پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال پنجم، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۵
صص. ۱۶۳-۱٤٦

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

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 مورفولوژیک رودخانه‌ها از مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرآیندهای ژئومورفولوژیک چرخه فرسایش می‌باشند. هدف از این تحقیق، مطالعه تغییرات مورفولوژی رودخانه خرم‌آباد - دوآب ویسیان 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 واردکردن داده‌های هندسی و جریان، شرایط مرزی برای بازه بالادست، هیدروگراف جریان و برای بازه پایین‌دست، منحنی سنجه تهیه شد. در طول مسیر رودخانهٔ خرم‌آباد - دوآب ویسیان، چهار نمونه از مصالح بستر و کناره‌های رودخانه برداشت و تغییرات دانه‌بندی رسوبات، وضعیت شیب و اتصال شاخه‌های فرعی مهم به رودخانهٔ 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، درجهٔ ۲، درجهٔ۳ و نمایی پرداخته شد. با تعیین میزان همبستگی بین متغیرها، روابط رگرسیونی، با استفاده از نرم‌افزار SPSS ، 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 منزلهٔ رابطهٔ مناسب انتخاب شد. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که ظرفیت حمل رسوب در بازه موردمطالعه رودخانه خرم‌آباد - دوآب ویسیان متغیر می‌باشد. مقادیر رسوبات محاسبه‌شده به‌وسیله رابطه ایکرز- وایت به‌عنوان مناسب‌ترین رابطه نشان داد از بین متغیرهای مستقل ظرفیت رسوب بیش‌تر به دبی جریان وابسته است. اندازه ذرات رودخانه موردمطالعه مشخص شد که در بازه اول (ایستگاه چم‌انجیر)، رسوب‌گذاری، در بازه دوم (بین دو ایستگاه)، فرسایش و در بازه سوم (ایستگاه دوآب ویسیان)، نیز رسوب‌گذاری رخ می‌دهد.

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

---

* نویسنده مسئول: E-mail: Ildoromi@gmail.com

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 ازنظر 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 هرساله 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، معرفی‌شده 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 درصحنه عمل و به‌کارگیری در پروژه‌ای 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 ازجمله مدل HEC-RAS جهت بررسی هیدرولیک جریان‌های سیلابی ضروری است (هازاریکا[1] و همکاران، ۲۰۰۵، ۱). هدف از انجام این تحقیق، مطالعه تغییرات رودخانه خرم‌آباد – دوآب ویسیان، شناخت مورفولوژی رودخانه و فرآیندهای 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 موردمطالعه 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 مسیل‌یابی بتوان گام مؤثری برداشت. بر این اساس در این تحقیق رودخانه خرم‌آباد– دوآب ویسیان واقع در استان لرستان به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب‌شده است تا فرآیندهای حاکم بر رودخانه خرم‌آباد – دوآب ویسیان و مورفولوژی حاصل از این فرآیندها تجزیه‌وتحلیل و روابط بین عوامل حاکم بر رودخانه و تغییرات هندسی حاصل از این عوامل استخراج و با استفاده از مدل HEC-RAS بررسی شود. ازجمله 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 قرارگرفته 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 انجام‌شده به‌اختصار شرح داده می‌شود.

---

1. Hazarika
2. Brice
3. Mosley

برایس[1]، (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 پر برحسب فوت و Q_2 دبی سیلابی با دوره بازگشت دو سال برحسب فوت مکعب در ثانیه است.

مسلی[2]، (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 پر برحسب مترمربع، $ASPRAT$ نرخ جهت (D_{max}/R) که حاصل تقسیم عمق حداکثر مقطع پر بر شعاع هیدرولیکی مقطع پر است، S شیب رودخانه مقطع پر و D_{mean} متوسط قطر ذرات رسوبی بستر (m) است.

استرکامپ و هدمان[3]، (۱۹۸۲)، در مطالعه‌ای در ایالات‌متحده، 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[4] (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 موردبررسی 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[5] 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 ۰.۹ 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 رژیمی 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

جـواهری، (۱۳۸۴)، در تحقیقـی کـه بـر روی رودخانـه کـارون انجـام داد سازگاری مدل‌های مختلف را جهت پیش‌بینی روند تغییرات مرفولوژیک رودخانه کارون بررسی نمود و بهترین مدل را برای این منظور معرفی کرد.

کوک[1] (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 استفاده‌شده 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 فرایند 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 مورداستفاده 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 روبی، 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 مدل-سازی 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 قابل‌محاسبه 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 حرمله تا بامدژ) نشان داد که در این مدل فرمول لارسن بهترین جواب را داشته است اما درمجموع، میزان خطای فرمول توفالتی نسبت به روابط دیگر کمتر می‌باشد.

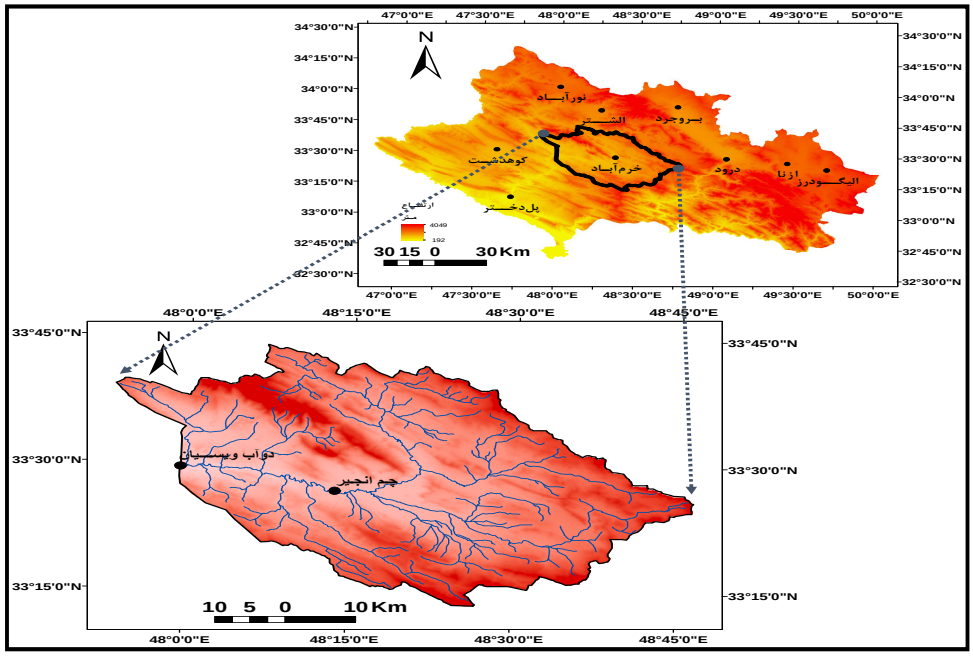
شای[2] و همکاران، (۲۰۱۲)، با بررسی فرآیند فرسایش و انتقال رسوب و مکانیسم آن بر روی شیب‌های (۱۰، ۱۵،۲۰، ۲۵ درجه) در چین به این نتیجه رسیدند که میزان فرسایش و انتقال رسوب به‌خصوص ذرات بزرگ‌تر از ۰.۱۵۲ میلی‌متر در مناطق شیب‌دار بستگی به قدرت جریان و دبی داشته و حمل رسوب با افزایش شیب نیز رابطه مستقیم دارد.

4. Cook
1. Shi

مواد و روش‌ها:

شناسایی منطقه موردمطالعه:

منطقه موردمطالعه در غرب ایران از ایستگاه چم‌انجیر در ۱۲ کیلومتری خرم‌آباد با طول جغرافیایی ″۴۰′۱۳°۴۸ و عرض جغرافیایی ″۴۷′۴۰°۳۳ و مساحت حوزه بالادست ۱۶۵۰ کیلومترمربع تا ایستگاه دوآب ویسیان با طول جغرافیایی ″۲۶′۴۷°۴۸ و عرض جغرافیایی ″۲۹′۲۹°۳۳ و مساحت حوزه بالادست ۲۴۵۰ کیلومترمربع را شامل می‌شود. این بخش از رودخانه دائمی خرم‌آباد دارای حدود۴۰ کیلومتر طول می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه آمده است.



شکل ۱: موقعیت منطقه موردمطالعه در استان لرستان و حوزه آبخیز خرم آباد- دوآب ویسیان

مدلHEC-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، غیردائمی و هم‌چنین انتقال رسوب در مرز متحـرک را به‌صورت یک‌بعدی شبیه‌سازی نماید. این مدل از معادله انرژی برای محاسبات استفاده کرده و برای حالاتی که تغییرات نیمـرخ سـطح آب سریع باشد، از معادله مومنتوم استفاده می‌کند. در این مدل امکان ارتباط با GIS وجـود دارد به‌طوری‌که معمولاً مقـاطع عرضی و ضرایب مانینگ از محیط GIS وارد محیط HEC می‌شود و پس از انجام محاسبات هیدرولیکی مجدداً به محیط GIS واردشده 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 زبـری در طـول کانـال 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).

$$n = 0.047 d_{50}^{1.5} \quad (۳۷\text{-}۳)$$

$$n = \frac{d_{50}^{1.6}}{21.1}$$ رابطه (۱)

$$n = 0.013 d_{65}^{1.6} \quad (۳۹\text{-}۳)$$

$$n = 0.038 d_{90}^{1.6}$$ رابطه (۲)

که در این روابط d_{50} قطر متوسط ذرات نمونه‌گیری شده از رودخانه برحسب متراست. d_{65} عبارت استاز قطری که۶۵٪ وزنی ذرات بستر آبراهه از آن عبور می‌کند و برحسب متر است. d_{90} عبارت است از قطری که ۹۰٪وزنی ذرات بستر از آن عبور می‌کند و برحسب متر است به‌جز 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 می گذارد.

برای شروع کار با مدل ابتدا دبی با دوره بازگشت‌های مختلف برآورد گردید که برای این کار از دبی ایستگاه چم‌انجیر و دوآب ویسیان با دوره‌های آماری (۱۳۳۵-۱۳۳۴) تا (۱۳۹۲-۱۳۹۱) استفاده گردید تا در مراحل بعدی تحقیق مورداستفاده 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 واردکردن داده‌های هندسی، داده‌های جریان به مدل وارد و شرایط مرزی برای بازه بالادست، هیدروگراف جریان و برای بازه پایین‌دست، منحنی سنجه در نظر گرفته شد. پس‌ازاین مرحله دستور اجرای مدل داده شد و نتایج استخراج گردید. در مرحله بعد شبیه‌سازی رسوب انجام داده شد. بدین منظور در طول مسیر رودخانهٔ 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 رودخانهٔ اصلی تعیین شد. بر این اساس،در ایستگاه چم‌انجیر، 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. پس‌ازاین مرحله داده‌های رسوب به نرم‌افزار وارد و شرایط مرزی هم برای بازه بالادست و هم برای بازه پایین‌دست منحنی دبی– رسوب انتخاب گردید. با توجه به این‌که 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 واردکردن داده‌های جریان شبه غیرماندگار بود که پس از واردکردن این داده‌ها و انتخاب شرط مرزی سری جریان برای بازه بالادست و منحنی دبی – اشل برای بازه پایین‌دست، 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 آب‌دارند، اطلاعات مربوط به دمای آب نیز در قسمت مربوط به جریان شبه غیرماندگار وارد مدل شد. شرط مرزی رسوب به‌صورت یک منحنی سنجه رسوب که ارتباط بین دبی جریان و دبی رسوب را به دست می‌دهد به مدل تعریف شد. بر اساس بررسی‌های به‌عمل‌آمده 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

به‌منظور برآورد دبی با دوره بازگشت‌های مختلف از دبی ایستگاه چم‌انجیر و دوآب ویسیان با دوره‌های آماری (۱۳۳۵-۱۳۳۴) تا (۱۳۹۲-۱۳۹۱) استفاده گردید. پس از تکمیل این آمار توسط نرم‌افزار SMADA آمار حداکثر دبی ایستگاه چم‌انجیر و دوآب ویسیان با توزیع‌های مختلف آماری برازش داده شد و با توجه به این‌که 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) ارائه‌شده است.

جدول۱: دبی با دوره بازگشت‌های مختلف رودخانه خرم‌آباد بازه چم‌انجیر- دوآب ویسیان

نام ایستگاه	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
چم‌انجیر	۲۷۶.۸۸	۱۴۴.۷۲	۱۹۹.۵۴	۲۷۹.۰۲	۳۴۵.۱۰	۴۱۶.۷۲	۴۹۴.۱۴
دوآب ویسیان	۷۷.۵۴	۱۶۸.۹۱	۲۵۹.۴۱	۴۱۶.۷۷	۵۷۱.۴۱	۷۶۳.۷۵	۱۰۰۱.۳

نتایج شبیه‌سازی هیدرولیک جریان

در این مرحله به‌منظور بررسی ارتباط بین داده‌های هندسی و هیدرولیکی به‌دست‌آمده از خروجی مدل هیدرولیکی-HEC RAS، به بررسی تناسب روابط رگرسیونی خطی ساده، درجهٔ ۲ ،درجهٔ۳ 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 بیش-ترین ضریب تعیین، کمترین خطای استاندارد و کمترین سطح معنی‌داری را داشت به منزلهٔ رابطهٔ مناسب انتخاب شد (عباسی، ۲۰۱۰). رابطهٔ 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 (درجهٔ۱) اغلب دارای R^2 نسبتاً بالا و SE پایین و P- value بالایی است (جدول۲).

جدول۲: نتایج الگوهای برآوردی عرض مقطع،عمق هیدرولیکی،سطح مقطع،سرعت جریان و دبی در مدل خطی ساده

Model		ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استانداردشده	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) رابطهٔ بین دبی ۲۵ ساله و پارامترهای هندسی و هیدرولیکی در معادلات خطی ساده رانشان می‌دهد:

رابطه (۳) $Q=۳۸۱.۰۷۷V+۲۴.۴۲۶W+۳۴۷.۸۴۲A+۰.۲۲۸D-۶۰۱.۴۴۰$

در الگوهای درجهٔ ۲میزان R^2 بین متغیرها افزایش‌یافته اما میزان خطای استاندارد بالاست و همان‌گونه که از مقادیر آماری P-value مشخص است، متغیرهای D^2، D، A، V در سطح۱ 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، این‌گونه مدل‌ها دارای R^2 بالا و سطوح معنی‌داری پایینی شده و مدل‌های مناسبی تلقی نمی‌شوند (جدول۳).

جدول ۳ : نتایج الگوهای برآوردی عرض مقطع، عمق هیدرولیکی، سطح مقطع، سرعت جریان و دبی در مدل درجه۲

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استانداردشده	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	۲۰۵.۶۵۴	۱.۷۷۲	۲.۰۷۰	۰.۰۳۹
D	۸۱.۶۷۲	۳۴.۸۷۴	۱.۷۳۳	۲.۳۴۲	۰.۰۲۰
V^2	۰.۱۸۳	۴۶.۰۶۴	۰.۰۰۰	۰.۰۰۴	۰.۹۹۷
W^2	۵.۴۴۹	۲۹.۰۱۲	۰.۱۱۶	۰.۱۸۸	۰.۸۵۱
A^2	-۱۷.۲۵۱	۴۴.۳۹۵	-۰.۳۲۸	-۰.۳۸۹	۰.۶۹۸
D^2	-۶۲۰.۵۰۸	۲۶۵.۲۱۲	-۱.۷۳۰	-۲.۳۴۰	۰.۰۲۰
R^2	۰.۶۰۵				

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

$$Q=۳۸۰.۵۹۶V+۲.۲۹۷W+۴۲۵.۷۰۴A+۸۱.۶۷۲D+۰.۱۸۳V^2+۵.۴۴۹W^2-۱۷.۲۵۱A^2-۶۲۰.۵۰۸D^2-۷۶۸.۸۸۰ \quad (۴)$$

در مدل رگرسیونی درجهٔ ۳، میزان R^2 افزایش یافت که نشان‌دهنده میزان تأثیر زیاد متغیرها بر دبی رودخانه است اما همه متغیرها در سطح ۱٪معنی‌دار نیستند، بنابراین الگوهای درجهٔ ۳مدل‌های مناسبی برای این رودخانه نیستند.

میزان ضریب تعیین به‌دست‌آمده در تابع‌نمایی برای W،A،V،D از مقادیر ِتوابع رگرسیونی درجهٔ ۲و درجهٔ ۳ کمتر است و از تابع رگرسیونی خطی ساده بیش‌تر است و همان‌گونه که از مقادیرP-value مشاهده می‌شود. بیش‌تر متغیرها در سطح۱٪ (فاصله اطمینان ۹۹٪) معنی‌دار هستند. هم‌چنین، در این تابع متغیرها دارای کمترین خطای استاندارد و سطح معنی‌داری نسبت به خطی ساده، درجه۲ و درجه ۳ هستند، بنابراین، مدل‌های مناسبی برای رودخانهٔ موردبررسی به‌حساب می‌آیند (جدول۴).

جدول٤ : نتایج الگوهای برآوردی عرض مقطع، عمق هیدرولیکی، سطح مقطع، سرعت جریان و دبی در مدل نمایی

Model	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استانداردشده	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^2			۰.۶۰۰		

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

رابطه (۵) $Q=۱۶۵.۵۲۰V^{۹.۲۰۷}W^{۱۵۳.۰۰۲}A^{۲.۳۵۲}D^{-۶۰۱.۱۵۲}$

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، درجهٔ۲، درجهٔ۳ 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 منزلهٔ رابطهٔ مناسب انتخاب شد.

رابطهٔ 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 برایV، Q، SH از مقادیرِ توابع رگرسیونی درجهٔ ۲و درجهٔ ۳ کمتر و از تابع رگرسیونی خطی ساده بیش‌تر است و همان‌گونه که از مقادیر P-value مشاهده می‌شود همه متغیرها در سطح ۱٪ (فاصلهٔ 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 رودخانهٔ موردبررسی به‌حساب می‌آیند (جدول۵).

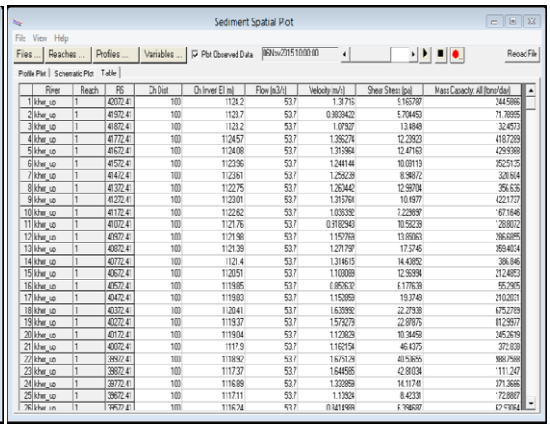
جدول۵ : نتایج الگوهای برآوردی تنش برشی، دبی، سرعت جریان و ظرفیت رسوب در مدل نمایی

Model		ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استانداردشده	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
	$R^۲$			۰.۶۳۹		

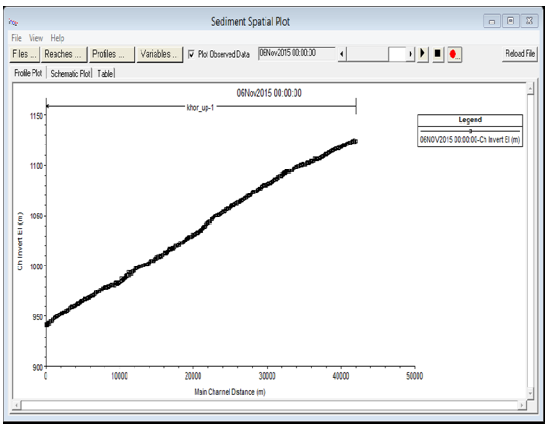
معادله (۶) رابطه بین ظرفیت رسوب و عوامل دیگر را در مدل نمایی نشان می‌دهد:

رابطه (۶) $SC=۱.۲۵۹V^{۵.۶۴۱}Q^{۱.۰۸۹}SH^{-۲۹.۰۰۵}$

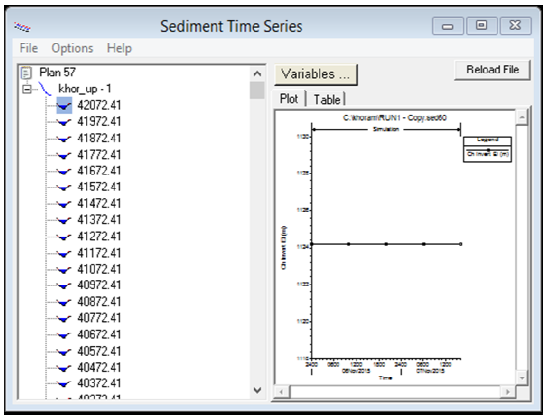
نتایج به‌صورت نمودارهای پروفیل، سری زمانی، نمودار تغییر بستر مقطع عرضی و خروجی مفصل جدولی قابل‌مشاهده است. برای نمونه از هرکدام از نتایج نمونه‌ای آورده شده است:



شکل۲: نمودار مکانی رسوب رودخانه خرم‌آباد- دوآب ویسیان در HEC-RAS

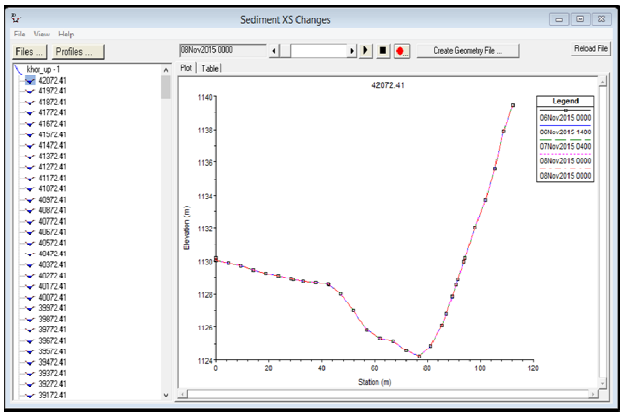


شکل۳: خروجی جدولی رودخانه خرم آباد-دوآب ویسیان در HEC-RAS



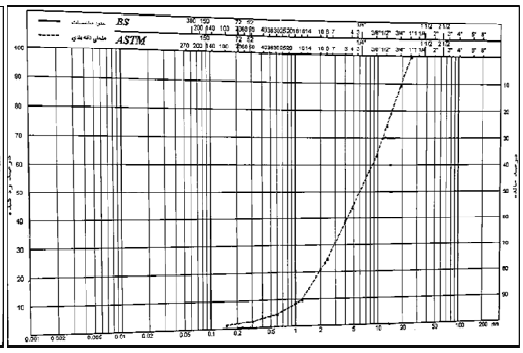
شکل ٤ : نمایشی شماتیک از عمق رسوب‌گذاری رودخانه خرم‌آباد- دوآب ویسیان در HEC-RAS

شکل۵: نمودار زمانی رسوب رودخانه خرم آباد-دوآب ویسیان در HEC-RAS

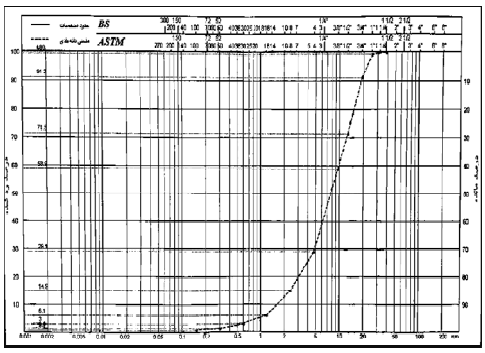


شکل٦: شکل مقطع عرضی ایستگاه چم‌انجیر پس از ۵ بار شبیه‌سازی متفاوت در HEC-RAS

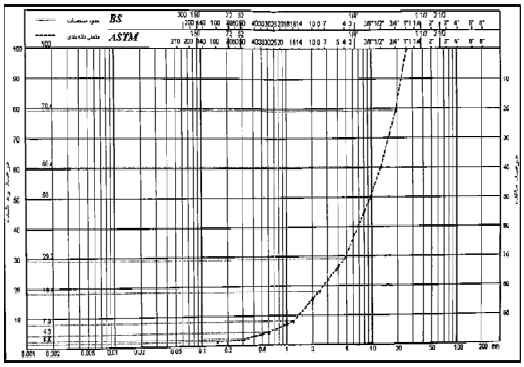
نتایج آزمایشات دانه‌بندی نمونه‌های برداشت‌شده از ایستگاه چم‌انجیر، ویسیان علیا، شوراب سفلی و ایستگاه دوآب ویسیان به شرح زیر می‌باشد:



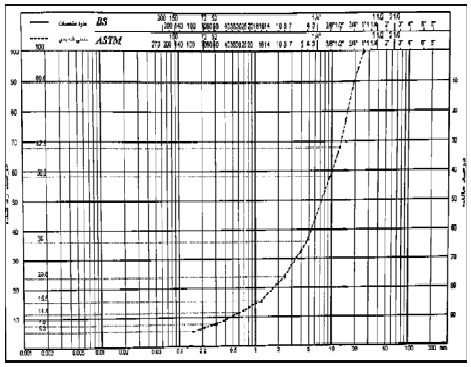
شکل۷: نمونه برداشت‌شده چم‌انجیر



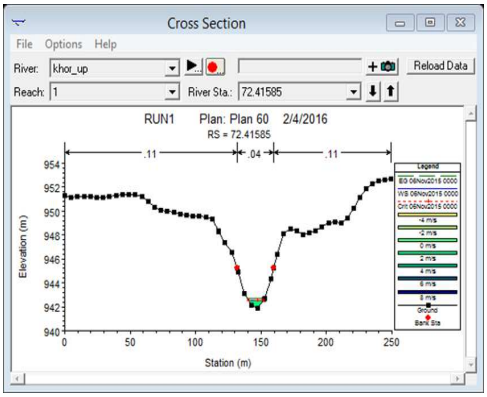
شکل۸: نمونه برداشت‌شده شوراب سفلی



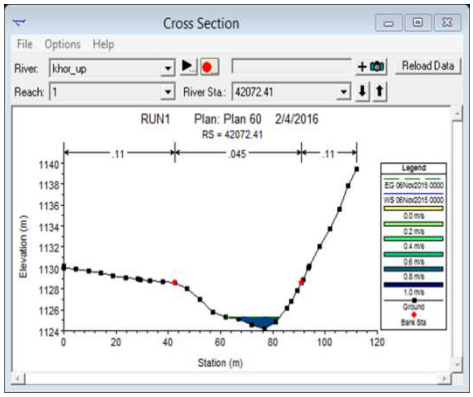
شکل ۹ : نمونه برداشت‌شده ویسیان علیا



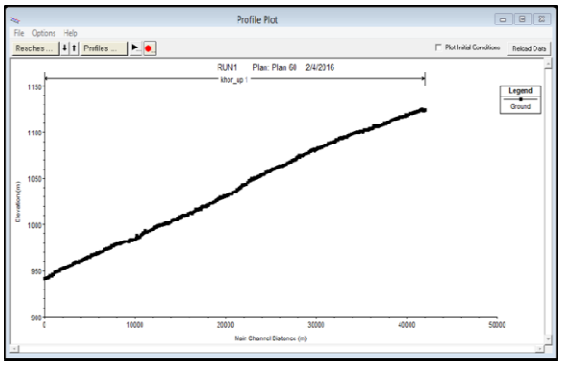
شکل۱۰: نمونه برداشت‌شده دوآب



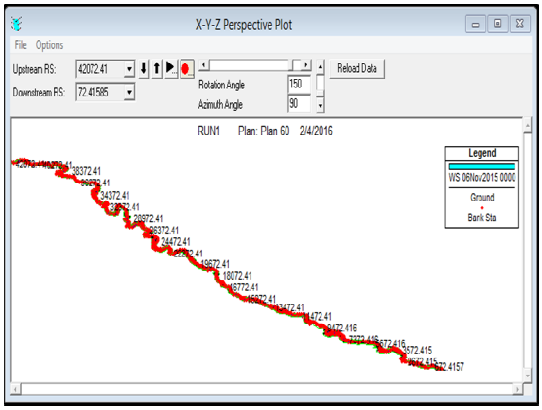
شکل۱۱: مقطع عرضی بازه بالادست رودخانه خرم‌آباد- دوآب ویسیان در HEC-RAS



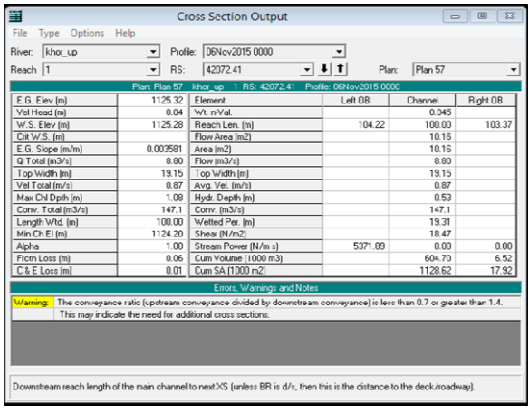
شکل۱۲: مقطع عرضی بازه پایین‌دست خرم آباد-دوآب ویسیان در HEC-RAS



شکل۱۳: پروفیل سطح آب رودخانه خرم‌آباد- دوآب ویسیان در HEC-RAS



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



شکل۱۵: جدول خروجی مفصل مقطع عرضی بازه بالادست رودخانه خرم‌آباد- دوآب ویسیان در HEC-RAS

نتایج آنالیز حساسیت پارامترها در دوره واسنجی

در این مطالعه، با توجه به اهمیت نقش سرعت در پدیدهٔ 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 نظرگرفتن دقت ۸۰٪، تعداد مقاطعی که در آن‌ها درصد حساسیت بیش از ۲۰٪ است، به منزلهٔ خطای کار در نظر گرفته شد (کوک، ۲۰۰۸). بنابراین، هرچه تعداد این مقاطع در مقایسه با کل مقاطع کمتر باشد، نشان دهندهٔ آن است که کار از دقت بیش‌تری برخوردار است. برای کمّی کردن این موضوع، درصد مقاطعی که تغییرات آن‌ها بیش از۲۰٪ است، از دقت اولیه (۸۰٪) کسر می‌شود و عدد به‌دست‌آمده دقت نهایی است (جدول۶).

جدول٦ : نتایج آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییرات عرض سطح آب،عمق و سرعت جریان (خرم آباد- دوآب ویسیان)

پارامتر موردنیاز	نوع تغییر	دقت (درصد)	تعداد مقاطع دارای حساسیت	کل مقاطع	درصد	میانگین درصد حساسیت	دقت نهایی (٪)
درصد تغییرات عرض سطح آزاد آب به ازای ۲۰٪ تغییر ضریب مانینگ	کاهش	۸۰	۲۷	۴۲۱	۶.۴۱	۶.۸۸	۷۳.۱۲
	افزایش	۸۰	۳۱	۴۲۱	۷.۳۶		
درصد تغییرات عمق جریان به ازای ۲۰٪ تغییر ضریب مانینگ	کاهش	۸۰	۲	۴۲۱	۰.۴۷	۰.۳۵	۷۹.۶۵
	افزایش	۸۰	۱	۴۲۱	۰.۲۳		
درصد تغییرات سرعت جریان به ازای ۲۰٪ تغییر ضریب مانینگ	کاهش	۸۰	۴۶	۴۲۱	۱۰.۹۲	۵.۹۳	۷۴.۰۷
	افزایش	۸۰	۴	۴۲۱	۰.۹۵		

نتایج شبیه‌سازی

با توجه به نتایج حاصل از خروجی مدل هیدرولیکی HEC-RAS برای جریان با دورهٔ بازگشت۲۵ ساله در رودخانهٔ موردمطالعه وضعیت عرض مقاطع از بالادست به پایین‌دست رودخانه، به‌طورکلی از روند ثابتی پیروی نمی‌کند. در بازه-های مختلف، با توجه به یکنواخت نبودنِ 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 رودخانهٔ خرم‌آباد – دوآب ویسیان 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، جریان-های 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 (تورنز ،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 – دوآب ویسیان 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 مجموعه ای از مشکلات همراه با چندخطی چندگانه وجود دارد. در این عارضه چندین مقدار ویژهٔ 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 درجهٔ ۲و۳ به دلیل مشکل هم خطی بودن، این مدل‌ها از اعتبار کافی برخوردار نبودند. ضمن آن‌که مدل‌های موردنظر (درجهٔ ۲و۳) هم ازنظر سطح معنی‌داری و هم خطای استاندارد از اعتبار کافی برخوردار نبودند. بنابراین، مدلِ نمایی به دلایل هم خطی نبودن ،P-value کمتر از ۱٪ و خطای استاندارد کمتر نسبت به مدل‌های دیگر، مدلِ 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؛ ۱۹۸۲) 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 دورهٔ بازگشت ۲۵ ساله حاصل از خروجی مدل HEC-RAS است. بنابراین، می‌توان گفت روابط آماری به‌دست‌آمده در شرایط مختلف و در دبی‌های با دورهٔ 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 موردمطالعه 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 قلقاچی، ۱۳۸۹) که با بررسی معادلات انتقال رسوب با استفاده از مدل HEC-RAS نتیجه گرفتند که معادله لارسن، نتایج قابل‌قبول‌تری در برآورد رسوب رودخانه آجی‌چای 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 مورداستفاده 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. درتابع نمایی به‌دست‌آمده ظرفیت رسوب به عنوان متغیر وابسته با سرعت متوسط جریان، تنش برشی و دبی جریان به عنوان متغیر مستقل رابطهٔ 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 رابطهٔ 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. به‌طورکلی 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 موردمطالعه 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 قابل‌قبول بودن کارایی مدل HEC-RAS جهت بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه خرم‌آباد – دوآب ویسیان است بنابراین فرض دوم نیز قابل‌قبول 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 تعیین‌شده 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، درجۀ۲، درجۀ ۳ و نمایی، مدل‌هایِ نمایی مناسب‌ترین روابط حاکم بر خصوصیات هندسی و عوامل مربوط به فرآیندهای مؤثر بر رودخانۀ موردنظرند. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که ظرفیت حمل رسوب در بازه موردمطالعه 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 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 قابل‌توجه بار کف از مواد بستر تشکیل‌شده 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 به‌اندازه و شکل آن‌ها قابلیت فرسایش و جابه‌جایی دارند. ازنقطه‌نظر 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 درنتیجه شکل و ابعاد آن می باشد (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 چم‌انجیر- دوآب ویسیان) عموماً دارای الگوی شریانی هستند. در جهت پایین‌دست، به‌تدریج 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. بیلان 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 ذکرشده و اندازه ذرات رودخانه موردمطالعه 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 ویسیان) 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 به‌وسیله‌ی 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 به‌دست‌آمده‌اند و تنها در شرایط مشابه با شرایط مذکور نتایج منطقی ارائه می‌کنند و ممکن است تحت شرایطی به‌جز شرایطی که تحت آن‌ها به‌دست‌آمده‌اند، نتایج غیرقابل اعتمادی ارائه کنند. لذا شرایط هندسی، هیدرولیکی و رسوبی اعمال هریک از معادلات انتقال رسوب و محدوده‌ی کاربرد آن‌ها، در استفاده بجا و بهینه از این روابط از اهمیت به سزایی برخوردار است.

پیشنهادات:

- با توجه به این‌که 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 به‌منظور 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.
- درنهایت توصیه می‌شود اثر اقدامات مدیریتی که در آینده جهت پیشگیری از فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه خرم‌آباد (بازه چم‌انجیر- دوآب ویسیان) اجرا خواهد شد، با استفاده از مدل واسنجی شده مدل *HEC-RAS* شبیه-سازی 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 مورداستفاده قرار گیرد.
- با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق و توانایی مدل *HEC-RAS* در بررسی وضعیت فرسایش و رسوب-گذاری 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 *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*، سال۲۳، پیاپی۴۶، *شماره۲*، صص ۱۴-۱.
- ره‌نورد، م.، شوشتری، م.، و طالب بیدختی ، ن. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی انتقال رسوب در رودخانه دز (بازه بین ایستگاه حرمله تا بامدژ). *مجله مهندسی منابع آب*، سال پنجم، ص ۱۰۹-۹۹.
- 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 ungaunged 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 savanakhet 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.