

## مدل‌سازی روابط هندسی - هیدرولیکی سطح مقطع و ظرفیت انتقال رسوب رودخانه خرم‌آباد

آزاده شیخی پور<sup>۱</sup>

علیرضا ایلدرمی<sup>۲</sup>

حسین زینی‌وند<sup>۳</sup>

### چکیده

شبیه‌سازی ظرفیت انتقال رسوب رودخانه‌ها با ارزیابی پارامترهای هندسی و هیدرولیکی جهت انجام هرگونه فعالیت بسیار مهم می‌باشد. هدف از این پژوهش مدل‌سازی ظرفیت انتقال رسوب رودخانه خرم‌آباد با استفاده از مدل HEC-RAS و پارامترهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه شامل دبی (Q) و عرض (W)، عمق (D)، سطح مقطع (A) و سرعت (V) می‌باشد. ابتدا از رابطه رویی جهت تعیین سرعت سقوط و انتقال رسوبات و از رابطه رگرسوونی بین پارامترها جهت تحلیل آماری و رابطه‌سازی روابط استفاده شد. سپس بر اساس مقادیر سطح معنی‌داری، ضریب تعیین و خطای استاندارد، مدل‌های خطی ساده، درجه ۲، درجه ۳ و نمایی و روابط حاکم بر خصوصیات هندسی و عوامل مربوط به فرآیندهای مؤثر بر فرسایش و رسوبگذاری رودخانه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از مدل HEC-RAS برای دوره بازگشت ۲۵ ساله نشان می‌دهد که وضعیت عرض مقاطع رودخانه از بالا دست به پایین دست به دلیل تغییرات مکانی الگوی فرسایش و رسوبگذاری از روند ثابتی پیروی نمی‌کند. همچنین مدل نمایی به دلایل هم خطی نبودن، P-value کمتر از ۱٪ و خطای استاندارد کمتر نسبت به مدل‌های دیگر، از دقت بیشتری برخوردار است. نتایج نشان داد که مقدار متوسط قدرت جریان در بازه ابتدایی، میانی و انتهایی به ترتیب برابر با ۸۶۲، ۶۷۸ و ۴۶۳ و تنش برشی ۳۲/۴۳، ۲۸/۷۹ و ۲۲/۸۶ نیوتن بر مترمربع می‌باشد و از بالا دست به پایین دست در حال کاهش است. بررسی توابع نمایی نشان می‌دهد که ظرفیت انتقال رسوب، با دبی، سرعت جریان و تنش برشی و دبی با سرعت رابطه مستقیم و با سطح مقطع، عرض رودخانه و عمق جریان رابطه معکوس دارد. و بیانگر این است که رواناب بیش‌ترین تأثیر را در فرسایش و رسوبگذاری دارد. بررسی تغییر پارامترهای هندسی - هیدرولیکی و قطر ذرات رسوبی نشان داد که در قسمت‌های میانی فرسایش و در ساحل راست بالا و پایین دست رودخانه رسوبگذاری رخ می‌دهد.

واژگان کلیدی: رودخانه خرم‌آباد، سرعت جریان، فرسایش، HEC-RAS

### مقدمه

کاربرد مدل‌های فیزیکی و ریاضی به دلیل نیازمندی به فضای وسیع، هزینه زیاد و زمان طولانی جهت انجام آزمایشات اغلب توصیه نمی‌شود. به همین دلیل بسیاری از مسائل مهندسی رودخانه با مدل‌های ریاضی بررسی می‌شوند (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۸). محققین مختلفی نیز از مدل‌های متعدد و متفاوت برای بررسی انتقال رسوب در رودخانه‌ها استفاده نموده‌اند: مک‌میلان و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۷)، کین و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۷)، کلاون و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۷). در این رابطه مدل‌های ریاضی مانند مدل یک بعدی HEC-RAS با بهره‌گیری از حداقل اطلاعات صحرائی و حجم محاسبات محدود، کاربرد گسترده‌ای در مطالعات فرسایش و رسوب، تعبیر بستر و طرح‌های مهندسی رودخانه‌های ایران پیدا کرده است (یاسی و همکاران ۱۳۹۶). تحقیقات متعددی برای شناخت و مدل‌سازی پدیده فرسایش و رسوبگذاری

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه ملایر

<sup>۲</sup> دانشیار دانشگاه ملایر (نویسنده مسئول)

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه آبخیزداری دانشگاه لرستان

Email: ildoromi@gmail.com - Tel: 09181117185

<sup>۴</sup> Mac Millan et al

<sup>۵</sup> Keane et al

<sup>۶</sup> Klavon et al

در رودخانه‌ها با استفاده از روابط ریاضی مختلفی از جمله HEC-6، HEC-RAS، SSIM، MIKE21، GSTAR، FLUVIAL ارائه شده است که با توجه به قابلیت‌ها و توانایی‌های مدل‌های ذکر شده، از مدل HEC-RAS به لحاظ کارایی و توانایی بالا، دسترسی آسان و رایگان، سهولت جهت بررسی وضعیت و مدل سازی فرسایش و رسوبگذاری، تغییر مورفولوژی بستر رودخانه‌ها، برآورد بار رسوبی، پهنه-بندی سیل خیزی<sup>+</sup>، بررسی صحت‌سنجی توابع انتقال رسوب و تأثیر پارامترهای هیدرولیکی بر چگونگی رسوبگذاری مخازن سدها بیشتر استفاده شده است چوی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۴). مدل HEC-RAS مجموعه‌ای از چند مدل عددی است که برای استفاده در مسائل چند-منظوره از جمله طراحی و تحلیل جریان عبوری از پل‌ها و کالورت‌ها، اصلاح مسیر آبراهه‌ها و محاسبه عملیات خاکی دارای قابلیت بسیار قوی و قابل قبولی می‌باشد عزیززی و همکاران (۱۳۹۸).

اصغری سراسکانرود (۱۳۹۶) در تحلیل شکل مجرای رودخانه قرانقو شهرستان هشتروند نشان داد که شکل گیری الگو و دینامیک مجرا در محدوده مورد مطالعه تحت تاثیر ویژگی‌های لیتولوژیک مقاطع کنترل می‌گردد بر همین اساس دینامیک مجرا در مقطعی تحت تأثیر عملکرد مقاومت لیتولوژیکی بستر و کناره‌های رودخانه عمدتاً به صورت تعمیق بستر بوده و در مقطعی دینامیک مجرا به دلیل تشکیلات سست و فرسایش‌پذیر به صورت تعریض بستر می‌باشد که شدیداً توسط ویژگی‌های لیتولوژیکی رودخانه کنترل می‌گردد.

یاسی و همکاران (۱۳۹۶) به شبیه‌سازی و ارزیابی جریان رودخانه‌هایی دائمی با دو مدل HEC-RAS و RubarBE در رودخانه دانوب پرداختند. نتایج نشان داد که تراز سطح آب کمترین حساسیت را به تغییر عوامل دیگر دارد و مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی جریان از کارایی بهتری نسبت به مدل RubarBE برخوردار است.

خورشیددوست و همکاران (۱۳۹۷) در برآورد میزان رسوب حوضه رود ارس با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ضمن تأیید توانایی مدل شبکه عصبی مصنوعی نشان دادند که انطباق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی وجود دارد به طوری که میانگین خطای این مدل با داده‌های مشاهداتی برابر ۰/۹ درصد و ضریب همبستگی ۰/۹۹ است.

حسین زاده و همکاران (۱۳۹۸) در شبیه‌سازی فرسایش کرانه‌ای رودخانه و مخاطرات آن با استفاده از مدل BSTEM (مطالعه موردی: رودخانه گلالی قروه)، نشان دادند که از نظر پایداری کرانه و ضریب ایمنی (FS) هر سه مقطع مورد بررسی ناپایدار بوده و ضریب ایمنی کمتر از یک محاسبه گردیده است.

عزیزی و همکاران (۱۳۹۸)، در بررسی تأثیر تغییر مقاطع عرضی بر طغیان و ظرفیت انتقال رودخانه آبشینه همدان با استفاده از مدل HEC-RAS و نرم افزار SMADA نشان دادند که مقاطع عرضی و تغییر مورفولوژی بستر به دلیل فرسایش و رسوبگذاری موجب تغییر مقدار ظرفیت انتقال رسوب و سرعت جریان شده است.

شرفی و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی تغییرات مکانی-زمانی مورفولوژی رودخانه سیلاخور در استان لرستان به این نتیجه رسیدند که با توجه به ماهیت مئاندری بودن رودخانه سیلاخور، ساحل راست رودخانه عمدتاً فرسایشی و ساحل چپ در حال افزایش رسوبگذاری بوده است.

کلامی و همکاران (۱۳۹۸)، در تشخیص روابط هندسی-هیدرولیکی سطح مقطع رودخانه‌ها با استفاده از حل معکوس معادلات سنت-ونانت، به ارائه یک مدل ریاضی، روابط هندسی-هیدرولیکی پرداختند. نتایج نشان داد روش‌های روندیابی هیدرولیکی-هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی سیل رودخانه از کارایی و دقت بالایی برخوردار هستند.

<sup>1</sup> . Choi et al



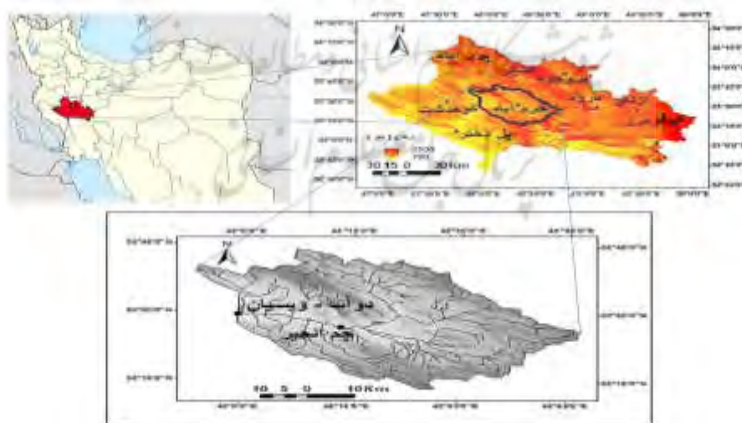
لای و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۹) در بررسی ظرفیت انتقال جریان و رسوب با مدل سه بعدی برای کانال‌های رو باز سطح آزاد با استفاده از معادلات حاکم بر جریان و رسوب معلق، الگوریتم راه‌حل بهبود یافته ارائه دادند. نتایج آنها نشان داد که مدل شبیه‌سازی خوبی بین جریان و رسوبات جهت پیش‌بینی ارائه می‌کند و با داده‌های تجربی مطابقت خوبی دارد.

ایکبال و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۹) برای شبیه‌سازی شستشوی رسوب در مخزن سد از دو مدل، 2D و نوع متوسط یا گودونف (Godunov) استفاده و با مطالعه مدل فیزیکی و یک فلوم آزمایشگاهی اعتبارسنجی مدل را از طریق تغییر توپوگرافی بستر و محاسبه میزان ترسیب رسوب انجام دادند. نتایج نشان داد که فرسایش جانبی و تغییرات بستر بر اساس مقدار دبی و ویژگی‌های مورفولوژیکی کانال متغیر و با نتایج آزمایشگاهی نیز مطابقت خوبی دارد.

اودا<sup>۳</sup> (۲۰۱۹) در مدل‌سازی و بررسی چند فازی انتقال رسوب و فرسایش بستر و تغییرات مورفودینامیک ساحلی رودخانه با استفاده از مدل‌سازی عددی و آنالیز مکانیسم‌های تولید و انتقال رسوب و فرآیندهایی مانند اختلاط آشفته، نشان دادند که مدل عددی فعلی عملکرد مطلوبی را در بیشتر موارد آزمون چند فازی انتقال رسوب و فرسایش نشان می‌دهد و می‌توان با استفاده از این آزمون برخی از نقص‌ها و محدودیت‌های داده‌های تجربی را مشخص و برطرف نمود. با توجه به مرور منابع، در این بررسی سعی شده رابطه بین خصوصیات هندسی و مقطع رودخانه ارزیابی و مدل‌های مختلف خطی ساده، درجه ۲، درجه ۳ و نمایی جهت شناخت رفتار هیدرولیکی با استفاده از مدل HEC-RAS ارزیابی و مناسب‌ترین روابط حاکم بر خصوصیات هندسی بر رودخانه خرم‌آباد لرستان شناسایی شود. تا تأثیر تغییر ظرفیت انتقال و رسوب، بر طغیان و سیلاب و بالا آمدن بستر مشخص شود، تا بتوان از نتایج و دستاوردهای آن جهت مدیریت صحیح و علمی در منطقه به ویژه کنترل سیلاب و مسیلابی، به ویژه در حوضه شهری استفاده نمود.

## داده و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در شهرستان خرم‌آباد استان لرستان در غرب ایران واقع شده که از ایستگاه چمانجیر در ۱۲ کیلومتری خرم‌آباد با طول جغرافیایی "۴۰ ۱۳ ۴۸ و عرض جغرافیایی "۴۷ ۲۶ ۳۳ و با مساحت حوضه بالادست ۱۶۵۰ کیلومتر مربع و تا ایستگاه دو آب ویسیان با طول جغرافیایی "۲۶ ۵۹ ۴۷ و عرض جغرافیایی "۲۹ ۲۹ ۳۳ و با مساحت حوضه بالادست ۲۴۵۰ کیلومتر مربع که در این پژوهش قسمتی از رودخانه دائمی خرم‌آباد به طول تقریباً ۴۰ کیلومتر را شامل می‌شود (شکل ۱).



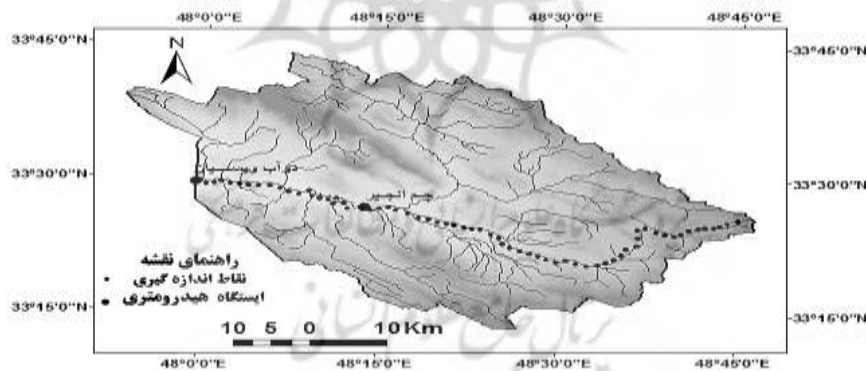
شکل(۱): موقعیت حوضه آبریز رودخانه خرم‌آباد در ایران و استان لرستان

1 . Lai et al

2 . Iqbal et al

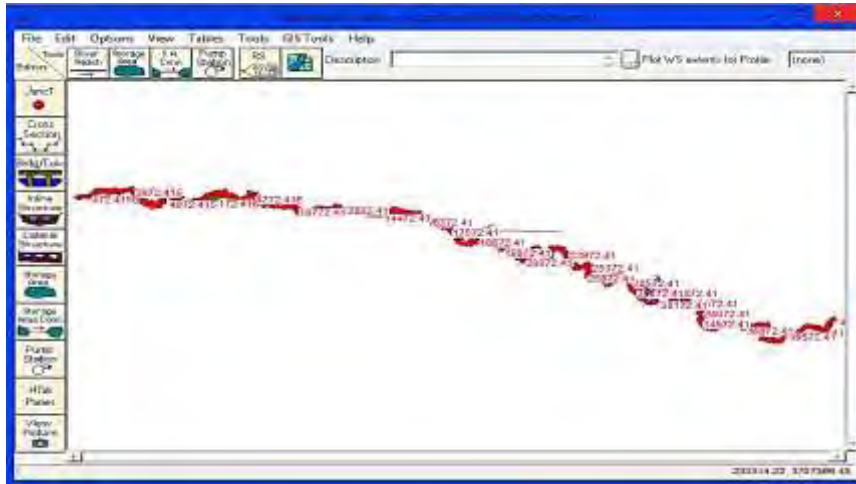
3 . Oda et al

در این پژوهش بخشی از رودخانه دائمی خرم‌آباد در غرب ایران به طول حدود ۴۰ کیلومتر انتخاب و دبی با دوره بازگشت‌های مختلف برای ایستگاه چم‌انجیر و دوآب ویسیان با دوره‌های آماری (۱۳۳۴-۱۳۳۵) تا (۱۳۹۶-۱۳۹۷) موجود در سازمان آب منطقه‌ای استان لرستان برآورد گردید. به منظور شبیه‌سازی رسوب در طول مسیر رودخانه خرم‌آباد- دوآب ویسیان، چهار نمونه از مصالح بستر و جناحین رودخانه، با توجه به وضعیت شیب و اتصال مسیل‌های مهم به رودخانه اصلی برداشت و آزمایشات دانه‌بندی انجام شد. از رابطه روبی جهت تعیین سرعت سقوط و انتقال رسوبات و از ۴۲۱ مقطع عرضی رودخانه با فواصل مختلف از یکدیگر جهت آنالیز و جمع‌آوری داده‌های هندسی رودخانه استفاده گردید (اشکال ۳ و ۲). پس از وارد کردن داده‌های هندسی و جریان به مدل، شرایط مرزی شامل منحنی سنجه رسوب برای بازه بالادست و منحنی دبی- اشل برای بازه پایین‌دست تهیه و برای بررسی تعیین شدند، داده‌های دمای آب و جریان شبه غیرماندگار، شبیه‌سازی رسوب نیز وارد مدل هیدرولیکی HEC-RAS و آنالیز حساسیت انجام و نتایج آن استخراج شد. سپس با استفاده از نرم افزار SPSS، رابطه رگرسیونی بین متغیر وابسته دبی (Q) برحسب مترمکعب بر ثانیه و متغیرهای مستقل (W)، عرض سطح آب جریان رودخانه بر حسب متر (D)، عمق متوسط و هیدرولیکی جریان برحسب متر، (A) سطح مقطع جریان و (V) سرعت متوسط مقطع (جریان) برحسب متر و بر اساس مقادیر سطح معنی‌داری، ضریب تعیین و خطای استاندارد محاسبه و بررسی گردید. در این مرحله به بررسی تناسب روابط رگرسیونی خطی ساده، درجه ۲، درجه ۳ و نمایی<sup>۴</sup> پرداخته شد. پس از تعیین میزان همبستگی بین متغیرها، روابط رگرسیونی، با استفاده از نرم افزار SPSS، از بین روابط تعیین شده بین دو متغیر (متغیر وابسته و مستقل) رابطه‌ای که بیش‌ترین ضریب تعیین<sup>۵</sup>، کمترین خطای استاندارد<sup>۶</sup> و کمترین سطح معنی‌داری<sup>۷</sup> را داشت به منزله رابطه مناسب انتخاب شد. 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 و برای بررسی بهتر نتایج حاصل از مدل، آنالیز حساسیت، با در نظر گرفتن دقت ۸۰ درصد، تعداد مقاطعی که در آن‌ها درصد حساسیت بیش از ۲۰ درصد بود، به منزله خطای کار در نظر گرفته و استفاده شد عزیززی و همکاران (۱۳۹۸).



شکل (۲): نقشه موقعیت مقاطع عرضی و نمونه‌برداری از رودخانه خرم‌آباد

1. Linear
2. Quadratic.
3. Cubic
4. Exponential.
5. Coefficient of Determination.
6. Standard Error
7. Probablity Value



شکل (۳): موقعیت مقاطع عرضی و نمونه‌برداری در پلان پروفیل طولی رودخانه

### مدل HEC-RAS

مدل ریاضی HEC-RAS، یک نرم‌افزار کاربردی و مناسب برای تحلیل فرسایش و رسوب‌گذاری از طریق اندرکنش مخلوط آب و رسوب، مصالح بستر و هیدرولیک جریان توسعه یافته و قدرت رودخانه را برای حمل رسوب شبیه‌سازی می‌کند. و توانایی تعیین محل و حجم رسوب‌گذاری در مخزن سد، فرسایش در پایین‌دست سد، تغییرات دراز مدت فرسایش و رسوب‌گذاری ناشی از اصلاح آبراهه و رسوب‌گذاری در کانال‌ها را دارد. مدل HEC-RAS با استفاده از چهار روش سرعت سقوط ذرات رسوبی و هفت تابع انتقال رسوب می‌تواند جریان‌های ماندگار، غیرماندگار و شبه غیرماندگار را مدل‌سازی و ظرفیت انتقال رسوب و تغییرات بستر جریان را شبیه‌سازی نماید. در نرم‌افزار HEC-RAS اطلاعات لازم برای اجرای مدل شامل داده‌های هندسی بازه رودخانه، مقاطع عرضی رودخانه، آمار دبی روزانه ایستگاه‌ها، منحنی‌های دبی-اشل، هیدروگراف سیل، دانه‌بندی، منحنی سنج رسوب و ضریب زبری مانینگ می‌باشد.

### یافته‌ها و بحث

به منظور برآورد دبی با دوره بازگشت‌های مختلف از دبی ایستگاه چمانجیر و دوآب و یسیان با دوره‌های آماری (۱۳۳۴-۱۳۳۵) تا (۱۳۹۶-۱۳۹۷) استفاده و پس از تکمیل آمار مربوطه توسط نرم‌افزار SMADA توزیع‌های مختلف آماری به آمار حداکثر دبی ایستگاه چمانجیر و دوآب و یسیان برآزش داده شد. با توجه به برآزش توزیع لوگ پیرسون نوع سه و با استفاده از توزیع مزبور مقادیر دبی حداکثر لحظه‌ای برای دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه و شبیه‌سازی برای دوره بازگشت ۲۵ ساله انجام شد جدول (۱).

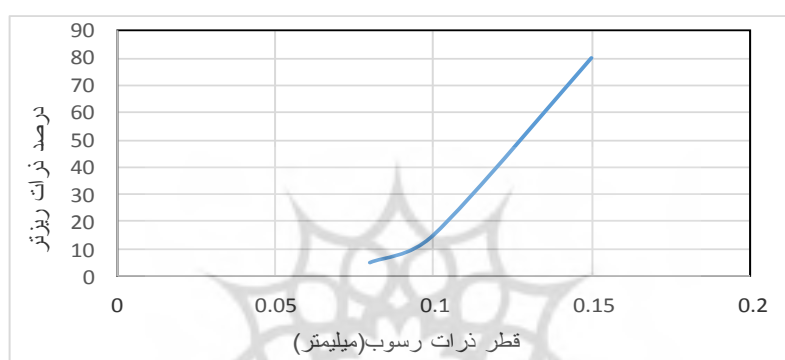
جدول (۱): دبی با دوره بازگشت‌های مختلف رودخانه خرم‌آباد بازه چمانجیر- دوآب و یسیان (نگارندگان: ۱۳۹۸)

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 و یسیان	۵۴/۷۷	۱۶۸/۹۱	۲۵۹/۴۱	۴۱۶/۷۷	۵۷۱/۴۱	۷۶۳/۷۵	۱۰۰۱/۳

### نتایج شبیه‌سازی رسوب

مقایسه بین نتایج حاصل از اجرای مدل با توابع مختلف انتقال رسوب و داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که رابطه ایگز- وایت نسبت به سایر توابع انتقال رسوب، مناسب‌ترین رابطه می‌باشد. بررسی کل بار رسوبی رودخانه شامل بار کف و بار معلق نشان می‌دهد که بخش قابل توجه بار کف از مواد بستر با ذرات ماسه و ماسه درشت‌تر می‌باشد. اهمیت فیزیکی تفکیک میان بار کف (ذرات ماسه درشت تر) و بار معلق (رس و سیلت) به دلیل چسبندگی و مقاومت این دو در مقابل فرسایش بوده و اندازه و شکل آن‌ها، قابلیت فرسایش و جابجایی را در یک رودخانه نشان می‌دهد. از نقطه نظر مورفولوژی، سهم بار کف از کل بار رسوبی و نیز اندازه و دانه‌بندی آن در رودخانه

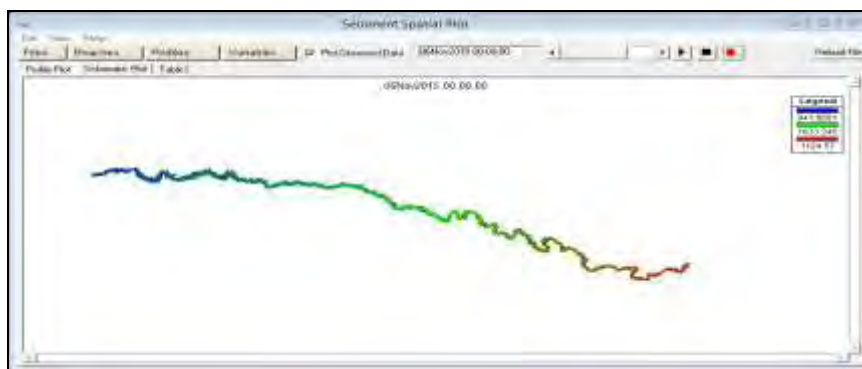
فصلی با رژیم سیلابی و نیز در محدوده بالادست حوضه آبریز بیش‌تر و نوع مواد رسوبی آن نیز درشت‌دانه و غیرچسبنده است و به همین دلیل رودخانه خرم‌آباد با مواد بستری شنی و درشت‌دانه عموماً دارای الگویی با مورفولوژی شریانی می‌باشد. بطوری‌که در جهت پایین دست، به تدریج اندازه مواد رسوبی کف بدلیل سایش و تخریب مکانیکی و جداسازی هیدرولیکی ذرات در اثر ته‌نشینی کاهش می‌یابد ( اشکال ۴، ۵و۶). بررسی‌ها نشان می‌دهد که رودخانه دارای نیروی تخریبی و فرسایشی بوده و مسیر رودخانه در حال جابجایی است. اما تفاوت‌هایی در جابجایی‌ها در هر نقطه و در هر دوره زمانی به صورت فرسایش، رسوبگذاری و یا بدون تغییر مشاهده می‌شود. براساس بازدیدهای میدانی و نتایج حاصله در طول مسیر رودخانه و اندازه ذرات مشخص شد که در ساحل راست مقاطع بالادست رودخانه عمدتاً فرسایش و در ساحل چپ رسوبگذاری در حال افزایش (ایستگاه چمنجیر) و در مقاطع پایین دست (ایستگاه دوآب و پسیان)، رسوب‌گذاری رخ می‌دهد. در مقاطع میانی (بین دو ایستگاه)، به دلیل فرسایش علاوه بر جابجایی مسیر رودخانه، در عمق بستر رودخانه نیز تغییر ایجاد شده است، که از دلایل آن می‌توان به تنوع لیتولوژی، تغییرات کاربری اراضی اشاره نمود.



شکل (۴): منحنی دانه بندی ذرات رسوبی رودخانه خرم‌آباد



شکل (۵): نمودار مکانی رسوب رودخانه خرم‌آباد در مدل HEC-RAS



شکل (۶): نمایش عمق رسوب گذاری رودخانه خرم‌آباد در مدل HEC-RAS



## نتایج بررسی داده‌های هندسی و هیدرولیکی

بررسی رابطه بین متغیر وابسته دبی (Q) و متغیرهای مستقل عرض (W)، عمق هیدرولیکی (D)، سطح مقطع جریان (A) و سرعت جریان (V) و سطح معنی داری و همچنین میزان ضریب تعیین و خطای استاندارد نشان داد که معادلات خطی ساده (درجه ۱) اغلب دارای  $R^2$  نسبتاً بالا و SE پایین و P-value بالایی است. (جدول ۲) (رابطه ۱)

جدول (۲): نتایج بررسی داده‌های هندسی و هیدرولیکی در مدل خطی ساده

P - value	ضرایب استاندارد نشده		Model
	Beta	خطای استاندارد	
۰/۰۰۰	-	۴۲/۷۸۲	(Constant)
۰/۰۰۰	۱/۵۸۲	۱۶/۸۰۹	V
۰/۰۴۳	۰/۱۲۹	۱۲/۰۴۹	W
۰/۰۰۰	۱/۴۴۸	۲۳/۴۸۹	A
۰/۹۰۲	۰/۰۰۵	۱/۸۵۹	D
		۰/۵۹۹	$R^2$

رابطه (۱) رابطه بین دبی ۲۵ ساله و پارامترها در مدل خطی ساده را نشان می دهد .

$$Q = 381/077V + 24/426W + 347/842A + 0/228D - 60/1440 \quad \text{رابطه (۱)}$$

در الگوهای درجه ۲ میزان  $R^2$  بین متغیرها افزایش، اما میزان خطای استاندارد بالاست و بر اساس مقادیر آماری P-value متغیرهای D، A، D، V در سطح ۱ درصد به خوبی معنی دار هستند. اما سایر متغیرها به دلیل مشکل هم خطی بودن معنی دار نیستند، بنابراین، اینگونه مدل‌ها با  $R^2$  بالا و سطوح معنی داری پایینی مدل‌های مناسبی نیستند. (جدول ۳).

جدول (۳): نتایج بررسی داده‌های هندسی و هیدرولیکی در مدل درجه ۲

P - value	ضرایب استاندارد نشده		Model
	Beta	خطای استاندارد	
۰/۰۰۱	-	۲۳۲/۳۸۳	(Constant)
۰/۰۰۰	۱/۵۸۰	۳۴/۳۹۰	V
۰/۹۸۴	۰/۰۱۲	۱۱۸/۰۲۴	W
۰/۰۳۹	۱/۷۷۲	۲۰۵/۶۵۴	A
۰/۰۲۰	۱/۷۳۳	۳۴/۸۷۴	D
۰/۹۹۷	۰/۰۰۰	۴۶/۰۶۴	$V^2$
۰/۸۵۱	۰/۱۱۶	۲۹/۰۱۲	$W^2$
۰/۶۹۸	- ۰/۳۲۸	۴۴/۳۹۵	$A^2$
۰/۰۲۰	- ۱/۷۳۰	۲۶۵/۲۱۲	$D^2$
		۰/۶۰۵	$R^2$

رابطه (۲) رابطه بین دبی و پارامترهای هیدرولیکی را در مدل درجه ۲ نشان می دهد:

$$Q = 380/596V + 2/297W + 245/704A + D + 0/183V^2 + 5/449W^2 - 17/251A^2 - 620/508D^2 - 76/880 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$Q = 380/596V + 2/297W +$$

در مدل رگرسیونی درجه ۳، افزایش میزان  $R^2$  نشان دهنده میزان تأثیر زیاد متغیرها بر دبی رودخانه می باشد (نگارندگان: ۱۳۹۸). اما همه متغیرها در سطح ۱٪ معنی دار نیستند، بنابراین الگوهای درجه ۳ مدل‌های مناسبی برای رودخانه مورد مطالعه محسوب نمی شوند.

میزان ضریب تعیین محاسباتی در تابع نمایی برای  $D, V, A, W$  از مقادیر توابع رگرسیونی درجه ۲ و درجه ۳ کمتر و از تابع رگرسیونی خطی ساده بیشتر است. براساس مقادیر P-value مشاهده می‌شود که بیشتر متغیرها در سطح ۱٪ (فاصله اطمینان ۹۹٪) معنی‌دار هستند. بنابراین مدل‌های مناسبی برای رودخانه مورد بررسی به حساب می‌آیند (جدول ۴) (رابطه ۳).

جدول (۴): نتایج بررسی داده‌های هندسی و هیدرولیکی در مدل نمایی

P - value	ضرایب استاندارد شده	ضرایب استاندارد نشده		Model
	Beta	خطای استاندارد	B	
-/۰۰۰	-	۴۲ / ۷۷۸	- ۶۰۱ / ۱۵۲	(Constant)
-/۰۰۰	۱ / ۵۸۳	۷ / ۲۹۸	۱۶۵ / ۵۲۰	V
-/۰۷۹	- / ۱۱۲	۵ / ۲۲۱	۹ / ۲۰۷	W
-/۰۰۰	۱ / ۴۶۷	۱۰ / ۱۴۴	۱۵۳ / ۰۰۲	A
۰ / ۷۲۵	- ۰ / ۰۱۴	۶ / ۶۶۷	- ۲ / ۲۵۳	D
	- / ۶۰۰			$R^2$

رابطه (۳) رابطه بین دبی و پارامترهای هندسی و هیدرولیکی را در مدل نمایی نشان می‌دهد:

$$Q = ۱۶۵ / ۵۲۰ V^{۰.۷۹} ۹ / ۲۰ W^{۰.۱۱۲} ۱۵۳ / ۰۰۲ A^{۱.۰۴۶۷} ۲ / ۳۵۲ D^{-۰.۰۱۴} - ۶۰۱ / ۱۵۲ \quad (۳)$$

بر اساس معادله (۳) دبی، سرعت و سطح مقطع جریان دارای بیشترین سطح معنی‌داری را دارند و تأثیر معکوس دبی و عمق جریان را می‌توان مشاهده کرد. بر اساس نتایج بدست آمده، مدل‌های نمایی دارای P-value پایین و خطای استاندارد کم نسبت به مدل‌های خطی ساده، درجه ۲ و درجه ۳ و ضریب تعیین برابر با مدل‌های خطی ساده، درجه ۲ و درجه ۳ هستند. بنابراین، مدل‌های نمایی مدل‌های مناسبی برای بیان ارتباط بین متغیرهای ژئومتری و هیدرولیکی در رودخانه مورد مطالعه می‌باشند.

### بررسی رابطه بین عرض مقطع و دبی و سرعت جریان

در این بررسی عرض مقطع به عنوان متغیر وابسته و دبی و سرعت جریان به عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند. نتایج حاصل از این بررسی در جداول ۵، ۶ و ۷ آمده است. بر اساس نتایج بدست آمده، مدل‌های نمایی دارای P-value پایین و خطای استاندارد کم نسبت به مدل‌های خطی ساده، درجه ۲ و درجه ۳ هستند و ضریب تعیین برابر با مدل‌های خطی ساده، درجه ۲ و درجه ۳ هستند. بنابراین، مدل‌های نمایی، مدل‌های مناسبی برای بیان ارتباط بین متغیرهای ژئومتری و هیدرولیکی در رودخانه مورد مطالعه هستند.

جدول (۵): نتایج بررسی داده‌های هندسی و هیدرولیکی در مدل خطی ساده

P - value	T	ضرایب استاندارد شده	ضرایب استاندارد نشده		Model
		Beta	خطای استاندارد	B	
-/۰۰۰	۷ / ۴۳۸	-	۰ / ۳۴۳	- ۲ / ۵۵۳	(Constant)
-/۰۰۰	- ۲۱ / ۹۷۱	- ۰ / ۷۱۶	۰ / ۰۴۲	- ۰ / ۹۱۳	V
-/۰۰۰	۱۳ / ۹۷۰	۰ / ۴۵۵	۰ / ۱۳۶	۱ / ۹۰۴	Q
		۰ / ۵۷۸			$R^2$

رابطه (۴) رابطه بین متغیر وابسته (عرض) و متغیرهای مستقل را در مدل خطی ساده نشان می‌دهد.

$$W = ۱ / ۹۰۴ Q - ۰ / ۹۱۳ V^{۰.۷۱۶} ۲ / ۵۵۳ \quad (۴)$$





جدول (۶): نتایج الگوهای برآوردی دبی و سرعت جریان با عرض مقطع در مدل درجه ۲

P - value	T	ضرایب استاندارد شده	ضرایب استاندارد نشده		Model
		Beta	خطای استاندارد	B	
۰/۲۵۰	- ۱/۱۵۱	-	۲/۸۳۹	- ۳/۲۶۸	(Constant) /
۰/۰۰۰	- ۷/۴۵۱	- ۰/۶۶۰	۰/۱۱۳	- ۰/۸۴۲	V
۰/۲۷۴	۱/۰۹۶	۰/۵۸۵	۲/۲۳۳	۲/۴۴۸	Q
۰/۴۹۸	- ۰/۶۷۹	- ۰/۰۶۱	۰/۱۷۳	- ۰/۱۱۸	V <sup>۲</sup>
۰/۸۱۲	- ۰/۲۳۷	- ۰/۱۲۷	۰/۴۴۰	- ۰/۱۰۵	Q <sup>۲</sup>
		۰/۵۷۸			R <sup>۲</sup>

رابطه‌ی (۵) رابطه‌ی بین متغیر وابسته (عرض) و متغیرهای مستقل را در مدل درجه ۲ نشان می‌دهد.

$$W = ۲/۴۴۸Q - ۰/۸۴۲V - ۰/۱۱۸V^۲ - ۰/۱۰۵Q^۲ - ۳/۲۶۸ \quad \text{رابطه (۵)}$$

جدول (۷): نتایج الگوهای برآوردی دبی و سرعت جریان با عرض مقطع در مدل نمای

P - value	T	ضرایب استاندارد شده	ضرایب استاندارد نشده		Model
		Beta	خطای استاندارد	B	
۰/۰۰۰	- ۷/۴۳۸	-	۰/۳۴۳	- ۲/۵۵۳	(Constant)
۰/۰۰۰	- ۲۱/۹۷۱	- ۰/۷۱۶	۰/۰۱۸	- ۰/۳۹۶	V
۰/۰۰۰	۱۳/۹۷۰	۰/۴۵۵	۰/۰۵۹	۰/۸۲۷	Q
		۰/۵۷۸			R <sup>۲</sup>

رابطه‌ی (۶) رابطه‌ی بین متغیر وابسته (عرض) و متغیرهای مستقل را در مدل نمای نشان می‌دهد.

$$W = ۰/۸۲۷Q + ۰/۳۹۶V - ۲/۵۵۳ \quad \text{رابطه (۶)}$$

در تابع نمایی بدست آمده عرض مقطع به عنوان متغیر وابسته با سرعت متوسط جریان رابطه معکوس و با دبی جریان رابطه مستقیم دارد. بیشترین همبستگی و سطح معنی‌داری بین دبی جریان به عنوان متغیر مستقل و سایر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی به عنوان متغیر وابسته وجود دارد. به طوریکه دبی با سطح مقطع جریان ارتباط بیشتری را نشان می‌دهد. زیرا پارامتر سطح مقطع جریان در برگیرنده دو پارامتر مهم عرض و عمق جریان (متغیرهای هندسی رودخانه) است. با توجه به تابع نمایی بدست آمده، از بین متغیرهای مستقل، ظرفیت انتقال رسوب، بیشتر به دبی جریان وابسته است که با افزایش دبی جریان، انتقال ظرفیت رسوب نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. با در نظر گرفتن مقادیر خطای استاندارد، سطح معنی‌داری و ضریب تعیین، از بین مدل‌های مختلف بررسی شده، مدل‌های مناسب‌ترین روابط حاکم بر خصوصیات هندسی را ارائه نموده است.

بررسی تناسب روابط رگرسیونی خطی ساده، درجه ۲، درجه ۳ و نمایی نشان می‌دهد که میزان ضریب تعیین بدست آمده 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 توابع خطی ساده، درجه ۲ و درجه ۳ هستند. بنابراین مدل‌های مناسبی برای رودخانه مورد بررسی به حساب می‌آیند.

رابطه (۷) رابطه بین ظرفیت رسوب و عوامل دیگر را در مدل نمای نشان می‌دهد:

$$\text{رابطه (۷)} \quad SC = 1/2597 \text{ V} + 1/641 \text{ Q} - 1/089 \text{ SH} - 29/005$$

بررسی رابطه رگرسیونی بین متغیر وابسته ظرفیت رسوب (SC) و متغیرهای مستقل تنش برشی (SH)، دبی (Q) و سرعت جریان (V) و مقادیر سطح معنی‌داری، میزان ضریب تعیین و خطای استاندارد نشان داد که معادلات خطی ساده (درجه ۱) اغلب دارای  $R^2$ ، SE و P-value پایینی است (جدول ۸).

جدول (۸): نتایج الگوهای برآوردی تنش برشی، دبی، سرعت جریان و ظرفیت رسوب در مدل خطی ساده

P - value	T	ضرایب استاندارد شده	ضرایب استاندارد نشده		Model
		Beta	خطای استاندارد	B	
۰/۰۰۹	- ۲/۶۱۵	-	۰/۲۴۵	- ۰/۶۴۰	(Constant)
۰/۰۰۰	۴/۴۴۱	۰/۲۲۳	۰/۲۹۴	۱/۳۰۴	V
۰/۰۰۰	۱۲/۷۵۰	۰/۴۲۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷	Q
۰/۰۰۰	۹/۰۳۱	۰/۴۳۴	۰/۱۲۰	۱/۰۸۳	SH
		۰/۶۲۲			$R^2$

رابطه (۸) رابطه بین ظرفیت رسوب با پارامترهای تنش برشی، دبی و سرعت جریان در معادلات خطی ساده را نشان می‌دهد.

$$\text{رابطه (۸)} \quad SC = 1/304V + 1/007Q + 1/083SH - 0/64$$

در الگوهای درجه ۲ میزان  $R^2$  بین متغیرها افزایش یافته اما میزان خطای استاندارد بالا می‌باشد و برخی متغیرها به دلیل مشکل هم-خطی بودن و مقدار P-value متغیرها در سطح ۱٪ به خوبی معنی‌دار نیستند. بنابراین این گونه مدل‌ها دارای  $R^2$  بالا و سطوح معنی‌داری پایینی بوده و مدل‌های مناسبی تلقی نمی‌شوند (جدول ۹).

جدول (۹): نتایج الگوهای برآوردی تنش برشی، دبی، سرعت جریان و ظرفیت رسوب در مدل درجه ۲

P - value	T	ضرایب استاندارد شده	ضرایب استاندارد نشده		Model
		Beta	خطای استاندارد	B	
۰/۰۰۰	- ۱۸/۴۱۹	-	۱/۲۶۶	- ۲۳/۳۱۰	(Constant)
۰/۰۰۰	۷/۰۳۹	۰/۴۸۸	۰/۴۰۴	۲/۸۴۷	V
۰/۲۱۳	۱/۲۴۹	۰/۲۶۵	۰/۵۳۰	۰/۶۶۱	SH
۰/۰۰۰	۱۹/۸۲۸	۸/۹۳۴	۰/۰۰۷	۰/۱۴۲	Q
۰/۰۰۷	- ۲/۷۲۰	- ۰/۱۴۱	۱/۱۰۷	- ۳/۰۱۱	$V^2$
۰/۹۴۲	- ۰/۰۷۰۳	- ۰/۰۱۴	۰/۲۱۰	- ۰/۰۱۵	$SH^2$
۰/۰۰۰	- ۱۸/۹۰۳	- ۸/۵۵۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	$Q^2$
		۰/۸۰۰			$R^2$

رابطه (۹) رابطه بین ظرفیت رسوب و عوامل دیگر را در مدل رگرسیونی درجه ۲ نشان می‌دهد.

$$\text{رابطه (۹)} \quad SC = 2/847V + 0/142Q + 0/661SH - 3/011V^2 - 0/000Q^2 - 0/015SH^2 - 23/310$$

بر اساس بررسی جدول ۵ در الگوهای درجه ۲، میزان  $R^2$  بین متغیرها افزایش یافته است و با توجه به مقادیر آماری P-value مشخص شد که متغیرهای  $Q^2$ ،  $V^2$ ،  $Q$ ،  $V$  در سطح ۱٪ به خوبی معنی‌دارند، اما سایر متغیرها به دلیل مشکل هم-خطی بودن معنی‌دار نیستند. این گونه مدل‌ها دارای  $R^2$  بالا و سطوح معنی‌داری پایینی بوده و بنابراین مدل‌های مناسبی تلقی نمی‌شوند. در مدل رگرسیونی درجه ۳، میزان  $R^2$  افزایش یافته که نشان‌دهنده میزان تأثیر زیاد متغیرها بر ظرفیت انتقال رسوب رودخانه است اما کلیه متغیرها در سطح ۱٪



٪ معنی دار نیستند، بنابراین الگوهای درجه ۳ مدل های مناسبی برای این رودخانه نمی باشند. میزان ضریب تعیین بدست آمده در تابع نمایی برای  $V$ ،  $Q$ ،  $SH$  از مقادیر توابع رگرسیونی درجه ۲ و درجه ۳ کمتر و از تابع رگرسیونی خطی ساده بیش تر است و همان گونه که از مقادیر  $P$ -value مشاهده می شود، همه متغیرها در سطح ۱٪ (فاصله اطمینان ۹۹٪) معنی دار هستند. همچنین در این تابع متغیرها دارای کمترین خطای استاندارد و سطح معنی داری نسبت به خطی ساده، درجه ۲ و درجه ۳ هستند، بنابراین مدل های مناسبی برای رودخانه مورد بررسی به حساب می آیند (جدول ۱۰).

جدول (۱۰): نتایج الگوهای برآوردی تنش برشی، دبی، سرعت جریان و ظرفیت رسوب در مدل نمایی

P - value	T	ضرایب	ضرایب استاندارد نشده		Model
		استاندارد شده	خطای استاندارد	B	
۰/۰۰۰	- ۱۱ / ۷۱۳	-	۲/۴۷۶	- ۲۹/۰۰۵	(Constant)
۰/۰۰۰	۴/۴۰۶	۰/۲۱۶	۰/۲۸۶	۱/۲۵۹	V
۰/۰۰۰	۱۷ / ۷۶۴	۰/۴۴۸	۰/۴۱۰	۵/۶۴۱	Q
۰/۰۰۰	۹/۳۳۳	۰/۴۳۷	۰/۱۱۷	۱/۰۸۹	SH
		۰/۶۳۹			$R^2$

رابطه (۱۰) رابطه بین ظرفیت رسوب و عوامل دیگر را در مدل نمایی نشان می دهد.

$$SC = ۱/۲۵۹ V - ۵/۶۴۱ Q + ۱/۰۸۹ SH - ۲۹/۰۰۵ \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در تابع نمایی ظرفیت رسوب با سرعت متوسط جریان، تنش برشی و دبی جریان رابطه مستقیم و ظرفیت رسوب بیش تر به دبی جریان وابسته است. مقدار ظرفیت رسوب با تنش برشی و سرعت جریان رابطه مستقیم دارد و این بدین معنی است که با افزایش تنش برشی و سرعت جریان، ظرفیت رسوب نیز افزایش می یابد و بالعکس. نتایج نشان داد که مقدار متوسط قدرت جریان در بازه ابتدایی، میانی و انتهایی به ترتیب برابر با ۸۶۲، ۶۷۸ و ۴۶۳ و تنش برشی ۳۲/۴۳، ۲۸/۷۹ و ۲۲/۸۶ نیوتن بر مترمربع می باشد و از بالا دست به پایین دست در حال کاهش است. بررسی توابع نمایی نشان می دهد که ظرفیت انتقال رسوب، با دبی، سرعت جریان و تنش برشی و دبی با سرعت رابطه مستقیم و با سطح مقطع، عرض رودخانه و عمق جریان رابطه معکوس دارد و بیانگر این است که رواناب بیش ترین تأثیر را در فرسایش، رسوبگذاری و تغییر مورفولوژی رودخانه دارد. بررسی تغییر پارامترهای هندسی- هیدرولیکی و قطر ذرات رسوبی نشان داد که در قسمت های میانی فرسایش و در ساحل راست بالا و پایین دست رودخانه رسوبگذاری رخ می دهد.

### نتایج آنالیز حساسیت پارامترها در دوره واسنجی

حساسیت مدل نسبت به تغییر ضریب مانینگ در سه پارامتر مؤثر در مورفولوژی رودخانه شامل عرض سطح آزاد آب، سرعت، و عمق جریان بررسی شد. بررسی جدول (۱۱) نشان دهنده دقت قابل قبول نتایج حساسیت مدل نسبت به تغییرات عرض سطح آب، عمق و سرعت جریان خرم آباد می باشد. آنالیز حساسیت مدل نشان می دهد که با افزایش تعداد مقاطع عرضی، میزان تغییرات پارامترهای هیدرولیکی در طول رودخانه وضوح بیشتری داشته است و همچنین در رودخانه خرم آباد 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.

جدول (۱۱): نتایج آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییرات عرض سطح آب، عمق و سرعت جریان (خرم‌آباد- دوآب)

پارامتر مورد نیاز	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
درصد تغییرات عرض سطح آزاد آب به ازای ۲۰٪ تغییر ضریب مانینگ	افزایش کاهش	۸۰ ۸۰	۳۱ ۲	۴۲۱ ۴۲۱	۷/۳۶ -۰/۴۷	۰/۳۵	۷۹/۶۵
درصد تغییرات عرض سطح آزاد آب به ازای ۲۰٪ تغییر ضریب مانینگ	افزایش کاهش افزایش	۸۰ ۸۰ ۸۰	۱ ۴۶ ۴	۴۲۱ ۴۲۱ ۴۲۱	-۰/۲۳ ۱۰/۹۲ -۰/۹۵	۵/۹۳	۷۴/۰۷

### نتیجه‌گیری

مدل‌های فیزیکی و ریاضی به منزله ابزار مناسب برای ارزیابی رفتار جریان رودخانه‌ها تحت تأثیر فرایندهای مختلف حاکم در بستر زمان و مکان بسیار مناسب می‌باشند. نتایج حاصل از خروجی مدل هیدرولیکی HEC-RAS در رودخانه خرم‌آباد نشان می‌دهد که وضعیت عرض مقاطع از بالادست به پایین دست رودخانه، از روند ثابتی پیروی نمی‌کند و در بازه‌های مختلف، به دلیل یکنواخت نبودن جنس بستر و کناره‌ها، اتصال سرشاخه‌های فرعی، رخداد سیلاب‌های بزرگ، عدم یا کاهش فرسایش کناره‌ها به دلیل وجود جنس بستر سنگی و مقاوم و تغییر کاربری اراضی در محدوده حریم قانونی بستر رودخانه، در عرض مقاطع تغییرات زیادی رخ داده است اما نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که تغییرات عرضی در طول بازه‌های رودخانه خرم‌آباد بیشتر به دلیل تغییرات مکانی الگوی کنش (فرسایش و رسوب‌گذاری) می‌باشد. آنالیز حساسیت مدل HEC-RAS نشان می‌دهد که با دقت قابل قبولی جریان و رسوب را در بازه مورد نظر شبیه‌سازی کرده است. به طوری که در مقاطع بالادست (چمنجیر) و در مقاطع پایین دست (دوآب و یسیان)، رسوب‌گذاری بار کف و در مقاطع میانی (بین دو مقطع)، فرسایش رخ می‌دهد که این موضوع باعث شریانی شدن رودخانه شده است. بررسی شبیه‌سازی رسوب نشان می‌دهد که در تابع نمایشی برای  $V$ ،  $Q$ ،  $SH$  از مقادیر توابع رگرسیونی درجه ۲ و درجه ۳ کمتر و از تابع رگرسیونی خطی ساده بیش‌تر است و همه متغیرها در سطح ۱٪ (فاصله اطمینان ۹۹٪) معنی‌دار هستند. بنابراین، مدل‌های مناسبی برای رودخانه مورد بررسی به حساب می‌آیند. نتایج حاصل از بررسی توابع نمایشی نشان می‌دهد که ظرفیت انتقال رسوب با دبی، سرعت جریان و تنش برشی رابطه مستقیم و همچنین دبی با سرعت رابطه مستقیم و با سطح مقطع جریان، عرض رودخانه و عمق جریان رابطه معکوس دارد و می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات مورفولوژی رودخانه مورد مطالعه با افزایش دبی افزایش می‌یابد که این بدین معنا است که با افزایش دبی، سطح مقطع جریان که در برگیرنده عرض و عمق جریان است به تدریج کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش دبی و تغییرات مورفولوژی رودخانه، سرعت جریان و تنش برشی افزایش می‌یابد که نتیجه آن افزایش ظرفیت انتقال رسوب می‌باشد و بالعکس. که با نتایج ظهیری و همکاران (۱۳۹۷)، کلامی و همکاران (۱۳۹۸)، شرفی و همکاران (۱۳۹۸)، اودا (۲۰۱۹)، لای و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد. با توجه به اینکه در پایین دست بازه مورد مطالعه، شهر خرم‌آباد و سایر مراکز مسکونی مانند روستاهای بزرگ قرار دارد، می‌توان از نتایج این بررسی جهت کنترل رسوب و کاهش اثرات مخرب سیلاب به ویژه در حوضه شهری برنامه ریزی و طرح جامع مدیریت آبخیز و منابع آب را اجرایی نمود. توصیه می‌شود اثر اقدامات مدیریتی جهت پیشگیری از فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه خرم‌آباد، با استفاده از مدل HEC-RAS واسنجی شده و با سایر مدل‌ها مثل GSTARS شبیه‌سازی شود.



## منابع

- 0 اصغری سراسکانرود، صیاد، (۱۳۹۶)، تحلیل شکل مجرای رودخانه قرانقو در بازه کوهستانی (حد فاصل روستای خراسانک شهرستان هشتگرد تا شهرستان میانه)، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۲۱، شماره ۶۰، صص ۱۹-۲۵.
- 0 حسین زاده، محمدمهدی، خالقی، سمیه، رستمی، میلاد، (۱۳۹۸)، شبیه‌سازی فرسایش کرانه‌ای رودخانه و مخاطرات آن با استفاده از مدل BSTEM (مطالعه موردی: رودخانه گلالی قروه)، *نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۲۳، شماره ۶۷، صص ۱۲۹-۱۴۹.
- 0 خورشیددوست، علی محمد، اسفندیاری، فریبا، حسینی، سید اسعد، دولتخواه، پروانه، (۱۳۹۷)، برآورد میزان رسوب حوضه رود ارس با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: زیرحوضه دره رود)، *نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی*، دوره ۲۲، شماره ۶۵، صص ۱۴۱-۱۶۲.
- 0 شرفی، سیامک، سکوند، حبیب، کمالی، زهرا، (۱۳۹۸)، بررسی تغییرات مکانی- زمانی مورفولوژی رودخانه سیلاخور در استان لرستان، *نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، دوره ۸، شماره ۳، پیاپی ۳۱، صص ۱۱۵-۱۳۱.
- 0 ظهیری، عبدالرضا، قلی نژاد، جواد، دهقانی، امیر احمد (۱۳۹۸)، محاسبه ظرفیت انتقال رسوب در رودخانه‌ها به کمک مدل ریاضی شبه دوبعدی، *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، سال ۱۰، شماره ۱۹، صص ۱۴۲-۱۵۳.
- 0 عزیزی، شهلا، ایلدرمی، علیرضا، نوری، حمید، (۱۳۹۸)، تاثیر تغییر مقاطع عرضی بر طغیان و ظرفیت انتقال رودخانه آبشینه همدان، *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، سال ۸، شماره ۲، صص ۲۰۹-۱۸۹.
- 0 کلامی، سوده، مظاهری، مهدی، محمدولی سامانی، جمال، (۱۳۹۸)، تشخیص روابط هندسی- هیدرولیکی سطح مقطع رودخانه‌ها با استفاده از حل معکوس معادلات سنت-ونانت و کاربرد آن، *نشریه مهندسی عمران شریف*، دوره ۲، شماره ۴، صص ۳۳-۴۲.
- 0 یاسی، مهدی، نصیری، لعیا، احمدی، سلطان، (۱۳۹۶)، شبیه‌سازی و ارزیابی جریان در رودخانه‌های با جریان دائمی با دو مدل HEC-RAS و RubarBE E، *نشریه آب و خاک*، مقاله ۱۷، دوره ۲۷، شماره ۲، صص ۲۲۵-۲۳۶.
- 0 Choi, S.U., and Lee, J. 2014. Assessment of total sediment load in rivers using lateral distribution method. *Journal of Hydro-environment Research*, 9(3): 381-387.
- 0 Iqbal, M., Ghumman, A. R., Haider, S., Hashmi, H. N., and Khan, M. A. (2019). Application of Godunov type 2D model for simulating sediment flushing in a reservoir. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(5): 4289-4307.
- 0 Keane, T. D., and Sass, C. K. (2017). Channel Evolution Models as Predictors of Sediment Yield, *Journal of the American Water Resources Association*, 53(6):1513-1529.
- 0 Klavon, K., Fox, G., Guertault, L., Langendoen, E., Enlow, H., Miller, R., Khanal, A. (2017). Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization: insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM). *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1): 191-213.
- 0 Lai, Y. G., and Wu, K. (2019). A Three-Dimensional Flow and Sediment Transport Model for Free-Surface Open Channel Flows on Unstructured Flexible Meshes, *Fluids*, 4(1): 18-28.
- 0 McMillan, M., Liebens, J., and Metcalf, C. (2017). Evaluating the BANCS Streambank Erosion Framework on the Northern Gulf of Mexico Coastal Plain, *Journal of the American Water Resources Association*, 53(6):1393-1408.
- 0 Ouda, M. (2019). Multiphase Modelling of Sediment Transport and Bed Erosion for the Study of Coastal Morphodynamics. (*KU Leuven, Technology Campus Brugge, Belgium*) October 2019.