

در این نوع از جریان تقریباً هیچ یک از داده‌های مشاهده‌ای رسوب در محدوده تخمین باند عدم قطعیت مدل قرار نمی‌گیرند. در حالی که میزان عدم قطعیت مدل در رژیم جریان‌های متوسط به بالا بسیار کم‌تر بوده و اکثر داده‌های مشاهده‌ای رسوب در محدوده باند تخمین عدم قطعیت مدل قرار می‌گیرند.

کلید واژه‌ها: منحنی‌سنجه رسوب، عدم قطعیت، تحلیل حساسیت، مونت کارلو، حوزه آبخیز

تحلیل حساسیت و عدم قطعیت ضرایب معادله سنجه رسوب با استفاده از شبیه‌ساز مونت کارلو (مطالعه موردی: حوزه آبخیز زشک - ابرده، شاندریز)

هادی معماریان^۱ و هادی دهقان^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۱

مقدمه

تخمین دقیق حجم رسوبات حمل شده به وسیله رودخانه‌ها و متعاقباً حجم رسوب ورودی به سدها در بسیاری از پروژه‌های کلان مدیریت منابع آب دارای اهمیت فراوان است. علاوه بر مقدار کل رسوب منتقل شده توسط رودخانه‌ها، چگونگی تغییرات زمانی رسوب حمل شده توسط آب‌های جاری، برای مطالعات مورفولوژی رودخانه‌ها و طراحی سازه‌های کنترل رسوب و مخازن مورد نیاز است [۳۰]. به دلیل هزینه بالای اندازه‌گیری مداوم رسوب حمل شده و پایش آن برآورد میزان رسوبات معلق در رودخانه‌ها معمولاً از طریق منحنی سنجه رسوب انجام می‌گیرد. ارتباط بین رسوب رودخانه و دبی جریان سال‌هاست که به صورت مدل‌های مختلف با ضرایب اصلاحی متعدد در مطالعات مرتبط با این زمینه به چشم می‌خورد [۳] و ۱۱ و ۱۳ و ۲ و ۲۳.

به علت کمبود آمار و اطلاعات و یا مشکلات مربوط به اندازه‌گیری‌های مستقیم رسوب، تعیین روابط تجربی بین دبی آب و رسوب، از جمله منحنی‌های سنجه در کشور به علت سادگی و کاربرد راحت همواره مورد توجه متخصصین بوده است. بنابراین بخش مهمی از مطالعات در زمینه رسوب معلق به استفاده از منحنی سنجه رسوب باز می‌شود. منحنی‌های سنجه رسوب یکی از روابط تجربی است که در زمینه ایجاد ارتباط بین دبی آب و رسوب در ایران و سایر کشورها بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. پژوهش‌های زیادی تاکنون بر نحوه ترسیم منحنی‌های سنجه [۸] و نیز افزایش و صحت این منحنی‌ها صورت گرفته است [۴ و ۲۹ و ۶]. مدل تابع توانی در اکثر منابع داخلی و خارجی به صورت $Q_s = Q^n$ برای نشان دادن رابطه دبی آب (QW) و دبی رسوب (QS) پذیرفته شده است [۱۹]. ولی شکل‌های مختلف دیگری نیز از معادله سنجه رسوب در منابع آمده است. از میان انواع مختلف منحنی‌های سنجه شامل یک‌خطی،

چکیده

به منظور مدیریت حوزه آبخیز جهت کاهش اثرات فرسایش خاک نیاز است تا میزان رسوب معلق خروجی حوزه آبخیز برآورد شود. بدین منظور روش منحنی سنجه متداول‌ترین روش آماری برای برآورد رسوب معلق در شرایط عدم داده‌برداری رسوب معلق می‌باشد. با توجه به خطاهای داده‌های برداشتی و محدود بودن این داده‌ها مقدار رسوب برآوردی با استفاده از روش منحنی سنجه دارای عدم قطعیت‌هایی است که این عدم قطعیت در صورت بزرگ بودن منجر به بروز خطاهای معنی‌دار در برآوردها می‌شود. بدین منظور در این تحقیق با استفاده از روش تصادفی مونت کارلو اقدام به برآورد عدم قطعیت و تحلیل حساسیت معادله منحنی سنجه رسوب در ایستگاه هیدرومتری زشک شد. شبیه‌سازی مونت کارلوی رسوب بر اساس معادله سنجه رسوب و با ۵۰۰۰ نمونه برداری نشان داد که سهم ضریب a نسبت به b در توجیه واریانس داده‌های شبیه‌سازی شده رسوب در رژیم جریان نرمال پرآب، کم‌آب و نرمال بسیار بیش‌تر می‌باشد. اما این روند در رژیم جریان حداکثر برعکس است. تحلیل حساسیت معادله سنجه در رژیم جریان نرمال پرآب، کم‌آب و نرمال نشان‌دهنده تأثیرپذیری بالای مدل سنجه رسوب نسبت به تغییرات ضریب a می‌باشد، در حالیکه این تأثیرپذیری نسبت به تغییرات ضریب b اندک است. ولی در رژیم جریان حداکثر معادله سنجه رسوب تأثیرپذیری منظم‌تر غیرخطی و بالایی را نسبت به تغییرات ضریب b نشان می‌دهد. معادله سنجه رسوب عدم قطعیت بسیار بالایی را در رژیم جریان حداقل (کم‌تر از ۰/۳ متر مکعب بر ثانیه) نشان داد بطوریکه

۱- نویسنده مسئول و استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه بیرجند، پست الکترونیک: hadi_memarian@birjand.ac.ir

۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر

دوخطی، چندخطی و غیره، منحنی یکخطی معمولی‌ترین روش ترسیم منحنی‌های سنج و شامل گذراندن یک خط از میان ابر نقاط است [۲]، که تمامی آن‌ها از رابطه ارائه شده توسط اداره احیای اراضی آمریکا (USBR1) پیروی می‌کنند.

یکی از مشکلات اصلی در طراحی‌های مهندسی و به خصوص بخش آب آن، ناتوانی در شناخت و به کمیت درآوردن متغیرهای حاکم بر فرآیندهای مربوط می‌باشد. در این راستا تجزیه و تحلیل عدم قطعیت معادله سنج رسوب می‌تواند درک درستی از اهمیت عوامل تأثیرگذار بر پدیده فرسایش و رسوب ایجاد کرده و شناختی راجع به سهم هر کدام از ضرایب ورودی برخطای ظاهر شده در مدل خروجی ارائه دهد [۱۲]. در رابطه با تحلیل عدم قطعیت منحنی‌های سنج تحقیقات متعددی انجام شده است. در این خصوص، بیات و همکاران [۵] عدم قطعیت روش منحنی سنج رسوب در برآورد حجم رسوب ورودی به مخزن سد لتیان را توسط روش برش آلفای فازی، در محیط نرم‌افزار MATLAB به ازای سه مقدار متفاوت دبی جریان (کم، متوسط و زیاد) به ترتیب 0.053 ، 0.142 و 0.26 تخمین زدند. نتایج آنالیز حساسیت بر روی ضرایب رگرسیونی منحنی سنج نشان داد که زمانی که دبی جریان کم و متوسط می‌باشد، حساسیت رابطه نسبت به ضریب a و در حالت دبی جریان زیاد حساسیت رابطه نسبت به ضریب b می‌باشد. جواد و همکاران [۱۶] میزان بار رسوب را در رودخانه گرگانرود با استفاده از روش‌های جنگل تصادفی و رگرسیون چندک مدل‌سازی کردند. نتایج نشان داد منحنی سنج رسوب کلاسیک علاوه بر اینکه قادر به برآورد بار رسوبی در دامنه عدم قطعیت‌های مختلف برای یک مقدار دبی معین نیست، بار رسوبی را نیز با مقدار خطای بیشتری برآورد می‌کند. با استفاده از روش‌های رگرسیون چندک و جنگل تصادفی برای یک دبی معین مقدار رسوب در احتمالات مختلف قابل پیش‌بینی است. نتایج برآورد عدم قطعیت منحنی سنج رسوب در چهار ایستگاه هیدرومتری حوزه آبخیز قزل اوزن نشان داد که دامنه عدم قطعیت حاصل از روش خودگردان ساز ۲ نسبت به روش GLUE بزرگتر بوده و تعداد بیش‌تری از داده‌های مشاهداتی را در بر می‌گیرد [۱۰]. هم‌چنین میزان عدم قطعیت برآورد رسوب با استفاده از روش منحنی سنج تابعی از تراکم داده‌های برداشتی و نوع تابع مورد استفاده بود. نتایج آنالیز حساسیت روش گلو نیز نشان داد با کاهش مقدار آستانه دامنه عدم قطعیت بیش‌تر می‌شود، اما همچنان دامنه عدم قطعیت بدست آمده کم‌تر از دامنه عدم قطعیت بدست آمده با استفاده از روش خودگردان ساز بود. محمدی و همکاران [۲۴] کارایی مدل‌های مختلف برآورد بار معلق به روش منحنی سنج در حوزه آبخیز سفید رود را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که روش حد وسط و روش حد وسط با ضرایب اصلاحی در مقایسه با سایر روش‌های منحنی سنج، بیش‌ترین برازش‌ها (از نظر فراوانی) را به ایستگاه‌های حوزه سفید رود دارا هستند. تاراس

واهلبرگ و لان [۳۳] با استفاده از روش مونت کارلو عدم قطعیت ناشی از پراکنش باقی مانده‌ها را در منحنی سنج برآورد کردند. راستامچی و ویلکینسون [۲۸] عدم قطعیت منحنی سنج را با استفاده از روش خودگردان‌ساز در ۱۱ ایستگاه استرالیا برآورد کردند. نتایج نشان دهنده عدم قطعیت بالا برای دبی‌های بالا بود. ویجیاک و بندمیکل [۳۵] کارایی روش بیزی ۳ در مقایسه با روش خودگردان ساز در برآورد عدم قطعیت منحنی سنج هشت پارامتره را در تخمین ضرایب کیفی در رودخانه داک استرالیا مورد ارزیابی قرار دادند.

خطای ناشی از اندازه‌گیری داده رسوب در عرصه و آزمایشگاه، دینامیک و تغییرات مکانی فرسایش و رسوب (از قبیل تأثیر پسماند، تغییرات مکانی بارش و رطوبت پیشین) و عدم ایستایی (به عنوان مثال تغییرات زمانی) پاسخ حوزه باعث پیچیدگی رابطه دبی و رسوب شده است [۲۶ و ۱۰]. در نتیجه آن، پیچیدگی‌های فرآیندهای هیدرولوژیکی مؤثر بر میزان بار رسوبی با داده‌های کم قابل مدل‌سازی نمی‌باشند. به طوری که اغلب پراکنش نقاط در نمودار مقادیر دبی و رسوب، بالا می‌باشد و باعث ایجاد عدم قطعیت در نتایج بدست آمده از روش منحنی سنج می‌شود [۱۵]. هم‌چنین معادله برازش داده شده در روش منحنی سنج و نحوه پراکنش باقی‌مانده‌ها باعث بوجود آمدن نوعی عدم قطعیت می‌شود [۲۸ و ۱۰]. با توجه به اینکه حوزه آبخیز زشک جایگاه مهمی در منطقه به لحاظ اکوتوریستی داشته و یکی از زیرحوزه‌های آبخیز کشف رود محسوب می‌شود و تاکنون مطالعه جامعی بر روی فرآیند تولید و انتقال رسوب و معادلات مرتبط در این حوزه صورت نگرفته است، بنابراین ضروری است که عدم قطعیت معادلات متداول سنج رسوب در محل ایستگاه هیدرومتری زشک بررسی و نتایج به سازمان‌های ذیربط ارائه گردد. بنابراین بررسی عدم قطعیت معادله سنج رسوب و نقش ضرایب معادله در ایجاد عدم قطعیت کل بعنوان هدف اصلی این مطالعه در حوزه آبخیز زشک - ابرده شهرستان شاندیز بعنوان یکی از قطب‌های گردشگری و حوزه‌های آبخیز مهم استان خراسان رضوی مطرح شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

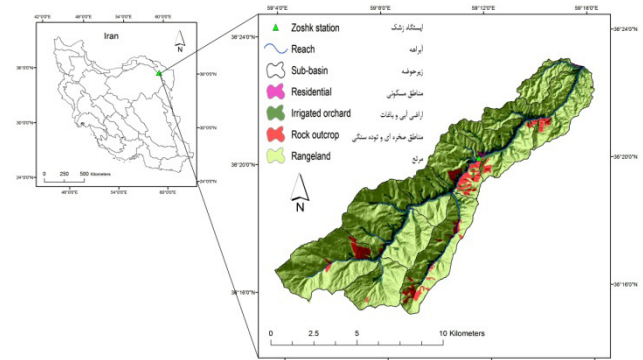
حوزه آبخیز زشک - ابرده با مساحتی در حدود ۹۲۲۵/۹ هکتار در محدوده شهرستان طرقبه- شاندیز و بخش شاندیز بین طول‌های جغرافیایی ۵۹ درجه، ۴ دقیقه و ۳۹ ثانیه تا ۵۹ درجه، ۱۶ دقیقه و ۱۳ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه، ۱۵ دقیقه و ۱۶ ثانیه تا ۳۶ درجه، ۲۳ دقیقه و ۱۲ ثانیه واقع شده است (شکل ۱). حوزه زشک دارای متوسط بارندگی ۴۰۴ میلی‌متر در سال و متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. اقلیم منطقه در روش دومارتن مدیترانه‌ای طبقه بندی می‌شود [۱۹].

مجموعه داده‌ها

در این تحقیق از ۱۲۰ داده دبی رسوب متناظر با دبی آب ایستگاه

1. U.S. Bureau of Reclamation
2. BOOTSTRAP

هیدرومتری زشک بین سال‌های ۱۳۵۵-۱۳۵۴ تا ۱۳۹۴-۱۳۹۳ استفاده شده است. این ایستگاه با مختصات $X=697026$ و $Y=4023333$ (در سیستم تصویر UTM) در حوزه آبخیز زشک- ابرده شهرستان شاندیز در خراسان رضوی واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت حوزه مطالعاتی و ایستگاه هیدرومتری زشک در استان خراسان رضوی

Fig 1. Geographic location of study area and Zoshk hydrometric station in Khorasan Razavi Province

روش انجام مطالعه

برازش معادله توانی بر داده‌های ایستگاه هیدرومتری زشک در ابتدا داده‌های مشاهداتی آب و رسوب تک به تک مورد بررسی قرار گرفته و داده‌های مشکوک و خطا حذف شدند. بمنظور برازش بهترین معادله توانی بر داده‌های رسوب سنجی ایستگاه هیدرومتری زشک از نرم‌افزار CurveExpert و مفهوم تابع شایستگی^۱ استفاده شد. در این روش، هدف حداقل سازی تابع شایستگی X^2 (که نشان‌دهنده توافق بین داده‌های بدست آمده از مدل و داده‌های مشاهداتی است) است که به روش‌های سری تیلور^۲ و تندترین شیب^۳ انجام می‌شود [۱۵].

برازش توزیع بر داده‌ها

با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق بررسی عدم قطعیت و حساسیت مدل به ضرایب a و b معادله سنجه رسوب است، بنابراین این ضرایب بعنوان ضرایب دارای عدم قطعیت به نرم‌افزار Risk@ معرفی شدند. بمنظور انتخاب بهترین توزیع آماری برازش داده شده بر این داده‌ها از معیار آکائیکه^۴ استفاده شد.

معیار اطلاعاتی آکائیکه^۴ یا به طور مخفف AIC معیاری برای سنجش نیکویی برازش و منطقی بودن معادله است. این معیار بر اساس مفهوم آنتروپی بنا شده است و نشان می‌دهد که استفاده از یک مدل آماری به چه میزان باعث از دست رفتن اطلاعات می‌شود. به

عبارت دیگر، این معیار تعادلی میان دقت مدل و پیچیدگی آن برقرار می‌کند. این معیار برای انتخاب بهترین مدل آماری پیشنهاد شد [۱]. با توجه به داده‌ها، چند مدل رقیب ممکن است با توجه به مقدار AIC رتبه‌بندی شوند و مدل دارای کم‌ترین AIC بهترین است. از مقدار AIC می‌توان استنباط نمود که به عنوان مثال سه مدل بهتر وضعیت نسبتاً یکسانی دارند و بقیه مدل‌ها به مراتب بدتر هستند، اما معیاری برای انتخاب مقدار آستانه‌ای برای AIC که بتوان مدلی را به واسطه داشتن AIC بزرگتر از این مقدار رد کرد وجود ندارد [۶ و ۷]. در حالت کلی، AIC برابر است با:

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \quad (1)$$

که k تعداد ضرایب مدل آماری است و L مقدار حداکثر تابع درستنمایی برای مدل برآورد شده است.

نمونه‌گیری از داده‌ها به روش مونت کارلو^۵

یکی از روش‌های ارزیابی عدم قطعیت و آنالیز خطر که کاربرد زیادی در علوم مختلف دارد روش شبیه‌سازی مونت کارلو می‌باشد. در این روش برای تهیه اعداد تصادفی با حفظ توزیع آماری آنها، از تابع تجمعی احتمال^۶ استفاده می‌شود. این تابع را با $F_X(x)$ نشان می‌دهند که یک تابع صعودی و مقدار آن در بازه $[0, 1]$ تغییر می‌کند [۳۱]. در این روش ابتدا توزیع آماری ضرایب ورودی تعیین و تابع توزیع تجمعی آنها همراه با احتمال‌های مربوطه بدست می‌آید و سپس اعداد تصادفی بین صفر تا ۱ تولید می‌شود. آنگاه به تعداد مورد نظر نمونه از تابع توزیع تجمعی ضرایب به ازای هر عدد تصادفی ایجاد می‌شود [۳۴]. سپس با محاسبه انحراف معیار و ضریب تغییرات خروجی‌های مدل در تکرارهای مختلف می‌توان میزان عدم قطعیت ضرایب مدل را برآورد نمود. در این مطالعه ۵۰۰۰ تکرار برای هر نمونه‌برداری (شبیه‌سازی) در نظر گرفته شد.

بمنظور ایجاد یک نمونه اولیه تصادفی از ضرایب a و b معادله سنجه رسوب مورد استفاده در این تحقیق، به اندازه داده‌های مشاهداتی داده‌های آب و رسوب (۱۲۰ داده) سری ۱۲۰ تایی از داده‌های Q_s و Q_w به روش نمونه‌گیری تصادفی با جایگزینی ایجاد شد. در این روش هر ردیف از داده‌ها بعنوان یک واحد نمونه‌گیری به سیستم معرفی و نمونه‌برداری تصادفی انجام شد. سپس برای هر سری ۱۲۰ تایی از داده‌های Q_s و Q_w یک معادله نمایی برازش داده شد و ضرایب a و b این معادلات توانست یک سری ۱۲۰ تایی را تشکیل دهد که در نهایت تحلیل حساسیت و عدم قطعیت بر روی این داده‌ها صورت گرفت.

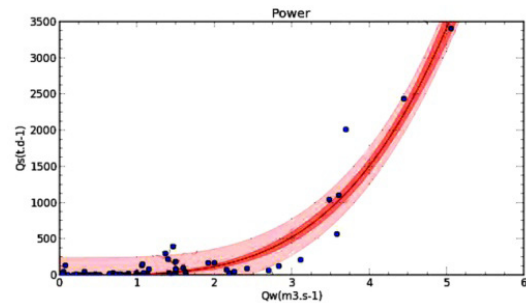
نتایج

نتایج برازش معادله توانی بر داده‌های ایستگاه هیدرومتری زشک معادله برازش داده شده (با شکل کلی $Q_s = aQ_w^b$) با میزان خطای

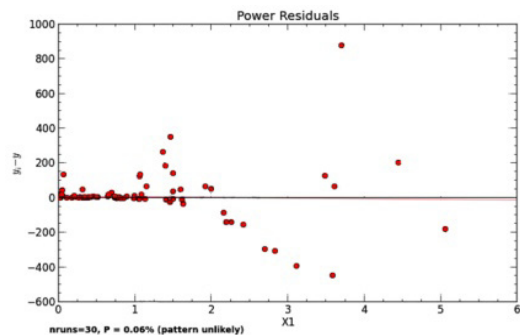
5. Monte Carlo
6. Probability Density Function

1. Merit function
2. Taylor series
3. Steepest descent
4. Akaike information criterion

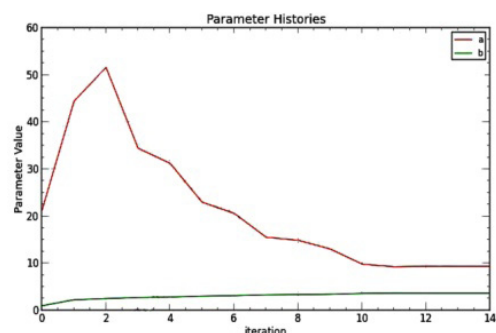
استاندارد ۱۲۳/۲۵، ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۶ و ضریب تبیین برابر با ۰/۹۲، به شکل $Qs=9.37(Qw)3.67$ می‌باشد (شکل ۲- الف). میزان خطای استاندارد برای ضرایب a و b بترتیب برابر با ۲/۲۲ و ۰/۱۶ بوده و دامنه اطمینان ضریب a از ۴/۹۶ تا ۱۳/۷۷ و برای ضریب b از ۳/۳۶ تا ۳/۹۷ برآورد شد. همان‌طور که در شکل ۲- ب مشخص است خطای باقیمانده کاملاً از یک روند تصادفی تبعیت نمی‌کند که همین نکته می‌تواند موجب ایجاد بی‌نظمی و عدم قطعیت در برآوردها شود [۹]. ضمن این که نوسانات بیش‌تر ضریب a در طی تکرارهای مختلف برای رسیدن به همگرایی نسبت به ضریب b (شکل ۲- ج) حاکی از وجود عدم قطعیت بیش‌تر این ضریب است.



(الف) (a)



(ب) (b)



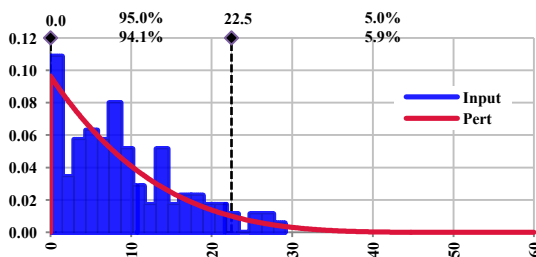
(ج) (c)

شکل ۲- (الف) معادله نمایی برازش داده شده؛ (ب) نمودار خطای باقیمانده پس از برازش؛ (ج) نمودار همگرایی ضرایب معادله در طی تکرارهای مختلف

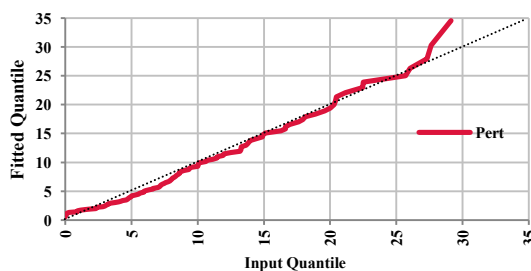
Fig 2. (a) The fitted power equation; (b) Residual error plot; (c) Parameters' values vs. iterations

نتایج برازش توزیع بر ضرایب a و b پس از برازش توزیع‌های مختلف، توزیع آماری Pert بر داده‌های ضریب a (شکل ۳- الف) و توزیع Loglogistic بر داده‌های ضریب b (شکل ۳- الف) بهترین برازش را نشان داد. میزان AIC برای توزیع آماری Pert برابر با ۷۶۴/۶۳ و برای توزیع Loglogistic برابر با ۳۵۳/۷۸ بدست آمد.

توزیع Pert نسخه نرم شده توزیع یکنواخت یا توزیع مثلثی است که بوسیله سه ضریب حداقل (α)، حداکثر (β) و نما (m) معرفی و شناسایی می‌شود. میانگین (μ) در این توزیع برابر با $(\alpha+4m+\beta)/6$ و انحراف معیار (σ) نیز برابر با $(\beta-\alpha)/6$ می‌باشد [۳۶]. شکل ۳- ب نمودار چندک- چندک (Q-Q) حاصل از برازش توزیع Pert بر ضریب a را نشان می‌دهد که تقریباً از الگوی ۱:۱ پیروی می‌نماید.



(الف) (a)



(ب) (b)

شکل ۳- (الف) توزیع آماری Pert برازش داده شده بر ضریب a؛ (ب) نمودار چندک- چندک (Q-Q) حاصل از برازش توزیع آماری بر داده‌های ضریب a

Fig 3. (a) Pert distribution fitted on the parameter a ;(b) Q-Q plot ,resulted from distribution fitting on the parameter a

توزیع Loglogistic (لگاریتم لجستیک) یک توزیع احتمال پیوسته است که برای متغیرهای تصادفی نامنفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این توزیع در هیدرولوژی نیز کاربرد گسترده‌ای دارد. این توزیع نیز بوسیله سه ضریب مقیاس یا میانه (α)، شکل (β) و معرفی (γ) و شناسایی می‌شود. میانگین توزیع از رابطه و واریانس آن از رابطه بدست می‌آید که در رابطه اخیر $b=\Pi/\beta$ است [۲۳]. نمودار چندک- چندک (Q-Q) حاصل از برازش توزیع Loglogistic بر ضریب b نشان می‌دهد که برازش حاصله انطباق کاملی بر الگوی ۱:۱ ندارد (شکل ۴- ب) که همین امر می‌تواند زمینه بروز خطا در

برآوردهای مبتنی بر ضریب b باشد.

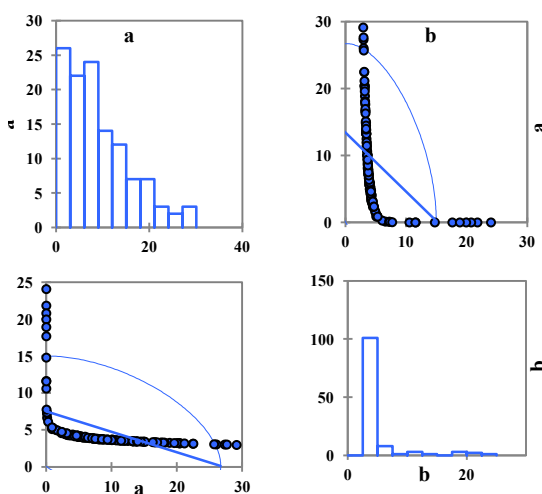
مدل در دبی‌های حداکثر، حداکثر مطلق دبی آب در سری گسسته مورد بررسی (۵/۰۶۲ متر مکعب بر ثانیه) نیز بعنوان ورودی به مدل معرفی شد.

بمنظور معرفی ضرایب a و b بعنوان ورودی‌های دارای عدم قطعیت به مدل ابتدا لازم است که وضعیت همبستگی آنها نسبت به یکدیگر بررسی شود چرا که در صورت وجود همبستگی، در صورتیکه این همبستگی بین ضرایب دارای عدم قطعیت به مدل معرفی نشود نمونه‌برداری از ضرایب از یک روند منطقی تبعیت نکرده و نتایج نامعتبر خواهد بود [۲۷]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ضرایب a و b دارای ضریب همبستگی معنی دار ۰/۴۹- در سطح ۵ درصد بوده (شکل ۶) که بصورت ماتریس همبستگی به مدل معرفی شد.

رژیم جریان نرمال در حالت پربابی

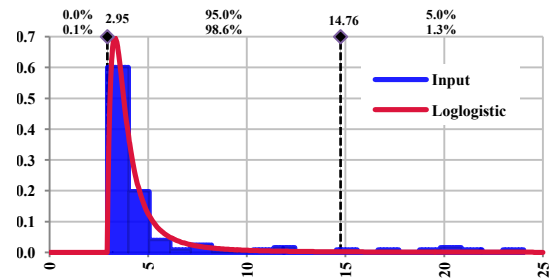
شبیه‌سازی مونت کارلوی رسوب بر اساس معادله سنج رسوب و با ۵۰۰۰ نمونه‌برداری حاکی از قرارگیری ۹۰ درصد داده‌ها در محدوده اطمینان ۱۵/۰ تا ۴۴/۱۲ (تن در روز) است (شکل ۷-الف). شکل ۷-ب نشان‌دهنده سهم بسیار بالاتر ضریب a (۳۳/۹۶ درصد) نسبت به b (۲۸/۰) در توجیه واریانس داده‌های شبیه‌سازی شده رسوب است. شکل ۷-ج نیز نشان‌دهنده تأثیرپذیری خطی و بالای مدل سنج رسوب نسبت به تغییرات ضریب a می‌باشد در حالیکه این تأثیرپذیری نسبت به تغییرات ضریب b اندک و غیر خطی است (شکل ۷-د). همانطور که در شکل‌های ۷-ه و ۷-و ملاحظه می‌شود ضریب a دارای محدوده اطمینان ۹۵ درصد پهن‌تری (۵/۹) نسبت به ضریب b (۲/۱) می‌باشد که این خود نشان‌دهنده عدم قطعیت بالاتری در ضریب a نسبت به ضریب b است [۲۱ و ۲۲].

بررسی الگوی پراکنش ضرایب a و b نیز نشان می‌دهد که ضریب b دارای الگوی پراکنش منظم‌تری نسبت به ضریب a است که این مساله می‌تواند منجر به عدم قطعیت کم‌تر ضریب b نسبت به a

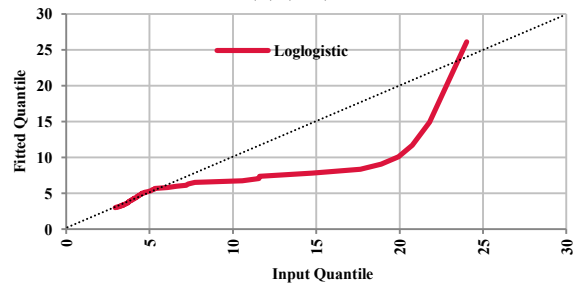


شکل ۶- نمایش گرافیکی ماتریس همبستگی بین ضرایب a و b

Fig 6. Graphical representation of the correlation matrix between the parameters a and b



(الف) (a)



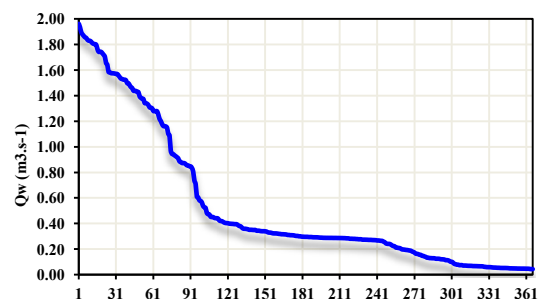
(ب) (b)

شکل ۴- (الف) توزیع آماری Loglogistic برازش داده شده بر ضریب b . (ب) نمودار چندک- چندک (Q-Q) حاصل از برازش توزیع آماری بر داده‌های ضریب b

Fig 4. (a) Loglogistic distribution fitted on the parameter b . (b) Q-Q plot, resulted from distribution fitting on the parameter b

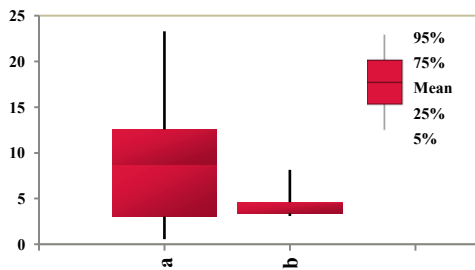
تحلیل حساسیت مدل و عدم قطعیت ضرایب

بمنظور بررسی عملکرد معادله سنج رسوب و تغییرات آن نسبت به ضرایب a و b که بعنوان ورودی‌های دارای عدم قطعیت به مدل معرفی شدند، ابتدا رژیم جریان در حوزه آبخیز زشک بررسی شد. بر اساس منحنی تداوم جریان (شکل ۵) دبی نرمال در حالت پربابی، دبی نرمال در حالت کم آبی و دبی نرمال بترتیب برابر با ۰/۸۳، ۰/۱۶ و ۰/۳ متر مکعب بر ثانیه برآورد شد. بمنظور بررسی رفتار

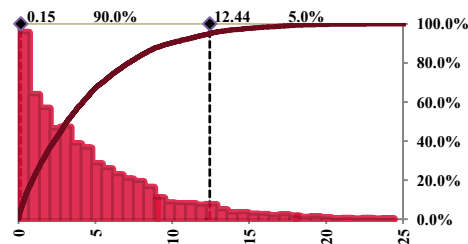


شکل ۵- منحنی تداوم جریان در دوره شاخص آماری

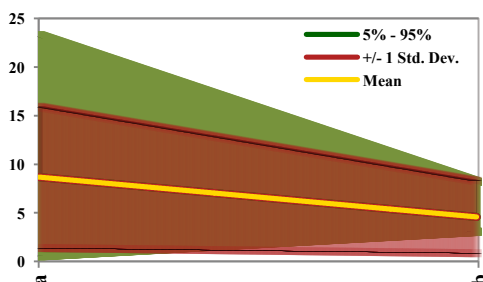
Fig 5. Flow duration curve in index period



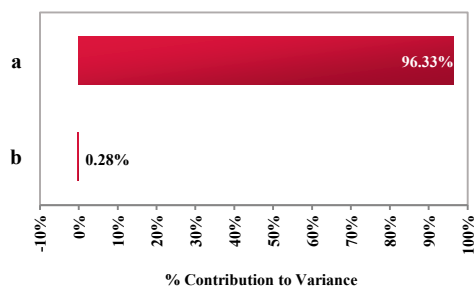
(e) (ا)



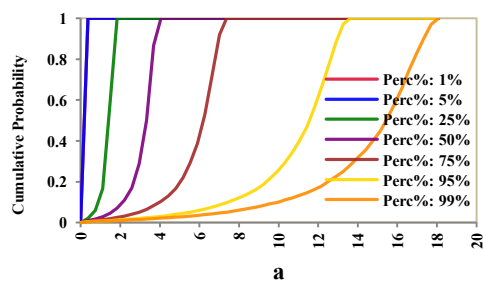
(a) (الف)



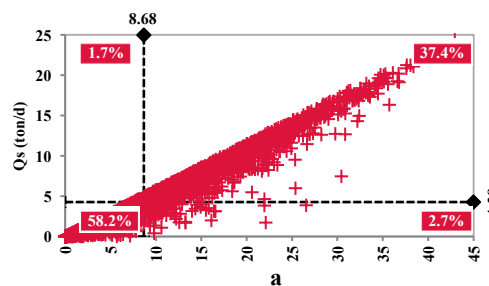
(f) (و)



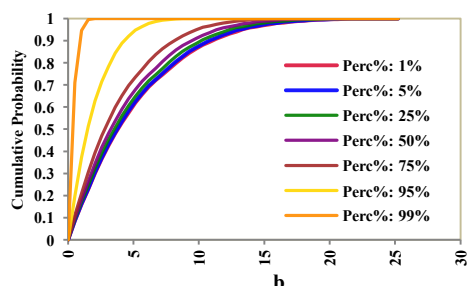
(b) (ب)



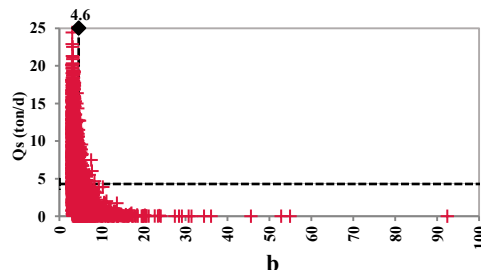
(g) (ز)



(c) (ج)



(h) (ح)

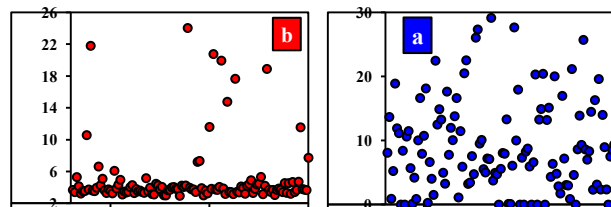


(d) (د)

شکل ۷- نمودارهای مختلف تحلیل حساسیت و عدم قطعیت معادله سنج رسوب در رژیم جریان نرمال در حالت پرایبی (الف) هیستوگرام فراوانی رسوب شبیه سازی شده بروش مونت کارلو؛ (ب) نمودار سهم ضرایب a و b در توجیه واریانس داده های رسوب؛ (ج) نمودار پراکنش داده های رسوب در برابر نمونه های مختلف از a؛ (د) نمودار پراکنش داده های رسوب در برابر نمونه های مختلف از b؛ (ه) نمودار جعبه ای ضرایب نمونه برداری شده a و b؛ (و) محدوده باند عدم قطعیت برای ضرایب a و b. (ز) نمودار تحلیل حساسیت ضریب a در صدک های مختلف؛ (ح) نمودار تحلیل حساسیت ضریب b در صدک های مختلف

Fig 7. Various charts resulted from uncertainty and sensitivity analysis of sediment rating equation in normal high flow regime, (a) Frequency histogram of sediment load, simulated by Monte-Carlo technique; (b) The contribution of the parameters a and b to the variance of sediment load; (c) Sediment load vs. different samples of the parameter a; (d) Sediment load vs. different samples of the parameter b; (e) Box plots of the sampled parameters a and b; (f) Uncertainty band of 5%-95% for the parameters a and b; (g) Sensitivity plot of the parameter a in different percentiles; (h)) Sensitivity plot of the parameter b in different percentiles

شود (شکل ۸). شکل‌های (۷-ز) و (۷-ح) نیز نشان می‌دهند که حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضریب a در صدک‌های پایین بالاتر از صدک‌های بالاست در حالی که این مساله در مورد ضریب b دقیقاً برعکس است.



شکل ۸- الگوی پراکنش ضرایب a و b در نمونه داده‌ها

Fig 8. Scatter plots of the parameters a and b in data samples

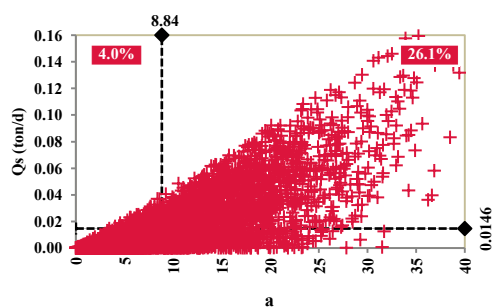
رژیم جریان نرمال در حالت کم‌آبی

شبیه‌سازی مونت کارلوی رسوب بر اساس معادله سنج رسوب و با ۵۰۰۰ نمونه‌برداری حاکی از قرارگیری ۹۰ درصد داده‌ها در محدوده اطمینان صفر تا ۰/۰۶۱۱ (تن در روز) است (شکل ۹-الف). شکل ۹-ب نیز نشان‌دهنده سهم بالای ضریب a (۵۴/۶۰) در توجیه واریانس داده‌های شبیه‌سازی شده رسوب است. ولی سهم ضریب b در توجیه واریانس داده‌های رسوب معنی‌دار نبوده و پلات نشده است. نتایج شبیه‌سازی با معرفی متغیر Q_w بعنوان یک ضریب دارای عدم قطعیت به مدل نشان می‌دهد که در چنین مواقعی اثر عدم قطعیت متغیر Q_w بر خروجی مدل معنی‌دارتر است. شکل ۹-ج نیز نشان‌دهنده تأثیرپذیری غیر منظم و بالای رسوب نسبت به تغییرات ضریب a می‌باشد در حالیکه این تأثیرپذیری نسبت به

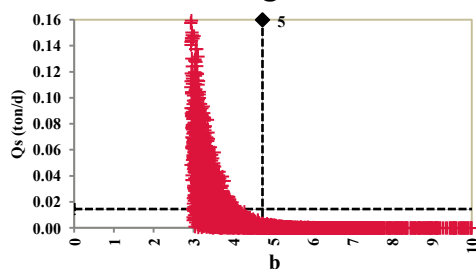
تغییرات ضریب b بسیار اندک است (شکل ۹-د). همانطور که در شکل‌های (۹-ه) و (۹-و) ملاحظه می‌شود ضریب a دارای محدوده اطمینان یا عدم قطعیت ۹۵ درصد پهن‌تری (۱/۱۰) نسبت به ضریب b (۲۷/۱) می‌باشد که این خود نشان‌دهنده عدم قطعیت بسیار بالاتری در ضریب a نسبت به ضریب b است. شکل‌های (۹-ز) و (۹-ح) نیز نشان می‌دهند که حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضریب a در صدک‌های پایین بالاتر از صدک‌های بالاست ولی این مساله در مورد ضریب b دقیقاً برعکس است.

رژیم جریان نرمال

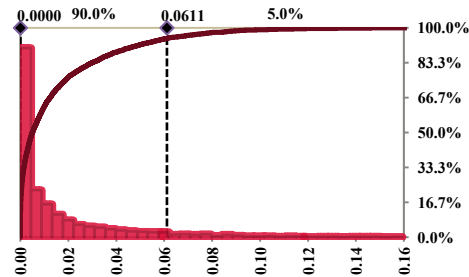
شبیه‌سازی مونت کارلوی رسوب بر اساس معادله سنج رسوب و با ۵۰۰۰ نمونه‌برداری حاکی از قرارگیری ۹۰ درصد داده‌ها در محدوده اطمینان صفر تا ۰/۰۴۵ (تن در روز) است (شکل ۱۰-الف). شکل (۱۰-ب) نیز همانند شکل‌های قبلی نشان‌دهنده سهم بسیار بالاتر ضریب a (۵۸/۷۱ درصد) نسبت به b (۱۳/۰ درصد) در توجیه واریانس داده‌های شبیه‌سازی شده رسوب است. آنچه که مسلم است با حرکت مدل از رژیم جریان پرآب بسمت رژیم‌های کم‌آب تأثیرپذیری مدل از ضرایب a و b (بخصوص b) کم‌تر شده و نقش Q_w پررنگ‌تر خواهد شد. شکل (۱۰-ج) نیز نشان‌دهنده تأثیرپذیری غیر منظم و بالای مدل سنج رسوب نسبت به تغییرات ضریب a می‌باشد در حالیکه این تأثیرپذیری نسبت به تغییرات ضریب b بسیار اندک است (شکل ۱۰-د). همانطور که در شکل‌های (۱۰-ه) و (۱۰-و) ملاحظه می‌شود ضریب a دارای محدوده عدم قطعیت ۹۵ درصد عریض‌تری (۸/۹) نسبت به ضریب b (۳/۱) می‌باشد که دلیلی است بر عدم قطعیت بالاتر ضریب a نسبت به ضریب b . شکل‌های



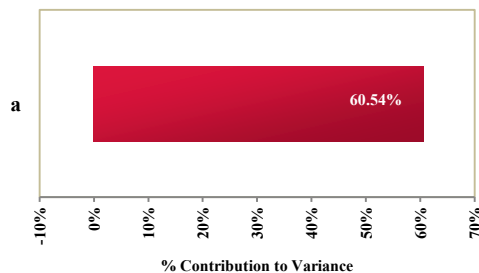
(ج) (c)



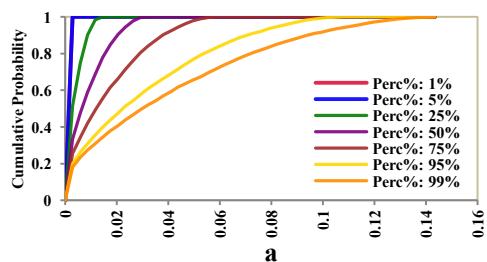
(د) (d)



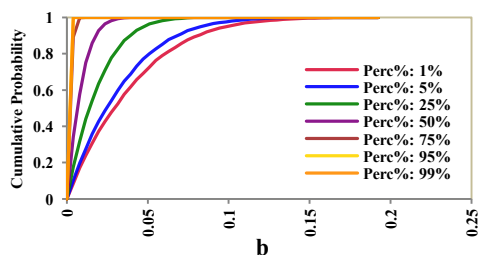
(الف) (a)



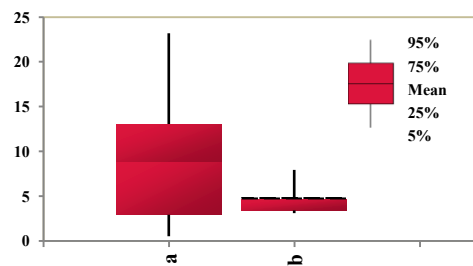
(ب) (b)



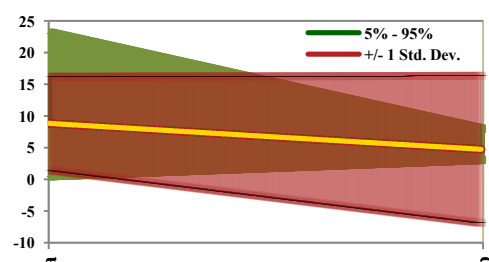
(g) (ز)



(h) (ح)



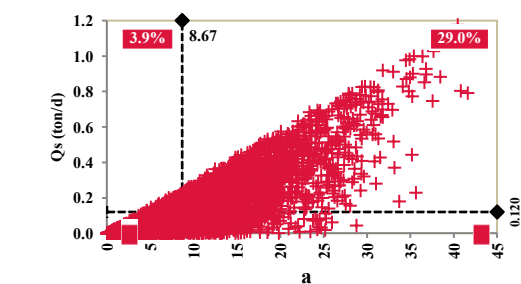
(e) (و)



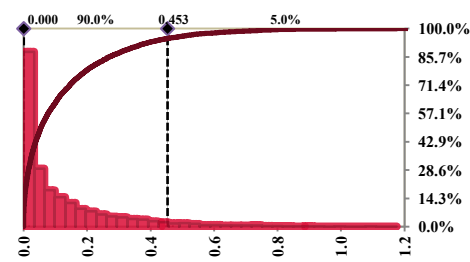
(f) (پ)

شکل ۹- نمودارهای مختلف تحلیل حساسیت و عدم قطعیت معادله سنج رسوب در رژیم جریان نرمال در حالت کم آبی (الف) هیستوگرام فراوانی رسوب شبیه سازی شده بروش مونت کارلو؛ (ب) نمودار سهم ضرایب a و b در توجیه واریانس داده های رسوب؛ (ج) نمودار پراکنش داده های رسوب در برابر نمونه های مختلف از a؛ (د) نمودار پراکنش داده های رسوب در برابر نمونه های مختلف از b؛ (ه) نمودار جعبه ای ضرایب نمونه برداری شده a و b؛ (و) محدوده باند عدم قطعیت برای ضرایب a و b؛ (ز) نمودار تحلیل حساسیت ضریب a در صدک های مختلف؛ (ح) نمودار تحلیل حساسیت ضریب b در صدک های مختلف

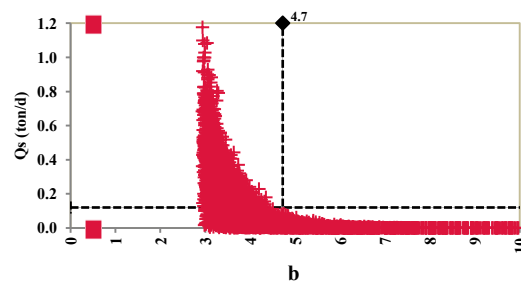
Fig 9. Various charts resulted from uncertainty and sensitivity analysis of sediment rating equation in normal low flow regime, (a) Frequency histogram of sediment load, simulated by Monte-Carlo technique; (b) The contribution of the parameters a and b to the variance of sediment load; (c) Sediment load vs. different samples of the parameter a; (d) Sediment load vs. different samples of the parameter b; (e) Box plots of the sampled parameters a and b; (f) Uncertainty band of 5%-95% for the parameters a and b; (g) Sensitivity plot of the parameter a in different percentiles; (h) Sensitivity plot of the parameter b in different percentiles



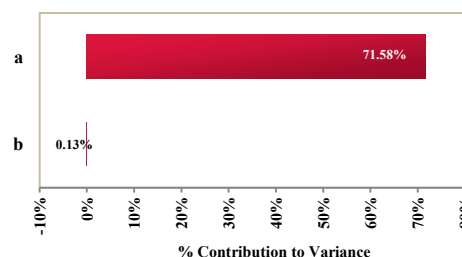
(c) (ج)



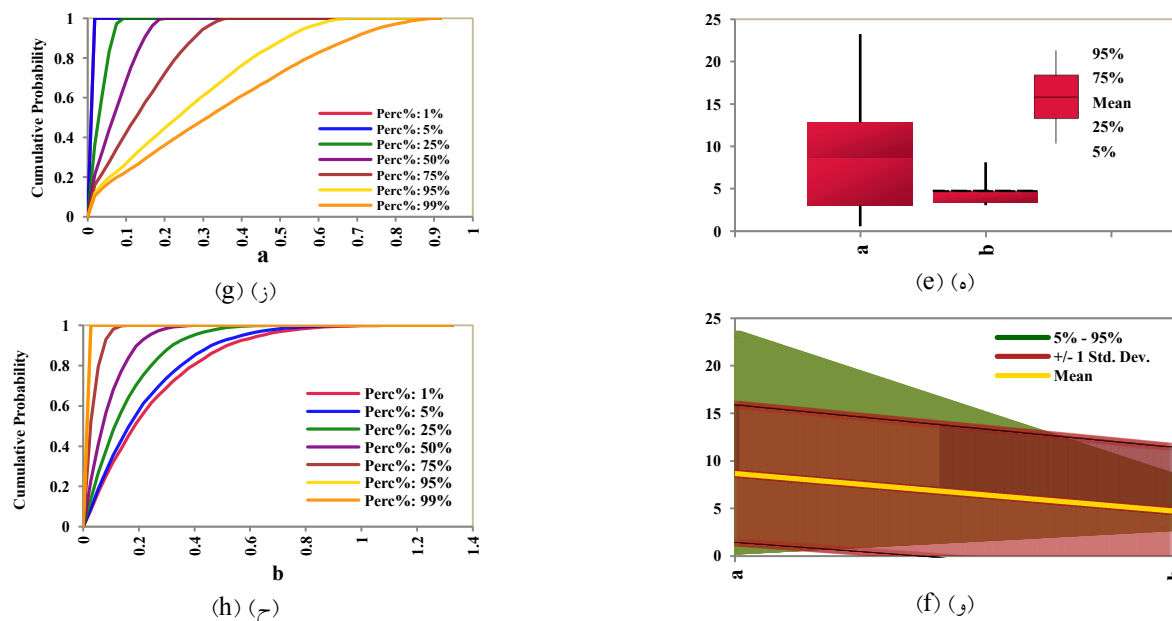
(a) (الف)



(d) (د)



(b) (ب)



شکل ۱۰- نمودارهای مختلف تحلیل حساسیت و عدم قطعیت معادله سنج رسوب در رژیم جریان نرمال (الف) هیستوگرام فراوانی رسوب شبیه‌سازی شده بروش مونت کارلو؛ (ب) نمودار سهم ضرایب a و b در توجیه واریانس داده‌های رسوب؛ (ج) نمودار پراکنش داده‌های رسوب در برابر نمونه‌های مختلف از a ؛ (د) نمودار پراکنش داده‌های رسوب در برابر نمونه‌های مختلف از b ؛ (ه) نمودار جعبه‌ای ضرایب نمونه‌برداری شده a و b ؛ (و) محدوده باند عدم قطعیت برای ضرایب a و b ؛ (ز) نمودار تحلیل حساسیت ضریب a در صدک‌های مختلف؛ (ح) نمودار تحلیل حساسیت ضریب b در صدک‌های مختلف

Fig 10. Various charts resulted from uncertainty and sensitivity analysis of sediment rating equation in normal regime, (a) Frequency histogram of sediment load, simulated by Monte-Carlo technique; (b) The contribution of the parameters a and b to the variance of sediment load; (c) Sediment load vs. different samples of the parameter a ; (d) Sediment load vs. different samples of the parameter b ; (e) Box plots of the sampled parameters a and b ; (f) Uncertainty band of 5%-95% for the parameters a and b ; (g) Sensitivity plot of the parameter a in different percentiles; (h) Sensitivity plot of the parameter b in different percentiles

ضریب b است. نمودار عنکبوتی شکل ۱۱- ز نیز نشان می‌دهد که حساسیت معادله سنج رسوب به تغییرات ضریب a در صدک‌های پایین بیش‌تر از b بوده و بالعکس.

تحلیل عدم قطعیت معادله سنج رسوب

بمنظور تحلیل عدم قطعیت معادله سنج رسوب، بر اساس توزیع برازش داده شده بر ضرایب a و b ، ۱۰۰۰ داده از این دو ضریب بروش مونت کارلو نمونه‌برداری شد. سپس معادله سنج رسوب ۱۰۰۰ بار بر ۱۲۰ داده دبی آب و با استفاده از ضرایب تصادفی a و b اعمال شد و دبی رسوب متناظر محاسبه شد. با محاسبه چندک‌های بالا (۹۵ درصد و ۵/۹۷ درصد) و پایین (۵ درصد و ۵/۲ درصد) مشخص می‌شود که ۵/۳۶ درصد داده‌های مشاهداتی رسوب در محدوده باند عدم قطعیت ۹۵ درصد-۵ درصد و ۵/۳۷ درصد از داده‌های مشاهده‌ای رسوب در محدوده باند ۵/۹۷ درصد-۵ درصد قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه کم‌تر از ۵۰ درصد داده‌های مشاهده‌ای در محدوده باند اطمینان قرار می‌گیرند می‌توان نتیجه‌گیری کرد که میزان عدم قطعیت معادله سنج رسوب بالاست

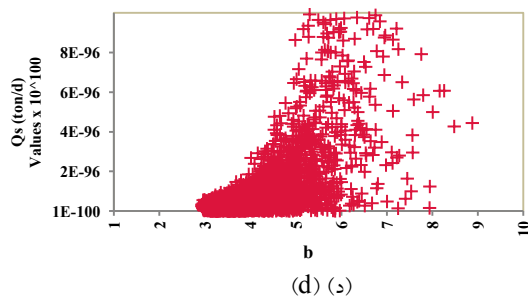
(۱۰- ز) و (۱۰- ح) نیز نشان می‌دهند که حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضریب a در صدک‌های پایین بالاتر از صدک‌های بالاست. در مورد ضریب b این حساسیت در صدک‌های بالا بیش‌تر است.

رژیم جریان حداکثر

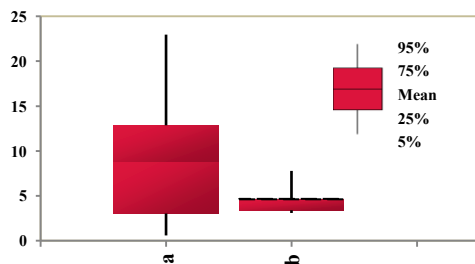
شبیه‌سازی مونت کارلوی رسوب بر اساس معادله سنج رسوب و با ۵۰۰۰ نمونه‌برداری نشان می‌دهد که ۹۰ درصد داده‌ها در محدوده اطمینان ۴۹۸ تا ۱۶۷۰۰۰ (تن در روز) قرار دارند (شکل ۱۱- الف). شکل ۱۱- ب بر خلاف رژیم‌های جریان قبلی نشان‌دهنده سهم بالاتر ضریب b (۲/۲۴ درصد) نسبت به a (۵/۰ درصد) در توجیه واریانس داده‌های شبیه‌سازی شده رسوب است. شکل ۱۱- ج نیز نشان‌دهنده تأثیرپذیری منظم‌تر غیر خطی و بالای مدل سنج رسوب نسبت به تغییرات ضریب b می‌باشد در حالیکه این تأثیرپذیری نسبت به تغییرات ضریب a کم‌تر از b است (شکل ۱۱- د). همانطور که در شکل‌های ۱۱- ه و ۱۱- و ملاحظه می‌شود ضریب a دارای محدوده اطمینان ۹۵ درصد پهن‌تری (۸/۹) نسبت به ضریب b (۲/۱) می‌باشد که باز هم نشان‌دهنده عدم قطعیت بالاتری در ضریب a نسبت به

[۲۱ و ۲۲] که استفاده از ترکیب منحنی سنج و روش‌های خبره مانند هوش مصنوعی می‌تواند بعنوان راهکار جایگزین در این زمینه جهت کاهش عدم قطعیت مطرح شود [۱۷]. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود معادله سنج رسوب عدم قطعیت بسیار بالایی در رژیم جریان حداقل (کم‌تر از ۳/۰ متر مکعب بر ثانیه) دارد بطوریکه در این نوع از جریان تقریباً هیچ یک از داده‌های مشاهده‌ای رسوب در محدوده تخمین باند عدم قطعیت مدل قرار نمی‌گیرند. در حالیکه میزان عدم قطعیت مدل در رژیم جریان‌های متوسط به بالا بسیار کم‌تر بوده و اکثر داده‌های مشاهده‌ای رسوب در محدوده باند تخمین قطعیت مدل قرار می‌گیرند. که البته کم‌ترین میزان عدم قطعیت در رژیم جریان متوسط دیده می‌شود و در رژیم‌های حداکثری نیز همانطور که در شکل دیده می‌شود داده‌های مشاهداتی کم‌تری نسبت به رژیم متوسط در محدوده باند اطمینان قرار می‌گیرند. همانطور که در بخش‌های قبلی نیز اشاره شد در رژیم‌های جریان حداقل عملکرد مدل بیش‌تر تحت تأثیر ضریب a می‌باشد در حالیکه در رژیم جریان متوسط به بالا عملکرد مدل بیش‌تر تحت تأثیر ضریب b است. این یافته نیز بواسطه تحقیقی که توسط بیات و همکاران [۵] بر روی عدم قطعیت منحنی سنج رسوب انجام شده است پشتیبانی می‌شود.

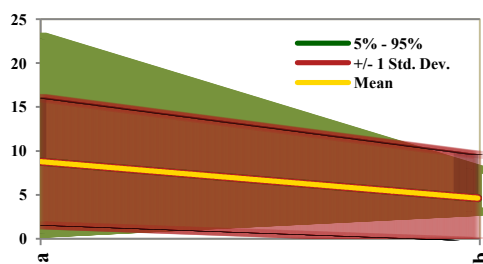
همانطور که قبلاً نیز اثبات شد ضریب a دارای عدم قطعیت بسیار بالاتری نسبت به ضریب b می‌باشد که این مساله موجب ایجاد درجه بالایی از عدم قطعیت در معادله سنج رسوب بخصوص در رژیم جریان حداقل می‌شود. وجود بی‌نظمی در رژیم جریان حداقل و عدم قطعیت و خطای بالا در نمونه‌های رسوب اندازه‌گیری شده و همچنین تأثیرپذیری زیاد غلظت رسوب در این رژیم از جریان‌های ورودی جانبی (مانند فاضلاب روستایی بالادست یا پساب اراضی زراعی و باغی) خود عامل مهمی در ایجاد عدم قطعیت مدل در این بخش از منحنی سنج رسوب است. تأثیرپذیری بالاتر معادله سنج رسوب از ضریب b در دبی‌های حداکثر نسبت به ضریب a حاکی از نقش بالاتر دبی آب و خصوصیات هندسی کانال در انتقال رسوب نسبت به جریان نرمال یا حداقل است. در دبی حداکثر بخشی از رسوب ناشی از تنش برشی جریان و کش کف و دیواره‌های کانال می‌باشد در حالیکه در رژیم نرمال یا حداقل این مساله نقش کمتری در تولید و انتقال رسوب دارد. در این نوع رژیم و بخصوص در منطقه مطالعاتی نقش جریان‌های جانبی ورودی پررنگ‌تر شده و خود بدلیل ایجاد بی‌نظمی، توانایی مدل آماری را در تخمین صحیح بار رسوب کاهش می‌دهد [۵].



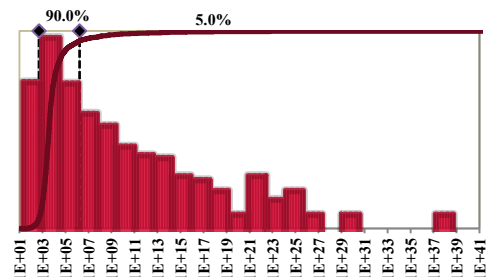
(د) (d)



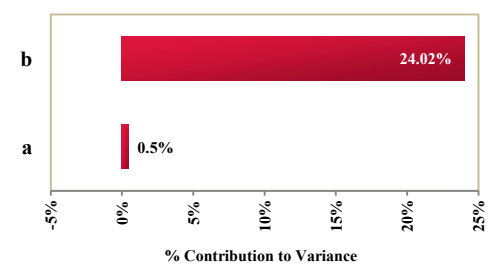
(ه) (e)



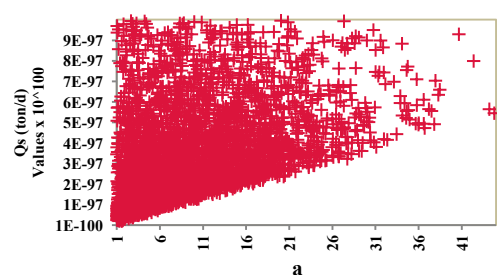
(و) (f)



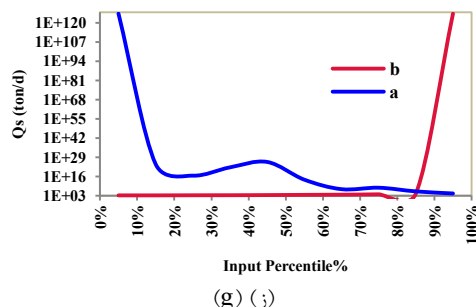
(الف) (a)



(ب) (b)

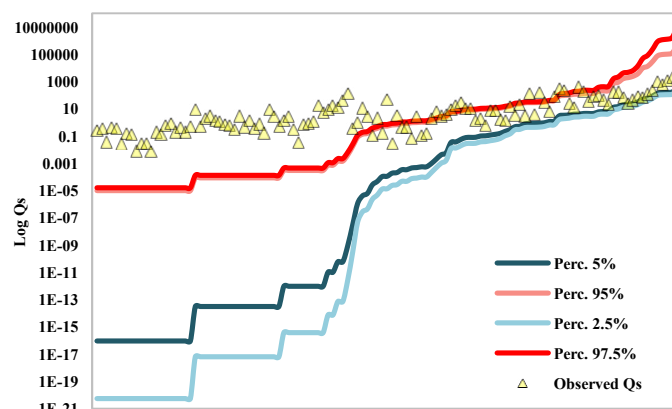


(ج) (c)



شکل ۱۱- نمودارهای مختلف تحلیل حساسیت و عدم قطعیت معادله سنج رسوب در رژیم حداکثر جریان (الف) هیستوگرام فراوانی رسوب شبیه‌سازی شده بروش مونت کارلو؛ (ب) نمودار سهم ضرایب **a** و **b** در توجیه واریانس داده‌های رسوب؛ (ج) نمودار پراکنش داده‌های رسوب در برابر نمونه‌های مختلف از **a**؛ (د) نمودار پراکنش داده‌های رسوب در برابر نمونه‌های مختلف از **b**؛ (ه) نمودار جعبه‌ای ضرایب نمونه‌برداری شده **a** و **b**؛ (و) محدوده باند عدم قطعیت برای ضرایب **a** و **b**؛ (ز) نمودار عنکبوتی تحلیل حساسیت ضرایب **a** و **b** در صدک‌های مختلف

Fig 11. Various charts resulted from uncertainty and sensitivity analysis of sediment rating equation in maximum flow regime, (a) Frequency histogram of sediment load, simulated by Monte-Carlo technique; (b) The contribution of the parameters a and b to the variance of sediment load; (c) Sediment load vs. different samples of the parameter a; (d) Sediment load vs. different samples of the parameter b; (e) Box plots of the sampled parameters a and b; (f) Uncertainty band of 5%-95% for the parameters a and b; (g) Sensitivity spider plot of the parameters a and b in different percentile



شکل ۱۲. نمودار همپوشانی داده‌های مشاهده‌ای رسوب بر روی باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ و ۹۰ درصد
Fig 12. Observed sediment load records overlaid on 95%-5% and 97.5%-2.5% uncertainty bands

نسبت به تغییرات ضریب **a** می‌باشد در حالیکه این تأثیرپذیری نسبت به تغییرات ضریب **b** اندک و غیر خطی است. در رژیم نرمال پرآب تأثیرپذیری مدل سنج رسوب نسبت به تغییرات ضریب **a** خطی و بالا می‌باشد، در حالیکه این تأثیرپذیری نسبت به تغییرات ضریب **b** اندک و غیرخطی است. ولی در رژیم جریان حداکثر معادله سنج رسوب تأثیرپذیری منظم‌تر غیرخطی و بالایی را نسبت به تغییرات ضریب **b** نشان می‌دهد.

در کلیه رژیم‌های مطالعاتی ضریب **a** دارای محدوده اطمینان یا عدم قطعیت ۹۵ درصد پهن‌تری نسبت به ضریب **b** می‌باشد که این خود نشان‌دهنده عدم قطعیت بسیار بالاتری در ضریب **a** نسبت به ضریب **b** است. هم‌چنین در کلیه رژیم‌های جریان حساسیت مدل

بحث و نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی مونت کارلوی رسوب بر اساس معادله سنج رسوب و با ۵۰۰۰ نمونه‌برداری نشان داد که سهم ضریب **a** نسبت به **b** در توجیه واریانس داده‌های شبیه‌سازی شده رسوب در رژیم جریان نرمال پرآب و نرمال بسیار بیش‌تر می‌باشد. در رژیم جریان نرمال در حالت کم‌آبی سهم ضریب **b** در توجیه واریانس داده‌های رسوب معنی‌دار نمی‌باشد. اما این روند در رژیم جریان حداکثر برعکس است بطوریکه با حرکت از رژیم جریان کم آب بسمت پرآب نقش ضریب **b** در توجیه واریانس رسوب مؤثرتر می‌باشد.

تحلیل حساسیت معادله سنج در رژیم جریان نرمال کم‌آب و نرمال نشان‌دهنده تأثیرپذیری غیرمنظم و بالای مدل سنج رسوب

8. Crawford, C. G. 1991. Estimation of suspended-sediment rating curves and mean suspended-sediment loads. *Journal of Hydrology* 129(1-4): 331-348.

9. Draper, N. R. Smith, H. and Pownell, E. 1966. *Applied regression analysis* New York: Wiley. 3: 217-220.

10. Fathabadi, A. and Rouhani, H. 2016. Sediment Curve Uncertainty Estimation Using GLUE and Bootstrap Methods. *Journal of Water and Soil* 30(2), 405-415. (In Persian)

11. Ferguson, R. I. 1987. Accuracy and precision of methods for estimating river loads. *Earth surface processes and landforms* 12(1): 95-104.

12. Ganji Noroozi, Z. Samani, J. M. V. and Marid, S. 2008. Uncertainty Analysis of Reservoir Sedimentation. *Iran-Water Resources Research* 4(1), 1-8. (In Persian)

13. Horowitz, A. J. 2002. The use of rating (transport) curves to predict suspended sediment concentration: a matter of temporal resolution. In *Turbidity and other Sediment Surrogates Workshop*. April.

14. Hudson, P. F. 2003. Event sequence and sediment exhaustion in the lower Panuco Basin, Mexico. *Catena* 52(1): 57-76.

15. Hyams, D. 2017. *CurveExpert Professional: documentation*.

16. Javadi Alinejad, M. Seyedian, S.M. Rouhani, H. and Fathabadi, A.H. 2017. Stochastic modeling of sediment yield using random forest and quantile regression. *Journal of Water and Soil Conservation* 24(4), 103-122. (In Persian)

17. Khazaie Poul, A. and Talebi, A. 2013. Investigation of Possibility of Suspended Sediment Prediction Using The Combination of Sediment Rating Curve and Artificial Neural Network (Case Study: Ghatorchai River, Yazdakan Bridge). *Quarterly Journal of Environmental Erosion Researches* 2(9), 73-82. (In Persian)

18. Lovejoy, S. B. Lee, J. G. Randhir, T. O. and Engel, B. A. 1997. Research needs for water quality management in the 21st century, a spatial decision support system. *Journal of Soil and Water Conservation* 52(1): 18-22.

19. Majd Abadi Farahani, F. 2001. Investigation of the length of the appropriate statistical period for estimating annual mean sediment and its relation with climate, geology and coverage. MSc. Dissertation. Faculty of Natural Resources. University of Tehran. (In Persian)

نسبت به تغییرات ضریب a در صدک‌های پایین بالاتر از صدک‌های بالا است در حالیکه این مسأله در مورد ضریب b دقیقاً برعکس است. تحلیل عدم قطعیت معادله سنج رسوب بر اساس نمونه‌برداری مونت کارلو نشان داد که $36/5$ درصد داده‌های مشاهداتی رسوب در محدوده باند عدم قطعیت $5-95$ درصد و $37/5$ درصد از داده‌های مشاهده‌ای رسوب در محدوده باند $2/5-97/5$ درصد قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه کم‌تر از 50 درصد داده‌های مشاهده‌ای در محدوده باند اطمینان قرار می‌گیرند می‌توان نتیجه‌گیری کرد که میزان عدم قطعیت معادله سنج رسوب بالاست. معادله سنج رسوب عدم قطعیت بسیار بالایی در رژیم جریان حداقل (کم‌تر از $0/3$ متر مکعب بر ثانیه) دارد بطوریکه در این نوع از جریان تقریباً هیچ یک از داده‌های مشاهده‌ای رسوب در محدوده تخمین باند عدم قطعیت مدل قرار نمی‌گیرند. در حالیکه میزان عدم قطعیت مدل در رژیم جریان‌های متوسط به بالا بسیار کم‌تر بوده و اکثر داده‌های مشاهده‌ای رسوب در محدوده باند تخمین قطعیت مدل قرار می‌گیرند. نتایج مطالعات فتح‌آبادی و روحانی [۱۰] نیز حاکی از وجود دامنه عدم قطعیت پهن‌تر در جریان‌های حداقلی است.

منابع

1. Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control* 19(6): 716-723.

2. Arabkhedri, M. Hakimkhani, SH. And Verdani, J. 20003. The validity of extrapolation methods in estimating annual suspended sediment (17 hydrometric stations of the country). *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources* 11(3), 123-132. (In Persian)

3. Asselman, N. E. M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology* 234(3): 228-248.

4. Badiei, H. 1998. Evaluating and presenting a model for estimating erosion and sediment using statistical analysis. MSc. Dissertation. Faculty of Natural Resources. University of Tehran. (In Persian)

5. Bayat, M. Ghaderi, K. and Ahmadi, M. 2015. Uncertainty Analysis of the Relationship of the Sediment Scale Curve Using Fuzzy Method (Case Study: Latian Dam). 14 th Iranian Hydraulic Conference, Zahedan. (In Persian).

6. Bozdogan, H. 1987. Model selection and Akaike's information criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. *Psychometrika* 52(3): 345-370.

7. Burnham, K. P. and Anderson, D. R. 2004. Multimodel inference understanding AIC and BIC in model selection.

29. Sadeghi, S. H. R. 2005. Development of Sediment Rating Curve Equations for Rising and Falling Limbs of Hydrograph Using Regression Concept. *Journal of Iran-Water Resources Research* 1(1), 101-103. (In Persian)
30. Sadeghi, S. H. R. and Singh, J. K. 2005. Development of a synthetic sediment graph using hydrological data. *J. Agri. Sci. Tech. (JAST)* 7: 69-77.
31. Shapiro, A. 2003. Monte Carlo sampling methods. *Handbooks in operations research and management science* 10: 353-425.
32. Slaets, J. I. Piepho, H. P. Schmitter, P. Hilger, T. and Cadisch, G. 2017. Quantifying uncertainty on sediment loads using bootstrap confidence intervals. *Hydrology and Earth System Sciences* 21(1): 571-588.
33. Tarras-Wahlberg, N. H. and Lane, S. N. 2003. Suspended sediment yield and metal contamination in a river catchment affected by El Niño events and gold mining activities: the Puyango River Basin, southern Ecuador. *Hydrological Processes* 17(15): 3101-3123.
34. Vali Samani, J. M. Delavar, M. and Radmehr, H. 2014. Uncertainty Analysis and Overtopping Risk Evaluation of Maroon Dam with Monte Carlo and Latin Hypercube Methods. *Journal of Water and Soil* 29(3), 517-527.
35. Vigiak, O. and Bende-Michl, U. 2013. Estimating bootstrap and Bayesian prediction intervals for constituent load rating curves. *Water Resources Research* 49(12): 8565-8578.
36. Vose, D. 2008. Risk analysis: a quantitative guide. John Wiley & Sons.
37. Yang, C. C. and Lee, K. T. 2017. Analysis of flow-sediment rating curve hysteresis based on flow and sediment travel time estimations. *International Journal of Sediment Research*.
20. Melesse, A. M. Ahmad, S. McClain, M. E. Wang, X. and Lim, Y. H. 2011. Suspended sediment load prediction of river systems: An artificial neural network approach. *Agricultural Water Management* 98(5): 855-866.
21. Memarian, H. Bilondi, M. P. and Rezaei, M. 2016. Drought prediction using co-active neuro-fuzzy inference system, validation, and uncertainty analysis (case study: Birjand, Iran). *Theoretical and Applied Climatology* 125(3-4): 541-554.
22. Memarian, H., Balasundram, S. K., Abbaspour, K. C., Talib, J. B., Boon Sung, C. T., & Sood, A. M. (2014). SWAT-based hydrological modelling of tropical land-use scenarios. *Hydrological Sciences Journal*, 59(10), 1808-1829.
23. Mohammadi Ostadkelayeh, A. 2002. Optimization of water-discharge relations and suspended sediment discharge in Hydrometric stations of Gorganroud River. MSc. Dissertation. University of Gorgan Agricultural Sciences and Natural Resources.
24. Mohammadi, S. Salajegheh, A. Ahmadi, H. Ghodosi, J. and Kiyani Rad, A. 2017. Estimating the Efficiency of Different Models of Estimating Suspended Load Using Gauge Curve Method in Sefid Rod River Basin. *Journal of Iran Natural Resources* 70(4), 977-990. (In Persian)
25. Mokhtari, A. 1997. Investigating the possibility of fitting the PSIAC experimental model for estimating sediment/erosion in the unguaged watersheds using GIS and remote sensing. MSc. Dissertation. Faculty of Natural Resources. University of Tehran. (In Persian)
26. Nistor, C. J. and Church, M. 2005. Suspended sediment transport regime in a debris-flow gully on Vancouver Island, British Columbia. *Hydrological processes* 19(4): 861-885.
27. Palisade. 2016. Risk analysis and Simulation add-in for Microsoft Excel. Palisade corporation, New York.
28. Rustomji, P. and Wilkinson, S. N. 2008. Applying bootstrap resampling to quantify uncertainty in fluvial suspended sediment loads estimated using rating curves. *Water resources research* 44(9).

*Abstract***Sensitivity and Uncertainty Analysis of Sediment Rating Equation Coefficients Using the Monte-Carlo Simulation (Case Study: Zoshk-Abardeh Watershed, Shandiz)**H. Memarian¹ and H. Dehghan²

Received: 07-06-2017 Accepted: 12-11-2018

The sediment load estimation is essential for watershed management and soil conservation strategies. The sediment rating curve is the most common approach for estimating the sediment load when the observed sediment records are not available. With regard to the measurement errors and the limitation of available data, the sediment rating curve has a degree of uncertainty which should be accounted for. Thus, in this work, a stochastic Monte-Carlo simulation approach was employed to measure the degree of uncertainty and to analyze the sensitivity of sediment rating equation to changing the coefficients "a" and "b" at the Zoshk hydrometric station. Results of the Monte-Carlo simulation using 5000 samplings showed that in the hydrologic regimes of normal high flow, normal low flow and normal, the contribution of the coefficient "a" to variance is significantly higher than the contribution of the coefficient "b" to sediment load variance. However, this condition is conversely for the hydrologic regime of maximum flow. The sensitivity analysis confirmed a higher sensitivity of the sediment rating equation to the coefficient "a" than that to the coefficient "b" in the hydrologic regimes of normal high flow, normal low flow and normal. However, in maximum flow, the sediment rating equation showed a higher non-linear and more regulated sensitivity to the changes of the coefficient "b" than "a". In all flow regimes, the coefficient "a" has a wider 95% uncertainty band, in comparison with that for the coefficient "b", which establishes a higher level of uncertainty. The sediment rating equation showed a high degree of uncertainty in the hydrologic regime of minimum flow (lower than 0.3 m³.s⁻¹). In this condition, all observed sediment records place outside the 95% and 97.5% of the uncertainty band. However, in medium and high flows, most of the observed sediment records are bracketed by the uncertainty band of 95% and 97.5%.

Keywords: Sediment rating curve, Uncertainty, Sensitivity analysis, Monte-Carlo simulation, Watershed

1. Corresponding Author and Assistant Professor, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Email: hadi_memarian@birjand.ac.ir

2. Assistant Professor, Water Science and Engineering Department, Kashmar Higher Education Institute