopia. *Scientific African*. 2021;12(1):e00834.
- [17]. Munna GM, Alam MJ, Uddin MM, Islam N, Orthee AA, Hasan K. Runoff prediction of Surma basin by curve number (CN) method using ARC-GIS and HEC-RAS. *Environmental and Sustainability Indicators*. 2021;17(1):100129.
- [18]. Brunner GW. Hec-ras (river analysis system). In *North American Water and Environment Congress & Destructive Water 2002* (pp. 3782-3787). ASCE.
- [19]. Baumann CA, Halaseh AA. Utilizing interfacing tools for GIS, HEC-GeoHMS, HEC-GeoRAS, and ArcHydro. In *World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability 2011* (pp. 1953-1962).
- [20]. Zhang P, Li J, Yang X, Zhu H. Semi-automatic extraction of rock discontinuities from point clouds using the ISODATA clustering algorithm and deviation from mean elevation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;110(1):76-87.
- [21]. De Doncker L, Troch P, Verhoeven R, Bal K, Meire P, Quintelier J. Determination of the Manning roughness coefficient influenced by vegetation in the river Aa and Biebrza river. *Environmental fluid mechanics*. 2009;9(5):549-67.
- [22]. Kaya CM, Tayfur G, Gungor O. Predicting flood plain inundation for natural channels having no upstream gauged stations. *Journal of Water and Climate Change*. 2019;10(2):360-72.
- [23]. Schäuble H, Marinoni O, Hinderer M. A GIS-based method to calculate flow accumulation by considering dams and their specific operation time. *Computers & Geosciences*. 2008;34(6):635-46.
- [24]. Ponce VM, Hawkins RH. Runoff curve number: Has it reached maturity?. *Journal of hydrologic engineering*. 1996;1(1):11-9.
- [25]. Rajabizadeh Y, Ayyoubzadeh S, Ghomeshi M. Flood Survey of Khuzestan Province in 97-98 and Providing Solutions for its Control and Management in the Future. *Iranian journal of Ecohydrology*, 2019;6(4):1069-1084. [Persian]
- [26]. Hejazi A, Khodaie geshlag F, Khodaie geshlag L. Zoning the villages at flood risk in the Varkesh-Chai drainage basin by GIS and HEC - RAS software and HEC- GEO - RAS extension. *Researches in Geographical Sciences* 2019;19(53):137-155. [Persian]
- [27]. Shafiei Motlagh, K., Ebadati, N. Flood Zoning and Hydraulic Behavior Simulation Using HEC RAS in (GIS) (Case Study: Maroon River - Southwestern Iran). *Iranian journal of Ecohydrology*, 2020;7(2):397-409. [Persian]