



شبیه‌سازی هیدرولیکی سیمینه‌رود با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای HEC-RAS و ArcGIS

میرعلی محمدی^{*}، مهسا مهتدی^۲

۱-دانشیار مهندسی عمران- هیدرولیک و مکانیک مهندسی رودخانه، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲-دانش آموخته دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷

چکیده

رودخانه‌ها یکی از منابع مهم آب‌های سطحی هستند که با توجه به نقش مهم آنها در زندگی بشر باید مورد توجه قرار گیرند. هدف این تحقیق، مطالعه ویژگی‌های هیدرولیکی سیمینه‌رود و فرآیندهای حاکم بر آن با استفاده از تلفیق مدل HEC-RAS، در بستر نرم‌افزار ArcGIS از طریق الحاقیه HEC-GeoRAS به منظور شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی آن رودخانه با مساحت حوضه‌ی آبریز ۳۷۲۶ کیلومترمربع می‌باشد. نظر به اینکه مدل‌های چندبعدی نیاز به زمان و هزینه‌ی بالایی دارند، در قوس رودخانه با استفاده از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای و مدل تک‌بعدی HEC-RAS شبیه‌سازی چند بعدی انجام پذیرفت. در این میان، ۵۸ مقطع عرضی در مسیر رودخانه در نظر گرفته شده است که داده‌های اصلی مورد نیاز در این پژوهش شامل: نقشه‌های ارتفاعی، تصاویر ماهواره‌ای، شرایط مرزی و داده‌های هیدرومتری سیمینه‌رود می‌باشند. نتایج حاصل نشان داد، در بالادست رودخانه مقدار دبی برابر با ۳۱۶/۳ مترمکعب بر ثانیه و تراز سطح آب ۱۲/۸۵ متر و در پایین دست مقادیر دبی جریان و تراز سطح آب به ترتیب ۳۱۳/۶ مترمکعب بر ثانیه و ۱۱/۵۲ متر محاسبه شد. در دو طرف قوس رودخانه نیز تغییرات سطح آب نزدیک به ۵۰ سانتی‌متر بوده و سرعت جریان با مقدار فاصله از ساحل رودخانه نسبت مستقیم دارد؛ به طوری که بیشینه سرعت جریان با مقدار ۲/۲۰ متر بر ثانیه در فاصله‌ی حدود ۱/۵۰ متر اتفاق افتاده است. در صحت‌سنجی مدل، پارامتر آماری NSE در سطح آب و عمق جریان دارای مقادیر به ترتیب ۰/۸۴۵ و ۰/۸۰۵ بدست آمد که دقت بالای مدل‌سازی را نشان می‌دهد. این نتایج حاکی از دقت بالای مدل هیدرولیکی HEC-RAS در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان سیمینه‌رود را دارد. در نتیجه ملاحظه می‌شود تلفیق نرم‌افزارهای HEC-RAS و ArcGIS قابلیت بالایی در مدیریت دشت سیلابی داشته و باعث افزایش دقت، سرعت و کاهش هزینه‌های مطالعاتی مهندسی رودخانه می‌شود.

کلمات کلیدی: هیدرومورفولوژی، سیمینه‌رود، شبیه‌سازی جریان، دشت سیلابی، HEC-RAS، ArcGIS، شمال‌غرب ایران.

۱- مقدمه

کشور ایران جزو مناطق خشک و نیمه‌خشک است. مدیریت و استفاده بهینه از منابع آبی نیز یکی از راه‌های مطابقت با این شرایط می‌باشد، که با استفاده مطلوب از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و شناخت پدیده‌های هیدروژئومورفولوژیکی عملی خواهد بود (علیزاده، ۱۳۹۴: ۳۶). رودخانه‌ها منابع مهم آب‌های سطحی‌اند که با توجه به نقش مهم آنها در زندگی بشر باید مورد توجه و محافظت قرار گیرند و بطور کلی دائماً در حال تغییر و تحول می‌باشند (وینترباتوم^۱، ۱۹۹۰: ۲۰۰). رودخانه‌ها، تحت تأثیر شرایط اقلیمی، زمین‌شناختی، تکتونیکی و پدیده‌ی فرسایش و رسوب‌گذاری دست‌خوش تغییرات گوناگونی می‌شوند که از آن جمله می‌توان به تغییر امتداد جابجایی‌های عرضی و طولی، وقوع میانبرها، تغییر نوع رودخانه، تغییر در تراز بستر، تغییر دانه‌بندی و دگرگونی ویژگی‌های هندسی مسیر اشاره کرد (اسدی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۸) که تغییر در رژیم جریان نیز بدان افزوده می‌شود. به عبارتی، رفتار هیدرومورفولوژیک رودخانه عبارت از ظهور تغییر در بستر (توپوگرافی بستر) و ته‌نشینی رسوبات بستر است (واعظی‌پور، ۱۳۹۰: ۷۷). در نتیجه، رودخانه‌ها از مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرایندهای ژئومورفولوژیک زمین و چرخه‌ی فرسایش می‌باشند. بستر و ویژگی‌های هیدرومورفولوژی رودخانه می‌تواند تحت تأثیر وقوع سیل، حرکات تکتونیک لایه‌های زمین، احداث سدها، تغییرات اقلیمی، کاربری اراضی و دخالت‌های انسانی مستوجب تغییرات شود. این تغییرات خواه در بعد فیزیکی و ریخت‌شناسی و خواه به لحاظ کیفی، می‌تواند تحت تأثیر عوامل طبیعی یا غیرطبیعی باشد (شایان و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۹). تغییرات اقلیمی، تکتونیکی و ... از جمله عوامل طبیعی هستند که می‌توانند تغییراتی را در نیمرخ طولی، عرضی و به طور کلی در بستر جریان رودخانه‌ها و همچنین در شیب‌های مشرف به دره‌ها به وجود آورند. نظارت بر رودخانه‌ها به منظور کسب شناخت دقیق و بررسی معضلات و مخاطرات احتمالی در جهت حفظ و بهره‌برداری از منابع طبیعی ضروری می‌باشد. تغییرات بستر رودخانه در طی زمان طولانی آشکار می‌شود و به همین دلیل کمتر مورد توجه پژوهشگران، مسئولان و برنامه‌ریزان قرار می‌گیرد؛ در حالی که این تغییرات پیامدهای سنگین و زیان‌بار به دنبال خواهد داشت. رودخانه‌ها در سیمای کلی کره‌ی خاکی نقش دارند و تعیین‌کننده‌ی شکل زیستن انسان در آن نیز می‌باشند. بررسی هیدرومورفولوژی رودخانه‌ها برای درک شرایط کنونی و پتانسیل تغییرات احتمالی آنها در آینده ضروری بوده و تنها از این طریق می‌توان عکس‌العمل طبیعی آنها را نسبت به تغییرات طبیعی یا اقدامات ناشی از اجرای طرح‌های اصلاح مسیر و تثبیت کناره‌ها پیش‌بینی نمود و میزان جابجایی ابعاد تغییرات و الگوی آنها را تشخیص داد.

1- Winterbottom

مطالعات هیدرولیک جریان در یک رودخانه این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان ضمن شناخت رفتار ریخت‌شناسی هیدرولیکی رودخانه، آثار اقدامات ساماندهی را بر عملکرد رفتاری آن مورد ارزیابی کمی و کیفی قرار داده و از این طریق امکان تشخیص عوامل ناپایداری و اعمال معیارهای مناسب حفاظتی و اقدامات مهندسی را پیشاپیش میسر نماید (حمزه‌پور و یاسی، ۱۳۸۵: ۹). در همین راستا در طی چند دهه‌ی اخیر استفاده از مدل‌های کامپیوتری روند انجام محاسبات را آسان‌تر و انجام تحلیل‌ها را دقیق‌تر نموده است (عشقی و همکاران، ۱۳۹۵: ۹۱). از جمله آن، مدل‌های سری زمانی است که در دهه‌های اخیر در مدل‌سازی رسوب به‌کار گرفته شده است (برزگری و دستورانی، ۱۳۹۴: ۲۲۱)، اما مدل‌های ریاضی با روش حل عددی، تحت شرایط اولیه و مرزی مشخص، در بررسی جریان رودخانه‌ای کارایی دارند. جهت شبیه‌سازی ویژگی جریان در بازه‌ای مشخص از رودخانه، علاوه بر اطلاعات صحرایی، قابلیت مدل در مواردی همچون عمق، سرعت و در کناره‌های رودخانه از نیازهای اساسی در مطالعات مهندسی رودخانه است (چانگ و همکاران^۱، ۱۹۸۲: ۶۸۲).

تاکنون جهت شبیه‌سازی هیدرولیک جریان رودخانه‌ای با استفاده از مدل‌های ریاضی مختلف تحقیقات فراوانی انجام شده است. نظر به اینکه مدل هیدرولیکی HEC-RAS توانایی محاسبه پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند ارتفاع سطح آب و سرعت جریان در کل طول مسیر در حالت‌های جریان دائمی و غیردائمی را دارد (کوک^۲ ۲۰۰۸: ۴۵)، (وو و همکاران^۳، ۲۰۲۰: ۴۳)، می‌توان بیان نمود تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی^۴ (GIS) (رسولی، ۱۳۷۷) و مدل هیدرولیکی HEC-RAS قابلیت‌های خوبی برای تحلیل هیدرولیکی جریان را دارند (ظهیری و آشناور، ۱۴۰۰: ۶۴). در این پژوهش بر اساس داده‌های اندازه‌گیری دبی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه، مقاطع مورد نیاز و سایر اطلاعات لازم، بازه‌ای از سیمینه‌رود شبیه‌سازی و بررسی شده است (یانگ و همکاران^۵، ۲۰۱۴: ۲۸۹). شبیه‌سازی زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که امکان حل معادلات ریاضی حاکم با روش‌های تحلیلی وجود نداشته و انجام آزمایش‌ها و مشاهده پدیده‌ها در محیط واقعی آنها مشکل یا غیرعملی باشد (اودین و همکاران^۶، ۲۰۱۱: ۳۱). پدیده‌هایی قابلیت مدل‌سازی را دارند که علاوه بر استخراج روابط ریاضی حاکم بر آن پدیده، دارای روش قابل قبول و ابزار مناسب برای حل آن را داشته باشد (واعظی‌پور، ۱۳۹۰: ۷۹). امروزه ضرورت شناخت دقیق‌تر و مکانیسم مؤثر در پدیده‌ی وقوع سیلاب به منظور مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح و اصولی بیش از پیش احساس می‌شود. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص سیلاب صورت گرفته است اما مطالعه شبیه‌سازی مسیر مجرای رودخانه در حوضه‌ی آبریز سیمینه‌رود به عنوان اولین تحقیق است که با بکارگیری تصاویر ماهواره‌ای و مدل HEC-RAS در تلفیق با GIS در تحقیق

1-Chang et al.

2-Cook

3-Wu et al.

4-Geographic information system

5-Young et al.

6-Uddin et al.

حاضر می‌باشد. یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های این تحقیق، مدل‌سازی یک بعدی و شبیه‌سازی سرعت جریان در مقطع‌های عرضی است. با توجه به اینکه سرعت جریان در مقاطع عرضی و قوس‌ها دارای مقادیر متفاوتی است؛ این امر می‌تواند در بررسی و مدیریت پدیده‌ی انباشت آب و پخش سیلاب و همچنین پدیده‌ی آب‌شستگی در نواحی مختلف رودخانه حائز اهمیت باشد. نتایج حاصل از این تحقیق علاوه بر استفاده گسترده در جامعه‌ی علمی مهندسی عمران و آب، برای کارشناسان و برنامه‌ریزان در منطقه و در حیطه مدیریت بحران، مدیریت سیلاب و به‌روز رسانی اطلاعات مورد نیاز دستگاه‌های اجرایی دارای اهمیت فراوان است.

۱-۱- پیشینه‌ی تحقیق

در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در خصوص موضوع حاضر انجام شده است که در اینجا به تعدادی از آنها به شرح زیر اشاره می‌شود:

اسدی‌نیا و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی تأثیر پل‌های احداث شده بر رفتار هیدرولیکی جریان رودخانه‌ی شهرچای ارومیه، با تلفیق نرم‌افزارهای HEC-RAS و HEC-GeoRAS پرداخته و مشاهده کردند که وجود سازه‌ها، در ظرفیت جریان عبوری رودخانه و تراز سطح آب تأثیر قابل توجهی ندارند.

صمدیان و همکاران (۱۳۹۹) طرح‌های ساماندهی رودخانه‌ی زرينه‌رود در حومه‌ی شهر شاهین‌دژ را بررسی نمودند. نتایج نشان داد به ازای دوره‌ی بازگشت ۲۵ ساله، سطح آب بالاتر آمده و سواحل در معرض خطر قرار می‌گیرند. همچنین میزان خطای برآورد حجم جریان و میزان خطای نسبی در دبی اوج برابر ۰/۱۹۷ و ۱/۷۹۲ بوده و بر اساس دامنه‌ی شاخص‌های آماری تناسب کاملی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود داشته است.

محمدی و همکاران (۱۳۹۹) پهنه‌بندی ریسک سیلاب بر روی رودخانه‌ی باراندوزچای ارومیه انجام شده است. برای روندیابی هیدرولیکی سیل، ضریب زبری مانینگ مناسب در نرم‌افزار HEC-RAS اجرا شده و پهنه‌ی سیل از طریق الحاقیه HEC-GeoRAS در نرم‌افزار ArcMap مشخص گردیده است.

هنربخش و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از مدل HEC-RAS رفتار هیدرومورفولوژیک کانال رودخانه‌ی خشکه‌رود فارسان را در شرایط سیلابی با دوره‌ی بازگشت‌های مختلف بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که رودخانه خشکه‌رود فارسان به سمت یک تعادل نسبی از نظر فرسایش و رسوبگذاری پیش می‌رود.

ظهیری و آشناور (۱۴۰۰) جریان رودخانه‌ی کارون را با استفاده از تلفیق نرم‌افزار GIS و مدل هیدرولیکی HEC-RAS شبیه‌سازی کردند. نتایج معیارهای آماری مورد استفاده نشان داد مدل‌های ریاضی در شبیه‌سازی جریان دقت قابل قبولی دارند.

صمدی و عزیزیان (۱۴۰۰) در پژوهشی به بررسی تغییرات هیدرومورفولوژیکی رودخانه کرج بر اثر اجرای طرح‌های توسعه‌ی منابع آب و مهندسی رودخانه پرداختند. در این راستا، از مدل‌های جریان یک بعدی و دو بعدی HEC-RAS، مدل رسوب HEC-RAS و مدل RVR Meander برای شبیه‌سازی رودخانه استفاده شد.

مولودی و محمدی (۱۴۰۰) با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و ایجاد مقاطع عرضی توسط HEC-GeoRAS مشخصات ژئومتری در رودخانه شهرچای محاسبه گردید. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که تعیین ضریب زبری مانینگ و مقایسه با تصاویر به لحاظ عوامل متعدد در تخمین ضریب زبری از دقت زیادی برخوردار است.

بنواایدس^۱ و همکاران (۲۰۰۱) با استفاده از GIS و مدل هیدرولوژیکی HEC-RAS روش‌های تجزیه و تحلیل کنترل سیلاب را در حوضه‌ی آبریز کلیریک انجام دادند و سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله مشخص گردید. نتایج آنها نشان داد پهنه سیلابی با دوره‌ی بازگشت ۵۰ ساله نسبت سال‌های بالاتر بسیار زیاد است.

پاپنبرگر^۲ و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مدل HEC-RAS مقادیر ضریب زبری مانینگ، حاصل از بازدیدهای میدانی و فرمول‌های تجربی، از طریق روش شبیه‌سازی نقشه‌های احتمالی سیلاب گرفتگی را ایجاد کردند و برای رسیدن به ارزیابی قطعی استفاده از تلفیق لایه‌های مختلف با مدل ریاضی را پیشنهاد داده‌اند.

گیبسون^۳ (۲۰۱۰) با استفاده از مدل HEC-RAS به مدل‌سازی و ارزیابی اثرات درازمدت سیل در این رودخانه پرداخت. نتایج حاصل نشان داد میزان خسارت وارده به محدوده‌های اطراف رودخانه با دوره‌ی بازگشت‌های مختلف متفاوت است.

حقیابی و زارعه دشت^۴ (۲۰۱۲) در شبیه‌سازی رودخانه‌ی کارون با استفاده از مدل HEC-RAS بیان داشتند که این مدل با دقت خوبی قادر به شبیه‌سازی رودخانه‌ی مورد مطالعه می‌باشد. همچنین این مدل نسبت به انتخاب گام‌های زمانی حساس است.

1-Benavides
2-Pappenberger

3-Gibson
4-Haghiabi & Zarehdasht

خلف‌الله و سعیدی^۱ (۲۰۱۸) با استفاده از مدل HEC-RAS و نرم‌افزار GIS پیش‌بینی مکانی پهنه سیلابی را در تونس انجام دادند. نتایج حاصل نشان داد بر اساس دوره‌ی برگشت‌های ۱۰، ۲۰ و ۵۰ ساله همبستگی خوبی بین داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده وجود دارد.

ترمینی^۲ (۲۰۲۱) با ترکیب اطلاعات گرفته شده از تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های میدانی، داده‌های هیدرولوژیکی و مدل HEC-RAS الگوی تغییرات بستر رودخانه‌ی تالیامنتو^۳ در ایتالیا شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد ترکیبی از روش‌های مختلف نتایج خوبی را در بررسی تغییرات کاربری‌ها به لحاظ هندسی و اثرات هیدرولیکی را نشان می‌دهد و خروجی دقیق و مناسب را می‌توان تهیه نمود.

سان^۴ و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی به بررسی مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی سیل در بستر رودخانه هانچی چین پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان داد مدل HEC-RAS اثر شبیه‌سازی خوبی برای جلوگیری و کنترل سیل داشته و می‌تواند در اعمال بهترین روش مدیریتی در حوضه‌ی مورد استفاده قرار گیرد.

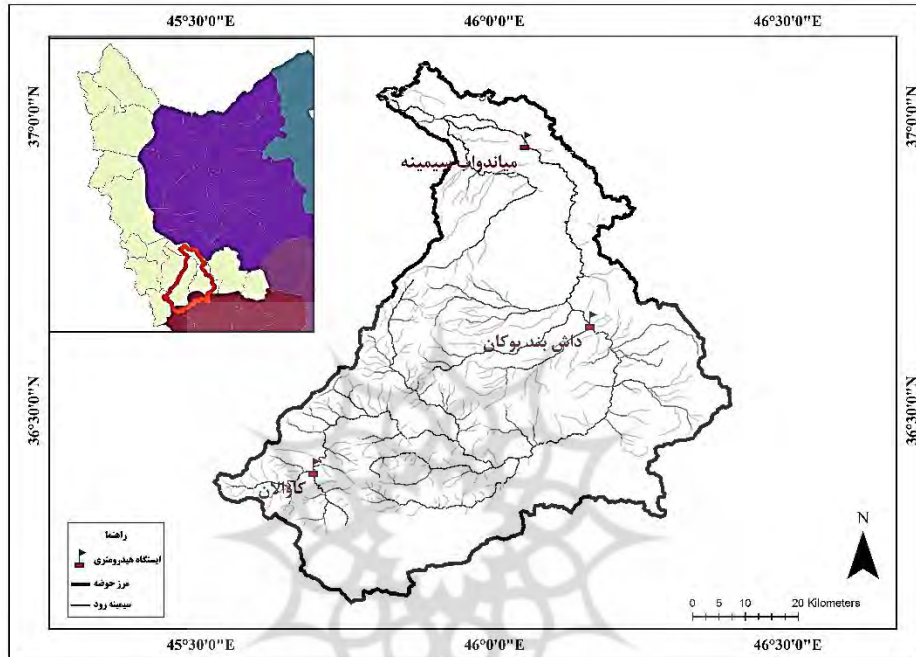
بررسی پیشینه‌ی تحقیق صورت گرفته حاکی از آن است که مدل هیدرولیکی HEC-RAS از قابلیت نسبتاً بالایی در ارزیابی تغییرات بستر رودخانه‌ها دارد.

۲- مواد و روش‌ها

سیمینه‌رود در بخش گسترده‌ای از محدوده‌ی شهرستان بوکان در استان آذربایجان غربی قرار دارد که بنا بر گزارشات شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی این رودخانه از کوهستان‌های منطقه‌ی سقز، بانه و کردستان عراق سرچشمه گرفته و پس از عبور از میانه‌ی شهر بوکان و اطراف شهر میاندوآب در مسیر خود شاخه‌های زیادی دریافت کرده و به موازات زرينه‌رود وارد دریاچه‌ی ارومیه می‌شود. مختصات جغرافیایی حوضه‌ی سیمینه‌رود ۴۵ درجه تا ۴۶ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۷ درجه شمالی واقع شده است و دارای مساحت ۳۷۲۶ کیلومتر مربع، میانگین بارندگی سالانه در ارتفاعات ۴۶۷/۳ و در دشت ۳۳۹/۱ میلی‌متر، دمای متوسط سالانه در ارتفاعات ۱۰/۶ و در دشت ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (شکل ۱).

1- Khalfallah & Saidi
 2- Termini

3- Tagliamento
 4- Sun



شکل (۱): موقعیت منطقه (محدوده) مورد مطالعه
Fig. (1): Location of the study area (region)

روش تحقیق حاضر بر اساس اهداف کاربردی و از نظر ماهیت توصیفی و تحلیلی است. آمار و اطلاعات مورد استفاده در این پژوهش مانند دبی جریان، تراز سطح آب و پارامترهای هواشناسی در ایستگاه کاولان، داشبند بوکان و سیمینه‌رود از شرکت آب منطقه‌ای و سازمان هواشناسی استان آذربایجان غربی تهیه گردید. نقشه ارتفاعی منطقه‌ی مورد مطالعه به عنوان اولین داده مورد نیاز شبیه‌سازی با دقت ۱۰ متر از سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۱ دریافت و به سیستم مختصات متریک (UTM Zone 38N) تبدیل شد. در ادامه شبکه نامنظم مثلثی و شبکه آبراه استخراج گردید. با توجه به اینکه تصاویر ماهواره‌ای ارتفاع کف رودخانه به صورت ارتفاع سطح آب نمایان می‌شود، بسترسازی رودخانه در محیط GIS با دقت بالا انجام شده است. جهت شبیه‌سازی جریان نیز از نرم‌افزار HEC-RAS استفاده گردید. از طریق الحاقیه HECgeoRAS در محیط GIS با استفاده از ابزار 2D Flow Area سطح جریان در پهنه‌ی رودخانه‌ی مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار HEC-RAS ترسیم گردید و با استفاده از ابزار SA/2D Area BC Lines مناطق بالادست و پایین‌دست رودخانه مشخص شد. اعمال شرایط مرزی بستگی به نوع جریان از نظر زیربحرانی و فوق‌بحرانی و همچنین از نظر دائمی و غیردائمی بودن آن دارد.

1- USGS

از نظر جریان فوق بحرانی و زیر بحرانی در رودخانه‌ی سیمینه به دلیل تغییرات ناگهانی شیب رودخانه از بازه‌ی کوهستانی در بالادست به بازه‌ی دشت در پایین دست و امکان تشکیل جهش هیدرولیکی، به مدل شرایط ترکیبی یا به عبارتی شرط مرزی در بالادست و پایین دست معرفی شده است.

در این تحقیق، تمام شبیه‌سازی‌ها با فرض جریان دائمی و پروفیل سطح آب بر اساس روش گام به گام استاندارد^۱ از مقطعی به مقطع دیگر برای حل معادله‌ی انرژی مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه شده است.

$$y_2 + z_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

که در آن، y_1 و y_2 عمق آب در دو مقطع متوالی، z_1 و z_2 ارتفاع کانال اصلی از سطح مبنا، δ_1 و δ_2 ضرایب تصحیح سرعت، V_1 و V_2 سرعت متوسط جریان، g شتاب ثقل و h_e افت انرژی بین دو مقطع است که افت‌های اصطکاکی، انقباضی و انبساطی بین دو مقطع عرضی را در نظر می‌گیرد و به صورت رابطه‌ی ۲ بیان می‌شود:

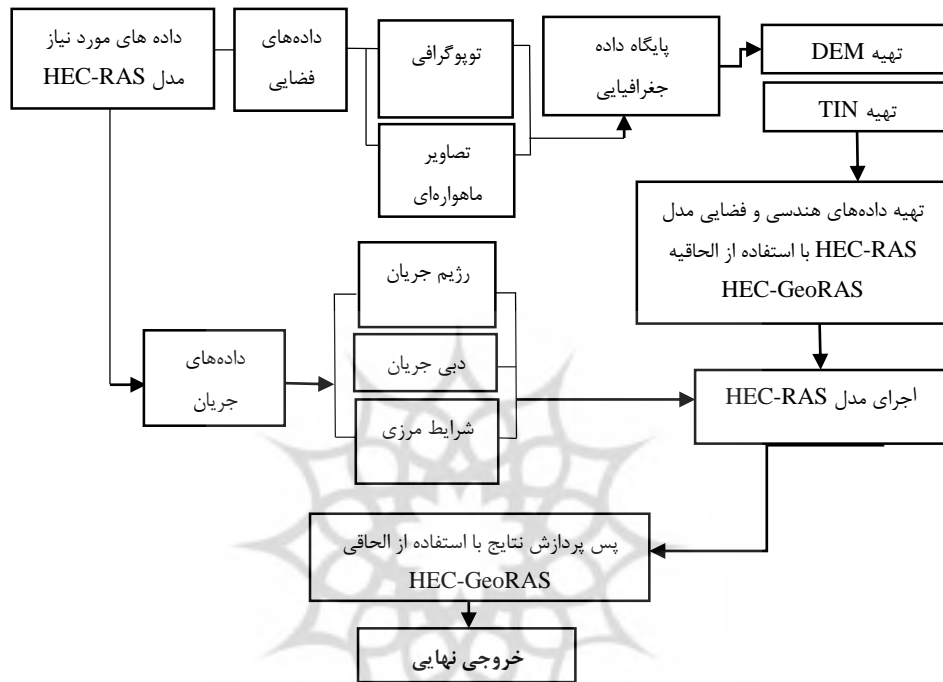
$$h_e = LS_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

در این رابطه: L فاصله بین دو مقطع، S_f شیب اصطکاکی بین دو مقطع و C ضریب افت ناشی از انبساط و انقباض است. سرانجام، انتقال کل در HEC-RAS با جمع کردن انتقال زیرمقطع‌های کانال و سیلاب‌دشت‌ها با استفاده از معادله مانینگ طبق رابطه‌ی زیر بدست آمد:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (3)$$

که در آن، Q دبی جریان، n ضریب زبری مانینگ، S شیب گرادیان انرژی، A مساحت مقطع و R شعاع هیدرلیکی است (محمدی، ۱۳۹۸: ۵۲).

در ادامه کار، مرز دشت سیلابی با استفاده از لایه مسیر جریان^۲ مشخص گردید و مقاطع عرضی با فواصل ۳۰۰ متر در مسیر رودخانه تعداد ۵۸ مقطع عرضی در بازه‌ی مورد مطالعه از رودخانه سیمینه رود تعیین گردید، که علاوه بر رودخانه سواحل کناری را نیز در بر می‌گیرند. دبی اوج با دوره‌ی بازگشت‌های چند ساله با استفاده از توزیع احتمالاتی لوگ پیرسون تیپ III پارامتریک به عنوان ورودی به مدل معرفی شد، چون بیشترین برازش با داده‌های طبیعی را دارد. گام‌های زمانی محاسبات برای حل معادلات ۵ دقیقه در نظر گرفته شد. در نهایت نتایج حاصل از مدل‌سازی از جمله عمق، سرعت و ارتفاع سطح آب در بازه‌ی مورد مطالعه از رودخانه بدست آمد. نمودار کلی روش کار در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲): فلوچارت مراحل انجام کار

Fig. (2): The methodology flowchart

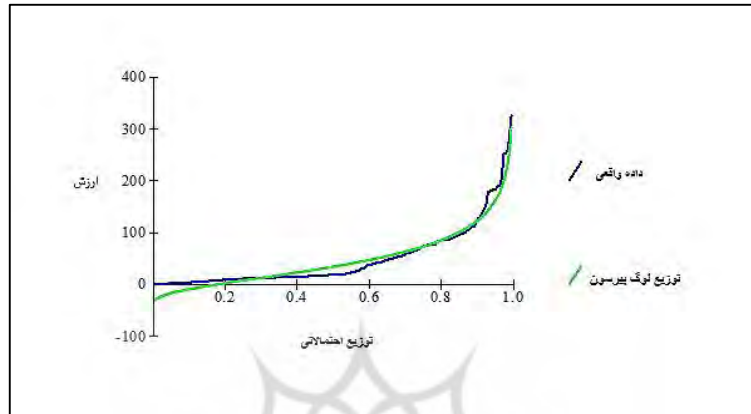
۳- یافته‌ها و بحث

متوسط آبدهی‌های ماهانه و سالانه ایستگاه هیدرومتری پل میاندوآب محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است که در جدول ۱ مشخصات ایستگاه هیدرومتری و متوسط آورد ۵، ۱۰ و ۲۰ سال اخیر به همراه متوسط آورد سالانه رودخانه (به میلیون مترمکعب) آمده است. با بهره‌گیری از داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری، تجزیه و تحلیل آمار و اطلاعات سیلاب‌ها در ایستگاه‌های هیدرومتری انجام شد. درنخستین گام، دبی‌های بیشینه لحظه‌ای و یک‌روزه ثبت شده در محدوده‌ی مطالعاتی گردآوری شد. شکل ۳ توزیع احتمالاتی داده‌های دبی به همراه دوره بازگشت (قید شده در جدول ۲) را نشان می‌دهد.

جدول (۱): مشخصات رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری (میلیون مترمکعب)

Table (1): River profile at the site of the hydrometric station MCM

نام ایستگاه هیدرومتری	طول حوضه در محل ایستگاه	متوسط آورد ۵ سال	متوسط آورد ۱۰ سال	متوسط آورد ۲۰ سال	متوسط آورد سالانه رودخانه
پل میاندوآب	۱۵۸/۸۱	۳۴۲	۲۷۸/۸	۳۰۷/۲	۴۴۶



شکل (۳): توزیع‌های احتمالاتی دبی

Fig. (6): Probabilistic distributions of discharge

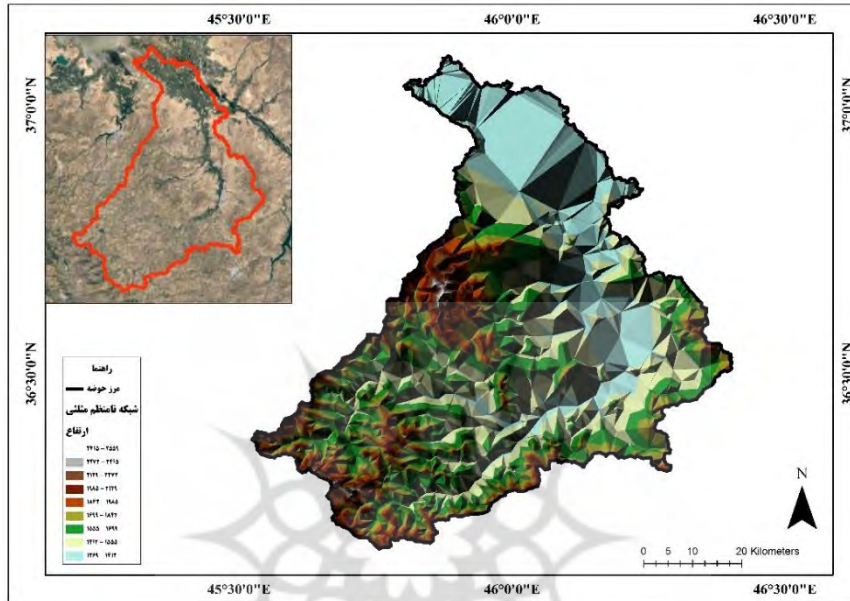
جدول (۲): مقادیر دبی با دوره‌های بازگشت مختلف در ایستگاه پل میان‌دوب

Table (2): Discharge values with different return periods at Miandoab bridge station

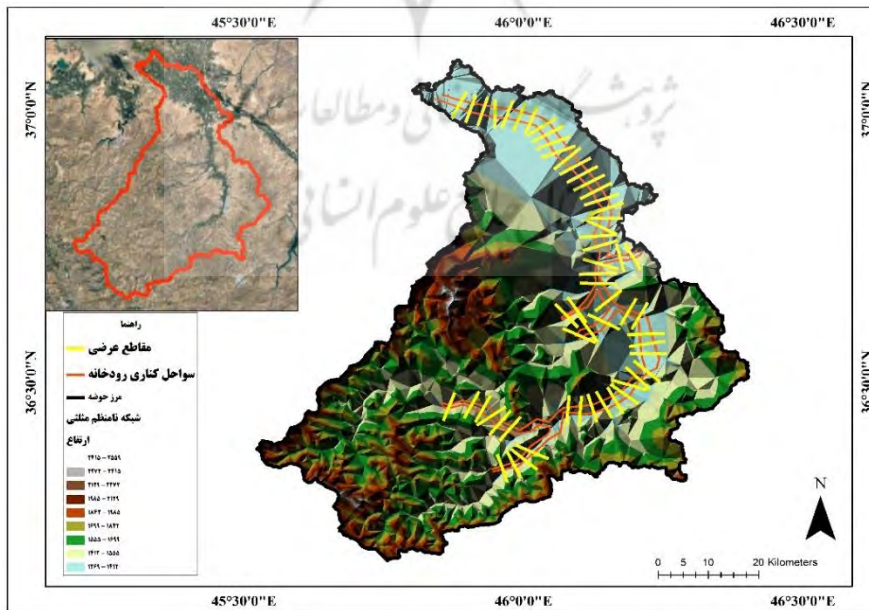
دوره‌ی بازگشت (سال)	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
دبی (مترمکعب بر ثانیه)	۵۰/۱	۷۵/۴	۱۰۰/۲	۱۷۴/۷	۲۴۸/۴	۴۲۶/۵	۵۴۴/۴

نقشه‌ی ارتفاع با استفاده از تصاویر USGS استخراج شد، طبق آن بیشترین ارتفاع ۲۵۵۹ متر، کمترین ارتفاع ۱۲۶۹ متر است. پس از اصلاح نقشه DEM، نقشه‌ی شبکه‌ی نامنظم مثلثی^۱ نیز تهیه گردید که ارتفاع منطقه را بر اساس ساختار مثلثاتی نامنظم نمایش می‌دهد. لایه‌ی TIN از کاربردی‌ترین لایه‌ها در اجرای مدل HEC-RAS می‌باشد (شکل ۴). با استفاده از لایه‌ی TIN مجرای اصلی جریان و سواحل چپ و راست رودخانه مشخص شد. لایه‌ی جریان اصلی به منظور تعیین ابعاد مسیر هیدرولیکی جریان در مجرای اصلی جریان و سواحل راست و چپ آن در ناحیه‌ی سیلاب‌گیر استفاده می‌شود. برای ترسیم مقاطع عرضی موارد زیر را باید در نظر گرفت. خطوط معرف مقاطع باید از ساحل چپ به سمت ساحل راست ترسیم شوند. این خطوط می‌توانند فقط یک نقطه‌ی تقاطع با خط مرکزی رودخانه و خطوط نشان‌دهنده‌ی مسیر جریان داشته باشند. این خطوط باید عمود بر جهت جریان در کانال اصلی رسم شود. خطوطی که در این لایه رسم می‌شود نباید متقاطع باشند. (شکل ۴).

1- TIN

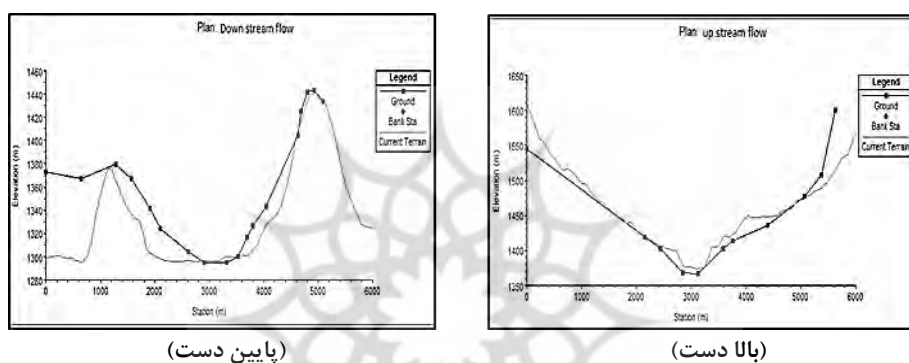


شکل (۴): نقشه‌ی شبکه‌ی نامنظم مثلثی حوضه‌ی آبریز مطالعاتی
 Fig. (3): Irregular trigonometry network map for the studied basin



شکل (۵): تصویر شماتیک مقاطع عرضی رودخانه‌ی حوضه مطالعاتی
 Fig. (4): Schematic image of cross sections of the studied river basin

مقاطع عرضی رودخانه اولین و مهم‌ترین عامل در تهیه‌ی مدل رودخانه می‌باشد. از طرفی این مقاطع گویای ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی کناره‌ها، بستر و عمق آب در بخش‌های مختلف رودخانه است (شکل ۶ را ملاحظه کنید). مقدار دبی در بالادست ۳۱۶/۳ مترمکعب بر ثانیه و تراز سطح آب متناظر ۱۲/۸۵ متر و در پایین دست مقادیر دبی و سطح تراز آب به ترتیب ۳۱۳/۶ مترمکعب بر ثانیه و ۱۱/۵۲ متر محاسبه گردید.



شکل (۶): تصاویر مقاطع عرضی در بالادست و پایین دست رودخانه‌ی حوضه‌ی مطالعاتی

Fig. (5): Images of cross sections at upstream and downstream of the studied river basin

یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های ریخت‌شناسی رودخانه به منظور بررسی تغییر در راستای رودخانه، نیمرخ طولی است که بیانگر شیب بستر در هر نقطه از رودخانه در نتیجه واکنش عوامل زمین، ریخت‌شناسی، سنگ‌شناسی و آب و هوا می‌باشد. نمودار پروفیل سطح آب و هیدروگراف جریان بر اساس آمار ایستگاه پل میان‌دوآب (روی سیمینه‌رود) در محل خروجی حوضه نشان داده شده است. طبق جدول ۳ مقادیر مربوط به ضریب همبستگی^۱، مقدار نسبت واریانس مدل‌سازی در مقایسه با واریانس داده‌های مشاهداتی^۲ و مجذور میانگین مربعات خطا^۳ برای صحت‌سنجی مدل هیدرولیکی آورده شده است که بر اساس آن با توجه به نزدیکی مقدار R^2 به عدد ۱، نشان دهنده برازش بهتر و دقت بالای مدل می‌باشد. NSE نیز در پارامترهای سطح آب و عمق جریان به ترتیب برابر با ۰/۸۰۵ و ۰/۸۴۵ بدست آمد که دقت بالای مدل‌سازی را نشان می‌دهد. همچنین RMSE محاسبه شده برای پارامتر دبی جریان ۱۹/۱۴ و تراز سطح آب ۰/۱۴ است. این نتایج، حاکی از دقت بالای مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان می‌باشد. همچنین شبیه‌سازی در محیط GIS می‌تواند تأثیر بسزایی در دقت خروجی بدست آمده از مدل را داشته باشد.

1- R2
2- NSE

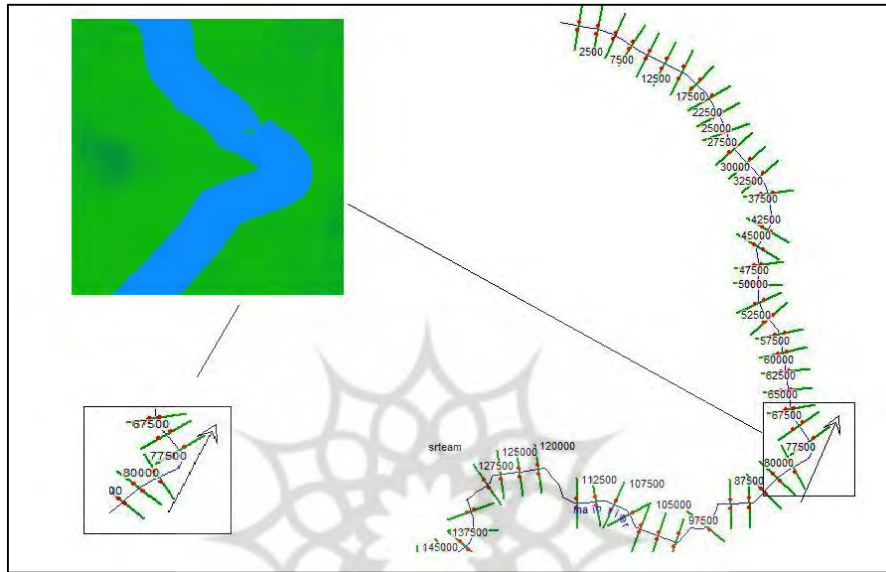
3- RMSE

جدول (۳): مقادیر همبستگی و خطا در مدل هیدرولیکی

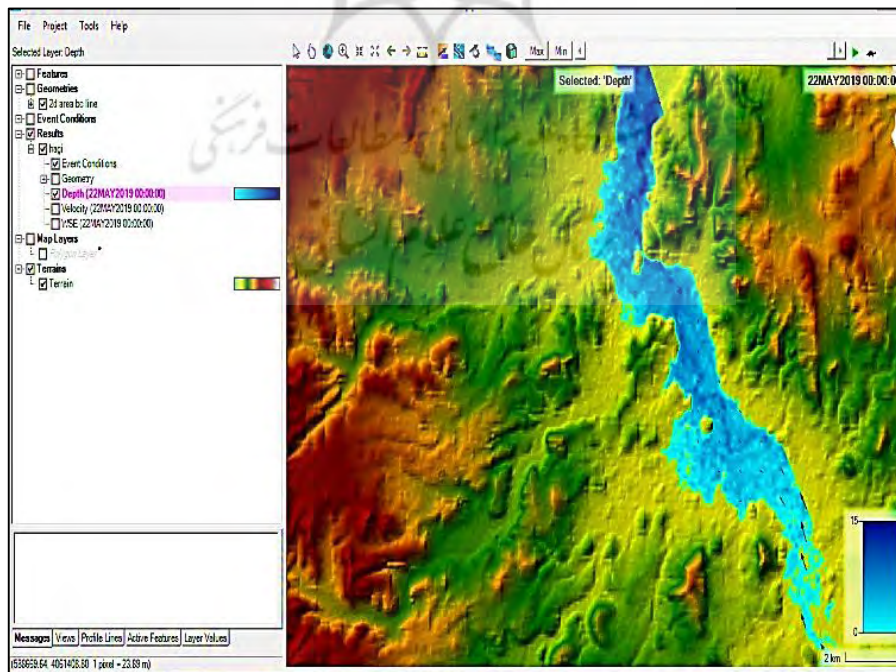
Table (3): Correlation and error values in the hydraulic model

پارامتر آماری	R ²	NSE	RMSE
دبی جریان	۰/۹۰۱	۰/۸۴۵	۱۹/۱۴
سطح آب	۰/۹۲۳	۰/۸۰۵	۰/۱۴

بررسی جریان غیرماندگار که جریان سیلاب از آن جمله است دارای اهمیت بسیاری در مهندسی رودخانه می‌باشد. از آنجا که این نوع جریان پیچیدگی‌های خاص خود را دارد، بنابراین شبیه‌سازی جریان با مدل‌های ریاضی یکی از دقیق‌ترین و ارزان‌ترین روش‌هاست. دامنه‌ی تغییرات عمق آب از ۱ تا ۳/۵ متر بوده و همچنین سرعت جریان از ۰/۵ تا ۳ متر بر ثانیه در محدوده‌ی مورد مطالعه، متغیر می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS در مقطع قوسی شکل (شکل ۷) نشان داد تغییرات سطح آب در دو طرف قوس رودخانه نزدیک به ۵۰ سانتی‌متر بوده و سرعت جریان مقدار فاصله از جداره‌ی رودخانه نسبت مستقیم دارد به طوری که بیشترین سرعت جریان با مقدار ۲/۲۰ متر بر ثانیه در فاصله‌ای حدود ۱/۵۰ متر اتفاق افتاده است. عمق جریان در قوس بیشتر از مسیرهای مستقیم بوده و جریان رودخانه پس از عبور از قوس به حالت عادی بر می‌گردد. به طوری که عمق جریان در قبل و بعد از قوس برابر با ۲/۵۴ و ۲/۹۶ و در قوس داخلی برابر با ۳/۲۴ می‌باشد. بردارهای بیشینه‌ی سرعت در نواحی نزدیک به قوس برونی رخ داده که این امر موجب تشدید فرسایش می‌شود. با توجه به اینکه شبیه‌سازی یک بعدی جریان با استفاده از مدل HEC-RAS انجام شده است لذا طبق نتایج حاصل، مدل با دقت قابل قبولی جریان را در قوس رودخانه شبیه‌سازی نموده است. همچنین نتایج نشان داد پهنه‌ی سیلابی در دوره‌ی بازگشت ۱۰ ساله برابر ۳۶۳/۸۹ کیلومترمربع بوده و در دوره‌ی بازگشت ۲۵ ساله ۶۴۳/۴۰ کیلومترمربع از اراضی اطراف رودخانه به زیر آب می‌رود. با توجه به اینکه دشت میاندوآب واقع در ورودی سیمینه‌رود به دریاچه‌ی ارومیه از جمله مهم‌ترین قطب کشاورزی استان است و نتایج بدست آمده از مدل نیز بیشترین پهنه‌ی سیلابی را در این محدوده نشان می‌دهد. این امر موجب وارد آمدن خسارات گسترده به کشاورزان و اراضی اطراف رودخانه خواهد بود؛ بنابراین در این منطقه تمهیدات خاصی باید از سوی مسئولان اندیشیده شود. شایان ذکر است طبق بازدیدهای میدانی، تعرض کشاورزان به محدوده‌ی بستر و حریم رودخانه نیز مشاهده می‌شود و این امر موجبات افزایش ریسک در مخاطره سیل را فراهم می‌کند (شکل ۸ ملاحظه شود).



شکل (۷): تصویر نمونه از رودخانه‌ی سیمینه و موقعیت قوس مورد مطالعه
Fig. (7): A sample image of Simineh River and the position of studied arch



شکل (۸): تصویر نمونه از شبیه‌سازی جریان در طول رودخانه در حوضه‌ی مطالعاتی
Fig. (8): A sample image of flow simulation along the river basin

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از مدل‌های ریاضی یکی از روش‌های متداول در شبیه‌سازی جریان در رودخانه است. در این تحقیق برای شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در سیمینه‌رود از نرم‌افزارهای GIS و HEC-RAS استفاده شده است. مدل هیدرولیکی HEC-RAS از جمله مدل‌های تک بعدی است که با توجه به صرفه‌جویی در زمان و هزینه، کارایی گسترده‌ای در پروژه‌های مهندسی رودخانه دارد. جهت افزایش قطعیت نتایج شبیه‌سازی عمق و سرعت جریان توسط مدل، از تصاویر ماهواره‌ای و محیط GIS در تهیه‌ی نقشه‌ی ارتفاع و استفاده در HEC-GeoRAS بهره گرفته شده است که با نتایج محققانی همچون پاپنبرگر و همکاران (۲۰۱۷) و ترمینی (۲۰۲۱) هم‌خوانی دارد. جهت صحت‌سنجی نتایج مدل، از روش‌های مختلف آماری بهره گرفته شد. با توجه به مقادیر بدست آمده، ضریب NSE در دبی جریان و تراز سطح آب بیش از ۰/۸۰ محاسبه شد که بیانگر دقت بالای روش بکار رفته در شبیه‌سازی است و با نتایج ظهیری و آشناور (۱۴۰۰) نیز هم‌خوانی دارد.

بطور کلی نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر آن است که محدود کردن مجرای جریان در نقاطی موجب افزایش عمق جریان و در نقاطی دیگر افزایش سرعت جریان را به همراه دارد. که این امر سبب آب‌گرفتگی زمین‌های مجاور (به دلیل افزایش در عمق جریان) یا پدیده‌ی آب‌شستگی بستر و کناره رودخانه (به دلیل افزایش در سرعت جریان) خواهد شد. در هر دو صورت تغییرات قابل ملاحظه‌ای در ریخت‌شناسی هیدرولیکی (هیدرومورفولوژی) رودخانه ایجاد می‌شود که از آن جمله می‌توان به تغییر مسیر جریان در رودخانه یا عریض‌تر شدن رودخانه تحت تأثیر فرسایش کناره‌ی آن و تغییر شیب رودخانه در اثر پدیده‌ی فرسایش (کف‌کنی) اشاره کرد. نتایج مربوط به مدل هیدرولیکی HEC-RAS دلالت بر توانایی مدل در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در بازه‌ی مورد مطالعه داشته است و با نتایج محققان، زارعه دشت و حقیابی (۲۰۱۲) و سان و همکاران (۲۰۲۱) هم‌خوانی دارد. با توجه به تأمین اطلاعات اولیه هندسی، نرم‌افزارهای ArcGIS و HEC-RAS قابلیت بالایی در مدیریت دشت سیلابی داشته و باعث افزایش دقت، سرعت و کاهش هزینه‌های مطالعات مهندسی رودخانه می‌شود.

۵-منابع

- Alizadeh, A. (2015). Principles of Applied Hydrology, *Astan-Quds Razavi Publications Press*, Meshad, Iran.
- Asadi, F. Z., Fazl Owla, R., & Emadi, A. (2017). Investigation of river bed changes using HEC-RAS4.0 model (Case study: Hall River), *J. Watershed Management Research*, 8(15): 35-25.
- Barzegari, F., & Dasturani, M.T., (2015) Forecasting the suspended load of the river using time series models and artificial neural network (Case study: Kazakh station of GorganRood River, *J. Watershed Management Research*, 6(12): 225-216.
- Benavides, J A., Pietruszewski, B., Kirsch, B., Bedient, P. (2001). Analyzing flood control alternatives for the clear creek watershed in a geographic information systems framework. *In Bridging the Gap: Meeting the World Water and Environmental Resources Challenges*, pp. 1-10.
- Chang, H.H. (1982). Mathematical model for erodible channels. *ASCE Journal of Hydraulics Division*, 108(5): 678-689.
- Cook, A. C. (2008). Comparison of one-dimensional HEC-RAS with two-dimensional FESWMS model in flood inundation mapping. Graduate School of Purdue University, *West Lafayette*, USA.
- Eshghi, P., Farzad Mehr, J., Dasturani, M.T., & Arab Asadi, Z., (2016). Investigation of efficiency of intelligent models in estimating suspended river sediments (case study: Babaman Watershed, North Khorasan), *J. Watershed Management Research*, 7(14): 88-95.
- Gibson, S., Nygaard, C., & Sclafani, P. (2010). Mobile bed modeling of the Cowlitz river using HEC-RAS: Assessing flooding risk and impact due to system sediment. *In 2nd Joint Federal Interagency Conference*, Vol. 27, Las Vegas, NV, USA.
- Haghiabi, A.H. & E. Zaredehdasht. (2012). Evaluation of HEC-RAS ability in erosion and sediment transport forecasting, *World Applied Sciences Journal*, Vol. 17: 1490-1497.
- Hamzehpour, R., & Yasi, M. (2006). Estimating the amount of bed load in rivers with pebble beds, *7th Seminar on River Engineering, Shahid Chamran University*, Ahwaz, Iran.
- Honarbakhsh., A, Hedayatipour., C, & Samadi., H. (2020). Investigation of the effects of sand harvesting on hydromorphological behavior of river canal case study of dry river Farsan, *Quantitative Geomorphology Researches*, Vol. 9: 216-214.
- Khalfallah, C. B., & Saidi, S. (2018). Spatiotemporal floodplain mapping and prediction using HEC-RAS-GIS tools: Case of the Mejerda river, Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 142: 44-51.
- Mohammadi, M., (2020). Applied Hydraulics, *Urmia University Publications Press*, Urmia, Iran.

- Mohammadi, M., Mohammadi, F., Fakherifard, A., & Bijanvand, S. (2020). Extraction of flood risk zoning control curve (case study: Baranduz-chay River, Urmia). *J. Hydrogeomorphology*, University of Tabriz, 6(22): 87-108.
- Moludi, M., & Mohammadi, M. (2021). Derivation of rule curve for flood risk zone (case study: Baranduz-chay River). *J. Water and Soil Science*, University of Tabriz, Iran. doi:10.22034/ws.2021.1225.
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M., & Blazkova, S. J. J. O. H. (2005). Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *J. Hydrology*, 302(1-4): 46-69.
- Rasuli, A. (1998). Necessity of creating the tendency of geographical information systems in geographical groups of the country; No.166.
- Samadian, M., Hessari, B., Mohammadi, M. and Alami, M.T. (2020). Assessment of river training plans using MIKE11 model (a case study: Zarineh River in Shahindezh city conjunction). *J. Hydrogeomorphology*, University of Tabriz, 7(22): 21-41.
- Shayan., S, Sharifi Kia., M, & Naseri, N. (2007). Analysis of morphological factors in spatial-spatial pattern changes of Alvand river; *Geographic Research Quarterly*, 32nd Year, Issue 1: 36-25.
- Sun, M., Quan, H., Lin, Z. (2021). Research on flood disaster simulation of Hongqi river basin based on HEC-RAS, *5th International Symposium on Resource Exploration and Environmental Science*, 781(2): 42-51. doi:10.1088/1755-1315/781/2/022017.
- Termini, D. (2021). Investigation of a gravel-bed river's pattern changes: Insights from satellite images. *Applied Sciences*, 11(5): 1-17. doi:10.3390/app11052103.
- Uddin, K., Basanta, S., & Shamsul Alam, M. (2011). Assessment of morphological changes and vulnerability of river bank erosion alongside the river Jamuna using remote sensing. *J. Earth Science and Engineering*, 1(1): 29-34.
- Vaezipour, H.A, & Taleb Bidakhti, N. (2011). Simulation of morphological changes of Sistan river (Hirmand bifurcated distance to Zahak dam).
- Winterbottom, S.J. (2000). Medium and short-term channel planform changes on the rivers Tay and Tummel, Scotland, *Geomorphology*, 34(3-4): 195-208.
- Wu, Y., Wang, Y., Yang, Y., Wang, J., Liu, H., & Fu, G. (2020). Flood simulation and disaster loss assessment of flood storage and detention areas based on HEC-RAS. *J. Water Resources Research*, 9(1): 42-51.
- Young, R.A., & Loomis, J. B. (2014). Determining the economic value of water: concepts and methods. Routledge.
- Zahiri, J. & Ashnavar, M. (2021). Efficiency of HEC-RAS and GIS in one-dimensional simulation of river hydrodynamics. *J. Civil Engineering and Environment*, 51(2): 63-72.