



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

فاطمه زهرا اسدی<sup>۱</sup>، رامین فضل‌اولی<sup>۲</sup> و علیرضا عمادی<sup>۳</sup>

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 مسول): 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 ۴۰ مقطع عرضی برداشت شده در سال ۱۳۸۵ و برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل از ۴ 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 ۳۴۸۵۳۴ 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 خدادادی، تحت تأثیر پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری دست‌خوش تغییرات گوناگونی می‌شوند که از آن جمله می‌توان به تغییر امتداد جابجایی‌های عرضی و طولی، وقوع میان‌برها، تغییر نوع رودخانه، تغییر 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 پیش‌پیش میسر نمود.

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 مسیر 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 ارائه 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 سنج رسوب به‌منظور تخمین آورد رسوب مطرح می‌شود.

روش منحنی سنج به داده‌های فراوان و آماربرداری تقریباً متوالی و مستمر نیاز دارد. هورویتر (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 سنج رسوب استفاده نمود.

با توجه به موارد گفته شده توسعه روش‌های کارآمد و دقیق برای برآورد میزان رسوب که محدودیت‌های فوق‌الذکر را 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

و در پهنه‌بندی سیلاب با دقت بالا و هزینه اندک مورد استفاده قرار گیرد.

گیسسون (۵) با استفاده از مدل HEC-RAS به مدل‌سازی بستر متحرک رودخانه کولیتز<sup>۱</sup> 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 به کار گرفته شد.

### رودخانه تالار

رودخانه تالار از بخش‌های شمالی رشته‌کوه‌های البرز سرچشمه می‌گیرد و از شاخه‌های متعددی چون کبیرود، سرخاب، بزلا، چرات، شش‌رودبار، کسلیان، تجون و توجی تشکیل شده است. طول رودخانه ۱۵۲ کیلومتر و مساحت حوزه آبریز آن ۳۹۰۰ کیلومتر مربع است. بستر رودخانه تا

موسوم به زنجیره مارکف و مدل‌های ARIMA اشاره نمود (۱). اما برخی دیگر از مدل‌ها با استفاده از میانی 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 خروود 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.

حق‌آبی 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 هر دو 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.

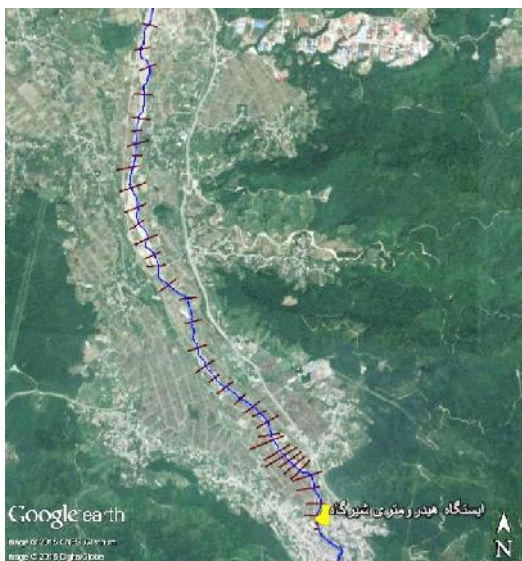
همچنین روشن و همکاران (۱۷) با بهره‌گیری تلفیقی از مدل هیدرولیکی HEC-RAS و نرم‌افزار Arc View استفاده از الحاقیه HEC-GeoRAS، پارامترهای هیدرولیکی رودخانه بشار را شبیه‌سازی نمودند. نتایج حاصل نشان داد که مدل HEC-RAS می‌تواند مقادیر عددی مناسبی را برای مطالعه خصوصیات هیدرولیکی جریان در رودخانه‌ها ارایه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

بازه مورد مطالعه از ایستگاه هیدرومتری شیرگاه تا ۱۲ کیلومتر به سمت پایین دست می باشد که با ۴۰ مقطع عرضی برداشت شده در سال ۱۳۸۵ شبیه سازی و برای واسنجی و صحت سنجی مدل از ۴ مقطع نقشه برداری شده توسط تیم تحقیق حاضر در سال ۱۳۹۰ استفاده شد. در شکل ۱ تصویر هوایی از بازه شبیه سازی 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 ایستگاه های درجه یک و دارای اشل، پل تلفریک و دیتالاگر می باشد. مساحت زیرحوزه تحت پوشش این ایستگاه ۱۷۶۸ کیلومتر مربع می باشد.

شیرگاه دارای شیب نسبتاً تندی در حدود ۴ درصد بوده و سپس رودخانه با شیب ملایم حدود ۱ درصد به سمت دریا پیش می رود. تالار دارای رژیم برفی-بارانی است و آبدهی رودخانه در ورود به دشت قابل ملاحظه بوده که بیشتر به مصارف کشاورزی می رسد. آبدهی سالانه رودخانه در یک دوره ۳۲ ساله به طور متوسط ۱۱۸ میلیون مترمکعب و حداکثر آبدهی لحظه ای آن ۷۶ مترمکعب در ثانیه می باشد (۱۵).

مهم ترین 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 کاربری های مختلف، وضعیت نامناسب زیست-محیطی و عملکرد نامناسب سازه های متقاطع با رودخانه در بازه های مختلف (۱۵).



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

در رابطه با  $\varepsilon$  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  $q_s$  دبی جانبی رسوبات ورودی در واحد طول می باشد.

انتگرال معادله (۱) روی حجم کنترل هر مقطع عرضی، یک معادله برای عمق رسوب گذاری ( $\Delta Z_b$ ) برای یک اندازه رسوب در مقطع عرضی  $i$  می دهد:

$$\varepsilon_i W_i \Delta x_i \Delta Z_{b,i} = q_{s,i} \Delta x_i \Delta t + (Q_{s,i-1} - Q_{s,i}) \Delta t \quad (2)$$

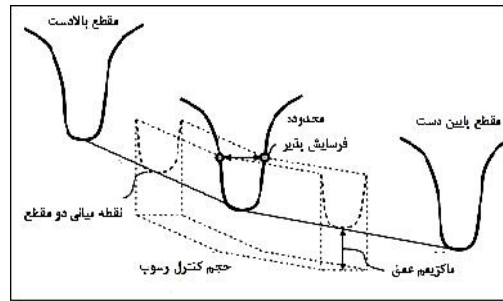
که در آن  $W$  عرض مقطع فرسایش یافته یا رسوب گذاری شده می باشد. از مجموع حجم فرسایش هر اندازه رسوب، حجم فرسایش کل یا رسوب گذاری کل مقطع به دست می آید. در شکل ۲ شماتیک حجم کنترل رسوب سه بعدی مورد استفاده در نرم افزار آمده است.

### معرفی مدل HEC-RAS و معادلات حاکم

مدل HEC-RAS4.0 نسخه سال ۲۰۰۸، آخرین مدل رایج شده از سوی مرکز مهندسی ارتش آمریکا<sup>۲</sup> می باشد که در آن قابلیت شبیه سازی رسوب و کیفیت نیز اضافه شده است (۱۹).

برای حل معادلات مختلف انتقال رسوب در نرم افزار HEC-RAS4.0 با در نظر گرفتن حجم کنترل برای رسوب و جریان به صورت شبه-غیرماندگار، از روندیابی جریان آب و رسوب توسط معادله اکسنر<sup>۳</sup> استفاده می شود. معادله اکسنر با فرض این که 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 به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + v \frac{\partial A_d}{\partial t} - q_s = 0 \quad (1)$$



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

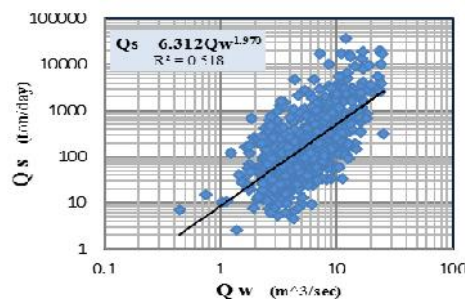
مورد مطالعه، با استفاده از مدل SAMS میزان دبی در ایستگاه شیرگاه برای ۱۰ سال آینده به دست آمده و مورد استفاده قرار گرفت. نرم افزار SAMS (شبیه سازی و مدل سازی با تجزیه تحلیل تصادفی) برای اهداف هیدرولوژی و پیش بینی پارامترهای هیدرولوژی، هواشناسی و خشکسالی توسط دانشگاه کلرادو آمریکا تهیه شده است (۱۸). مدل ARMA که تلفیقی از مدل AR (اتو رگرسیون) و MA (میانگین متحرک) می باشد، برای پیش بینی دبی به کار برده شد. مدل با استفاده از داده های ۳۰ سال قبل در ایستگاه شیرگاه، ۱۰ خروجی از دبی پیش بینی به صورت تصادفی دارد که بهترین خروجی انتخاب شد.

### نتایج و بحث

منحنی سنج رسوب معلق در ایستگاه شیرگاه به صورت یک رابطه ی خطی توانی با استفاده از داده های ۳۰ ساله موجود از اندازه گیری  $Q_s$  و  $Q_w$  و بهترین برازش بر مبنای روش حداقل مربعات استخراج و به مدل معرفی شد (شکل ۳).

$$Q_s = 6.312 Q_w^{1.97} \quad (3)$$

استفاده از رابطه ی فوق با درجه آزادی ۸۰ و ضریب همبستگی ۰/۸۴۸ در دو سطح معنی دار ۱٪ و ۵٪، مورد تأیید قرار گرفت (۱۴).



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

به منظور تعیین میزان فرسایش و رسوب گذاری در نرم افزار HEC- RAS4.0 توابع انتقال رسوب تجربی متعددی وجود دارد که توسط دانشمندان مختلف به دست آمده اند. فرضیات اعمال شده در این توابع و محدوده کاربرد آن ها سبب می گردد تا نتایج به دست آمده از این توابع، متفاوت باشد.

### واسنجی و صحت سنجی مدل ریاضی

در مدل سازی عددی سیستم رودخانه، به منظور انجام صحیح محاسبات، تعداد زیادی از پارامترها می بایست به شکل مناسبی تعریف شوند. مقادیر این پارامترها اغلب فاقد صحت و درستی قابل قبولی هستند و بنابراین تعریف مقادیر می بایست بر اساس اطلاعات تجربی سیستم باشد (۲۰).

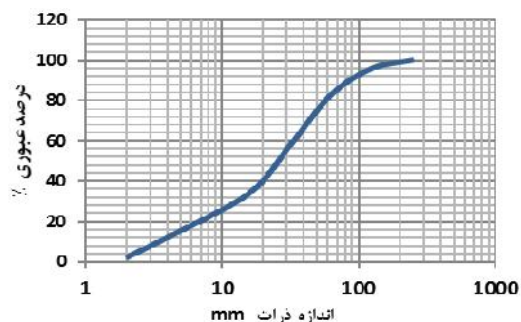
بررسی ها نشان می دهد که میزان فرسایش و رسوب گذاری در یک مقطع عرضی، نسبت به انتخاب معادله انتقال رسوب و ضریب زبری مانینگ حساس می باشد (۳). همچنین ضریب زبری مانینگ، مهم ترین ضریب هیدرولیکی در انواع مطالعات هیدرولیک رودخانه است که تأثیر بارزی بر نتایج محاسبات برجای می گذارد.

پس از اطمینان از واسنجی مدل برای شبیه سازی هیدرولیکی، می بایستی مدل برای شبیه سازی رسوب و اسنجی گردد.

### پیش بینی تغییرات فرسایش و رسوب گذاری

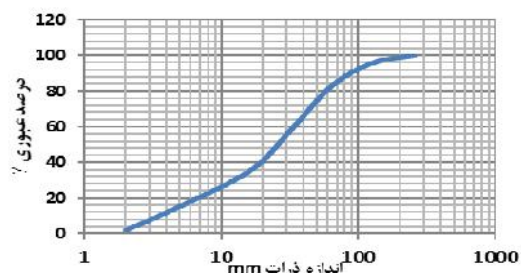
برای پیش بینی روند رسوب گذاری و فرسایش در بازه

نمودار دانه‌بندی بستر رودخانه با انجام نمونه‌برداری نقطه‌ای و انجام آزمایش الک در ۵ نقطه و همچنین روش ولمن<sup>۱</sup>، در این تحقیق به‌دست آمده و مورد استفاده قرار گرفت که نتایج نهایی در شکل‌های ۴ الی ۶ آمده است.



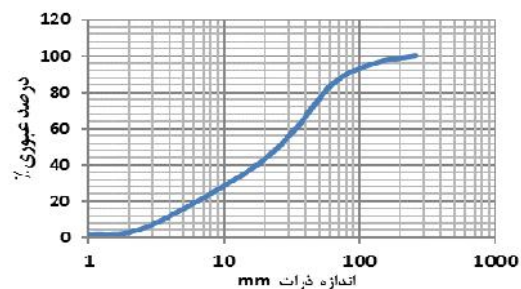
شکل ۴- منحنی دانه‌بندی بستر در بازه بالادست

Figure 4. The curve of bed grain size in the upstream reach



شکل ۵- منحنی دانه‌بندی بستر در بازه میانی

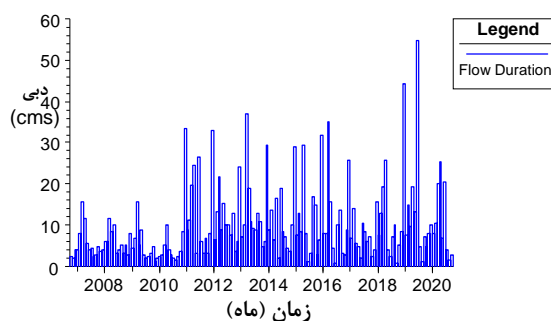
Figure 5. The curve of bed grain size in the middle reach



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.



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

$$STE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_{oi} - x_{ri})^2}{(n-1)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

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

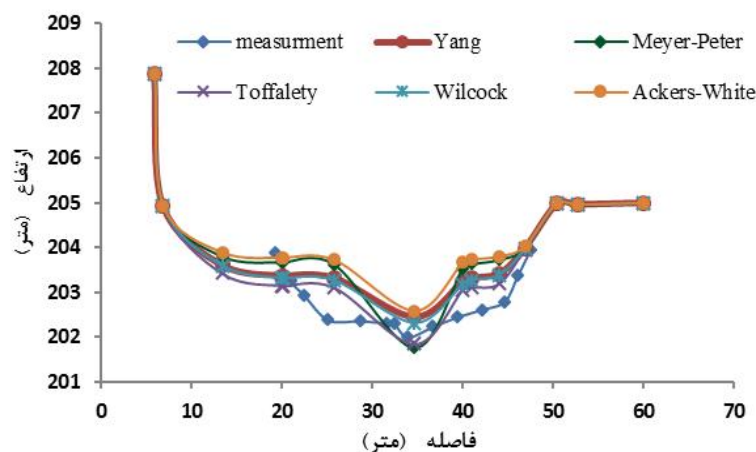
به‌منظور انجام واسنجی ضریب زبری، با توجه به قابلیت برنامه HEC-RAS در انتخاب شرایط مرزی مختلف، با داشتن منحنی دبی-اشل در ایستگاه شیرگاه، مدل با ضرایب زبری و دبی‌های مختلف در حالت ماندگار اجرا شده و منحنی دبی-اشل به‌دست آمده در ایستگاه شیرگاه و منحنی واقعی با استفاده از شاخص آماری میزان خطای استاندارد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

جدول ۱- مقادیر خطای استاندارد محاسبه شده به ازای ضرایب زبری مختلف

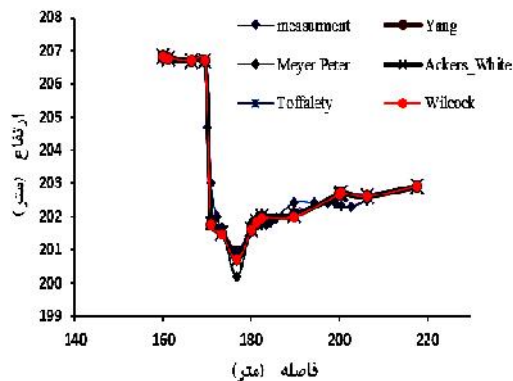
Table 1- Standard error values calculated for different roughness coefficients				
n4=0.055	n3=0.05	n2=0.04	n1=0.045	n
0.3531	0.3049	0.2200	0.2625	STE

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.

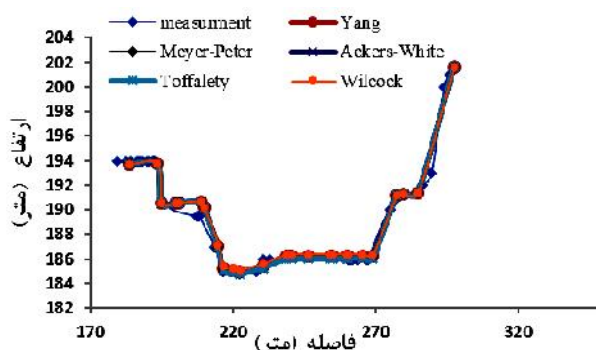
در بخش واسنجی رسوبی، با توجه به بازدهی‌های صحرائی انجام شده و عدم مشاهده امواج ماسه‌ای در بستر در بازه مورد مطالعه براساس توصیه یانگ (۲۱)، از ۶ معادله انتقال رسوب قابل استفاده در مدل، ۵ معادله توفالیتی، ایکرز-وایت، میر-



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



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

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).

در این قسمت نیز میزان خطای استاندارد برای هر یک از توابع انتقال رسوب با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد که در آن  $X_{ti}$  و  $X_{oi}$  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.

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	میریترمولر	ایکرز وایت	توفالیتی	ویلیکوک
۲۶	۰/۶۶۵	۰/۶۵۴	۰/۶۵۵	۰/۶۵۵	۰/۶۸۸
۲۸	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	میریتر مولر	ایکرز وایت	توفالیتی	ویلیکوک
۳۴	۰/۹۳۲	۰/۹۱۲	۰/۹۴۳	۰/۹۲۹	۱/۰۶۱

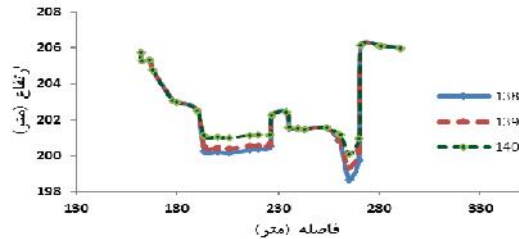
قرار داده و پس از شبیه‌سازی، با بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان بهترین مکان برای حفر گودال‌های برداشت، به طوری که کمترین تأثیر را روی سازه‌های متقاطع داشته باشند پیشنهاد نمود. حدادچی و همکاران (۶) نیز در رودخانه چهل‌چای استان گلستان با مقایسه بار بستر اندازه‌گیری شده و معادلات تجربی اظهار داشتند که معادلات ایکرز-وایت و میر-پیتر دقت قابل قبولی در محاسبه نرخ رسوب در این رودخانه دارند. مطالعات جباری و همکاران (۱۱)

کیوانلو (۱۲) نیز که در پژوهش خود به بررسی اثرات برداشت مصالح از بستر رودخانه تالار بر شرایط هیدرولیکی و سازه‌های متقاطع از 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

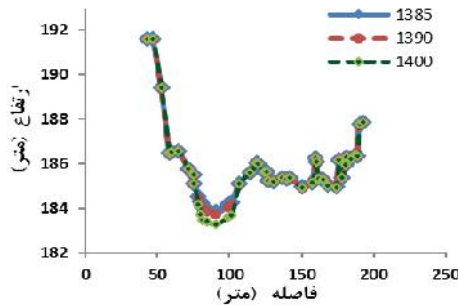
مقطع به عنوان نمونه در شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ ارایه شده است.

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

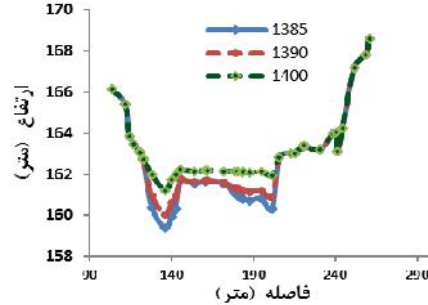
در رودخانه ابهررود استان زنجان که با استفاده از مدل HEC-RAS4.0 انجام شد، نشان داد که معادله یانگ با داشتن خطای کمتری نسبت به سایر معادله‌ها، برآورد قابل قبولی از میزان رسوب داشته و می‌تواند به‌منظور شناخت پتانسیل میزان انتقال رسوب در مناطق مختلف رودخانه ابهررود مورد استفاده قرار گیرد. نتایج تغییرات مقطع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



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 ۱۳۸۵-۱۳۹۰

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	میزان بار رسوبی خارج شده (تن)	میزان بار بستر در مقطع (تن)
۴۰	۱۳۶۳۹۰۹	۳۳۹۲۶۱	۲۰	۵۳۸۴۹۶	۱۸۳۱۶۱۲
۳۹	۱۰۳۹۳۷۹	۳۲۴۵۳۰	۱۹	۳۵۳۸۱۹	۱۴۷۷۷۹۲
۳۸	۹۵۰۵۸۳	۸۸۷۹۵	۱۸	۱۸۳۳۲۹	۱۲۹۴۴۶۳
۳۷	۶۳۷۷۶۴	۳۱۵۸۱۸	۱۷	۳۴۲۱۹۸	۹۵۲۲۶۴
۳۶	۴۱۷۶۳۲	۲۱۷۱۳۲	۱۶	۱۲۴۲۴۴	۸۲۸۰۱۹
۳۵	۲۳۷۵۳۸	۱۸۰۰۹۴	۱۵	-۳۶۰۶۲۶	۱۱۸۸۶۴۶
۳۴	۱۲۹۵۷۱	۱۰۷۹۶۶	۱۴	۸۴۰۳۸۰	۳۴۸۲۶۵
۳۳	۲۱۰۴۲۶	-۸۰۸۵۴	۱۳	۱۸۳۳۵۸	۱۶۴۹۰۶
۳۲	۲۹۳۷۷۷	-۸۳۳۵۰	۱۲	-۱۸۸۳۰۱۵	۲۰۴۷۹۲۲
۳۱	۳۶۴۱۳۵	-۷۰۳۵۸	۱۱	-۴۲۶۴۴۵۰	۶۳۱۲۳۷۲
۳۰	۳۳۵۹۹۲	۲۸۱۴۲	۱۰	۵۲۵۰۳۴۲	۱۰۶۲۰۳۰
۲۹	۳۷۸۱۲۵	-۴۲۱۳۲	۹	۷۸۲۳۹۳	۲۷۹۶۳۷
۲۸	۳۴۱۱۳۰	۳۶۹۹۴	۸	-۸۴۰۷۰	۳۶۳۷۰۷
۲۷	۱۴۷۹۶۸	۱۹۳۱۶۱	۷	۸۶۵۹	۳۵۵۰۴۷
۲۶	۸۴۶۵۱	۶۳۳۱۷	۶	-۱۱۶۱۳۹۵	۱۵۱۶۴۴۳
۲۵	۷۶۶۹۰	۷۹۶۰	۵	-۸۵۰۷۲۹	۲۳۶۷۱۷۳
۲۴	۸۵۱۴۲	-۸۴۵۱	۴	۱۶۹۸۸۲۷	۶۶۸۳۴۵
۲۳	۲۱۶۱۳۰	-۱۳۰۹۸۸	۳	-۳۱۰۲۱۰	۹۷۸۵۵۶
۲۲	۲۹۴۳۰۱	-۷۸۱۷۱	۲	۵۶۴۰۳۳	۴۱۴۵۳۲
۲۱	۱۲۹۳۱۱۵	-۹۹۸۸۱۳	۱	۳۲۴۷۹۹	۸۹۷۳۳



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	میزان بار بستر در مقطع (تن)	مجموع بار رسوبی خارج شده (تن)	مقطع	میزان بار بستر در مقطع (تن)
۴۰	۵۵۳۸۷۷۲	۱۳۳۸۴۵۶	۲۰	-۱۳۵۱۴۱۲	۳۸۹۵۲۷۰	۲۰	-۱۳۵۱۴۱۲
۳۹	۴۱۹۹۲۱۲	۱۳۳۹۵۶۰	۱۹	-۷۲۶۷۷	۳۹۶۷۹۴۷	۱۹	-۷۲۶۷۷
۳۸	۳۲۸۸۷۷۲	۹۱۰۴۴۰	۱۸	۲۰۶۴۴	۳۹۴۷۳۰۳	۱۸	۲۰۶۴۴
۳۷	۲۲۹۵۴۸۶	۹۹۳۲۸۶	۱۷	۷۰۶۶۱۴	۳۲۴۰۶۸۹	۱۷	۷۰۶۶۱۴
۳۶	۱۴۳۱۱۳۲	۸۶۴۳۵۵	۱۶	۵۸۵۸۹۱	۲۶۵۴۷۹۸	۱۶	۵۸۵۸۹۱
۳۵	۱۱۴۳۸۶۷	۲۸۷۲۶۴	۱۵	-۲۲۱۷۲۶۶	۴۸۷۲۰۶۴	۱۵	-۲۲۱۷۲۶۶
۳۴	۷۰۳۵۰۹	۴۴۰۳۵۸	۱۴	۲۷۹۸۸۶۷	۲۰۷۳۱۹۷	۱۴	۲۷۹۸۸۶۷
۳۳	۸۴۳۳۹	-۱۴۳۷۳۰	۱۳	۶۰۸۴۶۳	۱۴۶۴۷۳۵	۱۳	۶۰۸۴۶۳
۳۲	۹۹۶۲۷۳	-۱۴۹۰۳۴	۱۲	-۱۶۴۰۳۰۸	۳۱۰۵۰۴۲	۱۲	-۱۶۴۰۳۰۸
۳۱	۱۱۷۳۱۰۲	-۱۷۶۸۲۹	۱۱	-۳۸۷۶۲۱۷	۶۹۸۱۲۶۰	۱۱	-۳۸۷۶۲۱۷
۳۰	۱۱۵۹۵۶۶	۱۳۵۳۶	۱۰	۴۱۰۲۲۷۲	۲۸۷۸۹۸۷	۱۰	۴۱۰۲۲۷۲
۲۹	۱۱۶۹۷۸۷	-۱۰۲۲۱	۹	۱۲۶۷۱۷۴	۱۶۱۱۸۱۳	۹	۱۲۶۷۱۷۴
۲۸	۱۰۸۰۸۳۴	۸۸۹۵۲	۸	-۵۱۸۳۴۲	۲۱۳۰۱۵۶	۸	-۵۱۸۳۴۲
۲۷	۸۴۴۹۸۱	۲۴۵۸۵۳	۷	۵۶۶۰۰۲	۱۵۶۴۱۵۴	۷	۵۶۶۰۰۲
۲۶	۵۸۹۸۴۳	۲۴۵۱۳۹	۶	-۳۲۹۶۵۰	۴۸۶۰۷۰۴	۶	-۳۲۹۶۵۰
۲۵	۴۴۰۱۰۱	۱۴۹۷۴۲	۵	-۱۹۱۹۶۳	۵۰۵۲۶۶۷	۵	-۱۹۱۹۶۳
۲۴	۵۳۴۹۵۸	-۹۴۸۵۷	۴	۳۲۸۳۰۱	۱۷۶۹۳۶۵	۴	۳۲۸۳۰۱
۲۳	۷۴۴۵۶۹	-۲۰۹۶۱۲	۳	-۲۵۲۵۷۲۴	۴۲۹۵۰۸۹	۳	-۲۵۲۵۷۲۴
۲۲	۱۰۷۰۲۰۳	-۳۲۵۶۳۳	۲	۲۵۸۵۸۸۶	۱۷۰۹۲۰۳	۲	۲۵۸۵۸۸۶
۲۱	۲۵۴۳۸۵۹	-۱۴۷۳۶۵۶	۱	۱۳۶۰۶۶۸	۳۴۸۵۳۴	۱	۱۳۶۰۶۶۸

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 مدل HEC-RAS، مقایسه‌ای با نتایج مدل‌های دو بعدی و شبه دو بعدی نیز صورت گیرد.

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 ارزیابی 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

## 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, 7<sup>th</sup> 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. 9<sup>th</sup> 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. Ghomeysi and E. Nohani. 2012. Evaluating the River Bed Sediment from HEC-RAS.4 Numerical Model. (Case Study: Beshar River, Kohgiluyeh 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, Kohgiluyeh and Boyerahmad Province). Journal of Watershed Management Research, 4: 70-84 (In Persian).
18. Sevinnson, 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 Monograph. Polytechnic Krakowska, 396 pp.

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

Fatemeh Zahra Asadi<sup>1</sup>, Ramin Fazlola<sup>2</sup> and Alireza Emadi<sup>3</sup>

---

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 discharges 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 occur 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 Sedimental Simulation, Mathematical Model, Sediment Transport Equations, Talar River