

## اصلاح منحنی سنجه رسوب با استفاده از روش حداقل واریانس نارایب

### \*جواد وروانی<sup>۱</sup>، علی نجفی‌نژاد<sup>۲</sup> و آمنه میرمعینی کرهرودی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>عضو هیأت علمی گروه مرتع و آبخیزداری دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، <sup>۲</sup>استادیار گروه آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

<sup>۳</sup>کارشناس ارشد گروه آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۸۶/۳/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۶/۲

### چکیده

ماهیت متغیر و پیچیده بار رسوب رودخانه‌ها باعث شده است که برآورد میزان رسوب وارده به مخازن و تولید رسوب درازمدت برای تعیین عمر سازه‌ها با مشکل روبرو شود. کاربرد منحنی‌های سنجه رسوب یکی از معمولی‌ترین روش‌های برآورد بار رسوبی معلق رودخانه‌هاست. از آنجایی که معادلات رگرسیونی منحنی‌های سنجه با توجه به تبدیل لگاریتمی آمار دبی جریان و رسوب معلق به دست می‌آید دارای اریب زیاد هستند. در این تحقیق به منظور اصلاح روش‌های برآورد بار رسوبی رودخانه‌ها مقادیر برآوردی ۱۰ نوع منحنی سنجه رسوب با مقادیر واقعی دوره‌های مختلف آماری در ۵ ایستگاه هیدرومتری منتخب از مناطق اقلیمی مختلف کشور با شاخص‌های مختلف دقت و صحت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که کاربرد ضریب حداقل واریانس نارایب باعث افزایش صحت و دقت منحنی‌های سنجه گردیده به طوری که نسبت بار رسوبی برآوردی به بار واقعی به طور متوسط در ایستگاه‌های مورد مطالعه در حدود ۱/۲۳ می‌باشد که در مقایسه با سایر روش‌ها مقدار قابل قبولی به حساب می‌آید.

**واژه‌های کلیدی:** منحنی سنجه رسوب، MVUE، تبدیل لگاریتمی، بار معلق، ایستگاه هیدرومتری، رسوب سنجی

### مقدمه

اندازه‌گیری موازی با افزایش نیاز به اطلاعات در مورد بار معلق و تغییرات آن در برنامه‌های مدیریتی مخازن و تأسیسات آبی بوده است. (عرب‌خدری و همکاران، ۱۹۹۹؛ الیو وریگر، ۱۹۹۲؛ کرافورد، ۱۹۹۱). ماهیت متغیر و پیچیده بار رسوب رودخانه‌ها باعث شده است که برآورد میزان رسوب وارده به مخازن و تولید رسوب درازمدت برای تعیین عمر سازه‌ها، با مشکل روبرو باشد. روش‌های متعددی برای برآورد بار معلق رودخانه‌ها پیشنهاد شده و از جنبه‌های مختلف مورد بحث و

سابقه بررسی علمی در مورد انتقال رسوب معلق رودخانه‌ها بیش از ۱۰۰ سال است (والینگ ووب، ۱۹۸۱) به طوری که نخستین نمونه‌برداری از بار معلق رودخانه‌ها در سال ۱۸۴۵ میلادی در رودخانه می‌سی‌سی‌پی انجام شد. پس از آن در ۱۸۶۳ در رودخانه‌های سن و مارن<sup>۱</sup> فرانسه و در ۱۹۳۹ در رودخانه نیل صورت گرفت و به تدریج در سرتاسر جهان توسعه یافت (میرابولقاسمی و مرید، ۱۹۹۷). در این راستا توسعه فعالیت‌های

\*مسئول مکاتبه: [varvani\\_55@yahoo.com](mailto:varvani_55@yahoo.com)

نامیده می‌شود. علاوه بر این جانسون (۱۹۹۶)، پیشنهاد می‌کند دبی‌های جریان با یک نمو معین به تعدادی دسته تقسیم شده و برای دبی متوسط هر دسته میانگین رسوب همان دسته تعیین گردد و منحنی سنج رسوب با استفاده از این داده‌های جدید ترسیم گردد. این روش به نام منحنی سنج رسوب حد وسط دسته‌ها<sup>۷</sup> نامیده می‌شود. جونز و همکاران (۱۹۸۱) به جای استفاده از معادله توانی سنج رسوب که از نقطه‌ای با مختصات میانگین نقاط لگاریتم دبی و آب عبور می‌کند از معادله خطی موازی که از میانگین نقاط رسوب و دبی متناظر با آن می‌گذرد استفاده می‌کنند. این روش به نام روش فائو مطرح شده است و در عمل به‌عنوان ضربی محاسبه شده و در منحنی سنج رسوب یک خطی اعمال می‌گردد. منحنی‌های سنج رسوب دیگری که در آنها مسأله اریب ناشی از تبدیل لگاریتمی تا حدودی بر طرف شده است عبارت از روش تخمین گر شبه بیشینه درست نمایی (QMLE)<sup>۸</sup> (فرگوسن، ۱۹۸۷؛ دون، ۱۹۸۳) و اصلاح گر<sup>۹</sup> (توماس، ۱۹۸۵) می‌باشد. معادله کلی روش QMLE به‌صورت زیر است:

$$\hat{L}_{QMLE} = L_{Rc} \cdot \exp\left(\frac{S^2}{2}\right) \quad (1)$$

که در آن  $\hat{L}_{QMLE}$  رسوب برآورد شده از روش QMLE می‌باشد.  $L_{RC}$  رسوب برآورد شده با استفاده از منحنی سنج رسوب یک خطی و  $S^2$  مجذور میانگین اشتباه رگرسیون می‌باشد. این روش به نام روش پارامتری CF1 نیز گزارش شده است. برآوردکننده Smearing (CF2) یک روش غیرپارامتری بوده که شکل کلی معادله آن به‌صورت زیر است:

$$L_s = L_{Rc} \frac{\sum_{i=1}^N \exp(e_i)}{N} \quad (2)$$

بررسی قرار گرفته‌اند. به‌طورکلی روش برآورد بار معلق رودخانه‌ها به دو دسته تقسیم شده است. دسته اول روش‌های مبتنی بر قوانین دینامیک و مکانیک سیالات که عموماً توسط متخصصان و صاحب‌نظران علم هیدرولیک ارائه شده است و دسته دوم روش مبتنی بر اندازه‌گیری‌های مستقیم و تحلیل‌های آماری که بیشتر توسط صاحب‌نظران علم هیدرولوژی توصیه شده‌اند (میرابولقاسمی و مرید، ۱۹۹۷). تقسیم‌بندی دیگر توسط پرستون و بیرمن (۱۹۸۹) انجام شده است که به‌نظر طبقه‌بندی جامع‌تری می‌باشد. در این تقسیم‌بندی، سه طبقه عمده از روش هیدرولوژیکی دیده می‌شود که عبارت از برآورد کننده‌های میانگین<sup>۱</sup>، نسبتی<sup>۲</sup> و رگرسیونی<sup>۳</sup> است. برآوردکننده‌های رگرسیونی (منحنی‌های سنج) در اغلب موارد به‌صورت لگاریتمی به‌کار برده می‌شوند زیرا توزیع مناسب غلظت و جریان توزیع لوگ نرمال دو متغیره می‌باشد. در کاربرد منحنی‌های سنج رسوب دو نوع اریب به مدل رگرسیون خطی وارد می‌شود. اریب نوع اول مربوط به نوع روشی است که برای به‌دست آوردن معادله رگرسیون به‌کار می‌رود و اریب نوع دوم به‌علت تغییر حالت از لگاریتمی به حالت طبیعی ناشی می‌گردد. اریب نوع اول را می‌توان تا حدودی با کاربرد روش مناسب مثل حداقل مربعات که تا حدودی نااریب می‌باشد، کاهش داد ولی در مورد اریب نوع دوم بایستی یک‌سری تصحیحات مثل اضافه کردن متغیرهای مستقل اضافی به معادله انجام داد. در یک مدل نااریب یک واحد برآورد بیش از حد واقعی<sup>۴</sup> با همان مقدار برآورد زیر حد واقعی<sup>۵</sup> احتمال و شانس یکسانی دارد. معمولی‌ترین روش ترسیم منحنی سنج رسوب گذراندن یک خط (یا بیش از یک خط) از بین ابر نقاط دبی جریان و دبی رسوب می‌باشد که تحت عنوان منحنی سنج رسوب یک خطی<sup>۶</sup>

- 1- Averaging Estimator
- 2- Ratio Estimator
- 3- Regression Estimator
- 4- Overestimation
- 5- Underestimation
- 6- Linear sediment rating curve

- 7- Mean load within discharge classes
- 8- Quasi-Maximum Likelihood Estimator
- 9- Smearing

اشتباهات از توزیع نرمال تبعیت می‌کند روش **MVUE** روش مناسبی بوده در غیر این صورت روش **Smearing** مناسب می‌باشد. کن و همکاران (۱۹۸۹) به بررسی اریب و واریانس سه روش منحنی سنجه یک خطی، منحنی سنجه تغییر شکل یافته و برآوردکننده نارایب با واریانس حداقل (**MVUE**) پرداخته و نشان دادند که در بیشتر موارد برآورد کننده‌های قدیمی و تغییر شکل یافته می‌توانند مقادیر قابل قبولی را به دست دهند. اما در شرایطی مثل تعداد کم نمونه برداری و شرایط سیلابی، اشتباه استاندارد این روش‌ها زیاد است. اما روش **MVUE** نارایب بوده و نسبت به روش دیگر جواب قابل قبول تری ارائه می‌دهد. وانگ و لینکر (۱۹۹۹) در مطالعه خود با اضافه نمودن متغیرهای دیگر مثل روند فصلی درازمدت بار معلق و توابع سینوسی از زمان مدل رگرسیونی ارائه دادند که در آن همبستگی بار معلق با جریان و زمان وجود دارد. این مدل اشتباه معیار و برآورد کمتری نسبت به روش‌های دیگر دارد. این افراد به نقل از کن و همکاران (۱۹۸۹) بیان می‌دارند که نتایج روش **MVUE** در مقایسه با روش‌های دیگر خطای اریب کمتری داشته اما نسبت به فرضیه نرمال بودن داده‌ها حساس است. عرب‌خدری و همکاران (۲۰۰۴) با بررسی اعتبار روش‌های برون‌یابی در برآورد میانگین رسوب‌دهی معلق سالانه تلفیق جریان روزانه و منحنی سنجه حد وسط دسته‌ها را به عنوان روش مناسب معرفی می‌کنند و بیان می‌دارند روش‌های یک خطی، فائو، پارامتری و غیرپارامتری را ضعیف‌ترین نتایج را در برداشته‌اند. صادقی (۲۰۰۴) به معرفی دو روش بیضی سطح اطمینان<sup>۲</sup> و مفهوم رگرسیون<sup>۳</sup> در تهیه معادلات جداگانه برای شاخه‌های صعودی و نزولی هیدروگراف حوزه آبخیز معرف امامه پرداخته و نتیجه‌گیری می‌کند با کاربرد چنین معادلاتی خطای برآورد به کمتر از ۲۵ درصد می‌رسد. با توجه به مطالب مذکور کاربرد ضریب **MVUE**

**LS**: رسوب برآورد شده با استفاده از روش **Smearing**. **ei**: باقی‌مانده حداقل مربعات معادله منحنی سنجه بوده و در واقع تفاوت لگاریتم طبیعی رسوب مشاهده شده و برآورد شده است. از روش‌های آماری مهم دیگری که برای هر مقدار ممکن از یک پارامتر برآورد نارایب با مقدار واریانس کمتر از روش‌های دیگر به دست می‌دهد روش **MVUE**<sup>۱</sup> یا برآورد کننده نارایب با حداقل واریانس می‌باشد. در این روش تصحیح اریب برای هر یک از مقادیر دبی روزانه به کار برده می‌شود (کن و همکاران، ۱۹۸۹). معادلات این روش به صورت زیر است.

$$\hat{L}_{MVUE} = L_{Rc(t)} \cdot g_m \quad (۳)$$

$$g_m = \frac{m+1}{2m} \{ (1-V)S^2 \} \quad (۴)$$

$$V = \frac{1}{N} + \left[ \frac{(\ln(Q_x) - \overline{\ln(Q)})^2}{\sum_{i=1}^N (\ln(Q_i) - \overline{\ln(Q)})^2} \right] = \frac{1}{N} + \left[ \frac{(\ln(Q_x) - Q_{Bar})^2}{Q_{var}} \right] \quad (۵)$$

در این معادلات  $\hat{L}_{MVUE}$  رسوب برآورد شده از روش **MVUE**،  $L_{Rc(t)}$  بار رسوبی برآورد شده از منحنی سنجه برای هر روز  $t$ ،  $g_m$  تابع فیننی،  $Q_x$  میانگین دبی جریان روزانه،  $Q$  دبی جریان لحظه‌ای،  $N$  تعداد داده،  $Q_{var}$  واریانس دبی‌های جریان،  $Q_{Bar}$ : متوسط دبی و  $S$  اشتباه استاندارد منحنی سنجه می‌باشد.

بونینگ (۲۰۰۱) ضمن تشریح روش‌های فوق در یک گزارش بیان می‌دارد که دبی رسوب محاسبه شده بدون استفاده از ضریب تصحیح اریب ۱۳ درصد کمتر از رسوب برآورد شده با استفاده از روش **MVUE** می‌باشد. همچنین برآورد روش **QMLE** در حدود ۴ درصد بزرگ‌تر از برآورد **MVUE** بوده است. همچنین روش **MVUE** و **Smearing** تنها ۰/۶ درصد با هم دیگر اختلاف داشتند. وی در این گزارش بیان می‌دارد زمانی که توزیع آماری

2- Confidence Area Ellipse

3- Regression Concept

1- Minimum Variance Unbiased Estimator

در ترسیم منحنی‌های سنجه رسوب ایستگاه‌های کشور تاکنون گزارش نشده است و این تحقیق می‌تواند مسائل مربوط به این روش را بیشتر روشن نماید. به طوری که هدف تحقیق به دنبال بررسی میزان دقت و صحت منحنی‌های سنجه رسوب مختلف با معرفی ضریب MVUE در چندین ایستگاه هیدرومتری و رسوب‌سنجی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

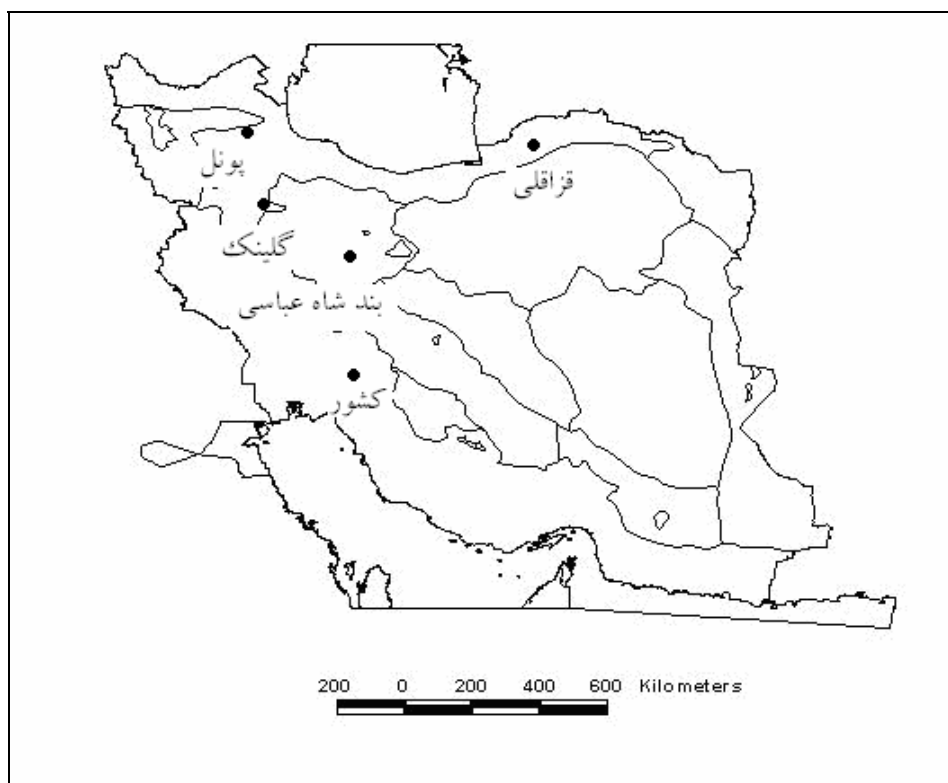
- ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب‌سنجی مورد مطالعه: با بررسی آمار رسوب و دبی جریان ایستگاه‌های مختلف کشور ۵ ایستگاه رسوب‌سنجی به نحوی انتخاب شدند که ضمن داشتن دوره‌های آماری با فراوانی نمونه‌برداری حداقل روزانه در بعضی از ماه‌های مختلف سال شرایط اقلیمی نسبتاً متفاوت نیز داشته باشند. جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه و اطلاعات مورد نیاز و شکل ۱ نقشه پراکنش ایستگاه‌های آنها در سطح کشور را نشان می‌دهد.

- جامعه آماری و نمونه‌برداری و ترسیم منحنی‌های سنجه رسوب: با توجه به داده‌های همزمان دبی جریان و رسوب

معلق هر یک از ایستگاه‌های مذکور در طی یک دوره طولانی مدت جامعه آماری تشکیل شد. عملیات نمونه‌برداری به صورت تصادفی (عرب‌خردی و همکاران، ۲۰۰۴) در ۵ تکرار در اندازه‌های مختلف نمونه‌برداری توصیه شده (کن و همکاران، ۱۹۹۲) اعم از ۷۵، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۵۰ جفت داده همزمان دبی جریان و رسوب صورت گرفت. این قسمت توسط نرم‌افزار SPSS انجام شد. بعد از برداشت نمونه‌ها در محیط Excel منحنی‌های سنجه رسوب یک خطی و حدوسط با ضرایب مختلف CF2, CF1 و فائو ترسیم شد. برای استفاده از ضریب MVUE در ابتدا پارامترهای مورد نیاز این ضریب از هر یک از منحنی‌های سنجه یک خطی و حد وسط به دست آمد و سپس از برنامه‌ای در محیط فرترن (بونینگ، ۲۰۰۱) به منظور سهولت در محاسبات پیچیده استفاده گردید. در نهایت با استفاده از مقادیر دبی جریان متوسط روزانه و منحنی‌های سنجه مختلف مقادیر رسوب روزانه برآورد گردید.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های رسوب‌سنجی و هیدرومتری مورد مطالعه.

ایستگاه - رودخانه	مختصات جغرافیایی		ارتفاع از سطح دریا (متر)	مساحت حوزه آبخیز بالادست (کیلومتر مربع)	طول دوره آماری
	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی			
قزاقلی - گرگانرود	55°-00'	13°-37'	۳۰	۶۸۱۱	۳۸
پونل - شفارود	49°-05'	37°-32'	۵۰	۳۵۰	۳۶
کشور - سرخاب	48°-38'	33°-08'	۷۶۰	۳۳۵	۴۰
گلینک - طالقان رود	50°-44'	36°-10'	۱۸۲۰	۷۷۵	۳۸
بندشاه عباسی - وفرقان	50°-09'	34°-54'	۱۵۷۰	۱۴۳۰۰	۴۲



شکل ۱- نقشه پراکنش تقریبی ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب‌سنجی مورد مطالعه.

انتخاب روش مبنا در مقایسه کارایی روش‌ها اهمیت بسیار زیادی دارد. در حالت ایده‌آل اندازه‌گیری از مقادیر رسوب معلق باید معطوف به دوره‌های زمانی کوتاه بوده تا بتوان مقدار واقعی رسوب دوره آماری را با ضریب اطمینان بیشتر به‌دست آورد لیکن با توجه به محدودیت آمار ایستگاه‌های رسوب‌سنجی کشور در این تحقیق سعی گردید که دوره‌های آماری در ایستگاه‌های مختلف به نحوی انتخاب شوند که حداقل نمونه‌برداری روزانه در آنها صورت گرفته باشد تا بتوان با روش درونیابی مقدار بار واقعی دوره را به‌دست آورد.

### نتایج

مقادیر شاخص صحت (نسبت باررسوبی برآورد شده به بار رسوبی مبنا) و شاخص دقت (ضریب تغییرات برآورد)

- ارزیابی کارایی برآورد منحنی‌های سنج رسوب:  
 به‌منظور ارزیابی کارایی منحنی‌های سنج رسوب، برآورد هر یک از روش‌ها با استفاده از شاخص آماری نسبت مقدار برآوردی به مقدار مشاهداتی (مقدار مبنا) به‌عنوان شاخص صحت و ضریب تغییرات برآورد به‌عنوان شاخص دقت مورد ارزیابی قرار گرفت (فرگوسن، ۱۹۸۷؛ دون، ۱۹۸۳؛ مارتین و رانگو، ۱۹۸۹). نکته مهم و ضروری این قسمت، به‌دست آوردن مقدار واقعی رسوب دوره‌های آماری مورد بررسی بوده است. بدین منظور در تمام ایستگاه‌های انتخابی دوره‌های آماری که فراوانی نمونه‌برداری در آنها حداقل روزانه بود تفکیک شدند و مقادیر بار واقعی متوسط دوره محاسبه شد. از طرفی با داشتن مقادیر دبی متوسط روزانه در هر یک از دوره‌ها مقادیر برآوردی با روش‌های مختلف منحنی سنج رسوب به‌دست آمد. لازم به ذکر است که

روش‌های مختلف در ایستگاه‌های منتخب در جدول‌های ۲ و ۳ خلاصه شده است. مقادیر این جدول‌ها براساس متوسط ۵ اندازه نمونه (۷۵، ۱۷۵، ۱۵۰، ۱۲۵ و ۲۵۰ تایی) تنظیم شده است و شکل‌های ۲ تا ۶ تغییرات شاخص‌های مذکور با در نظر گرفتن اندازه نمونه نشان می‌دهد. بررسی مقدار این شاخص‌ها می‌تواند در انتخاب روش مناسب کمک زیادی کند.

شاخص صحت مورد استفاده در این تحقیق بیانگر میزان دوری و یا نزدیکی متوسط بار رسوبی برآورد شده به بار مشاهداتی است. مقدار شاخص صحت در بهترین حالت برابر مقدار واحد بوده و فاصله گرفتن این شاخص از مقدار

یک نشان می‌دهد که مقدار برآوردی با مقدار مشاهداتی اختلاف دارد. در جدول ۲ مقادیر شاخص صحت برای ۱۰ روش مورد آزمون و ایستگاه‌های منتخب آورده شده است.

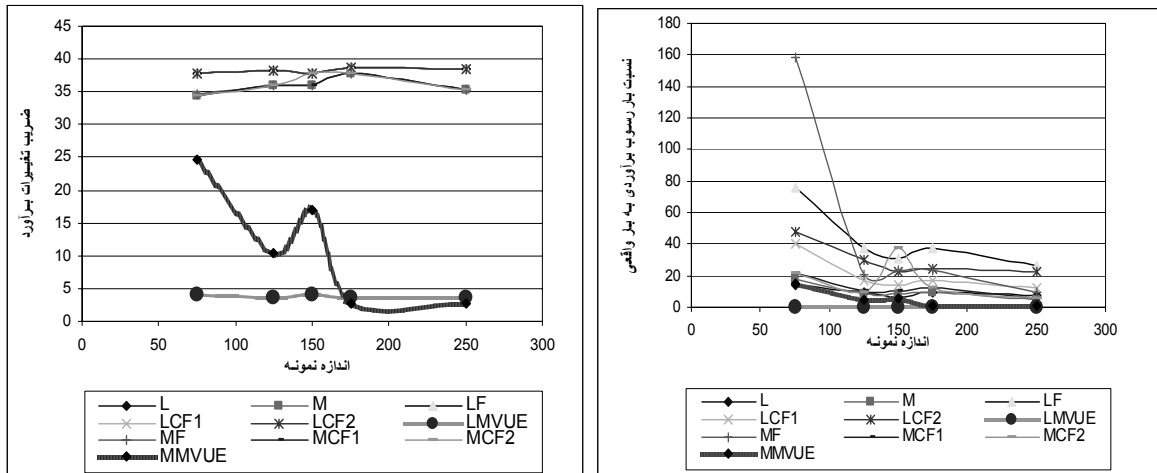
شاخص دقت مورد استفاده در این تحقیق (ضریب تغییرات) بیانگر میزان اختلاف برآوردهای هر روش با یکدیگر می‌باشد. هر چه برآوردهای یک روش به هم نزدیک باشد، دقت آن زیاد خواهد بود. بنابراین مقادیر کم ضریب تغییرات بیانگر دقت زیاد روش می‌باشد. در جدول ۳ مقادیر متوسط شاخص دقت ۵ اندازه نمونه برای روش‌های مختلف و ایستگاه‌های منتخب آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر متوسط شاخص صحت (نسبت رسوب برآوردی به بار واقعی) روش‌های مختلف برآورد رسوب معلق در ایستگاه‌های منتخب.

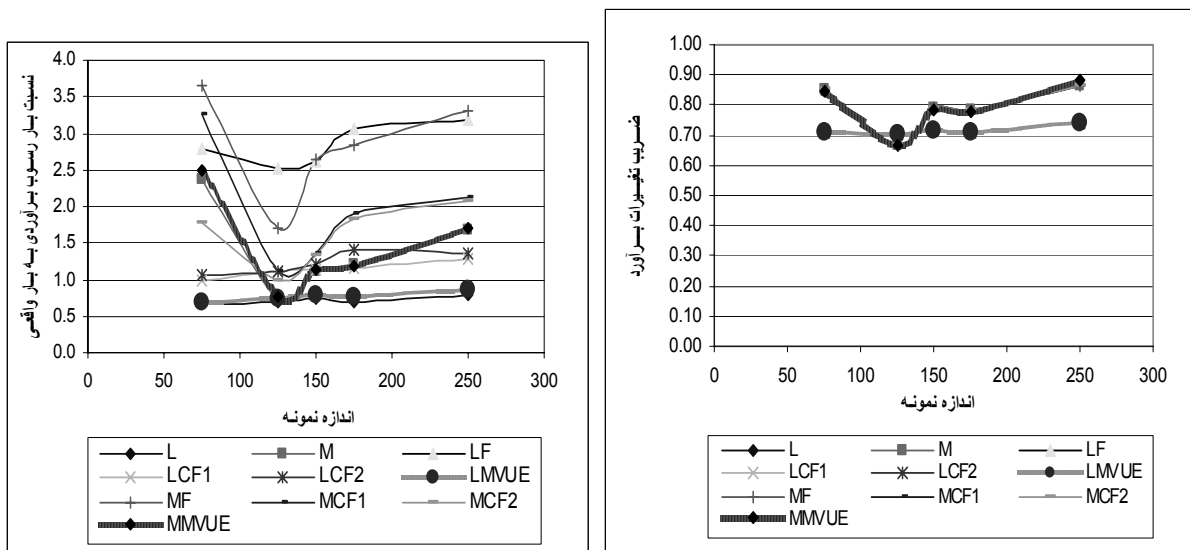
ایستگاه- روش	یک خطی	حد وسط	یک خطی				حد وسط			
			ضریب فائو	CF1	CF2	MVUE	ضریب فائو	CF1	CF2	MVUE
قزاقلی	۹/۲۶	۹/۶۹	۴۱/۵۷	۲۰/۳۱	۲۹/۴۲	۰/۳۸	۴۷/۰۵	۱۲/۰۹	۱۷/۳۱	۵/۲۲
پونل	۰/۷۱	۱/۴۲	۲/۸۴	۱/۱۴	۱/۲۳	۰/۷۷	۲/۸۳	۱/۹۵	۱/۶۰	۱/۴۶
سرخاب	۰/۶۷	۰/۹۷	۲/۸۸	۱/۲۴	۱/۳۱	۰/۷۵	۲/۴۹	۱/۲۷	۱/۲۴	۱/۰۱
گلینک	۰/۷۱	۱/۴۹	۲/۲۶	۱/۸۰	۱/۵۶	۰/۶۴	۲/۳۹	۱/۸۷	۱/۶۲	۱/۲۳
بند شاه عباسی	۰/۲۲	۰/۵۳	۲/۱۰	۰/۶۴	۱/۲۹	۰/۲۷	۲/۰۸	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۵۷

جدول ۳- مقادیر متوسط شاخص دقت (ضریب تغییرات برآورد) روش‌های مختلف برآورد رسوب معلق در ایستگاه‌های منتخب

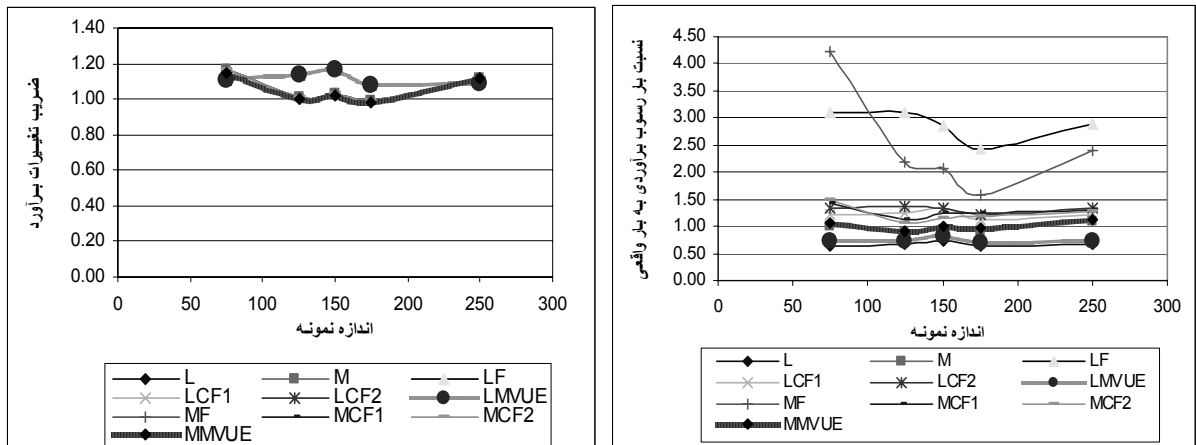
ایستگاه- روش	یک خطی	حد وسط	یک خطی				حد وسط			
			ضریب فائو	CF1	CF2	MVUE	ضریب فائو	CF1	CF2	MVUE
قزاقلی	۳۸/۲۱	۳۵/۸۴	۳۸/۲۱	۳۸/۲۱	۳۸/۲۱	۳/۷۹	۳۵/۹۰	۳۵/۸۴	۳۶/۲۴	۱۱/۵۰
پونل	۰/۷۲	۰/۷۹	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹
سرخاب	۱/۱۲	۱/۰۶	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۰۶
گلینک	۰/۸۶	۱/۱۵	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۶	۱/۰۵	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۳۸
بند شاه عباسی	۰/۵۸	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۵۹



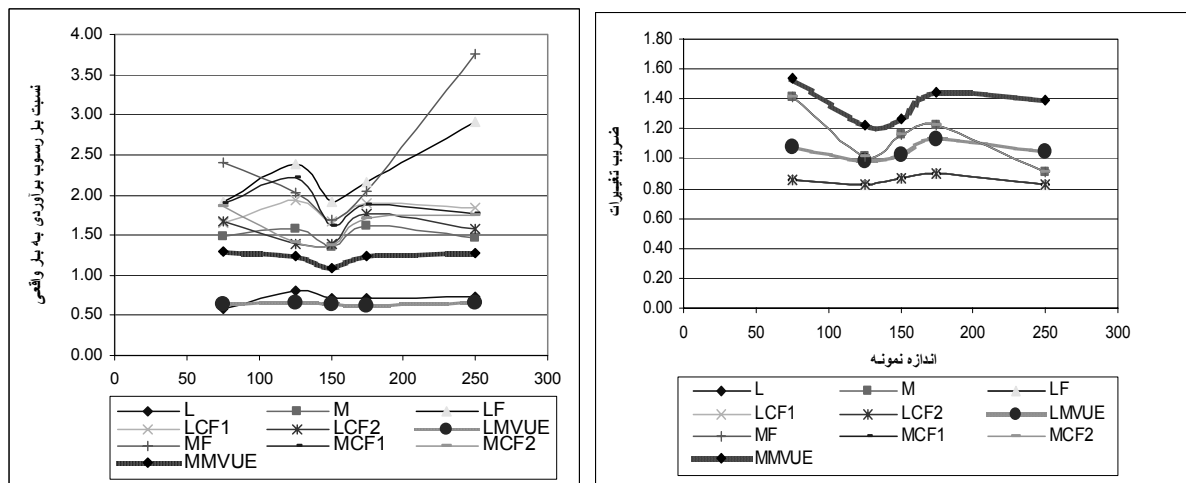
شکل ۲- مقادیر شاخص دقت (ضریب تغییرات) و صحت (نسبت رسوب برآوردی به بار واقعی) روش‌های یک خطی (L)، روش حد وسط (M) و ترکیب آنها با ضرایب فانو (F)، ضریب پارامتری (CF1)، ضریب غیر پارامتری (CF2) و ضریب حداقل واریانس ناریب (MVUE) در ایستگاه قزاقلی - رودخانه گرگانرود.



شکل ۳- مقادیر شاخص دقت (ضریب تغییرات) و صحت (نسبت رسوب برآوردی به بار واقعی) روش‌های یک خطی (L)، روش حد وسط (M) و ترکیب آنها با ضرایب فانو (F)، ضریب پارامتری (CF1)، ضریب غیر پارامتری (CF2) و ضریب حداقل واریانس ناریب (MVUE) در ایستگاه پونل - رودخانه شفارود.

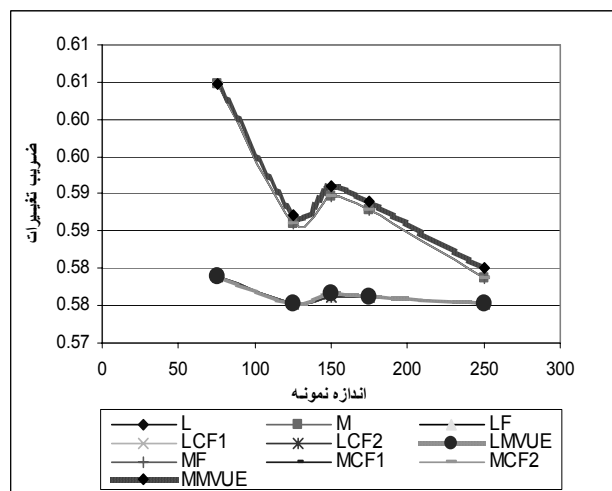
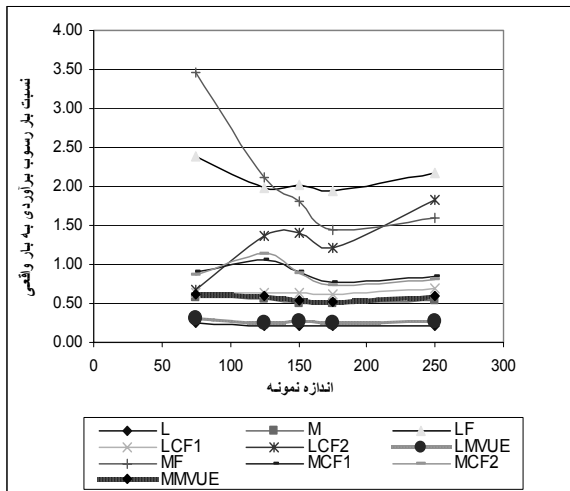


شکل ۴- مقادیر شاخص دقت (ضریب تغییرات) و صحت (نسبت رسوب برآوردی به بار واقعی) روش‌های یک خطی (L)، روش حد وسط (M) و ترکیب آنها با ضرایب فائو (F)، ضریب پارامتری (CF1)، ضریب غیرپارامتری (CF2) و ضریب حداقل واریانس ناریب (MVUE) در ایستگاه کشور- رودخانه سرخاب.



شکل ۵- مقادیر شاخص دقت (ضریب تغییرات) و صحت (نسبت رسوب برآوردی به بار واقعی) روش‌های یک خطی (L)، روش حد وسط (M) و ترکیب آنها با ضرایب فائو (F)، ضریب پارامتری (CF1)، ضریب غیرپارامتری (CF2) و ضریب حداقل واریانس ناریب (MVUE) در ایستگاه گلینک- رودخانه طالقان رود.





شکل ۶- مقادیر شاخص دقت (ضریب تغییرات) و صحت (نسبت رسوب برآوردی به بار واقعی) روش‌های یک خطی (L)، روش حد وسط (M) و ترکیب آنها با ضرایب فائو (F)، ضریب پارامتری (CF1)، ضریب غیرپارامتری (CF2) و ضریب حداقل واریانس ناریب (MVUE) در ایستگاه بند شاه‌عباسی - رودخانه قره‌چای.

اهمیت فراوانی دارد. شاخص صحت به‌کار گرفته شده نسبت بین متوسط رسوب برآوردی به مقدار رسوب واقعی دوره‌های مختلف در ایستگاه‌ها مورد مطالعه بوده است. این نسبت در ایستگاه قزاقلی متغیر از ۰/۳۸ برای روش یک خطی - MVUE تا ۰/۰۵ در روش فائو - حد وسط بوده است. همچنین مقادیر این نسبت برای ایستگاه قزاقلی در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها بالاتر می‌باشد. در ایستگاه پونل نیز صحیح‌ترین روش منحنی سنج رسوب یک خطی - MVUE بوده است که برآورد آن نسبت به بار واقعی در حدود ۰/۷۷ بوده است. در ایستگاه گلینک و سرخاب روش حد وسط - MVUE بهترین نتیجه را داشته است (با شاخص صحت به ترتیب ۱/۲۳ و ۱/۰۱). از نظر دقت در ایستگاه قزاقلی ضریب تغییرات روش یک خطی - MVUE به‌طور قابل ملاحظه‌ای با دیگر روش‌ها متفاوت می‌باشد. اما میزان این تفاوت در ایستگاه‌ها دیگر کاهش می‌یابد.

باتوجه به نتایج این تحقیق می‌توان اظهار نمود که در بین منحنی‌های مختلف سنج رسوب روش LMVUE

## بحث و نتیجه‌گیری

از آنجایی‌که در معادلات رگرسیونی منحنی‌های سنج رسوب تنها یک متغیر مستقل وارد می‌شود از این‌رو، این منحنی‌ها قادر به پیش‌بینی دقیق و صحیح مقدار بار رسوبی واقعی رودخانه‌ها نمی‌باشند و این موضوع به‌خوبی در نتایج این تحقیق و تحقیقات دیگر مشخص می‌باشد (فرگوسن، ۱۹۸۷؛ والینگ، ۱۹۷۷)، اما سهولت کاربرد این معادلات باعث شده است که استفاده زیادی در برآوردهای بار رسوبی داشته باشند. برآورد دقیق بار رسوبی رودخانه‌ها مستلزم نمونه‌برداری در فواصل زمانی کوتاه از دبی جریان و غلظت رسوبات معلق است. اما در شرایط کنونی عملیات مذکور به‌ندرت و در بعضی ایستگاه‌های خاص انجام می‌گیرد به‌طوری‌که ایستگاه‌های انتخاب شده در این تحقیق دارای شرایط نسبتاً مناسبی از نقطه نظر آمار رسوب روزانه بوده‌اند و در این بین فراوانی نمونه‌برداری در ایستگاه قزاقلی از سایر ایستگاه‌ها بیشتر بوده است. این موضوع در انتخاب مبنای ارزیابی و مقایسه برآورد منحنی‌های سنج رسوب

نتایج نسبتاً قابل قبولی به دست می‌دهد و برآورد این روش در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه به مقدار واقعی نزدیک است. از طرفی تغییرات شاخص صحت این روش در اندازه نمونه‌های مختلف کمتر می‌باشد یا به عبارتی دیگر اندازه نمونه تأثیر زیادی در دقت و صحت برآورد این روش نداشته است ولی در روش‌های دیگر با کاهش اندازه نمونه مقدار خطای برآورد زیادتر می‌گردد. همچنین برخلاف روش‌های دیگر روش LMVUE در تمامی موارد باعث برآورد زیر حد واقعی می‌گردد اما روش‌های دیگر هر دو حالت برآورد بیش و کم برآورد را داشته‌اند. در حالت میانگین روش LMVUE خطای برآوردی در حدود ۴۰ درصد زیر حد واقعی داشته است و تا حدودی نسبت به روش‌های دیگر بهتر عمل می‌کند.

جامعه آماری که با توجه به آن نمونه‌برداری انجام می‌شود و در نهایت منحنی سنجه رسوب براساس آن نمونه‌ها ترسیم می‌گردد تأثیر زیادی در دقت منحنی‌های مذکور دارد. همچنین گذشته از اندازه نمونه بیش از همه نوع داده‌های نمونه‌برداری شده در دقت منحنی‌ها تأثیر دارد به طوری که هر چه داده‌های اولیه پراکنده‌تر باشند برآورد منحنی‌های سنجه رسوب با خطای زیادی روبرو می‌باشد. از طرفی در صورتی که منحنی سنجه رسوب به گونه‌ای ترسیم شود که اطلاعات زیادی از جامعه آماری اولیه داشته باشد در این صورت میزان خطای برآورد کاهش می‌یابد. در مورد ضریب MVUE این حالت مطرح می‌باشد زیرا اطلاعات زیادی از داده‌های اولیه و همچنین تک تک داده‌های دبی جریان که براساس آنها برآورد انجام می‌دهد، به دست می‌آورد.

روش حد وسط دسته‌ها که به نوعی تغییر شکل منحنی سنجه رسوب یک خطی می‌باشد کارایی بهتری نسبت به روش LMUE نداشته و حتی در بعضی موارد خطای

برآورد زیادتری نسبت به این روش نشان می‌دهد. کاربرد ضریب MVUE در این روش نیز باعث کاهش خطا گردیده و تا حدود زیادی برآوردهای این روش را نیز بهبود بخشیده است. از آنجایی که ضریب‌های فائو، CF1 و CF2 اطلاعات اندکی از داده‌های کالیبراسیون را در نظر می‌گیرند لذا کارایی آنها در برآورد بار رسوبی متوسط دوره‌های در نظر گرفته شده ضعیف بوده و نسبت به روش LMVUE دقت و صحت کمتری داشته‌اند.

بالا بودن مقادیر شاخص صحت و دقت در بین روش‌های مختلف در ایستگاه قزاقلی به نوع داده‌های این ایستگاه و دوره‌های انتخاب شده برمی‌گردد به طوری که تغییرات بار واقعی دوره‌های انتخاب شده زیاد بوده (به علت تغییر رسوب‌دهی در فصول و زمان‌های مختلف سال) و این تغییرات زیاد باعث می‌شود برآوردهای منحنی سنجه رسوب با خطای زیادی روبرو شود. اما در سایر ایستگاه‌ها دوره‌های انتخاب شده مربوط به ماه‌های پرباران بوده که تغییرات بار واقعی آنها نسبت به قزاقلی کمتر بوده است.

عده‌ای از متخصصین معتقدند از آنجایی که منحنی‌های سنجه رسوب تک متغیره بوده و برآورد بار رسوبی این منحنی‌ها با استفاده از میزان دبی جریان انجام می‌شود ممکن است برای بعضی از رودخانه‌ها مناسب نباشند زیرا معمولاً در طول شاخه‌های بالارونده و پایین رونده هیدروگراف جریان برای یک مقدار دبی یکسان غلظت‌های متفاوتی ثبت شده است و این خاصیت باعث می‌شود که منحنی سنجه به صورت خط مستقیم نبوده بلکه به صورت حلقه درآید، (والینگ، ۱۹۷۷؛ صادقی، ۲۰۰۴؛ لمک، ۱۹۹۱). البته تحقیقات دیگر در زمینه رفتار رسوبی در شرایط سیلابی (وروانی، ۲۰۰۷؛ کوهن و لارون، ۲۰۰۵) مویید این مطلب است که شکل حلقه برای منحنی‌های سنجه رسوب بیشتر در شرایط سیلابی و زمانی که از غلظت رسوب به عنوان متغیر وابسته در

معادلات استفاده می‌شود به وجود می‌آید. در برآورد بار رسوب سالیانه معمولاً منحنی‌های سنجه رسوب با توجه به مقادیر دبی جریان و دبی رسوب ترسیم می‌گردد و این مورد باعث می‌شود که شکل حلقه در این حالت دیده نشود.

مقایسه نتایج تحقیقات انجام شده با یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش دقت و صحت برآوردهای بار رسوبی با کاربرد ضریب  $MVUE$  در مواردی که پراکندگی داده‌ها وجود دارد، توسط کن و همکاران (۱۹۹۲) نیز گزارش شده است. همچنین وانگ و لینکر (۱۹۹۹) اظهار می‌دارند نتایج روش  $MVUE$  در مقایسه با روش‌های دیگر خطای اریب کمتری داشته اما نسبت به فرضیه نرمال بودن داده‌ها حساس است.

والینگ (۱۹۷۷) با تحلیل و بررسی آمارهای مفصلی از سه رودخانه در دوون انگلیس گزارش می‌کند که کاربرد ضرائب اصلاحی به منظور خطای ناشی از تبدیل لگاریتمی ( $CF_1$  و  $CF_2$ ) تأثیر کمتری در اصلاح برآورد رسوب حاصل از کاربرد منحنی‌های سنجه رسوب دارند. عرب خدری و همکاران (۲۰۰۴) نیز بیان می‌دارند ضرایب اصلاحی  $Cf_1$  و  $Cf_2$  تابعی از اشتباه استاندارد برآورد می‌باشد و نتایج متفاوتی در برآورد بار رسوبی از خود نشان می‌دهند.

در این تحقیق نیز برآوردهای روش  $MVUE$  به گونه‌ای بوده است که در حالت متوسط می‌توان گفت نسبت به سایر روش‌ها از صحت و دقت بیشتری برخوردار است. همچنین ضریب اصلاحی فائو در برآورد بار رسوبی متوسط دوره آماری افزایش خطا از نظر صحت و دقت داشته است. ضرایب اصلاحی  $Cf_1$  و  $Cf_2$  نیز نتایج پراکنده از خود نشان داده‌اند به طوری که نمی‌توان نتیجه‌گیری منطقی در مورد کارایی این ضرایب به دست آورد.

به‌طورکلی در جهت بهبود روابط منحنی سنجه رسوب در ایستگاه‌های مختلف کشور باید تحقیقات بیشتری صورت گیرد تا ماهیت و پیچیدگی برآورد کننده‌های رگرسیونی و یا سایر مدل‌ها به خوبی روشن شود. آنچه در این بین نقش مهم و به‌سزایی دارد داشتن جامعه آماری مناسب از داده‌های همزمان غلظت رسوب و دبی جریان می‌باشد. دبی جریان به‌عنوان یک متغیر کمکی<sup>۱</sup> نقش زیادی در نتایج کاربرد منحنی‌های سنجه رسوب دارد و تنها متغیر مستقلی است که در معادلات رگرسیونی منحنی سنجه رسوب وارد می‌شود. علاوه بر مقادیر دبی جریان، لازم است که کاربرد متغیرهای دیگر نیز در ترسیم منحنی‌های سنجه رسوب مورد آزمون قرار گیرد و یا به‌عبارت دیگر منحنی‌های سنجه رسوب چند متغیره ترسیم گردد. افراد زیادی به کاربرد متغیرهایی مثل زمان، توابع سری زمانی داده‌ها و تغییرات فصلی و غیره در ترسیم منحنی‌های سنجه رسوب اشاره می‌کنند. (لمک، ۱۹۹۱؛ کن و همکاران، ۱۹۹۲) که به نظر گزینه بهتری در برآورد بار رسوبی رودخانه‌ها و حوزه‌های آبخیز می‌رسد. اما در شرایط موجود به‌خصوص با توجه به وضعیت آمار و ارقام هیدرولوژیکی کشور به‌نظر می‌رسد در برآورد بار رسوبی رودخانه‌ها و حوزه‌های آبخیز روش  $LMVUE$  نسبت به منحنی‌های سنجه دیگر خطای کمتری داشته باشد. از آنجایی که این روش تاکنون در منابع داخلی گزارش نشده است با توجه به توصیه‌های سایر محققان و همچنین نتایج این تحقیق که در اقالیم مختلف کشور به‌دست آمده است پیشنهاد می‌شود این روش در رودخانه‌ها و حوزه‌های آبخیز بیشتری مورد آزمون قرار گیرد.

## منابع

1. Arabkhedri, M., Hakimkhani, Sh., Valikhojeini, A. 1999. Necessity for revised methods in estimating suspended load of rivers, Pajouhesh and Sazandegi, 39:37-42.
2. Arabkhedri, M., Hakimkhani, Sh., Varvani, J. 2004. The validity of extrapolation methods in estimation of annual mean suspended sediment yield (17 Hydrometric Stations), Journal of Agri. Sci. & Natur. Resour. 13: 123-131.
3. Miraboulghasemi, H., and Morid, S. 1997. Investigation of hydrological methods for estimating suspended load of rivers, Journal of Water and Development, 35: 95-116.
4. Boning, W.C. 2001. Recommendations for use of retransformation methods in regression, models used to estimate sediment loads, <http://water.Usgs.Gov>.
5. Cohen, H., and Laronne, J.B. 2005. High rates of sediment transport by flashfloods in the southern Judean desert, Israel, Hydrological Processes, 19, 1687-1702.
6. Cohn, T.A., Delong, L.L., Gilroy, E.J., Hirsch, R.M., and Wells, D.K. 1989. Estimating constituent loads, Water Resources Research. 25(5): 937-942.
7. Cohn, A.T., Dana, L.C., Edward, J.G., Linda, D.Z., Roubert, M.S. 1992. The validity of a simple statistical model for estimating fluvial constituent loads: An empirical study-involving nutrient loads entering Chesapeake Bay, Water resources Research, 28(9): 937-942.
8. Crawford, C.G. 1991. Estimation of suspended and sediment ratings curves and mean suspended sediment loads, Journal of Hydrology, 129:331-398.
9. Duan, N. 1983. Smearing estimate, a nonparametric retransformation method, Journal of American Statistical Association, 78(383): 605-610.
10. Ferguson, R.I. 1987. Accuracy and precision of methods for estimating river loads, Earth Surface Processes and Land Forms, 12: 95-104.
11. Jansson, M.B. 1996. Estimating a sediment rating curves of the Reventzon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes, Journal of Hydrology, 183(4):227-241.
12. 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.
13. Lemke, A.K. 1991. Transfer function models of suspended sediment concentration, Water Resources Research, 27 (3):293-305.
14. Martine, G., and Rango, A. 1989. Merits of statistical criteria for performance of hydrological models, Water Resources Bull. 25 (2):42-432.
15. Olive, L.J., and Reiger, W.A., 1992. Stream suspended sediment transport monitoring – why, how and what is being measured? IAHS, 210:537-540.
16. Preston, S.V., and Bierman, J., Silliman, S.E. 1989. An evaluation of methods for the Estimation of tributary mass loads, Water Resources Research. 25, (6):1379-1390.
17. Sadeghi, S.H. 2004. Producing sediment rating curve equation for rising and falling limb of hydrograph using regression concept, journal of Iranian Water Resources Research, 1 (1):101-103.
18. Thomas, R.B. 1985. Estimating total suspended sediment yield with probability sampling .Water Resources Research, 21:1381-1388.
19. Varvani, J. 2007. Investigation of Sediment Yield Behavior and Effect of Geological Formation in Flood Event Sediment Yield and Evaluation of Empirical Models for Estimating Sediment Yield of Flood Events, PhD Thesis, Science and Research Branch, Azad University, 198 Pp.
20. Walling D.E., and Webb, B.W. 1981. The reliability of suspended sediment load data, Erosion and Sediment Transport Measurement, IAHS Pub. 133:177-194.
21. Waling, D.E. 1977. Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin, Water Resources Research, 13: 531-538
22. Wang, P., and Linker, L. 1999. An Alternative Regression method for Constituent Loads from streams, Water Quality and Ecosystems Modeling, 4:935-942.

## **Improving of sediment rating curve using minimum variance unbiased estimator**

**\*J. Varvani<sup>1</sup>, A. Najafi Nejad<sup>2</sup> and A. Mirmoini Karahroudi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Member of Academic Board, Dept. of Range and Watershed Management, Islamic Azad University, Arak Branch, Iran, <sup>2</sup>Assistant Prof., Dept. of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, <sup>3</sup>Senior Expertise, Dept. of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

---

---

### **Abstract**

Complex and variable nature of the river sediment yield caused many problems in prediction of the long-term sediment yield and input into the reservoirs. Sediment rating curves generally used to estimate the suspended sediment load of the river and drainage basin. Since the regression equations of the sediment rating curves obtained by logarithmic retransformation and little independent variable include in this equation they also overestimate or underestimate the true load of the rivers. In this research in order to improve and develop sediment yield estimation methods the estimates of 10 kind of sediment rating curves were compared with actual loads of 5 stations in different climate zones of the country by using accuracy and precision index. The results show that in estimating long term mean load of the selected periods the Linear -MVUE sediment rating curve has relatively high accuracy and precision comparing other kinds of sediment rating curves. In average, the accuracy index of this method is about 1.23 that is reasonable among other methods. Since this kind of sediment rating curve uses different data characteristics and information it could be recommend for application in sediment yield estimation within acceptable confidence limits.

**Keywords:** Sediment rating curve; MVUE; Logarithmic transformation; Suspended load; Hydrometric station

---

\*-Corresponding Author; Email: varvani\_55@yahoo.com