دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

بررسی تغییرات بستر رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS4.0 (مطالعه موردی: رودخانه تالار)

فاطمه زهرا اسدی[۱]، رامین فضل‌اولی[۲] و علیرضا عمادی[۳]

۱ و ۳- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد و دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، (نویسنده مسوول: raminfazl@yahoo.com)
تاریخ دریافت: ۹۳/۵/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۱۲

چکیده

اطلاع از چگونگی فرسایش و توانایی حمل رسوب در آبراهه‌های مختلف حوزه از جمله مواردی است که در هر طرح مهندسی رودخانه و هیدرولوژی باید مورد نظر قرار گیرد. در تحقیق حاضر فرسایش و رسوب‌گذاری در بازه‌ای به طول ۱۲ کیلومتر از رودخانه تالار با استفاده از مدل HEC-RAS4.0 مورد بررسی و میزان آورد رسوب برای ۱۰ سال آینده پیش‌بینی شد. به‌منظور شبیه‌سازی بازه مورد مطالعه از ٤٠ مقطع عرضی برداشت شده در سال ۱۳۸۵ و برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل از ٤ مقطع نقشه‌برداری شده در سال ۱۳۹۰ استفاده شد. واسنجی و صحت‌سنجی مدل نشان داد رابطه انتقال رسوب میر-پیتر-مولر تطابق بهتری با نتایج واقعی دارد. برای پیش‌بینی روند فرسایش و رسوب‌گذاری، با استفاده از آمار ثبت شده دبی ایستگاه هیدرومتری شیرگاه (در ابتدای بازه) در ۳۰ سال گذشته و به کمک مدل آماری SAMS مقدار دبی ماهانه رودخانه برای ۱۰ سال آینده پیش‌بینی و مدل رسوب اجرا گردید. تغییرات پروفیل طولی رودخانه نشان می‌دهد بیشترین تغییرات در محدوده میانی بازه مطالعاتی رخ می‌دهد و ابتدای بازه به طول حدود ۱۰۰۰ متر با داشتن شیب ملایم، پایدار می‌باشد. همچنین پیش‌بینی می‌شود میزان رسوب خارج شده از بازه مورد مطالعه برای ۱۰ سال آینده به میزان ٣٤٨٥٣٤ تن باشد.

واژه‌های کلیدی: روابط انتقال رسوب، رودخانه تالار، شبیه‌سازی هیدرولیکی و رسوبی، فرسایش و رسوب‌گذاری، مدل ریاضی

مقدمه

رودخانه‌ها یکی از منابع مهم آب‌های سطحی می‌باشند که با توجه به نقش مهم آن‌ها در زندگی بشر می‌بایستی مورد توجه و محافظت قرار گیرند. این منابع خدادای، تحت تأثیر پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری دست‌خوش تغییرات گوناگونی می‌شوند که از آن جمله می‌توان به تغییر امتداد جابجایی‌های عرضی و طولی، وقوع میان‌برها[۱]، تغییر نوع رودخانه، تغییر تراز بستر، تغییر دانه‌بندی و دگرگونی ویژگی‌های هندسی مسیر اشاره کرد.

مطالعات فرسایش و رسوب‌گذاری این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان ضمن شناخت رفتار ریخت‌شناسی رودخانه، اثرهای اقدامات ساماندهی را بر عملکرد رفتاری آن مورد ارزیابی کمی و کیفی قرار داده و از این طریق امکان تشخیص عوامل ناپایداری و اعمال معیارهای مناسب حفاظتی و اقدامات مهندسی را پیشاپیش میسرنمود.

از اهم مشکلاتی که انتقال رسوب و رسوب‌گذاری مواد رسوبی می‌تواند به وجود آورد عبارتند از: ایجاد جزایر در مسیر رودخانه و در نتیجه کاستن از ظرفیت انتقال جریان‌های سیلابی، رسوب‌گذاری در مخازن پشت سدها و در نتیجه کاستن از ظرفیت ذخیره مخازن و کاهش عمر مفید سدها و رسوب‌گذاری در مسیل رودخانه‌ها در هنگام سیلاب و در نتیجه وارد کردن خسارات به بناها و مزارع، خوردگی تأسیسات سازه‌های رودخانه‌ای و رسوب‌گذاری در کف کانال و در نتیجه کم‌عمق شدن رودخانه که بسیاری مسایل و مشکلات را در پی خواهد داشت (۸).

برای پیش‌بینی آورد رسوب، عموماً با استفاده از مدل‌های فیزیکی- هیدرولیکی روابط تجربی متعددی ارایه شده است. این روابط عمدتاً بر قوانین دینامیک و هیدرولیک استوار بوده و با در نظر گرفتن خصوصیات جریان همانند دبی، سرعت، سطح مقطع و عمق جریان، دانه‌بندی و قطر ذرات رسوب، وزن مخصوص، لزجت و دمای آب به‌دست آمده‌اند. در بسیاری از ایستگاه‌های آب‌سنجی هرگز چنین داده‌هایی به اندازه کافی یافت نمی‌شود و عمدتاً کل داده‌ها به دبی آب و دبی رسوب خلاصه می‌گردد که این امر استفاده از این روابط را دچار مشکل می‌کند. در چنین مواردی استفاده از منحنی سنجه رسوب[۲] به‌منظور تخمین آورد رسوب مطرح می‌شود.

روش منحنی سنجه به داده‌های فراوان و آماربرداری تقریباً متوالی و مستمر نیاز دارد. هورویتز (۹) که به تحقیق برای پیش‌بینی بار رسوب معلق در رودخانه می‌سی‌سی‌پی مبادرت ورزید، دریافت به‌منظور بهترین ارزیابی بار رسوب معلق سالانه در یک دوره بیست ساله می‌توان از منحنی‌های سنجه رسوب استفاده نمود.

با توجه به موارد گفته شده توسعه روش‌های کارآمد و دقیق برای برآورد میزان رسوب که محدودیت‌های فوق‌الذکر ر ا نداشته باشد از اهمیت زیادی برخوردار است در همین راستا در طی چند دهه اخیر استفاده از مدل‌های کامپیوتری روند انجام محاسبات را آسان‌تر و انجام تحلیل‌ها را دقیق‌تر نموده است. برخی از این مدل‌ها که تحت عنوان مدل‌های هوشمند شهرت یافته‌اند از روش‌های یادگیری ماشین از جمله مدل درختان تصمیم‌گیری، ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد میزان بار رسوبی رودخانه استفاده می‌کنند (۴). از سوی دیگر مدل‌های سری زمانی نیز از جمله مباحث نوظهوری است که در دهه‌های اخیر در مدل‌سازی رسوب به کار گرفته شده و از جمله آنها می‌توان به روش

1- Cut-off
2- Sediment Rating Curve

موسوم به زنجیره مارکف و مدل‌های ARIMA اشاره نمود (۱). اما برخی دیگر از مدل‌ها با استفاده از مبانی فیزیکی- هیدرولیکی حاکم بر پدیده انتقال رسوب به صورت مدل‌های ریاضی یک، دو و سه‌بعدی تهیه شده‌اند، در این میان مدل یک‌بعدی ساده‌تر و با توجه به فرضیات ساده آن، برای شبیه‌سازی رفتار رودخانه که بسیار پیچیده است، کافی نمی‌باشد ولی مدل‌های یک‌بعدی تحت شرایط خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های دو و سه بعدی، پرهزینه و پیچیده می‌باشند (۲). همچنین مدل‌های ریاضی به‌دلیل این‌که ابعاد واقعی پدیده‌ها را مدل می‌کنند، با محدودیت مقیاس مواجه نیستند ولی به اطلاعات بیشتری برای واسنجی و صحت‌سنجی نیاز دارند. به دلیل پیچیده بودن روابط حاکم بر پدیده‌های فرسایش و رسوب، معمولاً مدل‌های یک‌بعدی در این‌گونه مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرند. گرچه مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی نیز توسعه یافته و در مواردی برای اهداف مهندسی از آن‌ها استفاده می‌شود.

حسینی و جواهری (۱۰) با هدف بررسی وضعیت رسوب رودخانه‌ی خررود واقع در استان قزوین، به مطالعه امکان احداث کارگاه‌های برداشت شن و ماسه و فعالیت‌های مختلف عمرانی در حاشیه و محدوده سیلاب‌دشت رودخانه پرداختند و پس از شبیه‌سازی رودخانه توسط مدل HEC-RAS4.0 با تعیین رسوبات رودخانه‌ای و مشخص نمودن توزیع رسوب در بخش‌های مختلف رودخانه، برنامه برداشت مصالح از رودخانه ارایه دادند.

حقی‌آبی و زارع دهدشت (۷) در شبیه‌سازی رودخانه کارون دو مدل HEC-RAS4.0 و MIKE11 را استفاده نمودند. ایشان به‌منظور شبیه‌سازی از معادله انتقال رسوب ایکرز- وایت استفاده کرده و در نتایج خود بیان داشتند که این دو مدل با دقت خوبی قادر به شبیه‌سازی رودخانه مورد مطالعه می‌باشند. همچنین در مقایسه مدل‌ها، یکی از معایب مدل HEC-RAS4.0 را نیاز به مدت زمان بیشتر برای انجام شبیه‌سازی بیان نموده و اظهار نمودند هردو مدل نسبت به انتخاب گام‌های زمانی حساس می‌باشند.

پیرو و همکاران (۱۶) با استفاده از اطلاعات مربوط به رودخانه بشار واقع در استان کهگیلویه و بویر احمد، با منظور نمودن هیدروگراف‌های ۲ و ۲۵ ساله و تهیه اطلاعات پایه و شبیه‌سازی ۲۵ کیلومتر از رودخانه در مدل HEC-RAS، به تحلیل و بررسی مکان‌های مناسب برای برداشت مصالح پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که چنانچه بستر رودخانه نسبت به عمل فرسایش مقاوم باشد، در آن‌صورت بدنه رودخانه شروع به ریزش کرده و باعث تعریض رودخانه خواهد شد.

همچنین روشان و همکاران (۱۷) با بهره‌گیری تلفیقی از مدل هیدرولیکی HEC-RAS و نرم‌افزار Arc View با استفاده از الحاقیه HEC-GeoRAS، پارامترهای هیدرولیکی رودخانه بشار را شبیه‌سازی نمودند. نتایج حاصل نشان داد که مدل HEC-RAS می‌تواند مقادیر عددی مناسبی را برای مطالعه خصوصیات هیدرولیکی جریان در رودخانه‌ها ارایه دهد و در پهنه‌بندی سیلاب با دقت بالا و هزینه اندک مورد استفاده قرار گیرد.

گیبسون (۵) با استفاده از مدل HEC-RAS به مدل‌سازی بستر متحرک رودخانه کولیتز[1] و ارزیابی اثرات رسوب‌گذاری دراز مدت سیل در این رودخانه پرداخت. او در پژوهش خود با توجه به بستر رودخانه کولیتز (وجود ماسه ریز، لای و شن) معادله انتقال رسوب لارسن را انتخاب نموده و واسنجی مدل را با چهار سری داده‌های هیدروگرافی برداشت شده از رودخانه انجام داد.

مروری بر پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات در حد کافی و مورد نیاز به منظور آشکار سازی روند فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه تالار انجام نشده است و از طرفی با توجه به مسایل و مشکلات ناشی از فرسایش بستر و دیواره‌های رودخانه تالار که در بازه‌های مختلف این رودخانه مشهود می‌باشد، ضرورت انجام تحقیق و مطالعه بیشتر درخصوص موضوع فوق را برای این رودخانه دوچندان نموده است.

نظر به این‌که مدل هیدرولیکی HEC-RAS4.0 دارای قابلیت‌های خوبی برای تحلیل هیدرولیکی جریان و رسوب می‌باشد، در این پژوهش براساس داده‌های اندازه‌گیری شده رسوب و دبی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری موجود، مقاطع مورد نیاز و سایر اطلاعات لازم، بازه‌ای از رودخانه مورد نظر با استفاده از این مدل شبیه‌سازی شد و تغییرات رسوب‌گذاری و فرسایش در آن بازه مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

فایل‌های مورد نیاز برای ایجاد یک مدل رسوبی در HEC-RAS عبارتند از: فایل ژئومتری (حاوی اطلاعات هندسی بازه مورد مطالعه)، فایل جریان شبه‌دایمی و فایل رسوب. در بخش اطلاعات هندسی، پلان عمومی رودخانه همراه با مقاطع عرضی به مدل معرفی می‌شوند. در قسمت اطلاعات هیدرولیکی، مدل برای شبیه‌سازی پدیده انتقال رسوب رودخانه نیاز به تعریف جریان شبه‌غیرماندگار دارد که داده‌های مربوط به این جریان در قالب هیدروگراف، فایل ورودی مدل را تشکیل می‌دهد. برای شبیه‌سازی از داده‌های دبی روزانه ایستگاه شیرگاه از سال ۱۳۸۵ تا سال ۱۳۹۰ استفاده شد.

داده‌های مربوط به بخش رسوب شامل داده‌های رسوب ورودی، داده‌های دما، داده‌های دانه‌بندی بستر و پارامترهای مربوط به انتقال رسوبات چسبنده می‌باشد. در این بخش منحنی سنجه رسوب معلق که در ایستگاه شیرگاه به‌دست آمد، به‌عنوان ورودی به‌کار گرفته شد.

رودخانه تالار

رودخانه تالار از بخش‌های شمالی رشته‌کوه‌های البرز سرچشمه می‌گیرد و از شاخه‌های متعددی چون کبیررود، سرخاب، بزلا، چرات، شش‌رودبار، کسیلیان، تجون و توجی تشکیل شده است. طول رودخانه ۱۵۲ کیلومتر و مساحت حوزه آبریز آن ۲۹۰۰ کیلومترمربع است. بستر رودخانه تا

1- Cowlitz

شیرگاه دارای شیب نسبتاً تندی در حدود ۴ درصد بوده و سپس رودخانه با شیب ملایم حدود ۱ درصد به سمت دریا پیش می‌رود. تالار دارای رژیم برفی-بارانی است و آب‌دهی رودخانه در ورود به دشت قابل ملاحظه بوده که بیشتر به مصارف کشاورزی می‌رسد. آب‌دهی سالانه رودخانه در یک دوره ۳۲ ساله به‌طور متوسط ۱۱۸ میلیون‌مترمکعب و حداکثر آب‌دهی لحظه‌ای آن ۷۶ مترمکعب در ثانیه می‌باشد (۱۵).

مهم‌ترین مسایل مطرح در خصوص رودخانه تالار عبارتند از: فرسایش و رسوب رودخانه در مقاطع مختلف، برداشت شن و ماسه از رودخانه، تصرف بستر و حریم رودخانه برای کاربری‌های مختلف، وضعیت نامناسب زیست-محیطی و عمکلرد نامناسب سازه‌های متقاطع با رودخانه در بازه‌های مختلف (۱۵).

بازه مورد مطالعه از ایستگاه هیدرومتری شیرگاه تا ۱۲ کیلومتر به سمت پایین‌دست می‌باشد که با ۴۰ مقطع عرضی برداشت شده در سال ۱۳۸۵ شبیه‌سازی و برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل از ۴ مقطع نقشه‌برداری شده توسط تیم تحقیق حاضر در سال ۱۳۹۰ استفاده شد. در در شکل ۱ تصویر هوایی از بازه شبیه‌سازی شده به همراه مقاطع عرضی و ایستگاه هیدرومتری شیرگاه، نشان داده شده است.

ایستگاه هیدرومتری شیرگاه: در سال ۱۳۲۹ بر روی رودخانه تالار احداث شده است (شکل ۱). این ایستگاه از نظر تجهیزات هیدرومتری جزء ایستگاه‌های درجه یک و دارای اشل، پل تلفریک و دیتالاگر می‌باشد. مساحت زیرحوزه تحت پوشش این ایستگاه ۱۷۶۸ کیلومترمربع می‌باشد.

شکل ۱- تصویر هوایی رودخانه مورد مطالعه به همراه ایستگاه هیدرومتری شیرگاه و مقاطع مورد استفاده
Figure 1. Satellite image of the studied river with Shirgah hydrometric stations and sections used

معرفی مدل HEC-RAS و معادلات حاکم

مدل HEC-RAS4.0[1] نسخه سال ۲۰۰۸، آخرین مدل ارایه شده از سوی مرکز مهندسی ارتش آمریکا[2] می‌باشد که در آن قابلیت شبیه‌سازی رسوب و کیفیت نیز اضافه شده است (۱۹).

برای حل معادلات مختلف انتقال رسوب در نرم‌افزار HEC-RAS4.0 با در نظر گرفتن حجم کنترل برای رسوب و جریان به‌صورت شبه-غیرماندگار، از روندیابی جریان آب و رسوب توسط معادله اکسنر[3] استفاده می‌شود. معادله اکسنر با فرض این‌که تغییرات حجم رسوبات در حالت معلق خیلی کمتر از تغییرات حجم رسوبات بستر باشد، استنتاج شده است. معادله بقای جرم برای رسوب با توجه به معادله اکسنر به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + £\frac{\partial A_d}{\partial t} - q_s = 0 \qquad (۱)$$

در رابطه بالا ε حجم رسوبات در واحد حجم لایه بستر (ضریب تخلخل منهای یک)، A_d حجم رسوبات بستر در واحد طول، Q_s دبی حجمی رسوبات و qs دبی جانبی رسوبات ورودی در واحد طول می‌باشد.

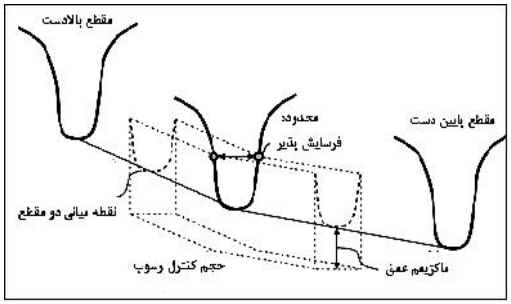
انتگرال معادله (۱) روی حجم کنترل هر مقطع عرضی، یک معادله برای عمق رسوب‌گذاری (ΔZ_b) برای یک اندازه رسوب در مقطع عرضی i می‌دهد:

$$\varepsilon_i W_i \Delta x_i \Delta Z_{b,i} = q_{z,i}\Delta x_i \Delta t + (Q_{s,i-1} - Q_{s,i})\Delta t \qquad (۲)$$

که در آن W عرض مقطع فرسایش یافته یا رسوب‌گذاری شده می‌باشد. از مجموع حجم فرسایش هر اندازه رسوب، حجم فرسایش کل یا رسوب‌گذاری کل مقطع به‌دست می‌آید.

در شکل ۲ شماتیک حجم کنترل رسوب سه‌بعدی مورد استفاده در نرم‌افزار آمده است.

1- Hydrologic Engineering Center, River Analysis System 2- USACE 3- Exner



شکل ۲- حجم کنترل سه بعدی به‌صورت شماتیک
Figure 2. Three dimensional control volume as a schematic view

به‌منظور تعیین میزان فرسایش و رسوب‌گذاری در نرم‌افزار HEC- RAS4.0 توابع انتقال رسوب تجربی متعددی وجود دارد که توسط دانشمندان مختلف به‌دست آمده‌اند. فرضیات اعمال شده دراین توابع و محدوده کاربرد آن‌ها سبب می‌گردد تا نتایج به‌دست آمده ازاین توابع، متفاوت باشد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل ریاضی

در مدل‌سازی عددی سیستم رودخانه، به‌منظور انجام صحیح محاسبات، تعداد زیادی از پارامترها می‌بایست به شکل مناسبی تعریف شوند. مقادیر این پارامترها اغلب فاقد صحت و درستی قابل قبولی هستند و بنابراین تعریف مقادیر می‌بایست براساس اطلاعات تجربی سیستم باشد (۲۰).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان فرسایش و رسوب‌گذاری در یک مقطع عرضی، نسبت به انتخاب معادله انتقال رسوب و ضریب زبری مانینگ حساس می‌باشد (۳). همچنین ضریب زبری مانینگ، مهم‌ترین ضریب هیدرولیکی در انواع مطالعات هیدرولیک رودخانه است که تأثیر بارزی بر نتایج محاسبات برجای می‌گذارد.

پس از اطمینان از واسنجی مدل برای شبیه‌سازی هیدرولیکی، می‌بایستی مدل برای شبیه‌سازی رسوب واسنجی گردد.

پیش‌بینی تغییرات فرسایش و رسوب‌گذاری

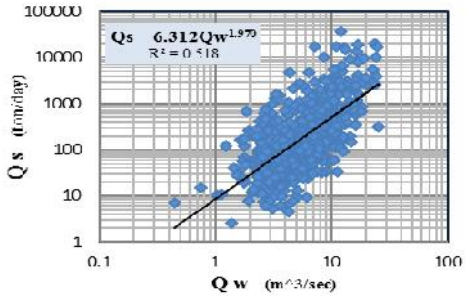
برای پیش‌بینی روند رسوب‌گذاری و فرسایش در بازه مورد مطالعه، با استفاده از مدل SAMS[1] میزان دبی در ایستگاه شیرگاه برای ۱۰ سال آینده به‌دست آمده و مورد استفاده قرار گرفت. نرم‌افزار SAMS (شبیه‌سازی و مدل‌سازی با تجزیه تحلیل تصادفی) برای اهداف هیدرولوژی و پیش‌بینی پارامترهای هیدرولوژی، هواشناسی و خشکسالی توسط دانشگاه کلرادو آمریکا تهیه شده است (۱۸). مدل ARMA که تلفیقی از مدل AR (اتو رگرسیون) و MA (میانگین متحرک) می‌باشد، برای پیش‌بینی دبی به کار برده شد. مدل با استفاده از داده‌های ۳۰ سال قبل در ایستگاه شیرگاه، ۱۰ خروجی از دبی پیش‌بینی به‌صورت تصادفی دارد که بهترین خروجی انتخاب شد.

نتایج و بحث

منحنی سنجه رسوب معلق درایستگاه شیرگاه به‌صورت یک رابطه‌ی خطی توانی با استفاده از داده‌های۳۰ ساله موجود از اندازه‌گیری Qs و Qw و بهترین برازش برمبنای روش حداقل مربعات استخراج و به مدل معرفی شد (شکل ۳).

$$Q_s=6.312\ Q_w^{1.97} \qquad (۳)$$

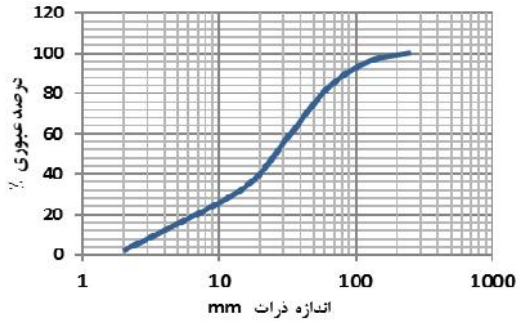
استفاده از رابطه‌ی فوق با درجه آزادی ۸۰ و ضریب همبستگی ۰/۸۴۸ در دو سطح معنی‌دار ۱٪ و ۵٪ مورد تائید قرار گرفت (۱۴).



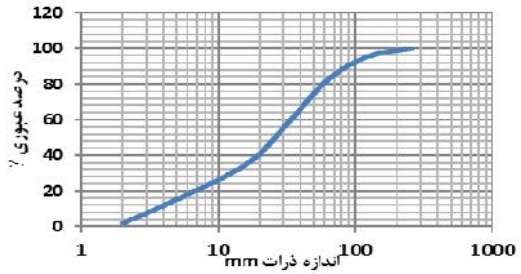
شکل ۳- منحنی دبی سنجه رسوب در ایستگاه شیرگاه
Figure 3. Sediment rating curve at the Shirgah station

1- Stochastic Analysis, Modeling and Simulation

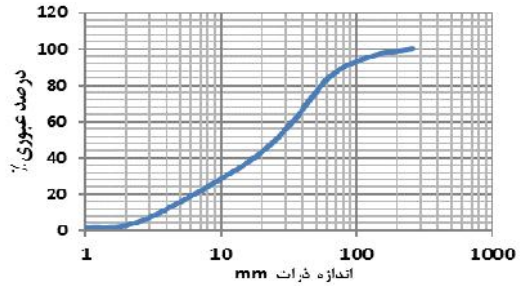
نمودار دانه‌بندی بستر رودخانه با انجام نمونه‌برداری نقطه‌ای و انجام آزمایش الک در ۵ نقطه و همچنین روش ولمن[1]، در این تحقیق به‌دست آمده و مورد استفاده قرار گرفت که نتایج نهایی در شکل‌های ۴ الی ۶ آمده است.



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی بستر در بازه بالادست
Figure 4. The curve of bed grain size in the upstream reach



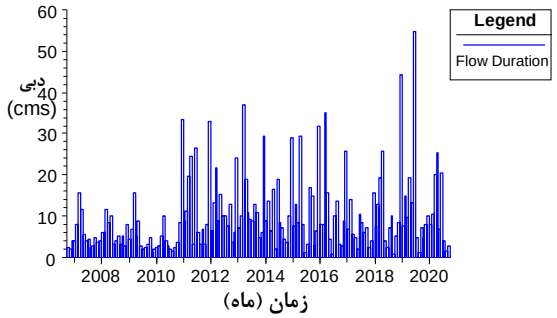
شکل ۵- منحنی دانه‌بندی بستر در بازه میانی
Figure 5. The curve of bed grain size in the middle reach



شکل ۶- منحنی دانه‌بندی بستر در بازه پایین‌دست
Figure 6. The curve of bed grain size in downstream reach

هیدروگراف جریان پیش‌بینی شده که توسط نرم‌افزار SAMS به‌دست آمده و در شبیه‌سازی مدل HEC-RAS به‌صورت دبی ماهانه مورد استفاده قرار گرفته، در شکل ۷ آمده است.

1- Wolman



شکل ۷- هیدروگراف مورد استفاده برای شبیه‌سازی پیش‌بینی رسوب‌گذاری
Figure 7. The hydrograph used to simulate the prediction of sedimentation

به‌منظور انجام واسنجی ضریب زبری، با توجه به قابلیت برنامه HEC-RAS در انتخاب شرایط مرزی مختلف، با داشتن منحنی دبی-اشل در ایستگاه شیرگاه، مدل با ضرایب زبری و دبی‌های مختلف در حالت ماندگار اجرا شده و منحنی دبی-اشل به‌دست آمده در ایستگاه شیرگاه و منحنی واقعی با استفاده از شاخص آماری میزان خطای استاندارد[1] (رابطه ۴) مقایسه گردید که نتایج آن در جدول ۱ آمده است.

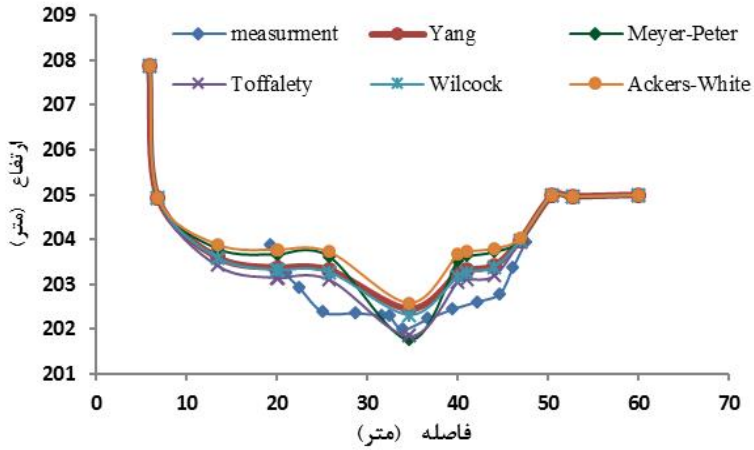
$$STE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{i=n}(x_{oi}-x_{ti})^2}{(n-1)}\right]^{1/2} \quad (۴)$$

در رابطه فوق X_{oi} و X_{ti} به ترتیب مقادیر داده مشاهده‌ای و داده به‌دست‌آمده حاصل از شبیه‌سازی برای سطح آب و N تعداد داده‌ها می‌باشد (۱۳).

جدول ۱- مقادیر خطای استاندارد محاسبه شده به ازای ضرایب زبری مختلف
Table 1- Standard error values calculated for different roughness coefficients

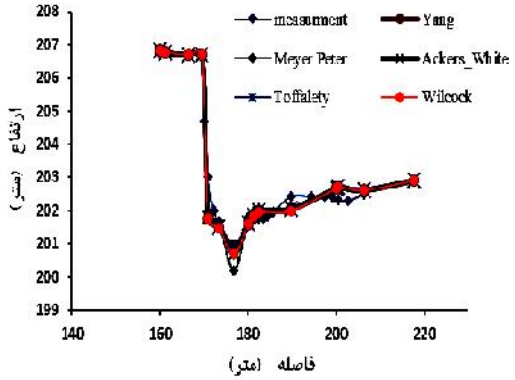
n	n1=0.045	n2=0.04	n3=0.05	n4=0.055
STE	0.2625	0.2200	0.3049	0.3531

در بخش واسنجی رسوبی، با توجه به بازدیدهای صحرایی انجام شده و عدم مشاهده امواج ماسه‌ای در بستر در بازه مورد مطالعه براساس توصیه یانگ (۲۱)، از ۶ معادله انتقال رسوب قابل استفاده در مدل، ۵ معادله توفالتی، ایکرز-وایت، میر-پیتر-مولر، انگلند-هانسن، لارسن و یانگ اجرا شد و نتایج برای سه مقطع نقشه‌برداری شده در سال ۱۳۹۰ مطابق شکل‌های ۸ تا ۱۰، مورد مقایسه قرار گرفت.

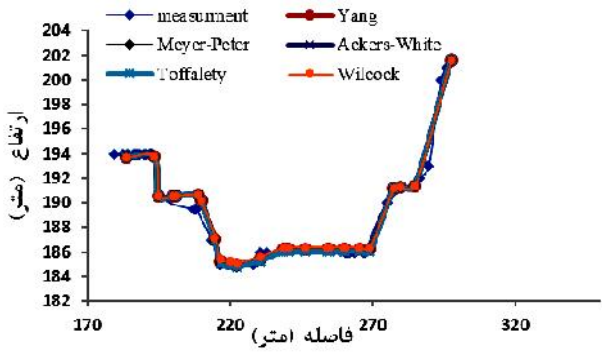


شکل ۸- واسنجی روابط رسوبی مختلف در مدل HEC-RAS4.0 برای مقطع عرضی ۳۹
Figure 8. The calibration of sedimentary relationships with HEC-RAS4.0 model in cross-section no. 39

1- STE



شکل ۹- واسنجی روابط رسوبی مختلف در مدل HEC-RAS4.0 برای مقطع عرضی ۳۸
Figure 8. The calibration of sedimentary relationships with HEC-RAS4.0 model in cross-section no. 38



شکل ۱۰- واسنجی روابط رسوبی مختلف در مدل HEC-RAS4.0 برای مقطع عرضی ۲۶
Figure 8. The calibration of sedimentary relationships with HEC-RAS4.0 model in cross-section no. 26

در این قسمت نیز میزان خطای استاندارد برای هریک از توابع انتقال رسوب با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد که در آن X_{oi} و X_{ti} به ترتیب مقادیر داده مشاهده‌ای و داده به‌دست آمده حاصل از شبیه‌سازی برای تراز کف رودخانه و N تعداد داده‌ها (تعداد نقاط اندازه‌گیری شده در مقطع عرضی) می‌باشد.

نتایج در جدول ۲ آمده است. در بخش صحت‌سنجی از مقطع ۳۴ استفاده شد که نشان می‌دهد معادله میر-پیتر-مولر به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است (جدول ۳).

جدول ۲- مقادیر خطای استاندارد محاسبه شده برای روابط انتقال رسوب مختلف مورد استفاده
Table 2. Calculated standard error values for used different sediment transport equations

مقطع	یانگ	میرپیترمولر	ایکرز وایت	توفالتی	ویلکوک
۲۶	۰/۶۶۵	۰/۶۵۴	۰/۶۵۵	۰/۶۵۵	۰/۶۸۸
۳۸	۱/۳۰۲	۱/۲۰۱	۱/۲۹۷	۱/۲۹۸	۱/۲۹۳
۳۹	۰/۷۳۳	۰/۶۳۷	۱/۰۲۶	۰/۷۴۳	۰/۷۹۸

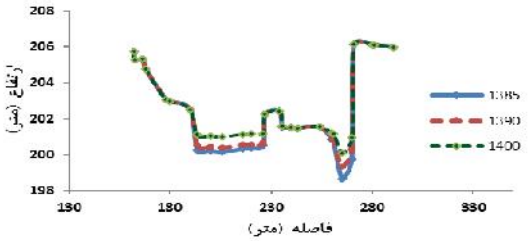
جدول ۳- مقادیر خطای استاندارد محاسبه شده برای روابط انتقال رسوب مختلف در مقطع ۳۴
Table 3. Calculated standard error values for different sediment transport equations in section 34

مقطع	یانگ	میرپیتر مولر	ایکرز وایت	توفالتی	ویلکوک
۳۴	۰/۹۳۲	۰/۹۱۲	۰/۹۴۳	۰/۹۲۹	۱/۰۶۱

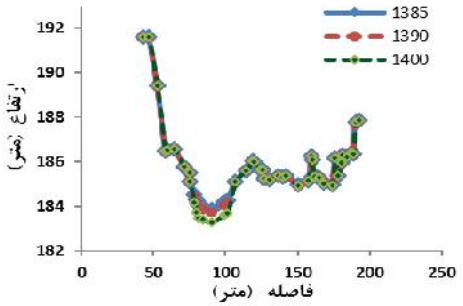
کیوانلو (۱۲) نیز که در پژوهش خود به بررسی اثرات برداشت مصالح از بستر رودخانه تالار بر شرایط هیدرولیکی و سازه‌های متقاطع با استفاده از توانایی مدل HEC-RAS، ARC GIS و الحاقیه HEC-GeoRAS پرداخت، مناسب بودن معادله انتقال رسوب میر-پیتر-مولر را در بازه پایین‌دست این رودخانه تأیید نمود. ایشان در پژوهش خود سناریوهای مختلف تأثیر حالت‌های مختلف برداشت از کناره‌ها و بستر رودخانه بر شرایط هیدرولیکی و سازه‌های پل را مورد بررسی قرار داده و پس از شبیه‌سازی، با بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان بهترین مکان برای حفر گودال‌های برداشت، به طوری که کمترین تأثیر را روی سازه‌های متقاطع داشته باشند پیشنهاد نمود. حدادچی و همکاران (۶) نیز در رودخانه چهل‌چای استان گلستان با مقایسه بار بستر اندازه‌گیری شده و معادلات تجربی اظهار داشتند که معادلات ایکرز-وایت و میر-پیتر دقت قابل قبولی در محاسبه نرخ رسوب در این رودخانه دارند. مطالعات جباری و همکاران (۱۱)

در رودخانه ابهررود استان زنجان که با استفاده از مدل HEC-RAS4.0 انجام شد، نشان داد که معادله یانگ با داشتن خطای کمتری نسبت به سایر معادله‌ها، برآورد قابل قبولی از میزان رسوب داشته و می‌تواند به‌منظور شناخت پتانسیل میزان انتقال رسوب در مناطق مختلف رودخانه ابهررود مورد استفاده قرار گیرد. نتایج تغییرات مقطع عرضی برای سه مقطع به عنوان نمونه در شکل‌های ۱۱ الی۱۳ ارایه شده است.

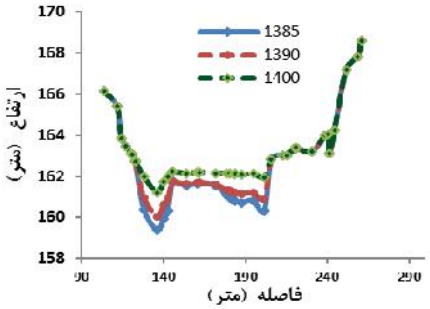
در جداول ۴ و ۵ تغییرات رسوب انتقال یافته و تغییرات بار بستر در دوره شبیه‌سازی شده ۱۳۹۰–۱۳۸۵ و دوره پیش‌بینی شده ۱۴۰۰–۱۳۹۰ ارایه شده است.



شکل ۱۱– تغییرات مقطع عرضی ۳۷
Figure 11. Changes of cross-section no. 37



شکل ۱۳– تغییرات مقطع عرضی ۱۴
Figure 13. Changes of cross-section no. 14



شکل ۱۲– تغییرات مقطع عرضی ۲۲
Figure 12. Changes of cross-section no. 22

جدول ۴– میزان تغییرات بار کل و بار بستر برای دوره شبیه‌سازی ۱۳۹۰–۱۳۸۵
Table 4. Changes in total load and bed load for the simulation period of 2007-2012

مقطع	مجموع بار رسوبی خارج شده (تن)	میزان بار بستر در مقطع (تن)	مقطع	مجموع بار رسوبی خارج شده (تن)	میزان بار بستر در مقطع (تن)
۴۰	۱۳۶۳۹۰۹	۳۳۹۲۶۱	۲۰	۱۸۳۱۶۱۲	-۵۳۸۴۹۶
۳۹	۱۰۳۹۳۷۹	۳۲۴۵۳۰	۱۹	۱۴۷۷۷۹۲	۳۵۳۸۱۹
۳۸	۹۵۰۵۸۳	۸۸۷۹۵	۱۸	۱۲۹۴۴۶۳	۱۸۳۳۲۹
۳۷	۶۳۴۷۶۴	۳۱۵۸۱۸	۱۷	۹۵۲۲۶۴	۳۴۲۱۹۸
۳۶	۴۱۷۶۳۲	۲۱۷۱۳۲	۱۶	۸۲۸۰۱۹	۱۲۴۲۴۴
۳۵	۲۳۷۵۳۸	۱۸۰۰۹۴	۱۵	۱۱۸۸۶۴۶	-۳۶۰۶۲۶
۳۴	۱۲۹۵۷۱	۱۰۷۹۶۶	۱۴	۳۴۸۲۶۵	۸۴۰۳۸۰
۳۳	۲۱۰۴۲۶	-۸۰۸۵۴	۱۳	۱۶۴۹۰۶	۱۸۳۳۵۸
۳۲	۲۹۳۷۷۷	-۸۳۳۵۰	۱۲	۲۰۴۷۹۲۲	-۱۸۸۳۰۱۵
۳۱	۳۶۴۱۳۵	-۷۰۳۵۸	۱۱	۶۳۱۲۳۷۲	-۴۲۶۴۴۵۰
۳۰	۳۳۵۹۹۲	۲۸۱۴۲	۱۰	۱۰۶۲۰۳۰	۵۲۵۰۳۴۲
۲۹	۳۷۸۱۲۵	-۴۲۱۳۲	۹	۲۷۹۶۳۷	۷۸۲۳۹۳
۲۸	۳۴۱۱۳۰	۳۶۹۹۴	۸	۳۶۳۷۰۷	-۸۴۰۷۰
۲۷	۱۴۷۹۶۸	۱۹۳۱۶۱	۷	۳۵۵۰۴۷	۸۶۵۹
۲۶	۸۴۶۵۱	۶۳۳۱۷	۶	۱۵۱۶۴۴۳	-۱۱۶۱۳۹۵
۲۵	۷۶۶۹۰	۷۹۶۰	۵	۲۳۶۷۱۷۳	-۸۵۰۷۲۹
۲۴	۸۵۱۴۲	-۸۴۵۱	۴	۶۶۸۳۴۵	۱۶۹۸۸۲۷
۲۳	۲۱۶۱۳۰	-۱۳۰۹۸۸	۳	۹۷۸۵۵۶	-۳۱۰۲۱۰
۲۲	۲۹۴۳۰۱	-۷۸۱۷۱	۲	۴۱۴۵۳۲	۵۶۴۰۲۳
۲۱	۱۲۹۳۱۱۵	-۹۹۸۸۱۳	۱	۸۹۷۳۳	۳۲۴۷۹۹

جدول ۵- پیش‌بینی میزان تغییرات بار کل و بار بستر برای دوره پیش‌بینی ۱۴۰۰-۱۳۹۰
Table 5. Forecast rate of changes in total load and bed load for the prediction period of 2012-2022

مقطع	مجموع بار رسوبی خارج شده (تن)	میزان بار بستر در مقطع (تن)	مقطع	مجموع بار رسوبی خارج شده (تن)	میزان بار بستر در مقطع (تن)
۴۰	۵۵۳۸۷۷۲	۱۳۳۸۴۵۶	۲۰	۳۸۹۵۲۷۰	-۱۳۵۱۴۱۲
۳۹	۴۱۹۹۲۱۲	۱۳۳۹۵۶۰	۱۹	۳۹۶۷۹۴۷	-۷۲۶۷۷
۳۸	۳۲۸۸۷۷۲	۹۱۰۴۴۰	۱۸	۳۹۴۷۳۰۳	۲۰۶۴۴
۳۷	۲۲۹۵۴۸۶	۹۹۳۲۸۶	۱۷	۳۲۴۰۶۸۹	۷۰۶۶۱۴
۳۶	۱۴۳۱۱۳۲	۸۶۴۳۵۵	۱۶	۲۶۵۴۷۹۸	۵۸۵۸۹۱
۳۵	۱۱۴۳۸۶۷	۲۸۷۲۶۴	۱۵	۴۸۷۲۰۶۴	-۲۲۱۷۲۶۶
۳۴	۷۰۳۵۰۹	۴۴۰۳۵۸	۱۴	۲۰۷۳۱۹۷	۲۷۹۸۸۶۷
۳۳	۸۴۷۲۳۹	-۱۴۳۷۳۰	۱۳	۱۴۶۴۷۳۵	۶۰۸۴۶۳
۳۲	۹۹۶۲۷۳	-۱۴۹۰۳۴	۱۲	۳۱۰۵۰۴۲	-۱۶۴۰۳۰۸
۳۱	۱۱۷۳۱۰۲	-۱۷۶۸۲۹	۱۱	۶۹۸۱۲۶۰	-۳۸۷۶۲۱۷
۳۰	۱۱۵۹۵۶۶	۱۳۵۳۶	۱۰	۲۸۷۸۹۸۷	۴۱۰۲۲۷۲
۲۹	۱۱۶۹۷۸۷	-۱۰۲۲۱	۹	۱۶۱۱۸۱۳	۱۲۶۷۱۷۴
۲۸	۱۰۸۰۸۳۴	۸۸۹۵۲	۸	۲۱۳۰۱۵۶	-۵۱۸۳۴۲
۲۷	۸۳۴۹۸۱	۲۴۵۸۵۳	۷	۱۵۶۴۱۵۴	۵۶۶۰۰۲
۲۶	۵۸۹۸۴۳	۲۴۵۱۳۹	۶	۴۸۶۰۷۰۴	-۳۲۹۶۵۵۰
۲۵	۴۴۰۱۰۱	۱۴۹۷۴۲	۵	۵۰۵۲۶۶۷	-۱۹۱۹۶۳
۲۴	۵۳۴۹۵۸	-۹۴۸۵۷	۴	۱۷۶۹۳۶۵	۳۲۸۳۳۰۱
۲۳	۷۴۴۵۶۹	-۲۰۹۶۱۲	۳	۴۲۹۵۰۸۹	-۲۵۲۵۷۲۴
۲۲	۱۰۷۰۲۰۳	-۳۲۵۶۳۳	۲	۱۷۰۹۲۰۳	۲۵۸۵۸۸۶
۲۱	۲۵۴۳۸۵۹	-۱۴۷۳۶۵۶	۱	۳۴۸۵۳۴	۱۳۶۰۶۶۸

با توجه به موارد گفته شده می‌توان گفت شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و رسوب در رودخانه تالار با استفاده از مدل HEC-RAS4.0 منجر به ارایه مدلی گردید که با دقت نسبتاً خوبی با نتایج واقعی در چهار مقطع نقشه‌برداری شده در سال ۱۳۹۰ برابری می‌کند. واسنجی رسوبی مدل نشان می‌دهد در مدل HEC-RAS4.0 معادله انتقال رسوب میر-پیتر-مولر بیشترین تطابق را با واقعیت داشته و می‌تواند برای پیش‌بینی روند تغییرات رودخانه مورد استفاده قرار گیرد.

معادله انتقال رسوب میر-پیتر-مولر در برنامه HEC-RAS4.0 میزان رسوب خارج شده از بازه در دوره شبیه‌سازی ۱۳۹۰-۱۳۸۵ را معادل ۸۹۷۳۳ تن و برای سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۹۰ معادل ۳۴۸۵۳۴ تن محاسبه و پیش‌بینی نمود.

تغییرات پروفیل طولی رودخانه نشان داد بیشترین تغییرات در محدوده میانی بازه مطالعاتی (مقطع ۶ تا ۱۶) رخ می‌دهد. همچنین فاصله بین مقطع ۲۵ تا ۳۲ در ابتدای بازه (به طول حدود ۱۰۰۰ متر) با داشتن شیب ملایم تغییرات ناچیزی داشته و تقریباً پایدار بوده است. بررسی مقاطع عرضی نیز نشان داد برای دوره ۵ ساله شبیه‌سازی، در مقاطع با تنگ شدگی موضعی، بیشترین فرسایش (مقاطع ۱۵، ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱) و در مقاطع دشتی با شیب کم رسوب‌گذاری انجام شده است. همچنین با توجه به نتایج شبیه‌سازی برای ۱۰ سال آینده انتظار می‌رود همین روند وجود داشته و در مقاطع ۳۴ تا ۴۰ رسوب‌گذاری و در مقاطع ۱۸ تا ۲۳ فرسایش مشاهده شود. همچنین مقاطع ۲۹ و ۳۰ تقریباً پایدار خواهند بود.

در انتها اذعان می‌گردد برنامه HEC-RAS با توجه به توانایی شبیه‌سازی هیدرولیکی در مدل کردن سازه‌های مختلف مسیر و قابلیت نمایش گرافیکی می‌تواند گزینه خوبی برای استفاده در طرح‌های مهندسی رودخانه باشد.

همچنین پیشنهاد می‌شود برای مطالعات دقیق‌تر با توجه به یک بعدی بودن مدلHEC-RAS، مقایسه‌ای با نتایج مدل‌های دو بعدی و شبه دو بعدی نیز صورت گیرد.

منابع

1. Barzegari, F. and M.T. Dastorani. 2015. Suspended Sediment Prediction using Time Series and Artificial Neural Networks Models (Case Study: Ghazaghly Station in Gorganroud River), Journal of Watershed Management Research, 6: 216-225 (In Persian).
2. Chang, H.H., L. Harrison., W. Lee and S. Tu. 1996. Numerical Modeling for Sediment Pass Through Reservoirs. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 122: 381-388.
3. Derakhshan, M. 2009. Simulate the Behavior of Erosion and Sedimentation in Ajichay River from GSTARS3 Model. M.Sc. Thesis Mazandaran University, 120 pp (In Persian).
4. Eshghi, P., J. Farzadmehr, M.T. Dastorani and Z. Arabasadi. 2016. The Effectiveness of Intelligent Models in Estimating the River Suspended Sediments (Case Study: Babaaman Basin, Northern Khorasan), Journal of Watershed Management Research, 7: 88-95 (In Persian).
5. Gibson, S. 2010. Mobile Bed Modeling of the Cowlitz River Using HEC-RAS: Assessing Flooding Risk and Impact Due to System Sediment. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV. 9 pp.
6. Haddadchi, A., M.H. Omid and A.A. Dehghani. 2011. Evaluation of Bed Load Discharge Formulas in Alpine Gravel Bed Rivers (Case study: Chehel Chai river in Golestan province). Journal of Water and Soil Conservation, 18: 149-165 (In Persian).
7. Haghiabi, A.H. and E. Zaredehdasht. 2012. Evaluation of HEC-RAS Ability in Erosion and Sediment Transport Forecasting. World Applied Sciences Journal, 17: 1490-1497.
8. Hamzepur, R. and M. Yasi. 2006. Bed load Estimate in the Rivers with Gravel Bed, 7th River Engineering Seminar. Shahid Chamran University. 9 pp (In Persian).
9. Horowitz, A.J. 2002. The Use of Rating (Transport) Curves to Predict Suspended Sediment on Centration: A Matter of Temporal Resolution. Turbidity and other sediment surrogates workshop, U.S. Geological Survey, 30 pp.
10. Hosseini, S.A. and N. Javaheri. 2010. Locating Appropriate Points for Harvest River Sediment. 9th Iranian Hydraulic Conference. Tarbiat Modarres University, 7 pp (In Persian).
11. Jabary, A., S.A. Hosseini, A.H. Haghiabi, S. Emamgholizadeh and A. Behnia .2014. Prediction of the Sediment load in The River by HEC-RAS. Journal of Irrigation and Water Engineering, 4:19-23 (In Persian).
12. Keivanlou, M. 2013. Investigation the Impacts of Mining River Materials on Hydraulic Characteristics and Transverse Structures Using a Mathematical Model (Case Study: Talar River). M.Sc. Thesis, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, 120 pp (In Persian).
13. Lapin, L.L. 1983. Probability and Statistic for Modern Engineering. 2th edition, PWSKENT Publishing Company Boston, 810 pp.
14. Mahdavi, M. 2006. The Applied Hydrology, Volume 1. 6th edition, Tehran University Press. 227 pp (In Persian).
15. Ministry of Energy. Mazandaran Regional Water. 2009. Engineering Comprehensive Study of Rivers at the East of Mazandaran Province, Morphology Report. Volume 1: Talar River, 107 pp (In Persian).
16. Peyro, M., M. Ghomeyshi and E. Nohani. 2012. Evaluating the River Bed Sediment from HEC-RAS.4 Numerical Model. (Case Study: Beshar River, Kohgiloyeh and Boyerahmad Province). National Conference on Inter Basin Water Transfer. Islamic Azad University of Shahrekord, 9 pp.
17. Roshun, H., G. Vahabzadeh, K. Solaimani and R. Farhadi. 2013. Simulation of River Hydraulics Behavior Using HEC-RAS Model in GIS Environment (Case Study: Beshar River, Kohgiloyeh and Boyerahmad Province). Journal of Watershed Management Research, 4: 70-84 (In Persian).
18. Sevinsson, O.G.B., J.D. Salas, W.L. Lane and D.K. Ferevert. 2007. User's Manual for SAMS. 2007. Department of Civil and Environmental Engineering, Computing Hydrology Laboratory, Denver, Colorado, USA. 120 pp.
19. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC). 1992. Guidelines for the Calibration and Application of Computer Program HEC-6, Davis, CA, 36 pp.
20. U.S. Army Corps of Engineers. 2008. HEC_RAS4.0 User's Manual, 747 pp.
21. Yang, C.T. 1996. Sediment Transport: Theory and Practice. Mc. Graw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering Monographic. Polytechnic Krakowska, 396 pp.

Investigation of the River Bed Changes using HEC-RAS4.0 Model Case Study: Talar River

Fatemeh Zahra Asadi[1], Ramin Fazloula[2] and Alireza Emadi[3]

1 and 3- Graduated M.Sc. and Associate Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
2- Associate Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University; (Corresponding author: raminfazl@yahoo.com)
Received: August 19, 2014 Accepted: June 2, 2015

Abstract

Information on erosion and capacity of sediment carrying condition in various basins is one of the subjects that in each of hydrology and river engineering projects should be considered. In the present study HEC-RAS model was applied to evaluate and predict the sedimentation and erosion in the reach of Talar River with 12 km length. For doing this study 40 cross section which was surveyed in 2006 is applied in the simulation and 4 cross section which was surveyed in 2011 applied for calibration of the model. Model calibration and verification showed that the Meyer Peter Muller sediment transport equation has a better fit with the observed results. In order to predict the erosion and sedimentation trend, using recorded data of dischrges in Shirgah hydrometric station during last 30 years and using SAMS Statistical model, the amounts of monthly stream flow was predicted for the next 10 years and then sedimentation model was executed. Variations in the longitudinal profile of river in all profiles showed that the most changes will occurs within the middle reach area and the beginning of the river reach with the length of about 1000m and with having the mild slope is stable. Also predicted amount of sediment outflow from the studied reach is about 348534 tones for the next 10 years.

Keywords: Erosion and Deposition, Hydraulical and Sedimentional Simulation, Mathematical Model, Sediment Transport Equations, Talar River