

## بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه و نقش آن در فرسایش و رسوب‌گذاری با استفاده از HEC-RAS (مطالعه موردی: رودخانه خرم‌آباد - دوآب و یسیان)

علیرضا ایلدرمی\* - دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر  
آزاده شیخی پور - کارشناس ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۹      تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۱۲/۱۰

### چکیده

تغییرات مورفولوژی رودخانه‌ها از مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرآیندهای ژئومورفولوژیک چرخه فرسایش می‌باشند. هدف از این تحقیق، مطالعه تغییرات مورفولوژی رودخانه خرم‌آباد - دوآب و یسیان و بررسی عوامل مؤثر در تغییر شکل هندسی و ایجاد روابط بین آن‌ها است. به‌منظور برآورد دبی با دوره بازگشت‌های مختلف از نرم‌افزار SMADA جهت برازش داده‌ها استفاده شد. پس از وارد کردن داده‌های هندسی و جریان، شرایط مرزی برای بازه بالادست، هیدروگراف جریان و برای بازه پایین‌دست، منحنی سنج‌تهیه شد. در طول مسیر رودخانه خرم‌آباد - دوآب و یسیان، چهار نمونه از مصالح بستر و کناره‌های رودخانه برداشت و تغییرات دانه‌بندی رسوبات، وضعیت شیب و اتصال شاخه‌های فرعی مهم به رودخانه اصلی تعیین و نمونه‌ها برداشت و آزمایشات دانه‌بندی صورت گرفت. داده‌های رسوب به نرم‌افزار وارد و از رابطه (Ruby) در تعیین سرعت سقوط و انتقال رسوبات و دمای آب استفاده شد. به‌منظور بررسی ارتباط بین داده‌های هندسی و هیدرولیکی از خروجی مدل هیدرولیکی HEC-RAS، به بررسی تناسب روابط رگرسیونی خطی ساده، درجه ۲، درجه ۳ و نمایی پرداخته شد. با تعیین میزان همبستگی بین متغیرها، روابط رگرسیونی، با استفاده از نرم‌افزار SPSS، از بین روابط تعیین شده بین دو متغیر (متغیر وابسته و مستقل) رابطه‌ای که بیش‌ترین ضریب تعیین، کمترین خطای استاندارد و کمترین سطح معنی‌داری را داشت به منزله رابطه مناسب انتخاب شد. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که ظرفیت حمل رسوب در بازه مورد مطالعه رودخانه خرم‌آباد - دوآب و یسیان متغیر می‌باشد. مقادیر رسوبات محاسبه شده به‌وسیله رابطه ایکرز - وایت به‌عنوان مناسب‌ترین رابطه نشان داد از بین متغیرهای مستقل ظرفیت رسوب بیش‌تر به دبی جریان وابسته است. اندازه ذرات رودخانه مورد مطالعه مشخص شد که در بازه اول (ایستگاه چم‌انجیر)، رسوب‌گذاری، در بازه دوم (بین دو ایستگاه)، فرسایش و در بازه سوم (ایستگاه دوآب و یسیان)، نیز رسوب‌گذاری رخ می‌دهد.

واژگان کلیدی: مورفولوژی رودخانه، آنالیز حساسیت، ظرفیت انتقال رسوب، مدل HEC-RAS، رودخانه خرم‌آباد - دوآب و یسیان

## مقدمه

رودخانه‌ها از مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرایندهای ژئومورفولوژیک زمین و چرخه فرسایش بوده‌اند و تاکنون مطالعات گسترده‌ای بر روی تغییرات مورفولوژیک رودخانه‌ها و عوامل مؤثر بر آن‌ها صورت گرفته است. مورفولوژی رودخانه علم شناخت سیستم رودخانه از نظر شکل و فرم کلی، ابعاد و ویژگی‌های هندسه-هیدرولیک، جهت و نیمرخ طولی بستر و نیز روند و مکانیزم تغییرات آن می‌باشد (تلوری، ۱۳۸۳، ۴۵۴). رودخانه به‌عنوان سیستمی پویا، مکان و خصوصیات مورفولوژیکی خود را همواره برحسب زمان، عوامل ژئومورفیک، زمین‌شناختی، هیدرولوژیکی و گاه در اثر دخالت بشر تغییر می‌دهد. خصوصیات مورفولوژیکی رودخانه به‌واسطه ویژگی پویای آن همواره دچار تغییر بوده و این تغییرات می‌تواند به - دلیل فرسایش کناری و جابه‌جایی مرزهای رودخانه هر ساله سطح زیادی از اراضی کشاورزی، نواحی مسکونی و تأسیسات ساحلی را در معرض نابودی و تخریب قرار دهد (رضایی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۱، ۱). امروزه با پیشرفت روز افزون رایانه‌ها و توسعه هرچه بیش‌تر روش‌های عددی، مدل‌های ریاضی کاربرد فوق‌العاده وسیعی یافته‌اند. در مدل‌های ریاضی سیستم رودخانه توسط یک سری معادلات ریاضی که بیان‌گر خصوصیات آن سیستم می‌باشند، معرفی شده و سپس این معادلات به روش‌های تحلیلی یا عددی حل می‌گردند. توسعه یک مدل ریاضی برای بیان یک پدیده خاص عبارت است از شناخت قوانین حاکم بر آن و بیان آن در قالب مجموعه‌ای از روابط ریاضی (این روابط ممکن است به طریق تجربی و یا تئوری به دست آیند) و سپس دادن شکل خاصی به این روابط به‌گونه‌ای که بتوان در کوتاه‌ترین مدت، رفتار واقعی پدیده را که در طبیعت رخ می‌دهد، پیش‌بینی نمود. یک مدل ریاضی ممکن است سیر تکاملی خود را در صحنه عمل و به‌کارگیری در پروژه‌های عینی طی کند (عزیزیان و همکاران، ۱۳۹۲). در تحلیل جریان رودخانه‌ها، مدل‌های فیزیکی و ریاضی همچون ابزاری مناسب نقش ایفا می‌کنند. کاربرد مدل‌های فیزیکی به دلیل نیازمندی به فضای وسیع، هزینه زیاد و زمان طولانی جهت انجام دادن آزمایش‌ها اغلب توصیه نمی‌شود. به همین دلیل بسیاری از مسائل مهندسی رودخانه را می‌توان با مدل‌های ریاضی بررسی کرد. کاربرد مدل‌های ریاضی مناسب از جمله مدل HEC-RAS جهت بررسی هیدرولیک جریان‌های سیلابی ضروری است (هازاریکا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۵، ۱). هدف از انجام این تحقیق، مطالعه تغییرات رودخانه خرم‌آباد - دواب و یسیان، شناخت مورفولوژی رودخانه و فرایندهای حاکم بر آن و بررسی عوامل مؤثر در تغییر شکل هندسی و ایجاد روابط بین آن‌ها است تا از طریق نتایج و دستاوردهای آن بتوان به مدیریت صحیح و علمی در منطقه مورد مطالعه پرداخت. همچنین، تشابهات و تضادها را تشخیص داده و در رفع آن‌ها کوشید تا بتوان در محیطی امن و همساز با طبیعت و هماهنگ با روند آن، در جهت این تغییرات گام برداشت و در برنامه‌ریزی‌ها از آن استفاده کرد به‌ویژه در جهت کنترل سیلاب و مسیلابی‌یابی بتوان گام مؤثری برداشت. بر این اساس در این تحقیق رودخانه خرم‌آباد- دواب و یسیان واقع در استان لرستان به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است تا فرایندهای حاکم بر رودخانه خرم‌آباد - دواب و یسیان و مورفولوژی حاصل از این فرایندها تجزیه و تحلیل و روابط بین عوامل حاکم بر رودخانه و تغییرات هندسی حاصل از این عوامل استخراج و با استفاده از مدل HEC-RAS بررسی شود. از جمله مشکلاتی که پیش رو این تحقیق قرار دارد می‌توان به حجم بالای اطلاعات موردنیاز مدل مورداستفاده و مشکل گردآوری این آمار و اطلاعات اشاره کرد. تاکنون تحقیقات زیادی با استفاده از مدل HEC-RAS در سراسر دنیا صورت گرفته و توانایی‌های این مدل موردبررسی قرار گرفته است. همچنین در ایران چندین مورداستفاده از این مدل به‌منظور شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان و رسوب رودخانه‌های مختلف صورت گرفته است. در ادامه تعدادی از مطالعاتی که مرتبط با موضوع این تحقیق انجام شده به‌اختصار شرح داده می‌شود.

1. Hazarika
2. Brice
3. Mosley

برایس<sup>۱</sup>، (۱۹۷۴)، در تحقیقی در کشور کانادا، نشان داد که دبی‌های سیلابی را می‌توان از روی ابعاد رودخانه به‌طور موفقیت‌آمیزی تخمین زد. وی در تحقیق خود ۷۱ رودخانه با بستر گراولی در ایالت آلبرتا انتخاب کرد و رابطه زیر را به دست آورد:

$$W_b = 4.57Q_2^{0.527}$$

که در آن  $W_b$  عرض رودخانه در مقطع پیر برحسب فوت و  $Q_2$  دبی سیلابی با دوره بازگشت دو سال برحسب فوت مکعب در ثانیه است.

مسلی<sup>۲</sup>، (۱۹۷۹)، داده‌های هیدرولوژی، رسوب‌شناسی و مورفولوژی ۷۳ رودخانه آبرفتی را در ایجاد رابطه پیش‌بینی کننده برای پارامترهای هیدرولوژیکی استفاده کرد و به رابطه زیر دست‌یافت:

$$Q_{ma} = 1.6AB0.9ASPRAT - 0.376S - 0.392D_{mean}^{0.278}$$

که در آن  $Q_{ma}$  دبی متوسط سالانه برحسب مترمکعب بر ثانیه،  $Ab$  سطح مقطع رودخانه در مقطع پیر برحسب مترمربع،  $ASPRAT$  نرخ جهت  $(D_{max}/R)$  که حاصل تقسیم عمق حداکثر مقطع پیر بر شعاع هیدرولیکی مقطع پیر است،  $S$  شیب رودخانه مقطع پیر و  $D_{mean}$  متوسط قطر ذرات رسوبی بستر (m) است.

استرکامپ و هدمان<sup>۳</sup>، (۱۹۸۲)، در مطالعه‌ای در ایالات متحده، بر روی ۳۲ آبراهه با شیب زیاد در ایالت‌های مونتانا، وایومینگ، داکوتای جنوبی، کلرادو و نیومکزیکو رابطه‌ای بین  $Q_{ma}$  و  $W_a$  برقرار کردند که به‌صورت زیر است:

$$Q_{ma} = 0.017 W_a^{1.98}$$

که در آن  $Q_{ma}$  متوسط دبی سالانه برحسب فوت مکعب بر ثانیه و  $W_a$  عرض رودخانه در سطح مرجع کانال فعال برحسب فوت است.

یمانی و همکاران (۱۳۹۱) در بررسی مئاندرهای رودخانه هررود در لرستان نشان داده‌اند که میزان فرسایش کناری در کناره‌هایی که از مواد سست مانند آبرفت، شیل، مارن و کنگلومرای سخت نشده وجود دارد، بیش‌تر از کناره‌های دیگر است.

آندام<sup>۴</sup> (۲۰۰۳) در مقایسه رژیم رودخانه‌های جنگلی و خارج از جنگل با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS و الحاقیه HEC-GeoRAS تغییرات سرعت و عدد فرود را در این دو نوع رودخانه مورد بررسی قرار داد و تأثیر پوشش گیاهی بر رژیم و رفتار هیدرولیکی جریان را با این مدل مورد مقایسه قرار داد و نتیجه گرفت که استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS می‌تواند مقادیر عددی مناسبی را جهت مطالعه رژیم و سایر خصوصیات هیدرولیکی جریان رودخانه در اختیار محققین قرار دهد.

پاپنبرگر<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۵) به تحلیل عدم قطعیت جریان غیرماندگار به‌صورت یک‌بعدی در مدل HEC-RAS با انتخاب مقادیر متفاوت ضریب زبری اقدام کردند. آن‌ها در این تحقیق محدوده‌ای بین ۰.۰۰۱ تا ۰.۰۹ را برای ضریب مانینگ انتخاب کردند. در خروجی‌های هیدرولیکی تغییراتی مشاهده شد که در برخی از بازه‌ها تغییرات خوب بود و در برخی از بازه‌ها نامناسب. آن‌ها بیان کردند که این آنالیز به شرایط مرزی و نوع رژیم بستگی دارد که مدل در آن اجرا می‌شود تا از این طریق بتوان تغییرات را به خوبی مشاهده کرد.

1. Osterkamp and Hedman

2. Andam

3. Pappenberger

جواهری، (۱۳۸۴)، در تحقیقی که بر روی رودخانه کارون انجام داد سازگاری مدل‌های مختلف را جهت پیش‌بینی روند تغییرات مورفولوژیک رودخانه کارون بررسی نمود و بهترین مدل را برای این منظور معرفی کرد. کوک<sup>۱</sup> (۲۰۰۸) در پایان‌نامه خود به مقایسه مدل یک‌بعدی HEC-RAS و مدل دوبعدی FESWMS در تهیه نقشه طغیان سیل پرداخت. از الحاقیه HEC-GeoRAS و سیستم مدل آب سطحی (SMS) از طریق ابزارهای PreRAS و Post RAS ورودی‌های مدل جهت تهیه نقشه سیل‌خیزی استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد افزایش تعداد مقاطع عرضی در فرآیند شبیه‌سازی، وسعت سیل‌خیزی را در نزدیکی خاکریزها افزایش می‌دهد. همچنین مدل دوبعدی FESWMS در فرآیند پیش‌بینی، وسعت سیل‌خیزی بالاتری را با قدرت تفکیک‌پذیری بیش‌تر نشان می‌دهد این در حالی است که مدل HEC-RAS همان وسعت سیل‌خیزی یا حتی بیش‌تر را با قدرت تفکیک‌پذیری کمتری نشان می‌دهد.

امامقلی‌زاده و همکاران (۱۳۸۹) می‌باشد که در پژوهشی به بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه شیرین دره با استفاده از مدل HEC-RAS پرداختند و نتیجه گرفتند که در بین معادلات انتقال رسوب، تابع لارسن (کوپلند) در این رودخانه نسبت به سایر توابع انتقال رسوب، برآورد بهتری دارد. پژوهش اسدی و همکاران (۱۳۹۰) نیز نشان داد که از بین معادلات انتقال رسوب موجود در مدل HEC-RAS معادله میر-پیتر-مولر، در رودخانه تالار، بیش‌ترین تطابق را با واقعیت دارد و می‌تواند برای پیش‌بینی تغییرات مقاطع در این رودخانه مورد استفاده قرار گیرد.

اکبرزاده و همکاران، (۱۳۹۰)، با مطالعه و بررسی صحت‌سنجی توابع انتقال رسوب و تأثیر پارامترهای هیدرولیکی بر چگونگی رسوب‌گذاری مخزن سد شهید عباسپور با استفاده از مدل عددی HEC-RAS نتیجه گرفتند که از بین روش‌های سرعت سقوط با معیار شکل پروفیل طولی، سه روش روی، فن‌راین و گزارش ۱۲ تقریباً مشابه به هم و روش توفالتی به طرز محسوسی متفاوت از سایر روش‌ها می‌باشد. در رابطه با توابع مختلف انتقال رسوب نیز با معیار شکل پروفیل طولی، تابع ایکرز-وایت، بهترین هم‌پوشانی‌ها را با پروفیل مشاهده‌شده در واقعیت دارد.

همچنین اکبری و همکاران، (۱۳۹۰)، ترکیب‌های مختلف معادلات انتقال رسوب و روش‌های مختلف محاسبه سرعت سقوط ذرات در مدل HEC-RAS را در پیش‌بینی تغییر فرم بستر رودخانه بکار گرفتند و نتایج نشان داد که معادلات انتقال رسوب حساسیت چندانی به روش محاسبه سرعت سقوط ذرات در مدل‌سازی تغییر فرم بستر رودخانه ندارند و تفاوت عمده نتایج بستگی به نوع معادله انتقال رسوب دارد.

پیرو و همکاران (۱۳۹۱) نیز در پژوهشی نشان دادند که حجم متوسط رسوب خروجی از رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS به خوبی قابل محاسبه می‌باشد.

رهنورد و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی و شبیه‌سازی انتقال رسوب با استفاده از مدل HEC-RAS4.1.0 در رودخانه دز (بازه بین ایستگاه حرمه تا بامدژ) نشان داد که در این مدل فرمول لارسن بهترین جواب را داشته است اما در مجموع، میزان خطای فرمول توفالتی نسبت به روابط دیگر کمتر می‌باشد.

شای<sup>۲</sup> و همکاران، (۲۰۱۲)، با بررسی فرآیند فرسایش و انتقال رسوب و مکانیسم آن بر روی شیب‌های (۱۰، ۲۰، ۱۵، ۲۵ درجه) در چین به این نتیجه رسیدند که میزان فرسایش و انتقال رسوب به‌خصوص ذرات بزرگ‌تر از ۰.۱۵۲ میلی‌متر در مناطق شیب‌دار بستگی به قدرت جریان و دبی داشته و حمل رسوب با افزایش شیب نیز رابطه مستقیم دارد.

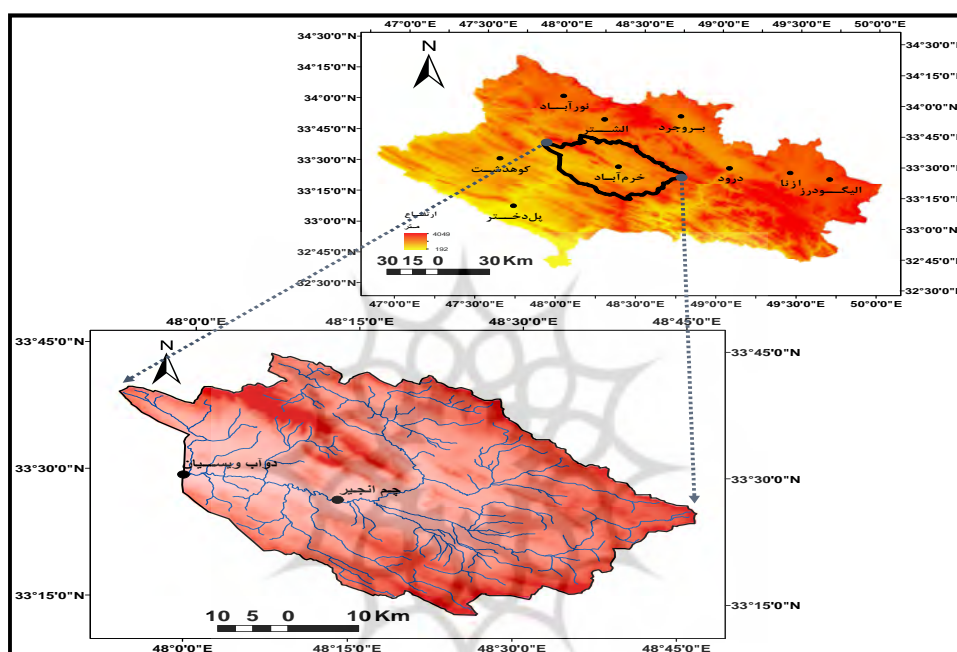
4. Cook

1. Shi

## مواد و روش‌ها:

## شناسایی منطقه مورد مطالعه:

منطقه مورد مطالعه در غرب ایران از ایستگاه چمنجیر در ۱۲ کیلومتری خرم‌آباد با طول جغرافیایی  $48^{\circ}13'40''$  و عرض جغرافیایی  $33^{\circ}26'47''$  و مساحت حوزه بالادست ۱۶۵۰ کیلومترمربع تا ایستگاه دوآب و سیسان با طول جغرافیایی  $47^{\circ}59'26''$  و عرض جغرافیایی  $33^{\circ}29'29''$  و مساحت حوزه بالادست ۲۴۵۰ کیلومترمربع را شامل می‌شود. این بخش از رودخانه دائمی خرم‌آباد دارای حدود ۴۰ کیلومتر طول می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه آمده است.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان لرستان و حوزه آبخیز خرم‌آباد- دوآب و سیسان

## مدل HEC-RAS

مدل ریاضی HEC-RAS، یک نرم‌افزار کاربردی و مناسب در مطالعات هیدرولیک رودخانه‌ها به شمار می‌آید. این مدل می‌تواند جریان متغیر تدریجی را با هر نوع مقطع عرضی در حالات دایمی، غیردایمی و همچنین انتقال رسوب در مرز متحرک را به صورت یک‌بعدی شبیه‌سازی نماید. این مدل از معادله انرژی برای محاسبات استفاده کرده و برای حالتی که تغییرات نیمرخ سطح آب سریع باشد، از معادله مومنتم استفاده می‌کند. در این مدل امکان ارتباط با GIS وجود دارد به طوری که معمولاً مقاطع عرضی و ضرایب مانینگ از محیط GIS وارد محیط HEC می‌شود و پس از انجام محاسبات هیدرولیکی مجدداً به محیط GIS وارد شده و خروجی در آن‌جا به دست می‌آید. البته می‌توان نتایج را در محیط HEC نیز مشاهده نمود. در این مدل انواع پل‌ها، آبگذرها، سرریزها، سازه‌های موجود در سیلاب‌دشت و انواع کانال‌ها با اشکال مختلف شبیه‌سازی می‌شوند. در این مدل می‌توان زبری در طول کانال و همچنین فاصله مقاطع را متغیر انتخاب کرد. در این مدل هفت معادله انتقال رسوب منظور شده است (راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی و فیزیکی در مطالعات مهندسی و ساماندهی رودخانه، ۱۳۸۶).

## اجرای اولیه مدل HEC-RAS

در این مطالعه، از روابط تجربی (۱) تا (۲) برای برآورد ضریب زبری مانینگ بهره گرفته شد (ریچارد، ۱۹۹۷).

$$n = 0.047d_{50}^{1.5} \quad (37-3) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$n = \frac{d_{50}^{1.6}}{21.1}$$

$$n = 0.013d_{65}^{1.6} \quad (39-3) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$n = 0.038d_{90}^{1.6}$$

که در این روابط  $d_5$  قطر متوسط ذرات نمونه‌گیری شده از رودخانه برحسب متر است.  $d_{65}$  عبارت است از قطر ذرات که ۶۵٪ وزنی ذرات بستر آبراهه از آن عبور می‌کند و برحسب متر است.  $d_90$  عبارت است از قطر ذرات که ۹۰٪ وزنی ذرات بستر از آن عبور می‌کند و برحسب متر است به جز جنس مواد بستر آبراهه و دانه‌بندی آن‌ها، پارامترهای مؤثر دیگری نیز مانند وضعیت پوشش گیاهی، پیچ‌وخم‌های رودخانه و تغییرات سطح مقطع رودخانه در زبری هیدرولیکی رودخانه‌ها تأثیر می‌گذارد.

برای شروع کار با مدل ابتدا دبی با دوره بازگشت‌های مختلف برآورد گردید که برای این کار از دبی ایستگاه چمنجیر و دوآب ویسیان با دوره‌های آماری (۱۳۳۴-۱۳۳۵) تا (۱۳۹۱-۱۳۹۲) استفاده گردید تا در مراحل بعدی تحقیق مورد استفاده قرار گیرد. برای انجام شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در این پژوهش با توجه به اطلاعات در دسترس، جریان غیرماندگار در نظر گرفته شد. برای این منظور پس از وارد کردن داده‌های هندسی، داده‌های جریان به مدل وارد و شرایط مرزی برای بازه بالادست، هیدروگراف جریان و برای بازه پایین دست، منحنی سنج در نظر گرفته شد. پس از این مرحله دستور اجرای مدل داده شد و نتایج استخراج گردید. در مرحله بعد شبیه‌سازی رسوب انجام داده شد. بدین منظور در طول مسیر رودخانه خرم‌آباد - دوآب ویسیان، چهار نمونه از مصالح بستر و کناره‌های رودخانه برداشت شد. محل برداشت نمونه‌ها، با توجه به تغییرات دانه‌بندی رسوبات، تغییر وضعیت شیب (توپوگرافی) و اتصال شاخه‌های فرعی مهم به رودخانه اصلی تعیین شد. بر این اساس، در ایستگاه چمنجیر، ویسیان علیا، شوراب سفلی و ایستگاه دوآب ویسیان با توجه به یکنواختی مصالح، نمونه‌ها برداشت شدند. پس از عملیات برداشت، نمونه‌ها برای انجام آزمایشات دانه‌بندی به آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک منتقل شدند. پس از این مرحله داده‌های رسوب به نرم‌افزار وارد و شرایط مرزی هم برای بازه بالادست و هم برای بازه پایین دست منحنی دبی - رسوب انتخاب گردید. با توجه به این که تفاوت اصلی فرمول‌های سرعت سقوط ذرات مربوط به میزان ذرات ریزدانه و هم‌چنین میزان چسبندگی و کلوئیدی بودن آن ذرات می‌باشد لذا از رابطه روبی (Ruby) در تعیین سرعت سقوط و انتقال رسوبات استفاده شد. جهت انجام شبیه‌سازی رسوب نیاز به وارد کردن داده‌های جریان شبه غیرماندگار بود که پس از وارد کردن این داده‌ها و انتخاب شرط مرزی سری جریان برای بازه بالادست و منحنی دبی - اشل برای بازه پایین دست، محاسبات مربوط به شبیه‌سازی رسوب را انجام داده و نتایج استخراج شد. از آنجا که بعضی از روش‌های محاسبه سرعت سقوط ذرات رسوبی مانند رابطه روبی (Ruby) نیاز به دمای آب دارند، اطلاعات مربوط به دمای آب نیز در قسمت مربوط به جریان شبه غیرماندگار وارد مدل شد. شرط مرزی رسوب به صورت یک منحنی سنج رسوب که ارتباط بین دبی جریان و دبی رسوب را به دست می‌دهد به مدل تعریف شد. بر اساس بررسی‌های به عمل آمده و با توجه به زیاد بودن داده‌های ورودی مشخص شد که برای شناخت کامل مدل و انجام موفق مرحله واسنجی، لازم است برای پارامترهای مدل آنالیز حساسیت انجام شود.

### بحث و نتایج

به منظور برآورد دبی با دوره بازگشت‌های مختلف از دبی ایستگاه چمنجیر و دوآب ویسیان با دوره‌های آماری (۱۳۳۴-۱۳۳۵) تا (۱۳۹۱-۱۳۹۲) استفاده گردید. پس از تکمیل این آمار توسط نرم‌افزار SMADA آمار حداکثر دبی ایستگاه چمنجیر و دوآب ویسیان با توزیع‌های مختلف آماری برازش داده شد و با توجه به این که آمار برای توزیع لوگ پیرسون

نوع سه بهترین برازش را داشتند. بنابراین با استفاده از توزیع مذکور مقادیر دبی برای دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه و نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: دبی با دوره بازگشت‌های مختلف رودخانه خرم‌آباد بازه چمنجیر- دواب و سیان

نام ایستگاه	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
چمنجیر	۲۷۶.۸۸	۱۴۴.۷۲	۱۹۹.۵۴	۲۷۹.۰۲	۳۴۵.۱۰	۴۱۶.۷۲	۴۹۴.۱۴
دواب و سیان	۷۷.۵۴	۱۶۸.۹۱	۲۵۹.۴۱	۴۱۶.۷۷	۵۷۱.۴۱	۷۶۳.۷۵	۱۰۰۱.۳

### نتایج شبیه‌سازی هیدرولیک جریان

در این مرحله به منظور بررسی ارتباط بین داده‌های هندسی و هیدرولیکی به دست آمده از خروجی مدل هیدرولیکی-HEC RAS، به بررسی تناسب روابط رگرسیونی خطی ساده، درجه ۲، درجه ۳ و نمایش پرداخته شد. پس از انجام آزمون همگنی داده‌ها، تعیین نرمال بودن داده‌های اصلی (هرمتغیر) و تعیین میزان همبستگی بین متغیرها، روابط رگرسیونی، با استفاده از نرم‌افزار SPSS، تعیین شد و از بین روابط تعیین شده بین دو متغیر (متغیر وابسته و مستقل) رابطه‌ای که بیشترین ضریب تعیین، کمترین خطای استاندارد و کمترین سطح معنی‌داری را داشت به منزله رابطه مناسب انتخاب شد (عباسی، ۲۰۱۰). رابطه رگرسیونی بین متغیر وابسته دبی (Q) و متغیرهای مستقل عرض (W)، عمق هیدرولیکی (D)، سطح مقطع جریان (A) و سرعت جریان (V) بر اساس مقادیر سطح معنی‌داری، میزان ضریب تعیین و خطای استاندارد بررسی شد. نتایج نشان داد که معادلات خطی ساده (درجه ۱) اغلب دارای  $R^2$  نسبتاً بالا و SE پایین و P-value بالایی است (جدول ۲).

جدول ۲: نتایج الگوهای برآوردی عرض مقطع، عمق هیدرولیکی، سطح مقطع، سرعت جریان و دبی در مدل خطی ساده

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	T	P - value
	B	خطای استاندارد	Beta		
(Constant)	-۶۰۱.۴۴۰	۴۲.۷۸۲	-	-۱۴.۰۵۸	۰.۰۰۰
V	۳۸۱.۰۷۷	۱۶.۸۰۹	۱.۵۸۲	۲۲.۶۷۰	۰.۰۰۰
W	۲۴.۴۲۶	۱۲.۰۴۹	۰.۱۲۹	۲.۰۲۷	۰.۰۴۳
A	۳۴۷.۸۴۲	۲۳.۴۸۹	۱.۴۴۸	۱۴.۸۰۹	۰.۰۰۰
D	۰.۲۲۸	۱.۸۵۹	۰.۰۰۵	۰.۱۲۳	۰.۹۰۲
$R^2$	۰.۵۹۹				

رابطه (۳) رابطه بین دبی ۲۵ ساله و پارامترهای هندسی و هیدرولیکی در معادلات خطی ساده را نشان می‌دهد:  

$$Q = 381.077V + 24.426W + 347.842A + 0.228D - 601.440$$
 رابطه (۳) در الگوهای درجه ۲ میزان  $R^2$  بین متغیرها افزایش یافته اما میزان خطای استاندارد بالاست و همان گونه که از مقادیر آماره P-value مشخص است، متغیرهای  $D$ ،  $A$ ،  $V$  در سطح ۱ درصد به خوبی معنی‌دار هستند. اما سایر متغیرها به دلیل مشکل هم خطی بودن معنی‌دار نیستند، یعنی P-value متغیرها در سطح ۱٪ به خوبی معنی‌دار نیست، بنابراین این گونه مدل‌ها دارای  $R^2$  بالا و سطوح معنی‌داری پایینی شده و مدل‌های مناسبی تلقی نمی‌شوند (جدول ۳).

جدول ۳: نتایج الگوهای برآوردی عرض مقطع، عمق هیدرولیکی، سطح مقطع، سرعت جریان و دبی در مدل درجه ۲

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	T	P - value
	B	خطای استاندارد	Beta		
(Constant)	-۷۶۸.۸۸۰	۲۳۲.۳۸۳	-	-۳.۳۰۹	۰.۰۰۱
V	۳۸۰.۵۹۶	۳۴.۳۹۰	۱.۵۸۰	۱۱.۰۶۷	۰.۰۰۰
W	۲.۲۹۷	۱۱۸.۰۲۴	۰.۰۱۲	۰.۰۱۹	۰.۹۸۴
A	۴۲۵.۷۰۴	۲۰.۵۶۵۴	۱.۷۷۲	۲.۰۷۰	۰.۰۳۹
D	۸۱.۶۷۲	۳۴.۸۷۴	۱.۷۳۳	۲.۳۴۲	۰.۰۲۰
V <sup>۲</sup>	۰.۱۸۳	۴۶.۰۶۴	۰.۰۰۰	۰.۰۰۴	۰.۹۹۷
W <sup>۲</sup>	۵.۴۴۹	۲۹.۰۱۲	۰.۱۱۶	۰.۱۸۸	۰.۸۵۱
A <sup>۲</sup>	-۱۷.۲۵۱	۴۴.۳۹۵	-۰.۳۲۸	-۰.۳۸۹	۰.۶۹۸
D <sup>۲</sup>	-۶۲۰.۵۰۸	۲۶۵.۲۱۲	-۱.۷۳۰	-۲.۳۴۰	۰.۰۲۰
R <sup>۲</sup>	۰.۶۰۵				

معادله (۴) رابطه بین دبی و عوامل دیگر را در مدل رگرسیونی درجه ۲ نشان می‌دهد:

$$Q = 380.596V + 2.297W + 425.704A + 81.672D + 0.183V^2 + 5.449W^2 - 17.251A^2 - 620.508D^2 - 768.880 \quad (4)$$

در مدل رگرسیونی درجه ۳، میزان R<sup>۲</sup> افزایش یافت که نشان‌دهنده میزان تأثیر زیاد متغیرها بر دبی رودخانه است اما همه متغیرها در سطح ۱٪ معنی‌دار نیستند، بنابراین الگوهای درجه ۳ مدل‌های مناسبی برای این رودخانه نیستند. میزان ضریب تعیین به دست آمده در تابع‌نمایی برای D, V, A, W از مقادیر توابع رگرسیونی درجه ۲ و درجه ۳ کمتر است و از تابع رگرسیونی خطی ساده بیش‌تر است و همان‌گونه که از مقادیر P-value مشاهده می‌شود. بیش‌تر متغیرها در سطح ۱٪ (فاصله اطمینان ۹۹٪) معنی‌دار هستند. همچنین، در این تابع متغیرها دارای کمترین خطای استاندارد و سطح معنی‌داری نسبت به خطی ساده، درجه ۲ و درجه ۳ هستند، بنابراین، مدل‌های مناسبی برای رودخانه مورد بررسی به حساب می‌آیند (جدول ۴).

جدول ۴: نتایج الگوهای برآوردی عرض مقطع، عمق هیدرولیکی، سطح مقطع، سرعت جریان و دبی در مدل نمایشی

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	T	P - value
	B	خطای استاندارد	Beta		
(Constant)	-۶۰۱.۱۵۲	۴۲.۷۷۸	-	-۱۴.۰۵۳	۰.۰۰۰
V	۱۶۵.۵۲۰	۷.۲۹۸	۱.۵۸۳	۲۲.۶۸۱	۰.۰۰۰
W	۹.۲۰۷	۵.۲۲۱	۰.۱۱۲	۱.۷۶۴	۰.۰۷۹
A	۱۵۳.۰۰۲	۱۰.۱۴۴	۱.۴۶۷	۱۵.۰۸۳	۰.۰۰۰
D	-۲.۳۵۲	۶.۶۷۷	-۰.۰۱۴	-۰.۳۵۲	۰.۷۲۵
R <sup>۲</sup>	۰.۶۰۰				



معادله (۵) رابطه بین دبی و عوامل دیگر را در مدل نمایی نشان می‌دهد:

$$Q = 165.52 \cdot V^{0.207} W^{1.53} \cdot A^{2.352} D^{-60.1152} \quad (5)$$

همان‌گونه که معادله (۴) نشان می‌دهد، تأثیر معکوس دبی جریان و عمق جریان را می‌توان مشاهده کرد و از طرفی دبی، سرعت و سطح مقطع جریان دارای بیش‌ترین سطح معنی‌داری‌اند.

### نتایج شبیه‌سازی رسوب

در مرحله شبیه‌سازی رسوب نیز به‌منظور بررسی ارتباط بین انتقال رسوب و داده‌های هیدرولیکی به‌دست‌آمده از خروجی مدل هیدرولیکی HEC-RAS، به بررسی تناسب روابط رگرسیونی خطی ساده، درجه ۲، درجه ۳ و نمایی پرداخته شد. پس از انجام آزمون همگنی داده‌ها، تعیین نرمال بودن داده‌های اصلی (هرمتغیر) و تعیین میزان همبستگی بین متغیرها، روابط رگرسیونی، با استفاده از نرم‌افزار SPSS، تعیین شد و از بین روابط تعیین‌شده بین دو متغیر (متغیر وابسته و مستقل) رابطه‌ای که بیش‌ترین ضریب تعیین، کمترین خطای استاندارد و کمترین سطح معنی‌داری را داشت به منزله رابطه مناسب انتخاب شد.

رابطه رگرسیونی بین متغیر وابسته ظرفیت رسوب (SC) و متغیرهای مستقل تنش برشی (SH)، دبی (Q) و سرعت جریان (V) بر اساس مقادیر سطح معنی‌داری، میزان ضریب تعیین و خطای استاندارد بررسی شد. میزان ضریب تعیین به‌دست‌آمده در تابع نمایی برای V، Q، SH از مقادیر توابع رگرسیونی درجه ۲ و درجه ۳ کمتر و از تابع رگرسیونی خطی ساده بیش‌تر است و همان‌گونه که از مقادیر P-value مشاهده می‌شود همه متغیرها در سطح ۱٪ (فاصله اطمینان ۹۹٪) معنی‌دار هستند. همچنین، در این تابع متغیرها دارای کمترین خطای استاندارد و سطح معنی‌داری نسبت به خطی ساده، درجه ۲ و درجه ۳ هستند بنابراین مدل‌های مناسبی برای رودخانه موردبررسی به‌حساب می‌آیند (جدول ۵).

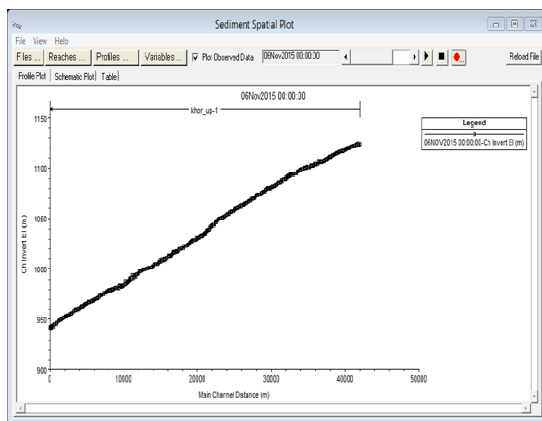
جدول ۵: نتایج الگوهای برآوردی تنش برشی، دبی، سرعت جریان و ظرفیت رسوب در مدل نمایی

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	T	P - value
	B	خطای استاندارد	Beta		
(Constant)	-۲۹.۰۰۵	۲.۴۷۶	-	-۱۱.۷۱۳	۰.۰۰۰
V	۱.۲۵۹	۰.۲۸۶	۰.۲۱۶	۴.۴۰۶	۰.۰۰۰
Q	۵.۶۴۱	۰.۴۱۰	۰.۴۴۸	۱۳.۷۶۴	۰.۰۰۰
SH	۱.۰۸۹	۰.۱۱۷	۰.۴۳۷	۹.۳۳۳	۰.۰۰۰
R <sup>۲</sup>			۰.۶۳۹		

معادله (۶) رابطه بین ظرفیت رسوب و عوامل دیگر را در مدل نمایی نشان می‌دهد:

$$SC = 1.259V^{0.216} Q^{0.448} SH^{0.437} - 29.005 \quad (6)$$

نتایج به‌صورت نمودارهای پروفیل، سری زمانی، نمودار تغییر بستر مقطع عرضی و خروجی مفصل جدولی قابل مشاهده است. برای نمونه از هر کدام از نتایج نمونه‌ای آورده شده است:

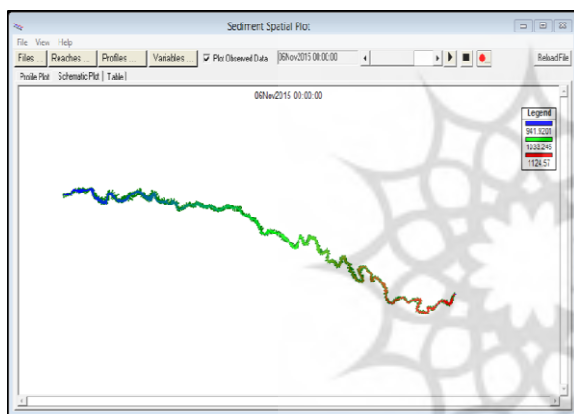


شکل ۳: خروجی جدولی رودخانه خرم آباد-دوآب و یسیان در HEC-RAS

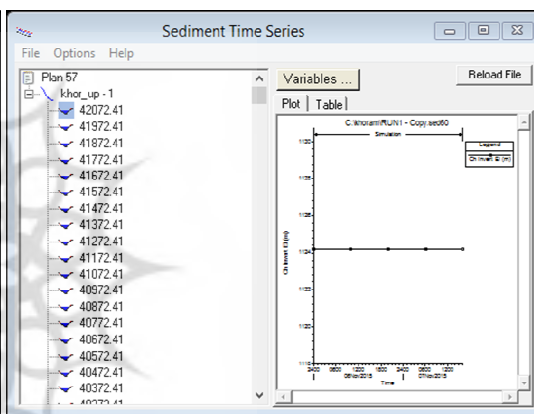
The screenshot shows the 'Sediment Spatial Plot' window with a data table displayed. The table has columns for 'Profile', 'Reach', 'FB', 'Ch Elev', 'Ch Elev El (m)', 'Flow (m³/s)', 'Velocity (m/s)', 'Shear Stress (kg/m²)', and 'Mass Capacity All (kg/m²)'. The data rows correspond to profiles from 1 to 25.

Profile	Reach	FB	Ch Elev	Ch Elev El (m)	Flow (m³/s)	Velocity (m/s)	Shear Stress (kg/m²)	Mass Capacity All (kg/m²)
1	khor_up - 1	42072.41	100	1123.2	53.7	1.9775	1.62397	14.5593
2	khor_up - 1	41932.41	100	1123.7	53.7	0.903422	5.70463	71.3995
3	khor_up - 1	41892.41	100	1124.2	53.7	1.07927	13.4849	32.4873
4	khor_up - 1	41772.41	100	1124.57	53.7	1.26274	12.2323	418729
5	khor_up - 1	41632.41	100	1124.99	53.7	1.37994	12.4743	429599
6	khor_up - 1	41532.41	100	1123.96	53.7	1.244144	10.0119	95251.9
7	khor_up - 1	41412.41	100	1123.81	53.7	1.29229	8.9872	30864
8	khor_up - 1	4132.41	100	1122.75	53.7	1.26342	12.5974	396.63
9	khor_up - 1	4122.41	100	1120.91	53.7	1.21794	10.6977	423177
10	khor_up - 1	4112.41	100	1122.42	53.7	1.03332	7.22897	671648
11	khor_up - 1	4102.41	100	1121.76	53.7	0.918264	10.5229	28802
12	khor_up - 1	4092.41	100	1121.98	53.7	1.15799	11.8963	386295
13	khor_up - 1	4082.41	100	1121.29	53.7	1.21797	11.5746	354844
14	khor_up - 1	4072.41	100	1121.4	53.7	1.31415	14.4092	386.848
15	khor_up - 1	4062.41	100	1120.51	53.7	1.10089	12.9394	112.4893
16	khor_up - 1	4052.41	100	1119.85	53.7	0.953637	11.7769	55.2925
17	khor_up - 1	4042.41	100	1119.69	53.7	1.15099	13.1948	210.263
18	khor_up - 1	4032.41	100	1120.41	53.7	1.03992	22.2938	376.203
19	khor_up - 1	4022.41	100	1119.37	53.7	1.57679	22.8975	112.997
20	khor_up - 1	4012.41	100	1119.04	53.7	1.12829	10.3459	145.219
21	khor_up - 1	4002.41	100	1119	53.7	1.16194	46.4375	372.639
22	khor_up - 1	3992.41	100	1118.97	53.7	1.01309	69.1889	389.999
23	khor_up - 1	3982.41	100	1117.37	53.7	1.54495	42.8034	111.247
24	khor_up - 1	3972.41	100	1116.89	53.7	1.20959	14.1174	271.368
25	khor_up - 1	3962.41	100	1117.11	53.7	1.1928	8.4233	72.897
26	khor_up - 1	3952.41	100	1116.74	53.7	0.941999	5.79697	67.1962

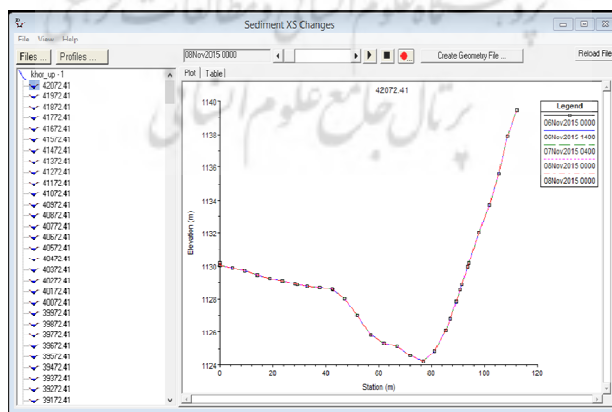
شکل ۲: نمودار مکانی رسوب رودخانه خرم آباد- دوآب و یسیان در HEC-RAS



شکل ۵: نمودار زمانی رسوب رودخانه خرم آباد- دوآب و یسیان در HEC-RAS

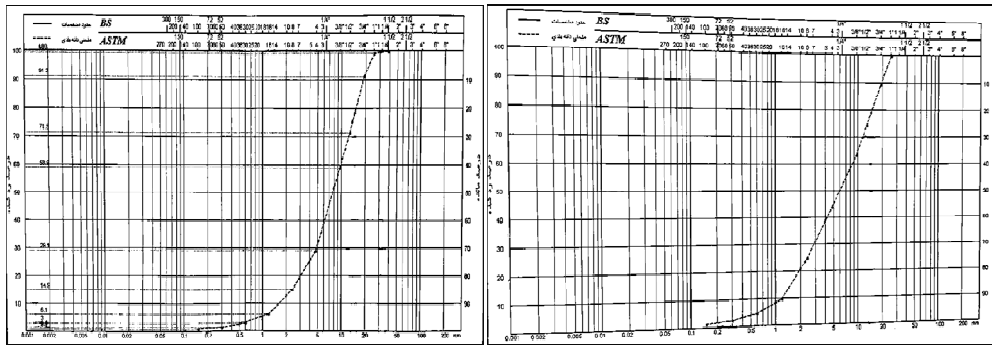


شکل ۴: نمایشی شماتیک از عمق رسوب گذاری رودخانه خرم آباد- دوآب و یسیان در HEC-RAS



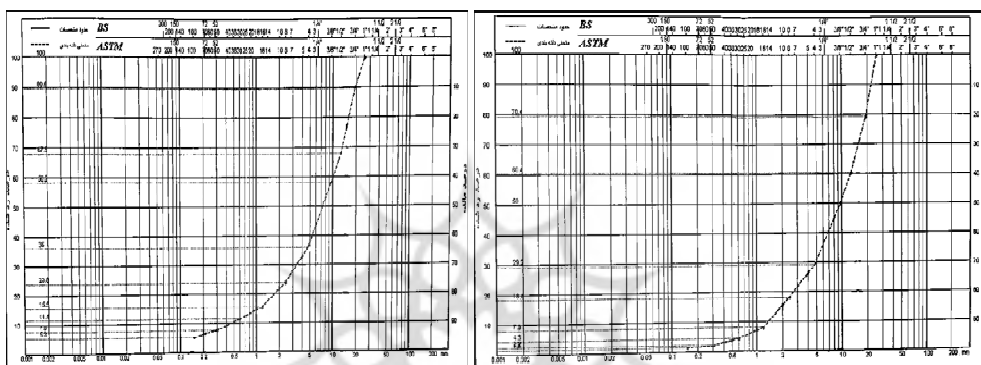
شکل ۶: شکل مقطع عرضی ایستگاه چمنجیر پس از ۵ بار شبیه سازی متفاوت در HEC-RAS

نتایج آزمایشات دانه بندی نمونه های برداشت شده از ایستگاه چمنجیر، و یسیان علیا، شوراب سفلی و ایستگاه دوآب و یسیان به شرح زیر می باشد:



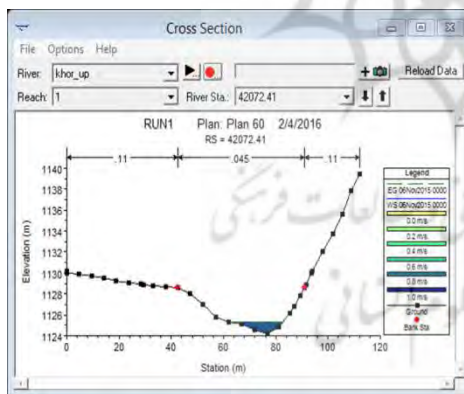
شکل ۸: نمونه برداشت شده شوراب سفلی

شکل ۷: نمونه برداشت شده چم انجیر

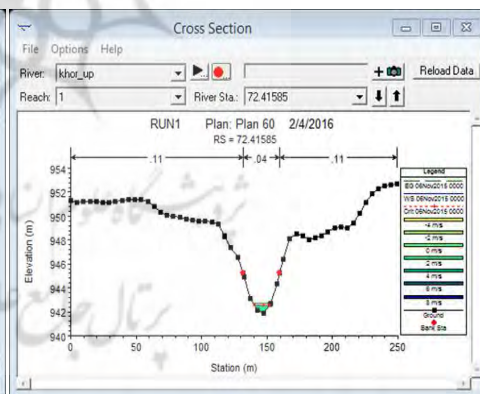


شکل ۱۰: نمونه برداشت شده دوآب

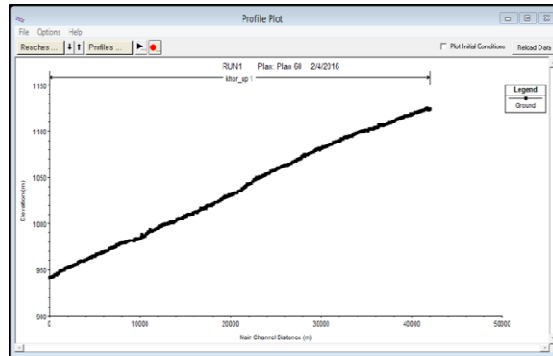
شکل ۹: نمونه برداشت شده ویسیان علیا



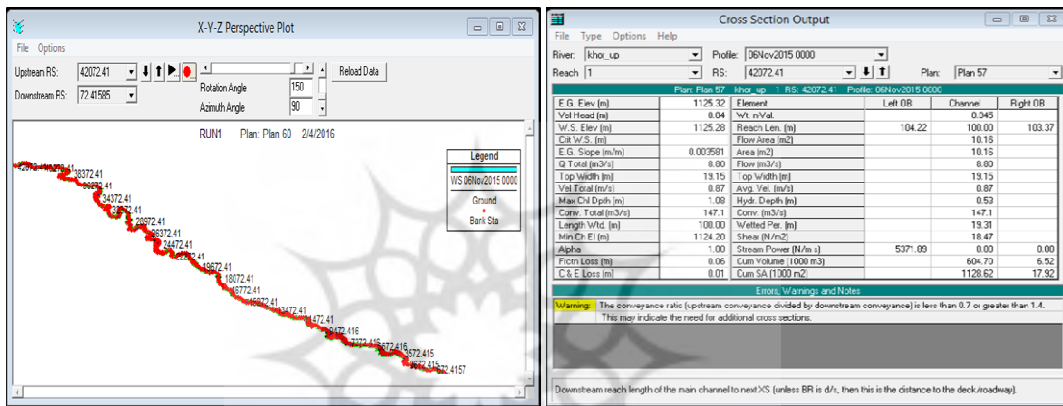
شکل ۱۲: مقطع عرضی بازه پایین دست خرم آباد-دوآب ویسیان در HEC-RAS



شکل ۱۱: مقطع عرضی بازه بالادست رودخانه خرم آباد- دوآب ویسیان در HEC-RAS



شکل ۱۳: پروفیل سطح آب رودخانه خرم‌آباد - دوآب و سیان در HEC-RAS



شکل ۱۵: جدول خروجی مفصل مقطع عرضی بازه بالادست رودخانه خرم‌آباد - دوآب و سیان در HEC-RAS

شکل ۱۴: نمودار سه‌بعدی X-Y-Z رودخانه خرم‌آباد - دوآب و سیان در HEC-RAS

### نتایج آنالیز حساسیت پارامترها در دوره واسنجی

در این مطالعه، با توجه به اهمیت نقش سرعت در پدیده فرسایش و نیز اهمیت عرض سطح آزاد آب و عمق، به عنوان پارامترهای مؤثر در مورفولوژی رودخانه، حساسیت مدل نسبت به تغییر ضریب مانینگ در سه پارامتر عرض سطح آب، سرعت، و عمق جریان بررسی شد (عزیزیان و همکاران، ۲۰۱۰). برای بررسی بهتر نتایج حاصل از مدل در آنالیز حساسیت، با در نظر گرفتن دقت ۸۰٪، تعداد مقاطعی که در آن‌ها درصد حساسیت بیش از ۲۰٪ است، به منزله خطای کار در نظر گرفته شد (کوک، ۲۰۰۸). بنابراین، هرچه تعداد این مقاطع در مقایسه با کل مقاطع کمتر باشد، نشان دهنده آن است که کار از دقت بیشتری برخوردار است. برای کمی کردن این موضوع، درصد مقاطعی که تغییرات آن‌ها بیش از ۲۰٪ است، از دقت اولیه (۸۰٪) کسر می‌شود و عدد به‌دست‌آمده دقت نهایی است (جدول ۶).

جدول ۶: نتایج آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییرات عرض سطح آب، عمق و سرعت جریان (خرم‌آباد- دواب و وِسیان)						
پارامتر موردنیاز	نوع تغییر	تعداد مقاطع دقت (درصد)	تعداد مقاطع دارای		میانگین درصد حساسیت	دقت نهایی (%)
			کل مقاطع	حساسیت		
درصد تغییرات عرض سطح آزاد آب به ازای ۲۰٪ تغییر ضریب مانینگ	کاهش	۸۰	۲۷	۴۲۱	۶.۴۱	۷۳.۱۲
	افزایش	۸۰	۳۱	۴۲۱	۷.۳۶	۶.۸۸
درصد تغییرات عمق جریان به ازای ۲۰٪ تغییر ضریب مانینگ	کاهش	۸۰	۲	۴۲۱	۰.۴۷	۷۹.۶۵
	افزایش	۸۰	۱	۴۲۱	۰.۲۳	۰.۳۵
درصد تغییرات سرعت جریان به ازای ۲۰٪ تغییر ضریب مانینگ	کاهش	۸۰	۴۶	۴۲۱	۱۰.۹۲	۷۴.۰۷
	افزایش	۸۰	۴	۴۲۱	۰.۹۵	۵.۹۳

### نتایج شبیه‌سازی

با توجه به نتایج حاصل از خروجی مدل هیدرولیکی HEC-RAS برای جریان با دوره بازگشت ۲۵ ساله در رودخانه مورد مطالعه وضعیت عرض مقاطع از بالادست به پایین دست رودخانه، به‌طور کلی از روند ثابتی پیروی نمی‌کند. در بازه‌های مختلف، با توجه به یکنواخت نبودن جنس بستر و کناره‌ها، اتصال سرشاخه‌های فرعی، اراضی کشاورزی و موانع طبیعی در طول مسیر رودخانه، در عرض مقاطع تغییرات زیادی رخ می‌دهد. این تغییرات عرض در طول بازه‌های رودخانه خرم‌آباد - دواب و وِسیان به تغییرات مکانی الگوی کنش (فرسایش و رسوب‌گذاری) نسبت داده می‌شود. تغییرات مکانی فرسایش و رسوب‌گذاری نیز در حقیقت، عکس‌العملی به وضعیت و فراوانی سیلاب‌های منفرد، بزرگ و هم‌چنین، جریان‌های کوچک‌تر و کم‌آبی است که این نتایج با بررسی نوسانات عرض کانال‌های با جریان کم در رابطه با کانال‌های کوچک رودخانه‌ای در جنوب شرق اسپانیا توسط (تورنر، ۱۹۸۰) کاملاً مطابقت دارد.

آنالیز حساسیت مدل نشان می‌دهد که با افزایش تعداد مقاطع عرضی، میزان تغییرات پارامترهای هیدرولیکی در طول رودخانه وضوح بیشتری داشته است و هم‌چنین در رودخانه خرم‌آباد - دواب و وِسیان تعداد مقاطع ۴۲۱ و میزان دقت برآورد مدل به ازای ۲۰٪ تغییر ضریب مانینگ برای پارامتر عرض سطح آب برابر ۷۳.۱۲٪، برای پارامتر عمق جریان برابر ۷۹.۶۵٪ و برای پارامتر سرعت جریان برابر ۷۴.۰۷٪ است که با یافته‌های تحقیق آنالیز حساسیت برای مدل یک‌بعدی HEC-RAS روی رودخانه کلیر توسط (استونسون، ۲۰۰۹) همخوانی دارد. گفتنی است در مدل نمایی مشکل هم خطی بودن متغیرها وجود نداشت و متغیرها بر روی یکدیگر اثر متقابل نداشتند. هم خطی بودن تأیید می‌کند که مجموعه‌ای از مشکلات همراه با چندخطی چندگانه وجود دارد. در این عارضه چندین مقدار ویژه نزدیک به صفر نشان می‌دهد که پیش‌گویی‌ها به مقدار بسیار زیادی همبستگی داخلی دارند و تغییرات کوچک در مقادیر داده‌ها ممکن است به تغییرات بزرگی در برآورد ضرایب منتهی شود. در مدل‌های درجه ۲ و ۳ به دلیل مشکل هم خطی بودن، این مدل‌ها از اعتبار کافی برخوردار نبودند. ضمن آن که مدل‌های موردنظر (درجه ۲ و ۳) هم از نظر سطح معنی‌داری و هم خطای استاندارد از اعتبار کافی برخوردار نبودند. بنابراین، مدل نمایی به دلایل هم خطی بودن، P-value کمتر از ۱٪ و خطای استاندارد کمتر نسبت به مدل‌های دیگر، مدل مناسبی معرفی می‌شود که با نتایج تحقیقات افرادی همچون (لئوپولد و مادوک، ۱۹۵۳) که طی بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که عرض، عمق و سرعت جریان در بازه‌های طبیعی با مقاطع پایدار را

می‌توان با معادلات ساده درجه‌دار بیان کرد و (نجفی و جمیری، ۲۰۰۵) در پژوهشی با عنوان «برآورد دبی‌های سیلابی بر اساس خصوصیات هندسی و هیدرولیکی مقاطع رودخانه» در بازه‌ای از رودخانه مهرانه‌رود در مقاطع مختلف روابط به‌دست‌آمده از لگاریتم داده‌ها نسبت به روابط حاصل از داده‌های اصلی دارای ضریب تعیین بیشتر و خطای نسبی کمتری بود. همچنین روابط چند متغیره نسبت به روابط ساده ضریب تعیین بالاتر و خطای برآورد کمتری داشت، همخوانی دارد. در تابع نمایی به‌دست‌آمده دبی جریان به عنوان متغیر وابسته با عرض رودخانه رابطه مستقیم دارد که با نتایج حاصل از تحقیقات افرادی چون (برایس؛ ۱۹۸۲، استرکامپ و هدمان؛ ۱۹۸۳) مطابقت دارد. همچنین دبی با سطح مقطع جریان ارتباط مستقیم و بیش‌تری نشان می‌دهد زیرا پارامتر سطح مقطع جریان دربرگیرنده دو پارامتر عرض و عمق جریان (متغیرهای هندسی رودخانه) است که با نتایج تحقیقات (مسلی ۱۹۷۹) مطابقت دارد. روابط نمایی به‌دست‌آمده بین پارامترهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه، در این تحقیق، مربوط به دبی با دوره بازگشت ۲۵ ساله حاصل از خروجی مدل HEC-RAS است. بنابراین، می‌توان گفت روابط آماری به‌دست‌آمده در شرایط مختلف و در دبی‌های با دوره بازگشت‌های دیگر ممکن است متفاوت باشد. پس از ورود داده‌های جریان شبه غیر ماندگار و اطلاعات رسوب رودخانه خرم‌آباد- دوآب ویسیان، با انتخاب توابع انتقال رسوب موجود در مدل (یانگ، ایکرز-وایت، انگلند-هانسن، لارسن (کوپلند)، میر-پیتر و مولر، توفالتیو ویلکوک) مدل اجرا گردید. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که ظرفیت حمل رسوب در بازه مورد مطالعه رودخانه خرم‌آباد - دوآب ویسیان، با انتخاب روابط مختلف، متغیر می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل، مقادیر رسوبات محاسبه‌شده به‌وسیله رابطه ایکرز- وایت به عنوان مناسب‌ترین رابطه انتخاب شد که با نتایج حاصل از تحقیقات (اکبرزاده و همکاران، ۱۳۹۰) همخوانی دارد و با نتایج حاصل از تحقیقات افرادی همچون (احمدیان و ناصری قلقلچی، ۱۳۸۹) که با بررسی معادلات انتقال رسوب با استفاده از مدل HEC-RAS نتیجه گرفتند که معادله لارسن، نتایج قابل قبول‌تری در برآورد رسوب رودخانه آچی‌چای دارد، (اسدی و همکاران، ۱۳۹۰) نیز نشان دادند که از بین معادلات انتقال رسوب موجود در مدل HEC-RAS معادله میر- پیتر- مولر، در رودخانه تالار، بیش‌ترین تطابق را با واقعیت دارد و می‌تواند برای پیش‌بینی تغییرات مقاطع در این رودخانه مورد استفاده قرار گیرد و (امامقلی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹) در پژوهش بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه شیرین دره با استفاده از مدل HEC-RAS، نتیجه گرفتند که در بین معادلات انتقال رسوب، تابع لارسن (کوپلند) در این رودخانه نسبت به سایر توابع انتقال رسوب، برآورد بهتری دارد، در تضاد می‌باشد. معادلات انتقال رسوب حساسیت چندانی به روش محاسبه سرعت سقوط ذرات در مدل‌سازی تغییر فرم بستر رودخانه ندارند و تفاوت عمده نتایج بستگی به نوع معادله انتقال رسوب دارد که با یافته‌های (اکبری و همکاران، ۱۳۹۰) مطابقت دارد. در تابع نمایی به‌دست‌آمده ظرفیت رسوب به عنوان متغیر وابسته با سرعت متوسط جریان، تنش برشی و دبی جریان به عنوان متغیر مستقل رابطه مستقیم دارد. با توجه به رابطه به‌دست‌آمده از بین متغیرهای مستقل ظرفیت رسوب بیش‌تر به دبی جریان وابسته است که با افزایش دبی جریان، ظرفیت رسوب نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. این بدان معنی است که رواناب بیش‌ترین تأثیر را در تغییر مورفولوژی رودخانه دارد. مقدار ظرفیت رسوب با تنش برشی و سرعت جریان رابطه مستقیم دارد بدین معنی که با افزایش تنش برشی و سرعت جریان، ظرفیت رسوب نیز افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش سرعت جریان و ظرفیت رسوب، تنش برشی نیز افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی رسوب با استفاده از مدل HEC-RAS با نتایج حاصل از تحقیقات (جواهری، ۱۳۸۴) مطابقت دارد.

### نتیجه‌گیری

در بررسی تابع نمایی به‌دست‌آمده نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت رسوب به عنوان متغیر وابسته با سرعت متوسط جریان، تنش برشی و دبی جریان به عنوان متغیر مستقل رابطه مستقیم دارد. با توجه به رابطه به‌دست‌آمده از بین

متغیرهای مستقل ظرفیت رسوب بیش‌تر به دبی جریان وابسته است که با افزایش دبی جریان، ظرفیت رسوب نیز افزایش می‌یابد و در مقابل با کاهش دبی جریان، ظرفیت رسوب نیز کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که رواناب بیش‌ترین تأثیر را در تغییر مورفولوژی رودخانه دارد. مقدار ظرفیت رسوب با تنش برشی و سرعت جریان رابطه مستقیم دارد و بیانگر این است که با افزایش تنش برشی و سرعت جریان، ظرفیت رسوب نیز افزایش می‌یابد و نیز با کاهش تنش برشی و سرعت جریان، ظرفیت رسوب نیز کاهش می‌یابد. به‌طور کلی از بررسی توابع نمایی به‌دست‌آمده چنین نتیجه می‌شود که ظرفیت رسوب با دبی، سرعت و تنش برشی رابطه مستقیم دارد و هم‌چنین دبی با سرعت رابطه مستقیم و با سطح مقطع جریان، عرض رودخانه و عمق جریان رابطه معکوس دارد می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات مورفولوژی رودخانه مورد مطالعه با افزایش دبی افزایش می‌یابد بدین معنا که با افزایش دبی، سطح مقطع جریان که دربرگیرنده عرض رودخانه و عمق جریان است به‌تدریج کاهش می‌یابد و هم‌چنین با افزایش دبی و تغییرات مورفولوژی رودخانه، سرعت جریان و تنش برشی افزایش می‌یابد که نتیجه آن افزایش ظرفیت رسوب می‌باشد و در مقابل با کاهش دبی و تغییرات مورفولوژی رودخانه، سرعت جریان و تنش برشی کاهش می‌یابد که نتیجه آن کاهش ظرفیت رسوب می‌باشد. طبق نتایج حاصل از تعیین میزان همبستگی بین متغیرهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه خرم‌آباد - دوآب ویسیان با استفاده از همبستگی پیرسون و با کمک نرم‌افزار SPSS نشان می‌دهد که بین متغیرهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه همبستگی معنی‌داری وجود. با توجه به نتایج آنالیز حساسیت مدل که دقت نهایی به‌دست‌آمده حاکی از قابل قبول بودن کارایی مدل HEC-RAS جهت بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه خرم‌آباد - دوآب ویسیان است بنابراین فرض دوم نیز قابل قبول است. چرا که به خوبی نشان داد که رواناب بیش‌ترین تأثیر را در تغییر مورفولوژی رودخانه دارد. طبق نتایج حاصل از روابط رگرسیونی خطی ساده، درجه ۲، درجه ۳ و نمایی که از بین روابط تعیین شده بین دو متغیر (وابسته و مستقل) بر اساس بیش‌ترین ضریب تعیین، کمترین خطای استاندارد و کمترین سطح معنی‌داری، مدل نمایی به عنوان رابطه مناسب انتخاب شد. با توجه به تابع نمایی به‌دست‌آمده، از بین متغیرهای مستقل، ظرفیت رسوب بیش‌تر به دبی جریان وابسته است که با افزایش دبی جریان، ظرفیت رسوب نیز افزایش می‌یابد و نیز با کاهش دبی جریان، ظرفیت رسوب نیز کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده با در نظر گرفتن مقادیر خطای استاندارد، سطح معنی‌داری و ضریب تعیین، از بین مدل‌های مختلف خطی ساده، درجه ۲، درجه ۳ و نمایی، مدل‌های نمایی مناسب‌ترین روابط حاکم بر خصوصیات هندسی و عوامل مربوط به فرآیندهای مؤثر بر رودخانه مورد نظرند. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که ظرفیت حمل رسوب در بازه مورد مطالعه رودخانه خرم‌آباد - دوآب ویسیان، با انتخاب روابط مختلف، متغیر می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل، مقادیر رسوبات محاسبه شده به وسیله رابطه ایکرز - وایت به عنوان مناسب‌ترین رابطه انتخاب شد نتایج حاصل از شبیه‌سازی رسوب با استفاده از مدل HEC-RAS با نتایج حاصل از تحقیقات افرادی همچون (جواهری، ۱۳۸۴) و (پیرو و همکاران، ۱۳۹۱) مطابقت دارد. کل بار رسوبی رودخانه شامل بار کف و بار معلق می‌باشد. بخش قابل توجه بار کف از مواد بستر تشکیل شده و شامل ذرات ماسه و درشت‌تر می‌باشد. اهمیت فیزیکی تفکیک میان بار کف و بار معلق در این است که رس و سیلت دارای چسبندگی بوده و در مقابل فرسایش مقاوم هستند هر چند این مواد رسوبی نیز تحت شرایط حاکم دچار فرسایش می‌شوند درحالی‌که ذرات ماسه و درشت‌تر فاقد چسبندگی بوده و بسته به اندازه و شکل آن‌ها قابلیت فرسایش و جابه‌جایی دارند. از نقطه نظر ریخت‌شناسی، سهم بار کف از کل بار رسوبی و نیز اندازه و دانه‌بندی آن عوامل مهمی در تکوین مواد آبرفتی بستر و دیواره‌های رودخانه و در نتیجه شکل و ابعاد آن می‌باشد (شوم، ۱۹۷۱). در رودخانه‌های فصلی با رژیم سیلابی و نیز در محدوده بالادست حوزه آبریز سهم بار کف بیش‌تر و نوع مواد رسوبی آن نیز درشت‌دانه و غیر چسبنده است و به همین دلیل رودخانه‌های با مواد بستری شنی و درشت‌دانه (مانند رودخانه چمنجیر - دوآب ویسیان) عموماً دارای الگوی شریانی هستند. در جهت پایین دست، به تدریج اندازه مواد رسوبی کف کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از سایش و تخریب مکانیکی و جداسازی هیدرولیکی ذرات در اثر ته

نشینی می‌باشد. از طرف دیگر مواد رسوبی رودخانه از دو منبع تغذیه می‌گردد، منشأ خارجی آن از طریق جریان سطحی حوزه آبریز و منشأ داخلی آن از فرسایش مواد بستر و دیواره رودخانه تأمین می‌گردد. بیان بار رسوب در یک بازه طولانی می‌تواند اثر مواردی نظیر شاخه‌های فرعی، تخریب‌پذیری دیواره‌ها، پدیده کف‌کنی و یا رسوب‌گذاری را روی ریخت‌شناسی و تغییرات رودخانه نشان دهد (شوم، ۱۹۸۴). با توجه به مطالب ذکر شده و اندازه ذرات رودخانه مورد مطالعه مشخص شد که در بازه اول (ایستگاه چمانجیر) به دلیل داشتن مواد بستری ریزدانه و چسبنده، رسوب‌گذاری، در بازه دوم (بین دو ایستگاه) به دلیل داشتن مواد بستری شنی و درشت‌دانه، فرسایش و در بازه سوم (ایستگاه دوآب و یسیان) نیز به دلیل وجود مواد بستری ریزدانه و چسبنده، رسوب‌گذاری رخ می‌دهد. در خاتمه باید به این نکته اشاره شود که ارائه‌ی نتایج بهتر و نزدیک‌تر به واقعیت به وسیله‌ی تابع انتقال رسوب ایکرز- وایت و روش سرعت سقوط روبی، لزوماً به معنی دقت بالاتر این روابط نسبت به سایر روابط محاسبه‌ی انتقال رسوب نبوده و ممکن است در مطالعات موردی دیگر، سایر روابط، نتایج بهتری را نسبت به آن‌ها ارائه کنند. دلیل این مسئله آن است که هر یک از روابط انتقال رسوب، تحت شرایط هندسی، هیدرولیکی و رسوبی خاص و با استفاده از داده‌های محدودی به دست آمده‌اند و تنها در شرایط مشابه با شرایط مذکور نتایج منطقی ارائه می‌کنند و ممکن است تحت شرایطی به‌جز شرایطی که تحت آن‌ها به دست آمده‌اند، نتایج غیرقابل اعتمادی ارائه کنند. لذا شرایط هندسی، هیدرولیکی و رسوبی اعمال هریک از معادلات انتقال رسوب و محدودی کاربرد آن‌ها، در استفاده بجا و بهینه از این روابط از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

#### پیشنهادات:

- با توجه به این که مدل *HEC-RAS* دارای قابلیت بسیار قوی در تحلیل جریان عبوری از پل‌ها و کالورت‌ها، قابلیت مخصوص اصلاح مسیر آبراهه و امکان محاسبه عملیات خاکی می‌باشد و همچنین انواع پل‌ها، آبگذرها، سرریزها، سازه‌های موجود در سیلاب‌دشت و انواع کانال‌ها با اشکال مختلف شبیه‌سازی می‌شوند، پیشنهاد می‌شود مدل برای کاربردهای دیگر بررسی و اصلاح شود.
- کاربرد مدل *HEC-RAS* برای سایر رودخانه‌های کشور و کالیبراسیون مدل در شرایط مختلف.
- توسعه زیر برنامه انتقال رسوب مدل *HEC-RAS* برای سایر روش‌های انتقال رسوب و همچنین روابط موجود بین انتقال رسوب و سرعت جریان در رودخانه به منظور افزایش دقت پیش‌بینی و همچنین کارایی مدل.
- توسعه مدل برای جریان فوق بحرانی و زیربحرانی برای شرایطی که جریان در رودخانه به حالت فوق بحرانی و زیربحرانی برسد.
- در نهایت توصیه می‌شود اثر اقدامات مدیریتی که در آینده جهت پیشگیری از فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه خرم‌آباد (بازه چمانجیر - دوآب و یسیان) اجرا خواهد شد، با استفاده از مدل واسنجی شده مدل *HEC-RAS* شبیه‌سازی شود.
- نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مدل *HEC-RAS* می‌تواند مقادیر عددی مناسبی را جهت مطالعه خصوصیات هیدرولیکی جریان در رودخانه‌ها ارائه دهد لذا پیشنهاد می‌شود جهت پهنه‌بندی سیلاب با دقت بالا و هزینه اندک مورد استفاده قرار گیرد.
- با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق و توانایی مدل *HEC-RAS* در بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه‌ها، پیشنهاد می‌شود جهت شناخت پتانسیل میزان انتقال رسوب، از این مدل در مناطق مختلف رودخانه خرم‌آباد استفاده شود.



## منابع

- احمدیان، م. و ناصری قلقاچی، ر. (۱۳۸۹). تعیین مناسب‌ترین معادله برای برآورد بار رسوبی رودخانه مطالعه موردی: رودخانه آجی‌چای. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران: دانشگاه تربیت مدرس.
- اسدی، ف.، فضلا ولی، ر.، عمادی، ع.، و اسدی، م. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی هیدرولیک رسوب در رودخانه با استفاده از مدل ریاضی *HEC-RAS 4.0* مطالعه موردی: رودخانه تالار. سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب، ساری: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
- اکبرزاده، ن.، مجدزاده طباطبائی، م.، و قریشی نجف‌آبادی، س. ح. (۱۳۹۰). صحت‌سنجی توابع انتقال رسوب و تأثیر پارامترهای هیدرولیکی بر چگونگی شبیه‌سازی رسوب‌گذاری مخزن سد شهید عباسپور با استفاده از مدل عددی *HEC-RAS*. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان: دانشگاه سمنان.
- اکبری، غ.، فغفور مغربی، م.، و تارم، ص. (۱۳۹۰). بررسی ترکیب معادلات انتقال رسوب و روش‌های محاسبه سرعت سقوط ذرات در مدل‌سازی تغییر فرم بستر رودخانه. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان: دانشگاه سمنان.
- امامقلی‌زاده، ص.، شیردل، س.، گنجویان، م.، محمدیون، م.، و فتحی‌مقدم، م. ۱۳۸۹. بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه شیرین دره با استفاده از مدل ریاضی *HEC-RAS*. مجله مهندسی آب، سال اول، شماره ۱، ص ۳۴-۱۹.
- پیرو، م.، قمشی، م.، نوحانی، ا.، و روانسالار، م. ۱۳۹۱. بررسی وضعیت رسوب بستر رودخانه با مدل عددی *HEC-RAS 4.0* مطالعه موردی: رودخانه بشار یاسوج. همایش ملی انتقال آب بین حوزه‌ای (چالش‌ها و فرصت‌ها)، دانشگاه شهرکرد.
- تلوری، ع. ۱۳۸۳. اصول مقدماتی مهندسی و ساماندهی رودخانه. وزارت جهاد سازندگی، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۴۵۴ صفحه.
- جواهری، ن. (۱۳۸۴). پیش‌بینی تغییر مرفولوژی رودخانه‌های مئاندری با کاربرد روش‌های هیدروانفورماتیک. رساله دوره دکتری تخصصی-گروه آبیاری، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- رضایی مقدم، م.، روتی، م.، و اصغری سراسکانرود، ص. ۱۳۹۱. بررسی تغییرات شکل هندسی رودخانه قزل‌اوزن با تأکید بر عوامل ژئومورفولوژیک و زمین‌شناسی. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۳، پیاپی ۴۶، شماره ۲، صص ۱-۱۴.
- رهنورد، م.، شوشتری، م.، و طالب بیدختی، ن. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی انتقال رسوب در رودخانه دز (بازه بین ایستگاه حرمه تا بامدژ). مجله مهندسی منابع آب، سال پنجم، صص ۹۹-۱۰۹.
- عزیزیان، ا.، صمدی، ا.، و آغاز، م. ۱۳۹۲. آموزش کاربردی مدل‌سازی جریان و رسوب در *HEC-RAS*. تهران: نشر نوآور.
- یمانی، م.، و شرفی، س. ۱۳۹۱. ژئومورفولوژی و عوامل مؤثر در فرسایش کناری رودخانه هررود در استان لرستان. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۴۵.
- Abassi, A. (2010). Evaluation of spatial variation of dry rivers (floodways) morphology (Case study: Yazd province rivers). *MSc thesis, Tehran University*.
- Andam, K.S. 2003. Comparing physical habitat conditions in forested and non-forested streams. *Msc Thesis, University of Vermont, USA, 136 pp*.
- Azizian, A., Noormohammadi, S., & Behroozian, M. (2010). Calibration of the results of HEC-HMS numerical model in ungauged catchments (Case study: Zawarian river). *6th national conference on watershed management sciences and engineering, Noor, Iran*.

- Brice, J. (1974). Evolution of meander loops. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 85, pp: 581-586.
- Cook, A. C. 2008. Comparison of one-dimensional HEC-RAS with two-dimensional FESWMS model in flood inundation mapping. *MSc thesis, Purdue university, USA.*
- Hazarika, M.H., Bormudoi, A., Phosalath, S., Sengtianthr, V. & Samarakoon, L. (2005). *Flood Hazard in savanakheth province, Lao PDR mapping user HEC-RAS, remote sensing and GIS.* Journal of hydrology, 302(2-3): 1-7.
- Leopold, L. B., & Maddock, T. (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *United States Geological Survey Professional Paper 252* (57 p.).
- Mosley, M.P. (1979). *Prediction of Hydrologic Variables from Channel Morphology, South Island River.* Journal of Hydrology (NZ), pp109-120.
- Najafi, M., & Jamiri, M. (2005). *Estimation of peak flow based on river geometry and hydraulic characteristics.* Journal of agricultural engineering research, Vol. 6, No. 24, pp. 111-122.
- Osterkamp, W. R. & Hedman, E. R. (1982). *Perennial streamflow characteristics related to channel geometry and sediment in Missouri River basins.* U.S. Geological Survey Professional Paper 1242, 37 p.
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M. & Blazkova, S. 2005. *Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations.* Journal of hydrology, Vol. 302 (1-4), pp.46-69.
- Shi, Z.H., Fang, N.F., Wu, F.Z., Wang, L., Yue, B.J., & Wu, G. L. 2012. *Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes.* Journal of Hydrology, 123-130.
- Schumm, S.A. (1971) , “ Fluvial Geomorphology : The Historical Perspective” . *Chapter 5.of River Mechanics Vol .1 , Fort Collins, Colorado.*
- Schumm, S.A. (1984). *Channel Morphology.* Symposium on River Meandering-June 1984, Colorado State University, Fort Collins Colorado, pp250-260.
- Stevenson, D. (2009). *1D HEC- RAS model and sensivity analysis for River Clair from 1971–2007.* report prepared for international joint commission, international upper Great Lakes study, Ottawa.