

## تعیین مناسب ترین روش اصلاحی بر آورد بار رسوب معلّق

### (مطالعه موردی: حوزه آبخیز تنگ بستانک)

احمدنوحه گر<sup>۱</sup>، محمد کاظمی<sup>۲\*</sup>، سیدجواد احمدی<sup>۳</sup>، حمیدغلامی<sup>۴</sup>، رسول مهدوی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت ۹۵/۲/۱۳ پذیرش ۹۵/۸/۲۳

### چکیده

برآورد صحیح از میزان رسوب حمل شده توسط سیستم آبراهه یک حوزه آبخیز در طراحی تمام پروژه‌های آبی و حفاظت خاک ضروری می‌باشد. با توجه به تبدیل لگاریتمی داده‌های دبی - رسوب، نیاز به اصلاح اریب زیاد معادلات رگرسیونی سنج رسوب می‌باشد. از این رو تحقیق حاضر درصدد ارزیابی عملکرد ۶ روش سازمان خواروبار و کشاورزی جهانی (FAO)، روش اصلاح گر (LS)، روش اداره عمران اراضی ایالات متحده (USBR)، برآوردکننده ناریب با حداقل واریانس (MVUE)، روش کائو(β) و تخمین گر شبه‌بیشینه درست‌نمایی (MQMLE) در برآورد رسوب معلّق در حالت بدون تقسیم‌بندی داده‌ها در حوزه‌ی آبخیز تنگ‌بستانک بود. بدین منظور از شاخص‌های مجذور مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی مدل (CE)، برآورد خطای نسبی (ER)، انحراف استاندارد عمومی (GSD)، شاخص نسبت اختلاف (f)، شاخص صحت (P) و تفاوت توزیع احتمالاتی رسوب مشاهداتی و برآوردی استفاده شد. ضریب تبیین رسوب معلّق مشاهداتی و برآوردی جهت نمایش ارتباط قوی میزان مشاهداتی و اصلاحی محاسبه گشت. نتایج نشان داد روش تخمین گر شبه‌بیشینه درست‌نمایی (LQMLE) با میزان مجذور مربعات خطای معادل ۳/۶۶۳، ضریب کارایی ۹۲/۱، انحراف استاندارد عمومی ۰/۵۵۶، نسبت اختلاف ۱/۰۱، برآورد درصد خطای نسبی ۳۳ و شاخص صحت ۱/۰۱ در کل بهترین مدل جهت برآورد رسوب معلّق حوزه و مدل‌های FAO و LS (با مجذور مربعات خطای ۶/۲۴ و ضریب کارایی ۷۶/۳)، (با مجذور مربعات خطای ۴/۸۷ و ضریب کارایی ۸۵/۷) ضعیف‌ترین مدل‌ها در برآورد رسوب معلّق حوزه می‌باشند. در مجموع روش‌های مختلف و ضرایب اصلاحی متفاوت نمودار سنج رسوب در حالت بدون تقسیم‌بندی داده‌ها می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در اکثر مدل‌ها روش‌های LQMLE و MVUE بهترین روش‌های برآورد رسوب معلّق بوده‌است. کلمات کلیدی: روش‌های اصلاحی، رسوب معلّق، ضریب کارایی، روش تخمین گر شبه‌بیشینه درست‌نمایی، تنگ بستانک

۱. استاد دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، Ahmad.nogegar@gmail.com

\*۲. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان نویسنده مسئول Mohamad.kazemi86@gmail.com، تلفن: ۰۹۱۷۱۰۶۳۳۰۴

۳. دانشیار پژوهشکده چرخه سوخت، سازمان انرژی اتمی، Sahmadi@gmail.com

۴. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان H.gholami@hormozgan.ac.ir

۵. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان Ra\_mahdavi2000@yahoo.com

## مقدمه

اطّلاع از نحوه دقیق فرسایش، انتقال رسوب و فرآیند رسوب‌گذاری در کشور چندان زیاد نیست و در بسیاری از موارد، بین اندازه‌گیری‌ها و برآوردهای انجام شده نیز اختلاف زیادی مشاهده می‌شود (۳۹). رودخانه‌ها همواره با پدیده‌های فرسایش و انتقال رسوب مواجه می‌باشند، بنابراین برآورد مقدار رسوب در پروژه‌های حفاظت خاک، طراحی و اجرای سازه‌های آبی، آبخیزداری و نیز بهره‌برداری از منابع آبی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است (۲۸ و ۳۲). به‌دلیل اهمیت و نقش پدیده انتقال رسوب در عرصه‌های مختلف مهندسی، تعیین کمیّت باررسوبی از دیرباز مورد توجه متخصصین مسائل رودخانه‌ای و مدیریت منابع آب قرار گرفته است (۱۵ و ۱۷) و همچنین برآورد بار معلق سالانه برای آبگیرهای رودخانه، طراحی و نگهداری کانال‌های آبیاری پایدار، حفاظت سواحل و لایروبی کانال‌ها حائز اهمیت است (۷). بار معلق شاخصی از رسوب-دهی کل سطح آبخیز است و علاوه بر این، بر اثر شستشوی اراضی حاصل‌خیز بالادست شکل می‌گیرد (۳۰) روش اندازه‌گیری بار معلق که بر پایه اندازه‌گیری غلظت رسوب معلق و دبی جریان استوار است، روش مطمئن ولی مستلزم اندازه‌گیری پیوسته هست که معمولاً تنها برای رودخانه‌های دائمی مقدور هست (۴۰). غالب ارزیابی‌های مقدار تولید رسوب حوزه‌های آبخیز با استفاده از نمونه‌برداری پراکنده، محدود و نامنظم از از رسوبات معلق رودخانه‌ها صورت

می‌گیرد (۲۵). در صورت نبود اندازه‌گیری واقعی رسوب، هیدرولوژیست‌ها از منحنی‌های سنجه-رسوب برای تعیین غلظت رسوب معلق استفاده می‌کنند و معمول‌ترین روش تخمین بار رسوب با استفاده از داده‌های غلظت رسوب معلق و دبی جریان هست (۱۸). از آنجایی که بیشتر حوزه‌های آبخیز در اکثر کشورها از جمله ایران فاقد ایستگاه رسوب‌سنجی هستند، استفاده از مدل-های تجربی و روش‌های آماری برآورد رسوب معلق ضروری به نظر می‌رسد. در حوزه‌های آبخیز عمل نمونه‌برداری از دبی جریان و رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری صورت می‌گیرد و برای تمامی دبی‌های جریان، نمونه‌برداری رسوب انجام نمی‌شود، بلکه میزان رسوب آن‌ها برآورد می‌گردد (۹). به دلیل عدم کارایی روش‌های منحنی سنجه‌رسوب، محققین و کارشناسان روش‌های متنوعی را ارائه کرده‌اند و ضرائب اصلاحی زیادی را ارائه کرده‌اند. به‌طور کلی روش برآورد بار معلق رودخانه‌ها به دو دسته تقسیم شده است. روش اول روش‌های مبتنی بر قوانین دینامیک و مکانیک سیالات که عموماً توسط متخصصین علم هیدرولیک ارائه شده است (۱۳) و دسته‌ی دوم روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری‌های مستقیم و تحلیل‌های آماری که بیشتر توسط صاحب‌نظران علم هیدرولوژی توصیه شده است (۳۳). در تخمین بار رسوب معلق رودخانه معمولاً از روش‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود که در این بین برآورد مستقیم، بهترین روش هست و برای این منظور باید آمار کاملی از غلظت رسوب

بینی شده ۲۵-۱۲ درصد بیشتر از مقادیر واقعی بوده است (۱). نتایج پژوهش نجفی نژاد و همکاران (۲۰۱۰) نشان می‌دهد که از بین انواع معادلات منحنی سنجه رسوب، رابطه توانی دارای بالاترین میزان همبستگی می‌باشد (۳۶). قورقی و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی نشان دادند که، تفکیک داده‌ها برای شرایط مختلف بارش و جریان، همگنی لازم را در داده‌ها برای ایجاد منحنی سنجه رسوب با دقت و صحت بالاتر ایجاد می‌کند (۱۴). در تحقیق حاضر سعی شده علاوه بر حالت دبی پایه، در مواقع بارش و سیلابی شدن سیستم آبراهه عملیات نمونه برداری دبی و رسوب معلق مدنظر قرار گیرد تا این مهم هرچه بیشتر در تحقیق حاضر مورد توجه قرار گرفته باشد و پیش از پیش اثر خود را نشان دهد. هدف تحقیق حاضر شناسایی و انتخاب بهترین مدل برآورد رسوب معلق با ۵ معیار آماری و بر اساس ۶ روش FAO، LS، USBR، MVUE،  $\beta$  و MQMLE در حوزه آبخیز تنگ بستانک بود.

### مواد و روش ها

#### مشخصات محدوده مورد مطالعه

حوزه‌ی مورد مطالعه در این بررسی، تحت عنوان حوزه آبخیز تنگ بستانک در حدود ۸۰ کیلو-متری شمال غرب شهرستان شیراز و در موقعیت جغرافیایی ۳۳° ۴۳' تا ۵۲° ۰۳' ۳۶' تا ۵۲° ۳۳' ۱۶' شرقی و ۳۰° ۲۵' ۱۸' تا ۳۰° ۲۵' ۱۸' شمالی واقع شده است. این حوزه از نظر تقسیمات حوزه های آبریز کشوری، جزء زیرحوزه آبریز نی ریز و شیراز بوده که آب‌های آن

و دبی جریان متناظر در دست باشد که در اغلب موارد به دلیل کمبود امکانات، نیروی انسانی، بالا بودن هزینه امکان برداشت داده رسوب و دبی به اندازه کافی مقدور نیست (۲۷). برزگری (۲۰۰۵) در مقایسه بین روش‌های USBR، جاماب و منحنی سنجه رسوب به ترتیب مقادیر رسوب معلق را کمتر از مقادیر واقعی برآورد می‌کنند و لذا در صورت استفاده از روش‌های موجود باید در سیستم نمونه‌گیری از رسوبات اصلاحاتی صورت گیرد (۶). خزائی و همکاران (۲۰۱۴) اعلام کردند که با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده بار معلق رسوب و به کمک معادله سنجه رسوب می‌توان مقدار رسوب انتقالی را برآورد نمود. در عین حال برآورد رسوب از طریق این معادله همواره با مقداری خطا همراه می‌باشد (۳۲). اسلمن<sup>۱</sup> (۲۰۰۰) به ارزیابی منحنی‌های سنجه رسوب در رودخانه راین و انشعابات آن پرداخت و خطاها و اشتباهات ارزیابی بارهای رسوبی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و دریافت که تفاوت‌های منحصربفرد در اشکال منحنی‌های سنجه رسوب به خصوصیات بار آبرفتی وابسته است. وی به منظور انتخاب بهترین مدل از شاخص حداقل میانگین مربعات خطا بهره جست (۵). آچیت و سیلویین<sup>۲</sup> (۲۰۰۷) در بررسی انتقال رسوب معلق در حوزه‌های آبخیز نیمه-خشک وادی عبد در کشور الجزایر، نشان دادند که با استفاده از روابط رگرسیونی مقادیر پیش-

1 Asselman

2 . Achite, , Sillvain

۹۳/۷/۳۰) و از تاریخ ۹۳/۸/۱ الی ۹۴/۱/۳۱ (در مدت ۶ ماه بارندگی حوزه و سیلابی شدن رودخانه) به شکل روزانه اندازه‌گیری مستقیم دبی جریان آب و دبی رسوب متناظر آن با روش انتگراسیون عمقی انجام گرفت.

جدول ۱- محدوده داده‌های مورد استفاده در دوره آماری

پارامتر	دبی جریان (متر مکعب بر ثانیه)	دبی رسوب (تن در روز)
حداکثر	۱۰/۶	۱۰۶/۸۵
حداقل	۰/۰۱	۰/۰۲۸
میانگین	۰/۷۷۹	۹/۱۱۷
انحراف از معیار	۱/۳۶۲	۱۷/۴

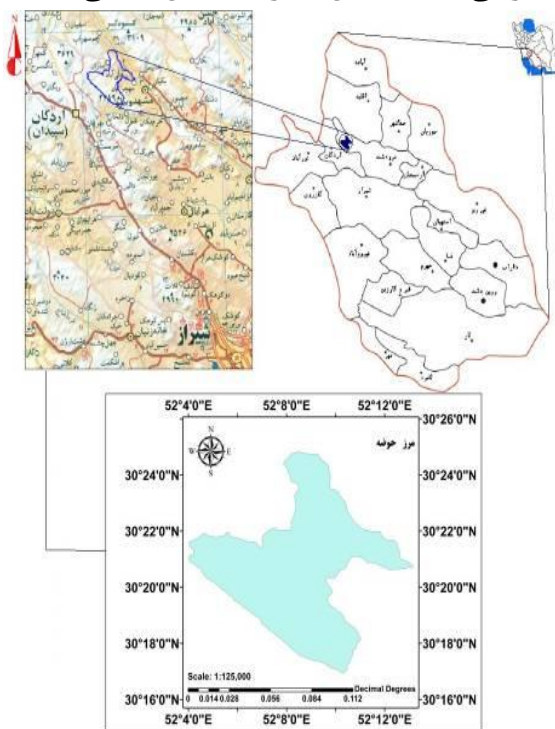
**روش‌های هیدرولوژیکی برآورد بار معلق رودخانه‌ها:** در روش هیدرولوژیکی ابتدا در ایستگاه‌های رسوب سنجی غلظت مواد معلق (C) بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و گذر حجمی متناظر با آن (Q<sub>w</sub>) بر حسب متر مکعب بر ثانیه طی یک دوره آماری طولانی مدت اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از رابطه ۱ بار معلق (Q<sub>s</sub>) بر حسب تن در روز محاسبه می‌شود.

رابطه ۱:

$$Q_s = 0.0846 \times C \times Q_w$$

در واقع از طریق داده‌های هیدرومتری و رسوب سنجی و با توجه به این که دبی رسوب تابعی از دبی جریان می‌باشد، رابطه‌ای بین Q<sub>s</sub> و Q<sub>w</sub> استخراج شده و با استفاده از ارقام درازمدت گذر حجمی رودخانه، بار معلق درازمدت رودخانه برآورد می‌گردد. در ادامه به معرفی روش‌های

پس از وارد شدن به رودخانه کر، وارد دریاچه بختگان می‌شود میانگین بارش سالانه این حوزه ۶۰۹ میلی‌متر می‌باشد، شیب متوسط وزنی حوزه ۰/۲۸٪، این حوزه طبق روش اقلیم‌نمای دومارتن اصلاح شده دارای اقلیم مدیترانه‌ای سرد می‌باشد. مساحت حوزه مذکور ۸۱/۷ کیلومتر مربع می‌باشد و کاربری‌های آن شامل اراضی کشاورزی، اراضی باغی، اراضی جنگلی و مراتع هستند. سازندهای این حوزه، کواترنر، پابده‌گورپی، آسماری، کشکان، رازک و بختیاری می‌باشد. شکل (۱)، موقعیت منطقه و راه‌های دسترسی به آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز تنگ‌بستانک و راه‌های دسترسی به آن

برای انجام این مطالعه در خروجی حوزه آبخیز تنگ‌بستانک علاوه بر دبی پایه (۹۳/۲/۱) الی

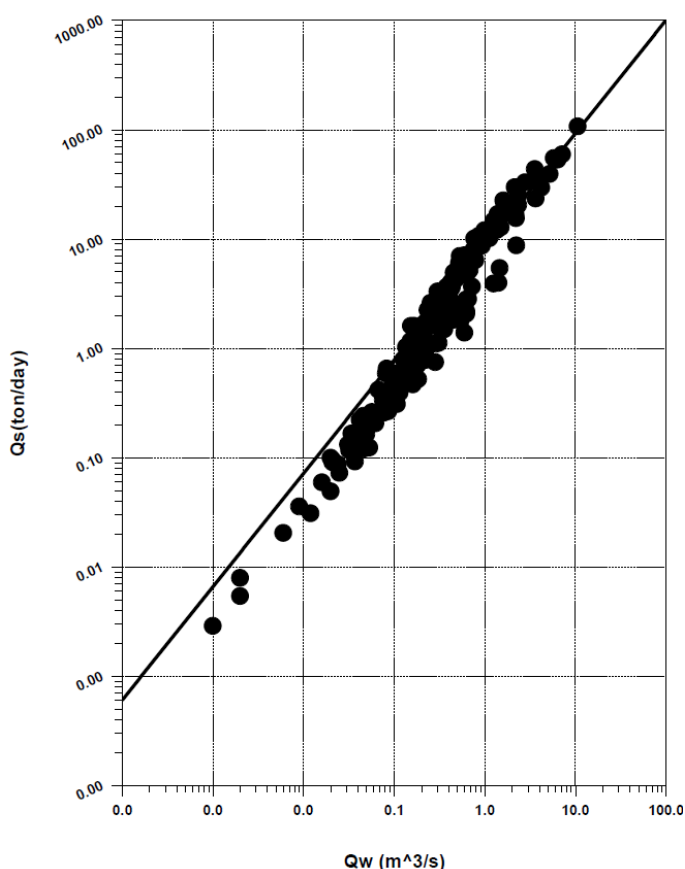
گوناگون هیدرولوژیکی برآورد رسوب معلق پرداخته می شود. روش های برآورد رسوب از نظر نوع منحنی سنجه و استفاده از دبی جریان، به منحنی سنجه یک خطی، چندخطی و حدواسط دسته ها تقسیم می شوند. در این تحقیق از منحنی سنجه تک خطی استفاده شد.

### روش اداره عمران اراضی ایالات متحده (USBR)<sup>۱</sup>

در این روش پس از تعیین غلظت نمونه های رسوب، با اطلاع از مقدار آب دهی رودخانه در زمان برداشت نمونه، یک رابطه ریاضی (معمولاً غیرخطی) بین بار رسوبی معلق رودخانه و آب دهی آن برقرار می گردد. در عمل با توجه به داده های دبی آب و دبی رسوب متناظر با آن، هر دو سری داده به صفحه مختصات لگاریتمی منتقل شده و خط بهترین برازش بر مبنای روش حداقل مربعات<sup>۲</sup> از میان آن ها عبور داده می شود و رابطه ای به صورت رابطه ۲ که به منحنی سنجه رسوب معروف است بین دو متغیر برقرار می گردد. در مختصات لگاریتمی مقدار ضریب  $a$  فاصله قائم محل تقاطع خط بهترین برازش با محور قائم تا مبدأ مختصات و مقدار  $b$  برابر با شیب خط بهترین برازش است (۱۴۳۹).

$$Q_s = aQ_w^b \quad \text{رابطه ۲}$$

1. United State Bureau of Reclamation
2. Least Square Method



شکل ۲- دبی آب و دبی رسوب متناظر با آن، در صفحه مختصات لگاریتمی

### روش سازمان خوار و بار جهانی کشاورزی (FAO)<sup>۳</sup>

جونز و همکاران (۱۹۸۱) برای نزدیک کردن مقادیر برآورد شده از منحنی سنجه رسوب به مقادیر مشاهده شده، توصیه نموده اند که در روابط دبی آب- دبی به جای ضریب  $a$  از ضریب  $\hat{a}$  طبق رابطه ۳ استفاده شود (۲۱).

$$\hat{a} = \frac{\overline{Q_s}}{\overline{Q_w^b}} \quad \text{رابطه ۳}$$

3 Food and Agricultural Organization

رابطه ۷:

که در آن  $L_{QMLE}$  رسوب برآورد شده از روش QMLE،  $L_{RC}$  رسوب برآورد شده از منحنی سنجه یک خطی و  $S^2$  مجدور میانگین اشتباه رگرسیون می‌باشد (۹).

### روش اصلاح گر<sup>۳</sup>

یک روش غیرپارامتری بوده که شکل کلی آن به صورت رابطه ۸

$$L_s = L_{RC} \times \frac{\sum_{i=1}^N \exp(e_i)}{N} \quad \text{است:} \quad \text{رابطه ۸:}$$

که در آن  $L_s$  رسوب برآورد شده از روش اصلاح-گر می‌باشد،  $L_{RC}$  رسوب برآورد شده از روش USBR می‌باشد،  $e_i$  حداقل مربعات باقیمانده با استفاده از معادله منحنی سنجه بوده و در واقع تفاوت لگاریتم طبیعی رسوب مشاهده‌ای و برآوردی می‌باشد (۲۴).

### روش $\beta$

این روش که توسط کائو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۵) برای تصحیح منحنی‌های سنجه رسوب رودخانه-های تایوان ارائه شده از ضریب  $\beta$  برای محاسبه فاکتور اصلاحی استفاده می‌کند. این ضریب از تقسیم مجموع باقی مانده‌ها بر مجموع مقادیر برآوردی مدل رگرسیونی به

که در آن  $Q_s^-$ ، متوسط دبی رسوب،  $b$  همان ضریب معادله USBR،  $Q_w$  متوسط دبی جریان متناظر با آن می‌باشد.

### روش برآوردکننده نااریب با حداقل واریانس<sup>۱</sup> (MVUE)

در این روش تصحیح اریب برای هر یک از مقادیر دبی روزانه با استفاده از رابطه‌های ۴ تا ۶ بیان شده است:

$$L_{MVUE} = L_{RC(t)} \times g_m \quad \text{رابطه ۴:}$$

$$g_m = \frac{m+1}{2m} \times |(1 - V \times S^2)| \quad \text{رابطه ۵:}$$

$$V = \frac{(\ln(Q_x) - \bar{Q})^2}{Q_{var}} + \left[\frac{1}{N}\right] \quad \text{رابطه ۶:}$$

در این معادلات  $L_{MVUE}$  رسوب برآورد شده از روش MVUE،  $L_{RC(t)}$  بار رسوبی برآورد شده از منحنی سنجه برای هر روز  $t$ ،  $g_m$  تابع فینی،  $Q_x$  میانگین دبی جریان روزانه،  $N$  تعداد داده،  $Q_{var}$  واریانس دبی‌های جریان،  $\bar{Q}$  متوسط دبی،  $S$  اشتباه استاندارد منحنی سنجه و  $m$  تعداد پارامترهای تابع توزیع حاکم بر داده‌های دبی جریان می‌باشد (۱۱).

### روش تخمین‌گر شبه‌بیشینه درست‌نما<sup>۲</sup> (QMLE)

این روش بر معادله کلی ارایه شده به صورت رابطه ۷ استوار

$$L_{QMLE} = L_{RC} \times \exp\left(\frac{S^2}{2}\right) \quad \text{است:}$$

3. Smearing

4. Kao

1. Minimum Variance Unbiased Estimator

2. Quasi-Maximum Likelihood Estimator

در رابطه‌های ذکر شده، RMSE ریشه میانگین مربعات خطا، n تعداد داده‌ها، Qs مقادیر رسوب مشاهده شده، Qsi مقادیر رسوب برآورد شده،  $\overline{Q_s}$  میانگین رسوب اندازه‌گیری شده،  $\overline{Q_w}$  دبی جریان و  $\overline{Q_w}$  میانگین دبی جریان، R ضریب همبستگی، r نسبت اختلاف و GSD انحراف استاندارد عمومی، SSCe مقدار رسوب معلق برآوردی و SSCo مقدار رسوب معلق مشاهداتی (تن در روز) می‌باشد.

مقدار بهینه شاخص‌های RMSE و GSD برابر صفر می‌باشد، در حالی که مقدار بهینه شاخص آماری ضریب همبستگی ۱۰۰ درصد می‌باشد. همچنین هرچه میزان شاخص نسبت اختلاف (r) و شاخص صحت (P) به یک نزدیک‌تر باشد مدل از دقت بیشتری برخوردار خواهد بود (۳۹ و ۳۲).

$$CE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (S_{y_o} - S_{y_e})^2}{\sum_{t=1}^T (S_{y_o} - \bar{S}_{y_o})^2} \quad \text{رابطه ۱۵:}$$

همچنین در رابطه ۱۵ شاخص ضریب کارایی مدل مشاهده می‌شود که در این رابطه  $S_{y_o}$  مقدار رسوب مشاهداتی و  $S_{y_e}$  مقدار رسوب برآوردی در دوره آماری مربوطه و به تعداد روزها می‌باشد (۳۲).

برای مقایسه دقت معادلات برآورد رسوب با میزان رسوب مشاهده شده در طول مدت نمونه برداری عملی از شاخص آماری میانگین درصد خطای نسبی طبق رابطه ۱۶ استفاده گردید.

دست می‌آید و می‌تواند مثبت یا منفی باشد (۳۰). در نهایت مقدار رسوب معلق از رابطه ۹ و ۱۰ محاسبه می‌گردد:

$$CF_{\beta} = 1 + \beta \quad \text{رابطه ۹:}$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N (\varepsilon_i)}{\sum_{i=1}^N a Q_w^b} \quad \text{رابطه ۱۰:}$$

در رابطه بالا مقادیر پارامترها مطابق روش‌های قبلی محاسبه می‌شوند. این روش در مورد پیش‌بینی رسوب دبی‌های بالا خطای مقادیر برآوردی را به طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد.

#### ارزیابی مدل‌ها

برای ارزیابی مدل‌های به دست آمده از روش‌های شش‌گانه فوق از شاخص‌های مختلف ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup>، ضریب همبستگی، نسبت اختلاف، انحراف استاندارد عمومی<sup>۲</sup> و خطای

نسبی برآورد به شرح ارایه شده در معادلات ۱۱ تا ۱۴ استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Q_s - Q_{si})^2} \quad \text{رابطه ۱۱:}$$

$$r = \frac{\sum Q_{si}}{\sum Q_s} \quad \text{رابطه ۱۲:}$$

$$GSD = \frac{RMSE}{\overline{Q_{si}}} \quad \text{رابطه ۱۳:}$$

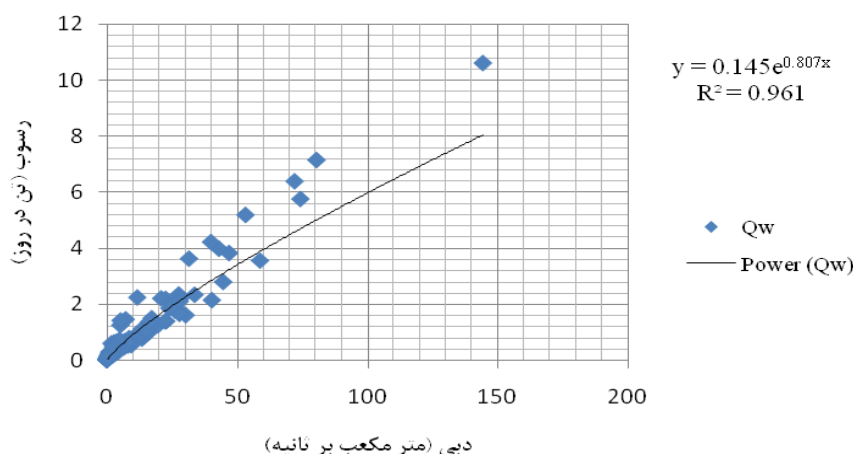
$$P = \left[ \frac{\sum_{n=1}^n \left( \frac{SSC_{\varepsilon}}{SSC_o} \right)}{N} \right] \quad \text{رابطه ۱۴:}$$

1. Root Mean Square Error
2. General Standard Deviation

یکسان و عدم اختلاف احتمالاتی فاحش نتایج مدل برآورد کننده قابل قبول خواهد بود.

### بحث و نتایج

بعد از تجزیه و تحلیل اولیه داده‌ها و انجام آزمون‌های آماری آماده‌سازی داده‌ها، با برآزش معادلات منحنی سنجه بار معلق برای داده‌های متناظر دبی - رسوب و محاسبه ضرایب مربوط به روش‌های پارامتری و ناپارامتری، شاخص‌های آماری برای هر یک از مدل‌ها محاسبه شد. نمودار بهترین خط رگرسیونی بین مقادیر دبی و رسوب در شکل زیر (۳) ارائه شده است.



شکل ۳ - بهترین خط رگرسیونی بین مقادیر دبی و رسوب

همان‌طور که ذکر گردید به دلیل میزان اریب ناشی از تبدیل لگاریتمی در روابط منحنی سنجه محققان ضرایب اصلاحی مختلفی را برای بهبود روابط دبی-رسوب ارائه کرده‌اند که در تحقیق حاضر به بررسی این ضرایب در حالت معمولی پرداخته شده است. وروانی و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که کاربرد ضریب

هرچه مقدار این معیار کم‌تر باشد، نشان دهنده این است که معادلات مربوطه از دقت بالاتری برخوردار است.

$$RE_i = \left| \frac{Q_s - Q_{Si}}{Q_s} \right| \times 100 \quad \text{رابطه ۱۶:}$$

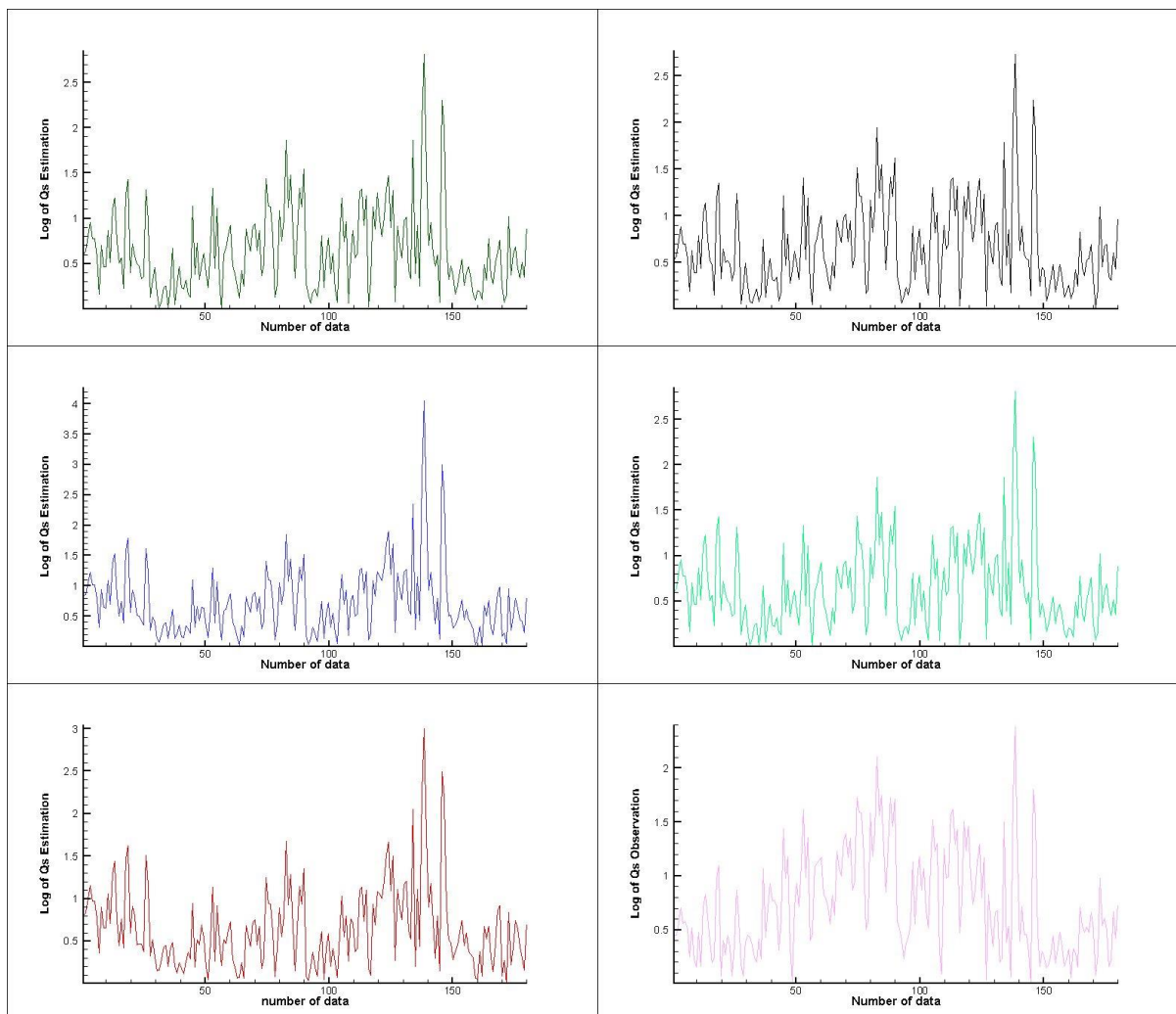
Rei درصد خطای نسبی هربرآورد می‌باشد،  $Q_s$  میزان رسوب مشاهده شده و  $Q_{Si}$  میزان رسوب برآورد شده می‌باشد (۳۹). قابل ذکر است که بعد از انتخاب بهترین روش با ملاک‌های ارزیابی که در بالا شرح داده شد، بهترین تابع چگالی احتمال بروی داده‌های رسوب معلق مشاهداتی و برآوردی برآزش داده شد و نمودار اختلاف تابع احتمالاتی آن‌ها استخراج شد. در صورت توزیع

همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود رابطه برتر در حالت معمولی داده‌ها (بدون در نظر گرفتن حد واسط داده‌ها) رابطه نمایی و با ضریب تبیین ۰/۹۶ می‌باشد. صادقی و همکاران (۲۰۰۶) ضریب تبیین کمتر از ۰/۵۰ را دلیل بر بی‌کفایتی رابطه بین دبی و رسوب در معادلات منحنی سنجه گزارش کردند (۲۷).



از جمله مجذور مربعات خطا، ضریب کارایی، نسبت اختلاف، انحراف استاندارد عمومی که دارای بهترین قابلیت پیش‌بینی بودند اقدام گردید. در آخر نیز درصد خطای نسبی هربرآورد محاسبه گشت. در شکل ضریب مقادیر اصلاحی برای روش‌های ذکر شده نشان داده شده‌است.

حداقل واریانس ناریب باعث افزایش دقت و صحت منحنی‌های سنج رسوب می‌شوند (۳۸). با برقراری رابطه بین مقادیر متناظر دبی آب و رسوب بر اساس ۶ روش (FAO، USBR، LMVUE، LQMLE،  $\beta$  و LS) اقدام به انتخاب مدل مناسب بر اساس معیارهای ارزیابی مدل‌ها



شکل ۴- مقادیر ضرائب اصلاحی در حالت معمولی به ترتیب برای روش‌های FAO، USBR، LQMLE، LMVUE، LS و رسوب معلق مشاهداتی

مربعات خطا و ضریب کارایی در جداول ۳ و ۲ ارائه شده است.

محاسبه ضرایب اصلاحی (FAO، USBR)، LMVUE، LQMLE و LS) با معیارهای مجذور

جدول ۲- نتایج ضرائب خطا و کارایی در حالت معمولی

روش	مجذور مربعات خطا (RMSE)	ضریب کارایی (CE)
USBR	۳/۸۵	۹۰/۹
FAO	۶/۲۴	۷۶/۳
LMVUE	۳/۵۴۱	۹۲/۳
LQMLE	۳/۶۶۳	۹۲/۱
$\beta$	۳/۹۵	۹۰/۵۱
LS	۴/۸۷	۸۵/۷

جدول ۳- نتایج انحراف استاندارد عمومی و شاخص نسبت اختلاف

روش	انحراف استاندارد عمومی (GSD)	نسبت اختلاف (r)
USBR	۰/۵۶۵	۱/۰۱۹
FAO	۰/۷۶۵	۱/۲
LMVUE	۰/۵۵۹	۰/۹۱۹
LQMLE	۰/۵۵۶	۱/۰۱
$\beta$	۰/۵۷۳	۱/۰۲
LS	۱/۱۱	۰/۶۴۷

مقدار  $b$  و  $\hat{a}$  برای روش فائو به ترتیب برابر  $1/191$  و  $12/43$  می‌باشد. همچنین مقدار  $a$  و  $b$  در روش اداره عمران اراضی ایالات متحده آمریکا برابر  $1/191$  و  $10/27$  می‌باشد. محمدی استاد کلایه (۲۰۰۷) (۳۵)، عرب‌خدری و همکاران (۲۰۰۱) (۲)، حیدرنژاد و همکاران (۲۰۰۷) (۱۷) اعلام کردند که روش‌های LQMLE و LRC بهترین روش‌های محاسبه رسوب معلق بوده‌است. نتایج تحقیق حاضر نیز گواه این مهم می‌باشد. همچنین قابل ذکر است که در روش فائو وجود داده‌های استثنایی با مقادیر رسوب زیاد در زوج متناظر دبی-آب-دبی رسوب تأثیر زیادی روی افزایش ضریب  $\hat{a}$  به وجود می‌آورند. زیرا در روش فائو تغییرات مخرج کسر معمولاً محدودتر از صورت کسر است که این امر از نقاط ضعف روش فائو هست (۳۹). آچیت و سیلویین

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌گردد نزدیک‌ترین مقدار شاخص نسبت اختلاف به یک، مربوط به روش LQMLE می‌باشد. همچنین قابل ذکر است که هر چه مقدار انحراف استاندارد عمومی کمتر باشد، مدل مناسب‌تر خواهد بود. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود کمترین مقدار این معیار مربوط به روش LQMLE و LMVUE می‌باشد. در جدول ۲ بیشترین ضریب کارایی مدل مربوط به LMVUE و سپس LQMLE می‌باشد و از این لحاظ در رتبه دوم قرار دارد و کمترین ضریب کارایی مدل مربوط به روش FAO است. همچنین کمترین مقدار مجذور مربعات خطا مربوط به روش LMVUE و سپس LQMLE می‌باشد و روش FAO بیشترین میزان مجذور مربعات خطا را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که

برداری مستقیم دبی و رسوب ارائه شده است. بدین ترتیب که برای روش FAO (فائو) بیشترین و برای روش LQMLE کمترین مقدار می باشد.

(۲۰۰۷) نشان دادند که مقادیر پیش بینی شده توسط روش USBR سالانه، حدوداً ۲۰ تا ۲۵ درصد بیشتر از مقادیر واقعی است (۱). در جدول ۴ همچنین درصد خطای نسبی هربرآورد (RE) مدل های مورد بررسی در نمونه -

جدول ۴ - درصد خطای نسبی برآورد در نمونه برداری مستقیم دبی و رسوب

شاخص صحت	درصد خطای نسبی (RE)	روش
۰/۶	۳۴	USBR
۰/۷۵	۴۲	FAO
۰/۸۹	۳۶	LMVUE
۱/۰۱۵	۳۳	LQMLE
۱/۰۸	۶۳/۴۳	$\beta$
۰/۶۹	۳۸	LS

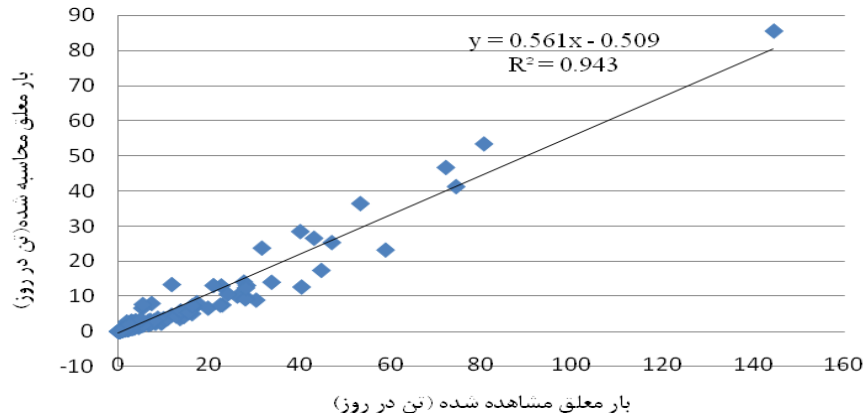
متوسط دبی رسوب حوزه در سال برابر با ۱۰/۰۴ LQMLE بدست آمد. جدول ۵ این مهم را نشان می - هست که نزدیک ترین مقدار به این برآورد را روش دهد.

جدول ۵- متوسط لگاریتم دبی رسوب سالانه برای هریک از روش های مورد بررسی (تن در روز)

روش	مقدار رسوب متوسط سالانه (دبی رسوب بر حسب تن در روز)
مشاهداتی	۱۰/۰۴
USBR	۹/۲۲
FAO	۹/۰۳۷
LMVUE	۹/۶۶۱
LQMLE	۱۰/۰۰۵
$\beta$	۱۳/۷۷
LS	۸/۹۱۳

به ترتیب مقادیر رسوب معلق را کمتر از مقادیر واقعی برآورد می کنند. نتایج تحقیق حاضر نیز نشان می دهد روش USBR مقادیر برآوردی را کمتر از مقادیر واقعی نشان می دهد (۶).

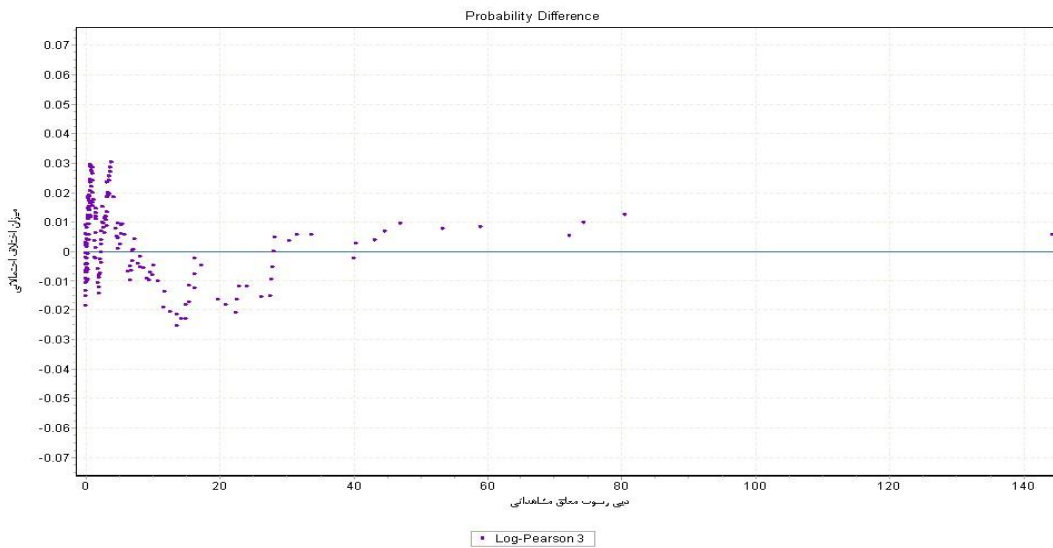
با توجه به جمیع نتایج بالا همان گونه که مشاهده می - شود روش LQMLE روش مناسب و مقبولی از بین دیگر روش ها می باشد. بر این اساس بین مقدار دبی رسوب مشاهداتی و نیز مقدار برآوردی حاصل از مدل فوق رابطه برقرار شد تا میزان این ارتباط مشخص گردد. شکل ۵ این ارتباط را با ضریب تبیین مربوطه نشان می دهد. برزگری (۲۰۰۵) اعلام کرد که در مقایسه بین روش های USBR، جاماب و منحنی سنج رسوب



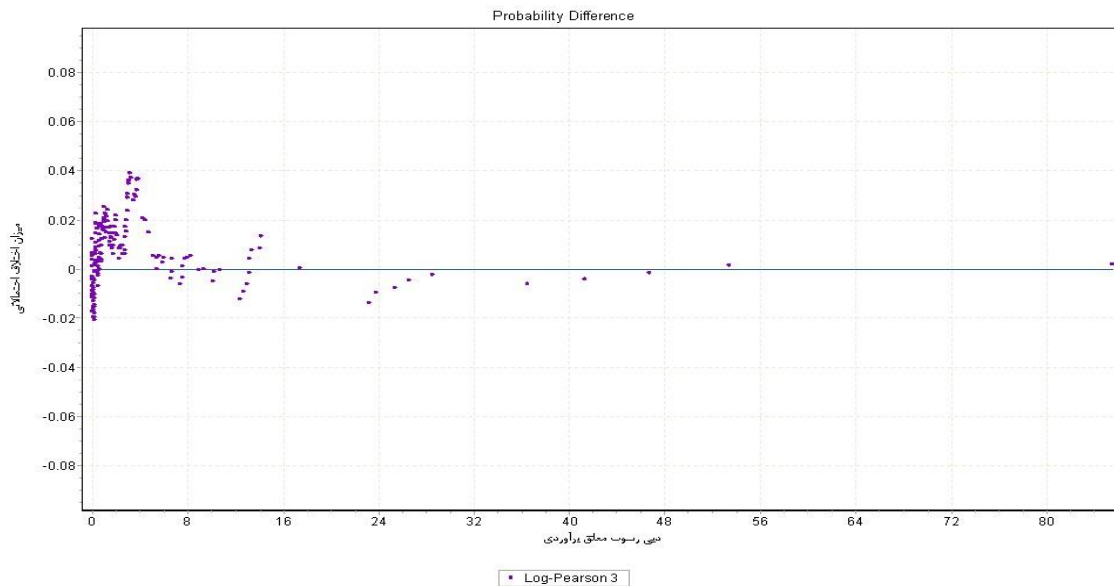
شکل ۵- مقایسه مقادیر بار معلق مشاهده شده و محاسبه شده

که در شکل مشخص شده تابع چگالی احتمال آنها یکی بوده و میزان اختلاف احتمالاتی چشم‌گیری در نمودار پراکنش داده‌ها مشاهده نمی‌شود.

همچنین اشکال ۶ و ۷ میزان اختلاف احتمالاتی بهترین توزیع برازش یافته روی داده‌های رسوب مشاهداتی و همچنین روش LQMLE را نشان می‌دهد. همان‌گونه



شکل ۶- دبی رسوب معلق مشاهداتی و اختلاف توزیع احتمالاتی آن



شکل ۷- دبی رسوب معلق برآوردی بروش LQMLE و اختلاف توزیع احتمالاتی آن

همچنین قابل ذکر است که، مدل  $\beta$  ممکن است در مورد داده‌های حد واسط عملکرد خوبی داشته باشد و اختلاف را بین مقادیر برآوردی و مشاهداتی در دبی‌های بالا کم کند، اما در مورد حالت معمولی چنین عملکردی ندارد و خطای نسبی بالایی دارد. همان‌گونه که نتایج تحقیق حاضر نشان داد مدل کائو نتوانسته‌است برای داده‌های معمولی نتایج قوی و بهتری نسبت به سایر مدل‌ها کسب نماید.

رابطه اداره احیای اراضی امریکا (USBR) به دلیل داشتن اریب در بیش‌تر مواقع نتوانسته غلظت رسوب در دبی‌های مختلف جریان را به خوبی نشان دهد، اریب<sup>۱</sup> در واقع باعث شده تا مقدار باقی‌مانده‌ها (اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای با مقادیر محاسباتی) توزیع نرمالی نداشته باشد و مقدار آن بیش‌تر از صفر شود (۳۰). اریب

کیا و عمادی (۲۰۱۳) اعلام کردند که نتایج مدل سالانه نسبت به حالات روزانه، ماهانه و فصلی به مدل مناسب ایستگاه مربوطه (ایستگاه قرآن) نزدیک‌تر است، چون داده‌ها بر اساس میانگین سالانه دبی جریان و دبی رسوب تفکیک شده‌اند (۳۱). بنابراین آمار دبی سالانه در بین بقیه حالات مناسب‌تر هست. همچنین نامبردگان اعلام کردند که دبی در حالت‌های سیلابی و غیر حالت پایه که تأثیر بیشتری بر میزان رسوب خروجی دارند و آن‌گاه شاهد حداقل تأثیر بر میزان فرسایش و مقدار رسوب معلق نخواهیم بود (۲۶). موارد یاد شده همچنین نتایج تحقیق حیدرنژاد و همکاران (۲۰۰۷) در برآورد بار رسوب دو ایستگاه هیدرومتری سیرا و بیلقان حوزه آبخیز سد مخزنی امیرکبیر مبنی بر در نظر گرفتن وقایع سیلابی و ماه‌های پربارش بر خلاف حالت جریان پایه را تصدیق می‌کند (۱۷).

<sup>1</sup> Bias

داده‌ها بوده و باعث می‌شود رسوب برآوردی خطای زیادی داشته باشد. همان‌گونه که نتایج تحقیق حاضر نشان داد این روش نتوانسته‌است نتایج ارزیابی قابل‌قبولی در مقایسه با سایر مدل‌ها کسب نماید و دلایل ضعف این مدل در بالا آورده شده‌است.

منحنی سنجه از دو عامل منشأ می‌گیرد. عامل اول به علت تغییر شکل معادله از حالت لگاریتمی به حالت طبیعی مدل رگرسیون خطی است که در اصل مربوط به ذات منحنی سنجه می‌باشد. عامل دوم اریب، ناشی از عمل برون-یابی برای برآورد رسوب دبی‌های بالاست (۲۳). که در ارتباط با کمیت و کیفیت

## References

1. Achite, M., and Sillvain, O. 2007. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, *J. Hydrol.* 84: 3. 187-202.
2. Arabkhedri, M. 2001. Methods of increasing accuracy for estimating of suspended sediment transport (workshop). Proceeding of National Conference on Land Management- Soil Erosion and Sustainable Development, Arak, Iran. Pp: 711-727. (In Persian).
3. Arabkhedri, M. 2001. Certitude increase methods of estimating rivers suspended sediment. P 123-132, In: Land manegment-soil erosion and resistant development congress.(In Persian).
4. Arabkhedri, M., Hakimkhani, Sh., Valikhojeini, A. 1999. Necessity for revised methods in estimating suspended load of rivers, *Pajouhesh and Sazandegi*, 39:37-42.(In Persian).
5. Asselman, N.E.M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves.*Journal of Hydrology.* 234: 234-248.
6. Barzegar, F., 2005. A Comparison of Methods of suspended sediment, Master's dissertation Department of Natural Resources, Tehran University, 120 pages.(In Persian).
7. Cigizoglu, K. 2003. Estimation and forecasting of daily suspended sediment data by multi-layer perceptrons. *Advances in Water Resources.* 27: 185-195.
8. Cohn, T.A., Delong, L.L., Gilory, E.J., Hirsch, R.M., and Wells, D.K. 1989. Estimating constituent loads. *Water Resources Research*, 25: 5. 937-942.
9. Dastorani, J., Babaei, A., Rezaei Rad, N., 2007, Application of flow and sediment discharge data on the effect of earthquakes on the Sefidrood watershed sediment, 10<sup>th</sup> Congress of Soil Science Iran, Karaj, Tehran University College of Agriculture and Natural Resources.(In Persian).
10. Duan, N. 1983. Smearing estimate, a nonparametric retransformation method. *J. Amer. Statistical Association*, 78: 383. 605-610.
11. Endreny, Th., and Hasset, J. 2005. Robustness of pollutant loading estimators for sample size reduction in a suburban watershed. *Intl. J. River Basin Manage.* (IAHR & INBO), 3: 1. 53-66.
12. Ferguson, R.I. 1987. Accuracy and precision of methods for estimating river loads, *Earth Surface Processes and Land Forms*, 12: 95-104.

13. Gomshi, M., Torabi Podeh, H., 2002, Evaluation of formulas for bed-load transport in Khuzestan rivers, *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, pp 13-30. (In Persian).
14. Ghoraghi, J.H., Habbib Nejad, M., Vahabzadeh, G., Khaledi Darvishan, A.V., 2013, Efficiency of Different Data Separation Methods to Increase the Accuracy of Sediment Rating Curve; Case Study A Part of the Sefidrood Watershed, *Journal of Irrigation and Water Management*, (2), NO7, pp 97-111. (In Persian).
15. Guide erosion and sediment studies in Accounting rivers, 2007, Publication No. 383, vice president of strategic planning and monitoring.
16. Heydarnezhad, M., Golmaei, S.H., Mosaedi, A., and Ziatabar ahmadi, M.KH. 2006. Correction of sediment rating curve and estimating of suspended load in Telezang station. P 243-252, In: The 7rd Civil Engineering National Conference. Tehran. (In Persian).
17. Heydar Nejad, M., 2007. Presentation Optimization Model in sediment deposition volume reservoir dam in Iran, Karaj and Dez dams, Master's dissertation Department of Natural Resources, University of Agricultural Sciences and Natural Resources Sari, 93 pages. (In Persian).
18. Horowitz A. J. 2003. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes* 17: 3387-3409.
19. Jansen, P. P., 1983, "Principles of river engineering", Pitman Pub. Inc., England.
20. Jansson M.B. 2002. Determining sediment source areas in a tropical river basin- Costa Rica. *Catena* 47: 63-84.
21. Jones, K.R., Berney, O., Carr, D.P., and Barret, E.C. 1981. Arid zone hydrology for agricultural development. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 37: 271.
22. Iadanza, C., and Napolitano, F. 2006. Sediment transport time series in the Tiber River. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31: 1212-1227.
23. Thomas, R.B. 1985. Estimating total suspended sediment yield with probability sampling. *Water Resources Research*. 21: 1381-1388.
24. Pavanelli, D., and Bigi, A. 2004. Suspended sediment concentration for three apennine monitored basins, particle size distribution and physical parameters. P 537 -544, In: The Agro Environment Congress, Venice, Italy.
25. Pandey, A., Chowdary, V.M., and Mal, B.C. 2009. Sediment yield modeling of an agricultural watershed using MUSLE, remote sensing and GIS. *Paddy Water Environ*. 7: 105-113.
26. Sadeghi, S.H.R. 2004. Producing sediment rating curve equation for rising and falling limb of hydrograph using regression concept, *J. Iran. Water Resour. Res.* 1: 1. 101-103. (In Persian).
27. Sadeghi, S.H.R., Tofighi, B., Mahdavi, M., 2006, Sediment estimation modeling in Zarrinderakht watershed, *Iranian j. Natural Res.* Vol 58, No 4, pp 759-768. (In Persian).
28. Sadeghi, S.H.R., Mizuyama, T., Miyata, S., Gomi, T., Kosugi, K., Fukushima, T., Mizugaki, S., and Onda, Y. 2008. Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed. *Geoderma*, 144: 198-211.

29. Sadeghi, S.H.R., Fazli, S., and Khaledi Darvishan, A. 2010. Evaluation of efficiency sediment rating curve in Khamesan typically watershed. In: The 4<sup>th</sup> National Seminar on Erosion and Sediment. Noor, Iran, 6p. (In Persian)
30. Kao, Sh., Lee, T., and Milliman, J.D. 2005. Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from mountainous rivers in Taiwan. TAO, 16: 3. 653-675.
31. Kia, E. and Emadi, A.R., 2013. Comparison of Statistical Methods for Long-Term Suspended Sediment Yield Estimation (Case Study: Babolrood River), Journal of Watershed Management Research Vol. 4, No. 8, pp127-150.
32. Khazayi, M., Dastranj A, Kazemi M, Falah S, Adeli, B. 2014. Assessment corrective methods for estimating suspended sediment (Case Study: Beshaar Watershed) . E.E.R. . 2014; 4 (3) :47-57.
33. Miraboulghasemi, H., and Morid, S. 1997. Investigation of hydrological methods for estimating suspended load of rivers, Journal of Water and Development, 35: 95-116.(In Persian).
34. Mirzaei, M., 2003. Compare methods of estimating the suspended sediment in rivers(Case Study: Gorganrood river), Master's dissertation Department of Natural Resources, Tehran University, 115 pages.(In Persian).
35. Mohammadi,A., Mosaediand, A., Heshmatpour, A., 2007. Determiration of the Best Model to Estimate Suspended Sediment loads in Ghazaghly Gauge Station-Gorganrood River, Iran, J. Agric. Sci. Natur. Resour., Vol. 14(4),pp 232-240.(In Persian).
36. Najafi Nejad, A., Babaei, A., Saniei, A., Mahmodi, O., Comparing of seasonal suspended rating curve and monthly suspended sediment load in some river of Golestan province, 2010, Fourth National Conference on erosion and sediment, Department of Natural Resources and Marine Science, Tarbiat Modarres, 6pp.(In Persian).
37. Varvani1, J., Regional Analysis of Suspended Sediment Estimation in Vashmgir dam,2001, M.Sc. Thesis, Tehran University, 203pp.
38. Varvani, J., Najafi Nejad, A.and Mirmoini Karahroudi ,A., Improving of sediment rating curve using minimum variance unbiased estimator, 2008, J. Agric. Sci. Natur. Resour., Vol. 15(1), Apr -May 2008 Special issue, pp 150-161.
39. Zanganeh, M.E. , Mosaedi, A., Meftah Halghi, M. and Dehghani, A.A., 2011, Determination of Suitable Method for Estimating Suspended Sediments Discharge in Arazkoose Hydrometric Station (Gorganrood Basin), J. of Water and Soil Conservation, Vol. 18(2),pp 85-104.(In Persian).
40. Zorrati Poor, A., 2007. Compare hydrological methods to estimate suspended sediment in rivers, Master's dissertation Department of Natural Resources, Tehran University, 150 pages.