



## مقایسه روش‌های مختلف رگرسیون آماری در برآورد بار رسوب معلق درازمدت سالانه (مطالعه موردی: بابل‌رود)

عیسی کیا<sup>۱</sup> و علیرضا عمادی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲- استادیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، (نویسنده مسوول: emadia355@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۹۰/۹/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۱/۸/۹

### چکیده

در پژوهش حاضر، با کلاسه‌بندی دبی و تفکیک زمانی داده‌ها، چندین مدل رگرسیون آماری مورد بررسی قرار گرفت و با برقراری رابطه رگرسیونی بین داده‌های دبی جریان و دبی رسوب و شبیه‌سازی آن بر اساس روش حداقل مربعات خطا و طبق روش‌های USBR و FAO، منحنی‌های سنج رسوب به همراه تجزیه و تحلیل آماری ارائه شد. مناسب‌ترین مدل بر اساس شاخص‌های آماری حداقل میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین انتخاب گردید. هم‌چنین مقادیر بار رسوب معلق درازمدت سالانه با تلفیق مدل‌های پیشنهادی و روش‌های دبی جریان نظیر منحنی تداوم جریان، دبی متوسط روزانه و دبی متوسط ماهانه برآورد شد. در این راستا از آمار دبی جریان و غلظت رسوب اندازه‌گیری شده به صورت روزانه در طول یک دوره طولانی مدت ۲۳ ساله ایستگاه هیدرومتری قرآن تالار واقع بر رودخانه بابل‌رود استفاده شد. در نهایت تلفیق مدل حد وسط دسته‌ها به روش FAO با دبی متوسط روزانه به عنوان مدل مناسب معرفی گردید.

واژه‌های کلیدی: بار معلق درازمدت، منحنی سنج رسوب، مدل آماری، منحنی تداوم جریان

### مقدمه

برآورد صحیح بار رسوب معلق که یک جریان مشخص قادر به حمل آن است یکی از موضوعات اصلی تحقیقات رسوب می‌باشد که در بسیاری از پروژه‌های مهندسی مانند برنامه‌ریزی و طراحی منابع ذخیره آب، مورفولوژی، تغییرات بار معلق رودخانه، برآورد بار معلق سالانه برای آبگیرهای رودخانه،

رسوبگذاری در سازه‌های هیدرولیکی یکی از مسائل مهم زیست محیطی بوده که در تمام دنیا مورد بحث قرار گرفته است و به عنوان یک مسأله مهم تلقی می‌گردد. به طور کلی رسوباتی که همراه با آب حرکت می‌کنند به سه دسته بار بستر، بار معلق و بار شسته تقسیم می‌شوند.

داد روش تلفیق منحنی سنج رسوب حد وسط دسته‌ها با دبی متوسط روزانه روش مناسب برآورد بار معلق می‌باشد. پوراغنیائی و همکاران (۱۴) با استفاده از روش‌های منحنی سنج تک‌خطی، دو خطی، فصلی و روش تعدیل بار رسوبی (FAO) مقادیر رسوب رودخانه صیدون در استان خوزستان را برآورد کرده و نتایج بدست آمده را با روش پسیاک مورد مقایسه قرار دادند. نتایج پژوهش نشان داد روش تعدیل بار رسوبی، روش مناسبی می‌باشد.

مساعدی و همکاران (۱۰) معادلات منحنی سنج رسوب در ایستگاه‌های ورودی به سدهای دز و کرج را بدست آوردند. نتایج نشان داد که این معادلات، مقدار رسوب‌گذاری را برای سد دز در حدود ۷۰ درصد و برای سد کرج حدود ۹۷ درصد کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. تحقیق پدرام و بارانی (۱۱) در مخزن سد زاینده‌رود نشان داد که برآورد رسوب با استفاده روش متوسط دسته‌ها و همچنین تفکیک آمار به صورت ماه‌های خشک و تر بالاترین میزان همبستگی را دارد. میرزائی (۹) در مقایسه روش‌های آماری برآورد بار معلق رودخانه گرگان‌رود به این نتیجه رسید که روش‌های مختلف برآورد بار رسوب گاهی تا ۱۳ برابر نسبت به یکدیگر اختلاف دارند. در این تحقیق حدود ۵۵ درصد از بار رسوبی در کمتر از ۰/۰۴ درصد زمانی حمل شده است که نشان دهنده اهمیت رویدادهای سیل و نمونه‌برداری از غلظت آنها می‌باشد.

هوروویتز (۵) در رودخانه می‌سی‌سی‌پی دریافت که به منظور بهترین ارزیابی بار رسوب معلق سالانه در یک دوره بیست ساله می‌توان از

طراحی و نگهداری کانال‌های آبیاری پایدار، حفاظت سواحل و لایروبی کانال‌ها حائز اهمیت است (۳). برای برآورد بار رسوب معلق روش‌های متعددی وجود دارد که با توجه به وضعیت آمار منطقه مورد بررسی، یک یا چند روش بکار گرفته می‌شود و پس از مقایسه نتایج حاصله، یکی از آنها برای آن حوزه پیشنهاد می‌گردد (۶). در اکثر موارد در این روش‌ها از رابطه توانی بین دبی جریان و دبی رسوب معلق که به منحنی سنج رسوب معروف است استفاده می‌شود.

$$Q_s = a Q_w^b \quad (1)$$

که  $a$  و  $b$  ضرایب معادله بوده و با رسم خط بهترین برازش بدست می‌آیند (۴). همچنین برای تبدیل مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت متوسط مواد رسوبی معلق به دبی رسوب معلق از رابطه (۲) که روش مستقیم تعیین دبی رسوب می‌باشد، استفاده می‌گردد.

$$Q_s = 0.0864C \cdot Q_w \quad (2)$$

که در آن:  $Q_s$ ، دبی مواد رسوبی معلق برحسب تن بر روز،  $Q_w$ ، دبی جریان آب برحسب مترمکعب بر ثانیه و  $C$ ، متوسط غلظت مواد رسوبی معلق برحسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد (۶، ۱۶).

پیری (۱۳) در پژوهشی دریافت که تفکیک داده‌ها بر اساس ماه‌های خشک و مرطوب و کلاسه‌بندی مقادیر دبی جریان برای حوزه معرف امامه، کمترین میزان خطا را در بر دارد. رستمی و اردشیر (۱۵) بار معلق هشت ایستگاه هیدرومتری در رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان

تالار بابل رود می‌باشد. چرا که محاسبه هرچه دقیق‌تر بار رسوب معلق با استفاده از مدل‌های مختلف، قابلیت اندازه‌گیری مطلوب میزان رسوب ورودی به مخازن سدها را فراهم خواهد آورد.

### مواد و روش‌ها

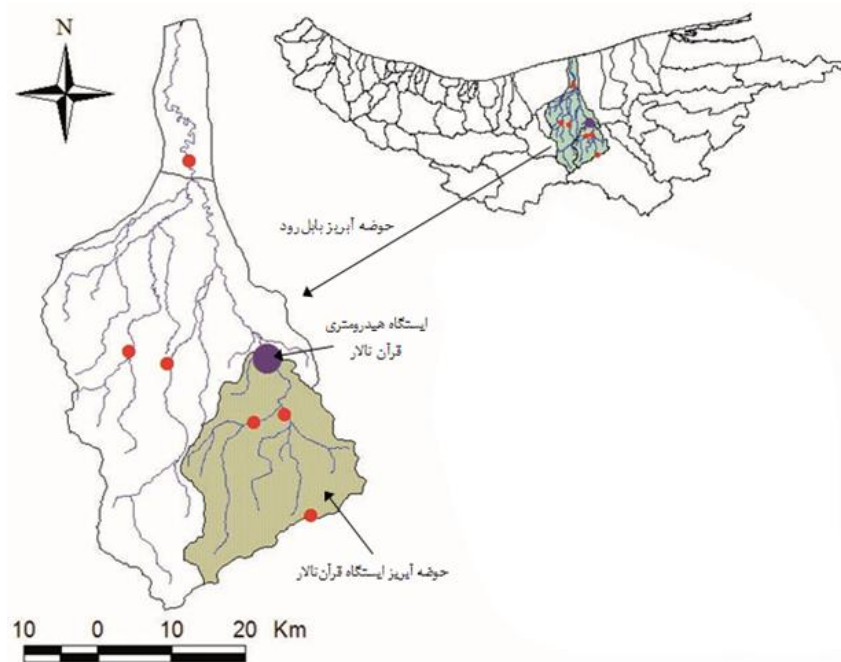
#### منطقه مورد مطالعه

بابل رود با حوزه آبریزی به وسعت بیش از ۴۵۰ کیلومتر مربع از دامنه‌های شمالی کوه‌های البرز سرچشمه گرفته و در بخش کوهستانی با شیب قابل ملاحظه‌ای جریان دارد (شکل ۱). این رودخانه با ورود به پهنه ساحلی خزر (قرآن‌کلا و امیرکلا) به صورت پیچان‌رود به جریان خود ادامه می‌دهد (۷).

#### روش تحقیق

در این پژوهش، ابتدا داده‌های روزانه دبی جریان و غلظت رسوب شش ایستگاه هیدرومتری واقع بر رودخانه مورد مطالعه از شرکت آب منطقه‌ای مازندران جمع‌آوری و پس از بررسی، تنها ایستگاه قرآن تالار دارای طول دوره آماری ۲۳ ساله، از سال آبی ۱۳۵۶-۵۷ لغایت ۱۳۷۸-۷۹ بوده است که مناسب تشخیص داده شد.

منحنی‌های سنج رسوب استفاده نمود. اسلمن (۱) به ارزیابی منحنی‌های سنج 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 منحصر بفرد در اشکال منحنی‌های سنج رسوب به خصوصیات بار آبرفتی وابسته است. وی به منظور انتخاب بهترین مدل از شاخص حداقل میانگین مربعات خطا بهره جست. در تحقیق فیلیپس و همکاران (۱۲)، روش متوسط زمانی بیشترین دقت را داشته است. دقت این روش با افزایش فواصل نمونه‌برداری به طور معنی‌داری کاهش یافت. بالامورگان (۲) سه نوع منحنی سنج رسوب را مورد مطالعه قرار داد. نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد که این روش‌ها منجر به برآورد کمتر رسوبات معلق سالانه با مقدار بیش از ۵۰ درصد مقدار واقعی خواهد شد. بدین منظور یک فاکتور تصحیح را برای تعدیل و استفاده از داده‌های دبی ناپیوسته ارائه نمود. هدف از این پژوهش، ارزیابی مدل‌های مختلف آماری و تعیین مناسب‌ترین معادله و نیز بهترین شیوه دسته‌بندی داده‌ها جهت تخمین صحیح‌تر مقدار رسوبات انتقال یافته بر اساس نوع استفاده از دبی جریان در برآورد دراز مدت رسوب معلق سالانه ایستگاه قرآن



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان مازندران

گردید.

### روش‌های رگرسیون آماری

#### روش USBR

در این روش، یک رابطه ریاضی (معمولاً غیرخطی) بین بار رسوبی معلق رودخانه و آبدهی آن برقرار می‌شود. در عمل با توجه به داده‌های دبی جریان 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 از میان آنها عبور داده می‌شود و رابطه (۱) بین دو متغیر برقرار می‌گردد. برای تعیین مقادیر  $a$  و  $b$  در چنین معادلاتی به روش کمترین مربعات خطا از روابط ۳ و ۴ استفاده می‌شود (۱۶).

(۳)

$$\text{Log}a = \frac{\sum \text{Log}Q_s - b \sum \text{Log}Q_w}{N}$$

قبل از هرگونه اقدام برای تجزیه و تحلیل داده‌های ایستگاه قران تالار که شامل ۴۱۳ جفت داده همزمان دبی جریان- دبی رسوب به صورت روزانه می‌باشد، به منظور اطمینان از کیفیت، همگنی و کامل بودن سری آماری، تست همگنی داده‌ها از آزمون ران، کفایت داده‌ها از روش ماکوس و برای رفع نواقص آماری از ضریب همبستگی بین ایستگاه‌های همجوار استفاده گردید. آنگاه برای تشکیل مدل‌های مختلف با توجه به دبی و زمان اندازه‌گیری، ابتدا دبی رسوبات معلق به کمک رابطه (۲) محاسبه و سپس داده‌ها به دو قسمت، ۸۰ درصد داده‌های کالیبره و ۲۰ درصد داده‌های صحت‌سنجی تفکیک شد. داده‌های کالیبره برای برازش منحنی توانی و از داده‌های صحت‌سنجی برای شبیه‌سازی رسوب استفاده

(۴)

یک رابطه مجزا برازش داده می‌شود.

#### مدل حد وسط دسته‌ها

از آنجا که تعداد نمونه‌های برداشت شده دبی رسوب در مواقع سیلابی بسیار کم بوده و در مواقع کم آبی رودخانه‌ها زیاد می‌باشد، لذا در برازش منحنی با احتساب کل آمار، رابطه تعیین شده برای دبی‌های پائین بهترین برآورد را داشته اما در برآورد دبی‌های بالا دچار مشکل می‌شود. بنابراین برای افزایش سهم دبی‌های بالا، یکی از روش‌ها این است که دبی‌ها را دسته‌بندی کرده، متوسط هر دسته را تعیین نموده و بین متوسط دسته‌های دبی جریان و متوسط دسته‌های دبی رسوب همبستگی ایجاد شود (۱۱).

#### مدل کلاسه‌بندی دبی

در این مدل، داده‌های دبی و رسوب با توجه به مقادیر دبی روزانه و میانگین دبی سالانه کلاسه‌بندی می‌شوند.

مدل بدون تفکیک داده‌ها: در این مدل تمامی داده‌ها بدون در نظر گرفتن زمان اندازه‌گیری، وضعیت هیدروگراف جریان و یا مقدار دبی کلاسه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

مدل تفکیک داده‌ها بر اساس ماه‌های سیلابی و غیرسیلابی: در این مدل، ماه‌هایی که میانگین دبی ماهانه آنها بیشتر و کمتر از میانگین دبی سالانه باشد به ترتیب در بخش ماه‌های سیلابی و غیرسیلابی دسته‌بندی شده و برای هر دسته رابطه رگرسیونی جداگانه‌ای ارائه می‌شود.

مدل تفکیک داده‌ها بر اساس کلاسه‌بندی دبی: در این مدل داده‌هایی که دبی جریان آنها از نصف میانگین دبی سالانه کمتر است تحت عنوان مدل A و داده‌هایی که دبی جریان آنها

$$b = \frac{N \sum \text{Log} Q_w \cdot \text{Log} Q_s - \sum \text{Log} Q_w \cdot \sum \text{Log} Q_s}{N \sum (\text{Log} Q_w)^2 - (\sum \text{Log} Q_w)^2}$$

#### روش FAO

در روش FAO برای تعدیل ارقام و نزدیکتر شدن مقادیر برآورد شده به مقادیر مشاهداتی، توصیه شده است که در معادله سنجه رسوب بجای ضریب a از ضریب a' که ضریب تعدیل فائو نام دارد، استفاده شود.

$$a' = \frac{\overline{Q_s}}{Q_w^b} \quad (۵)$$

که در آن  $\overline{Q_s}$ ، متوسط داده‌های دبی رسوب معلق و  $\overline{Q_w}$ ، متوسط داده‌های دبی جریان می‌باشد. سایر محاسبات این روش عیناً مانند روش U.S.B.R است و در واقع شکل تعدیل یافته‌ای از آن می‌باشد (۱۴).

#### مدل‌های پیشنهادی

##### منحنی سنجه یک خطی و چندخطی

در روش یک خطی، بهترین رابطه همبستگی و در چند خطی، چنانچه وضعیت پخشیدگی داده‌ها اقتضا کند بجای یک منحنی بر مبنای دسته‌بندی دبی رودخانه، چند منحنی سنجه از میان داده‌های اندازه‌گیری شده عبور داده می‌شود. لازم است که خطوط برازش داده شده ضریب همبستگی رگرسیون قابل قبولی داشته باشند (۱۶).

##### مدل منحنی سنجه ماهانه، سالانه و فصلی

در این روش برآورد دبی رسوب بر اساس تفکیک داده‌ها به صورت ماهانه، سالانه و فصلی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و برای هر یک از آنها

شده برحسب تن بر روز،  $\overline{Q_{sio}}$ ، میانگین بار معلق اندازه‌گیری شده بر حسب تن بر روز،  $\overline{Q_{sic}}$ ، میانگین بار معلق محاسبه شده برحسب تن بر روز و  $n$ ، تعداد داده‌ها در هر بخش از مدل می‌باشد (۴).

### نتایج و بحث

از ۴۱۳ جفت داده دبی جریان-دبی رسوب به صورت روزانه جهت تهیه مدل‌ها، ۳۳۸ داده جهت کالیبره و ۷۵ داده جهت صحت‌سنجی مدل و تعیین شاخص‌های آماری و مقایسه مدل‌های پیشنهادی استفاده شد. در نتیجه، با برقراری رابطه رگرسیونی بین داده‌های دبی جریان و دبی رسوب در مرحله کالیبره و شبیه‌سازی آن بر اساس روش حداقل مربعات خطا و طبق روش‌های USBR و FAO برای هر یک از مدل‌های پیشنهادی در مرحله صحت‌سنجی، پارامترهای منحنی سنج رسوب و شاخص‌های آماری مدل‌ها محاسبه شد. جدول ۱ خلاصه پارامترهای آماری روش USBR و جدول ۲ نتایج حاصل از روش FAO را نشان می‌دهد.

از نصف میانگین دبی سالانه بیشتر و از دو برابر آن کمتر است تحت عنوان مدل B و داده‌هایی که دبی جریان آنها از دو برابر میانگین دبی سالانه بیشتر است، مدل C نام‌گذاری شده و برای هر دسته رابطه رگرسیونی جداگانه‌ای طراحی می‌شود (۱۶).

در پژوهش حاضر برای تعیین میانگین درازمدت سالانه رسوب معلق، از تلفیق روش‌های مختلف دبی جریان نظیر منحنی تداوم جریان، دبی متوسط روزانه و دبی متوسط ماهانه با مدل‌های پیشنهادی استفاده گردید. سپس به منظور انتخاب مدل مناسب، از شاخص مجموع مربعات خطا<sup>۱</sup>، میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> و ضریب تبیین<sup>۳</sup> که به ترتیب به صورت روابط (۶)، (۷) و (۸) می‌باشند، استفاده شد.

$$SSE = \sum (\log Q_{sio} - \log Q_{sic})^2 \quad (۶)$$

$$MSE = \frac{SSE}{n} \quad (۷)$$

$$(۸)$$

$$R^2 = \frac{(\sum (\log Q_{sic} - \log \overline{Q_{sic}})(\log Q_{sio} - \log \overline{Q_{sio}}))^2}{\sum (\log Q_{sic} - \log \overline{Q_{sic}})^2 \cdot \sum (\log Q_{sio} - \log \overline{Q_{sio}})^2}$$

که در این روابط، SSE، مجموع مربعات خطا، MSE، میانگین مربعات خطا،  $R^2$  ضریب تبیین،  $Q_{sio}$ ، دبی بار معلق اندازه‌گیری شده بر حسب تن بر روز،  $Q_{sic}$ ، دبی بار معلق محاسبه

جدول ۱- خلاصه پارامترهای آماری بر اساس مدل‌های مختلف USBR

نام مدل	تفکیک داده‌های دبی	a	b	R <sup>2</sup> کالیبره	R <sup>2</sup> صحت‌سنجی	مجموع مربعات خطا (SSE)	میانگین مربعات خطا (MSE)	میانگین کل مربعات خطا (MSE) <sub>m</sub>	
بدون تفکیک	کل داده‌ها	۶/۱۲	۱/۳۰	۰/۶۱	۰/۷۳	۱۱/۷۴	۰/۱۶	۰/۱۶	
یک خطی (بهترین همبستگی)	یک سال	۰/۸۰	۲/۰۵	۰/۸۵	۰/۶۴	۵۰/۵۰	۰/۶۹	۰/۶۹	
	<= ۲	<= ۲	۵/۷۴	۰/۵۷	۰/۲۰	۰/۱۷	۲/۸۸	۰/۲۴	۰/۲۰۵
		> ۲	۳/۵۰	۱/۶۰	۰/۵۳	۰/۵۴	۱۰/۲۸	۰/۱۷	
	<= ۳	<= ۳	۶/۹۸	۰/۸۰	۰/۳۸	۰/۳۹	۳/۵۴	۰/۱۶	۰/۱۷
		> ۳	۳/۱۰	۱/۶۵	۰/۴۸	۰/۴۳	۹/۰۰	۰/۱۸	
	چندخطی	<= ۴	۷/۳۳	۰/۹۱	۰/۴۱	۰/۴۱	۵/۳۰	۰/۱۸	۰/۱۷۵
		> ۴	۲/۷۲	۱/۷۰	۰/۴۵	۰/۳۵	۷/۲۲	۰/۱۷	
	<= ۵	<= ۵	۷/۳۶	۰/۹۶	۰/۴۲	۰/۵۰	۵/۷۳	۰/۱۶	۰/۱۷
		> ۵	۲/۷۸	۱/۶۹	۰/۴۲	۰/۳۰	۶/۵۰	۰/۱۸	
	<= ۷	<= ۷	۷/۳۳	۱/۰۴	۰/۴۴	۰/۴۹	۱۰/۹۰	۰/۲۱	۰/۱۵۵
> ۷		۳/۳۶	۱/۶۳	۰/۳۵	۰/۲۷	۱/۹۶	۰/۱۰		
<= ۱۰	<= ۱۰	۷/۰۶	۱/۱۲	۰/۴۹	۰/۶۰	۱۲/۱۹	۰/۱۸	۰/۲۷	
	> ۱۰	۵/۳۲	۱/۴۸	۰/۲۵	۰/۰۳	۱/۰۸	۰/۳۶		
حد وسط دسته‌ها	کل داده‌ها	۸/۳۱	۱/۴۵	۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۴۸	۰/۰۴	۰/۰۴	
ماهانه	کل داده‌ها	۵/۵۵	۱/۳۷	۰/۶۰	۰/۷۴	۱۱/۷۵	۰/۱۶	۰/۱۶	
سالانه	کل داده‌ها	۲/۹۵	۲/۰۵	۰/۵۷	۰/۱۲	۰/۲۵	۰/۰۴	۰/۰۴	
فصلی	پائیز	۲/۷۵	۱/۵۸	۰/۷۵	۰/۲۴	۱/۵۴	۰/۲۶	۰/۲۱	
	زمستان	۴/۵۴	۱/۴۵	۰/۴۲	۰/۷۱	۰/۴۴	۰/۰۷		
	بهار	۶/۶۸	۱/۴۸	۰/۶۶	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۱۱		
کلاسه‌بندی دبی	تابستان	۸/۱۲	۰/۹۷	۰/۵۲	۰/۶۶	۲/۴۲	۰/۴۰	۰/۳۱	
	A	۷/۱۹	۰/۸۸	۰/۴۳	۰/۴۹	۲/۰۶	۰/۱۲		
	B	۳/۵۳	۱/۵۷	۰/۳۴	۰/۴۲	۹/۱۳	۰/۱۷		
ماه‌های سیلابی و غیرسیلابی	C	۴۴/۷۷	-۰/۲۸	۰/۰۷	۰/۶۷	۲/۵۲	۰/۶۳	۰/۱۵	
	سیلابی	۲/۹۵	۱/۷۳	۰/۴۳	۰/۳۴	۴/۶۴	۰/۱۳		
غیرسیلابی	غیرسیلابی	۶/۵۹	۱/۱۳	۰/۴۸	۰/۶۸	۶/۲۸	۰/۱۸	۰/۱۵	

جدول ۲- خلاصه پارامترهای آماری بر اساس مدل‌های مختلف FAO

نام مدل	تفکیک داده‌های دبی	a'	b	R <sup>2</sup> صحت‌سنجی	مجموع مربعات خطا (SSE)	میانگین مربعات خطا (MSE)	میانگین کل مربعات خطا (MSE) <sub>m</sub>
بدون تفکیک	کل داده‌ها	۱۶/۴۷	۱/۳۰	۱/۰۰	۶/۵۶	۰/۰۹	۰/۰۹
یک خطی (بهترین همبستگی)	یک سال	۳/۹۷	۲/۰۵	۰/۹۸	۱۱/۵۷	۰/۱۶	۰/۱۶
چندخطی	<=۷	۱۳/۴۹	۱/۰۴	۰/۷۴	۴/۶۸	۰/۰۹	۰/۰۸۵
	>۷	۷/۲۸	۱/۶۳	۰/۹۷	۱/۵۶	۰/۰۸	۰/۰۸۵
حد وسط دسته‌ها	کل داده‌ها	۱۲/۴۲	۱/۴۵	۰/۹۹	۰/۳۱	۰/۰۳	۰/۰۳
ماهانه	کل داده‌ها	۱۵/۰۳	۱/۳۷	۱/۰۰	۶/۱۹	۰/۰۹	۰/۰۹
سالانه	کل داده‌ها	۳/۸۱	۲/۰۵	۰/۷۵	۰/۲۸	۰/۰۷	۰/۰۷
فصلی	پائیز	۷/۴۳	۱/۵۸	۰/۹۴	۰/۱۹	۰/۰۵	۰/۱۴۵
	زمستان	۱۱/۰۷	۱/۴۵	۰/۶۷	۰/۳۳	۰/۰۸	۰/۱۴۵
	بهار	۱۶/۶۵	۱/۴۸	۱/۰۰	۰/۷۷	۰/۱۹	۰/۱۴۵
کلاسه‌بندی دبی	تابستان	۱۴/۹۴	۰/۹۷	۰/۳۸	۱/۰۵	۰/۲۶	۰/۱۴۵
	A	۱۲/۱۰	۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۶۳	۰/۰۴	۰/۱۹۶
	B	۷/۷۶	۱/۵۷	۰/۹۷	۳/۸۱	۰/۰۷	۰/۱۹۶
سیلابی و غیرسیلابی	C	۳۴۸/۹۱	-۰/۲۸	۰/۳۴	۰/۹۶	۰/۴۸	۰/۱۹۶
	ماه سیلابی	۶/۴۹	۱/۷۳	۰/۹۶	۳/۳۱	۰/۱۰	۰/۰۸
	ماه غیرسیلابی	۱۵/۴۱	۱/۱۳	۰/۹۶	۱/۹۹	۰/۰۶	۰/۰۸

برای محاسبه بار معلق درازمدت به روش مورد نظر در شکل ۲ آمده است.

به منظور انتخاب بهترین مدل از شاخص‌های آماری مجموع مربعات خطا، میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین استفاده شده است که با دقت در جداول ۱ و ۲ ملاحظه می‌گردد که مدل حد وسط دسته‌ها به روش FAO از شرایط بهتری نسبت به بقیه مدل‌ها و مدل‌های روش USBR برخوردار است. چون دارای حداقل میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین بالا می‌باشد. به این دلیل که در این روش از داده‌های دبی جریان و رسوب معلق میانگین‌گیری می‌شود، لذا تأثیر دبی‌های پائین

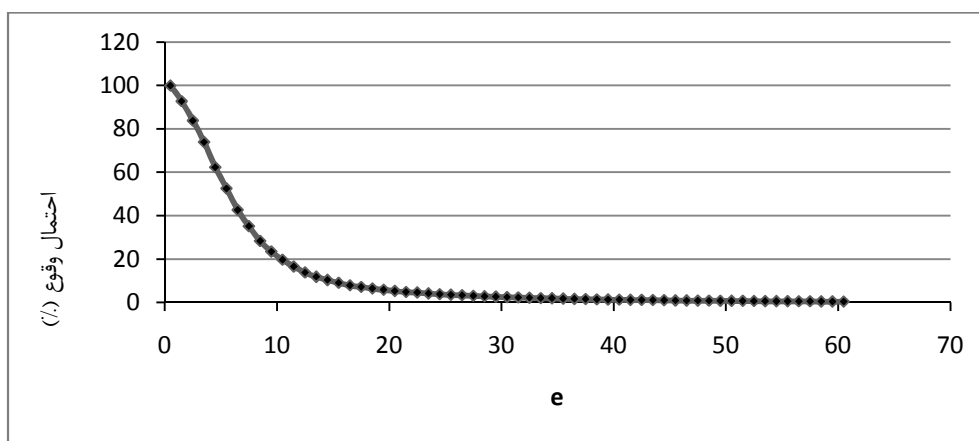
از بین کلاسه‌های مختلف روش چندخطی، کلاسه‌بندی بر اساس دبی ۷ مترمکعب بر ثانیه به دلیل داشتن شاخص‌های آماری بهتر یعنی حداقل میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین بالاتر انتخاب گردید. بنابراین روش فائو و سایر محاسبات فقط برای این کلاسه ارائه شده است. هم چنین نتایج برآورد بار رسوب معلق درازمدت سالانه با تلفیق مدل‌های پیشنهادی و روش‌های دبی جریان (منحنی تداوم جریان، دبی متوسط روزانه و دبی متوسط ماهانه) طبق روش‌های USBR و FAO در جدول ۳ و منحنی تداوم جریان درازمدت سالانه در ایستگاه قرآن تالار بابل‌رود



عنوان مدل مناسب معرفی می‌گردد. معادله  
سنجه رسوب این مدل طبق جدول ۲ به صورت  
زیر می‌باشد:

$$Q_s = 12.42 Q_w^{1.45} \quad (9)$$

کمتر بوده و در دبی‌های بالا خطای برآورد  
کمتری دیده می‌شود. هم چنین طبق جدول  
۳، روش دبی متوسط روزانه بهتر از دو روش  
دیگر بار معلق درازمدت سالانه را برآورد  
می‌کند. بنابراین روش تلفیق مدل حد وسط  
دسته‌ها به روش FAO با دبی متوسط روزانه به



شکل ۲- منحنی تداوم جریان درازمدت سالانه رودخانه بابلرود- ایستگاه قرآن تالار  
دبی جریان (m<sup>3</sup>/s)

جدول ۳- برآورد درازمدت رسوب معلق سالانه با مدل‌های پیشنهادی و روش‌های مختلف دبی جریان

بار رسوب معلق سالانه بر اساس روشهای دبی جریان (تن در سال)						تفکیک داده‌های دبی	نام مدل
دبی متوسط ماهانه		دبی متوسط روزانه		منحنی تداوم جریان			
FAO	USBR	FAO	USBR	FAO	USBR		
۸۶۵۳۲/۸	۳۲۱۵۴/۳	۹۴۹۴۴/۹	۳۵۲۸۰/۱	۸۶۱۴۹/۰	۳۲۰۱۱/۶	کل داده‌ها	بدون تفکیک
۱۳۱۴۰۸/۰	۲۶۴۸۰/۲	۲۲۶۹۳۵/۲	۴۵۷۳۰/۰	۱۳۳۳۶۰/۵	۲۶۸۱۳/۷	یک سال	یک خطی (بهترین همبستگی)
۴۷۰۷۲/۸	۲۲۳۱۰/۳	۱۰۲۲۸۴/۱	۴۸۲۶۰/۷	۸۰۳۳۳/۲	۳۸۰۶۸/۶	<= ۷ > ۷	چندخطی
۶۲۵۲۳/۱	۶۱۹۰۵/۶	۱۰۸۳۷۶/۶	۷۲۵۱۲/۸	۹۲۸۱۰/۲	۶۲۰۹۷/۷	کل داده‌ها	حد وسط دسته‌ها
۹۲۸۳۹/۴	۳۴۲۸۲/۰	۱۰۴۸۵۷/۰	۳۸۷۱۹/۶	۹۲۷۵۹/۳	۳۴۲۵۲/۴	کل داده‌ها	ماهانه
۱۲۶۱۱۱/۹	۹۷۶۴۵/۷	۲۱۷۷۸۹/۲	۱۶۸۶۲۹/۴	۱۲۷۹۸۵/۸	۹۹۰۹۶/۶	کل داده‌ها	سالانه
۹۱۳۷۶/۶	۳۷۱۶۳/۴	۱۰۶۳۶۸/۱	۴۲۹۱۸/۰	۸۲۳۴۷/۸	۳۳۹۳۹/۳	کل داده‌ها	فصلی
۲۵۰۳۲/۱	۱۴۸۷۴/۴	۲۴۳۸۵/۱	۱۴۴۹۰/۰	۲۴۴۴۸/۴	۱۴۵۲۷/۶	A	
۷۶۹۳۶/۰	۳۴۹۹۷/۹	۹۵۸۲۶/۱	۴۳۵۹۱/۰	۷۷۵۹۲/۸	۳۵۲۹۶/۷	B	کلاس‌بندی دبی
۷۹۳۳۶/۷	۱۰۱۸۰/۰	۸۶۹۷۵/۱	۱۱۱۶۰/۱	۸۰۵۳۳/۹	۱۰۳۳۳/۶	C	
۹۵۰۸۲/۶	۴۳۲۱۹/۴	۱۳۰۱۷۹/۷	۵۹۱۷۲/۶	۹۶۴۲۰/۳	۴۳۸۲۷/۴	سیلابی	ماههای سیلابی
۵۵۰۸۱/۲	۲۳۵۵۵/۲	۵۶۹۶۰/۹	۲۴۳۵۹/۰	۵۴۳۶۶/۶	۲۳۲۴۹/۶	غیرسیلابی	و غیرسیلابی

جدول ۴، مقادیر بار رسوب معلق مدل‌های پیشنهادی را با مدل مناسب در درازمدت سالانه به روش FAO و بر اساس ایستگاه قرآن تالار مورد مقایسه قرار داده است.

جدول ۴- مقایسه رسوب معلق درازمدت سالانه مدل‌های مختلف FAO نسبت به مدل مناسب\*

مدل‌های پیشنهادی									
سیلابی و غیرسیلابی	کلاسه بندی	فصلی	سالانه	ماهانه	حد وسط دسته‌ها	چندخطی	یک خطی	بدون تفکیک	نوع روش دبی جریان
۰/۷۰	۰/۵۶	۰/۷۶	۱/۱۸	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۷۴	۱/۲۳	۰/۷۹	منحنی تداوم جریان
۰/۸۶	۰/۶۴	۰/۹۸	۲/۰۰	۰/۹۷	۱/۰۰	۰/۹۴	۲/۰۹	۰/۸۸	دبی متوسط روزانه
۰/۶۹	۰/۵۶	۰/۸۴	۱/۱۶	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۴۳	۱/۲۱	۰/۸۰	دبی متوسط ماهانه

\*: منظور مدل تلفیقی حد وسط دسته‌ها به روش FAO با دبی متوسط روزانه می‌باشد.

میانگین سالانه دبی جریان و دبی رسوب تفکیک شده‌اند. اما در بین مدل کلاسه‌بندی، مدل C نتایج قابل قبولی ارائه نداده و می‌توان با کلاسه‌بندی هرچه دقیق‌تر، نتایج مناسب‌تری بدست آورد.

نتایج مدلی که در آن داده‌ها به دو دسته ماههای سیلابی و غیرسیلابی تقسیم شده‌اند نشان می‌دهد که میزان انتقال رسوب در ماههای سیلابی نسبت به ماههای غیرسیلابی بیشتر می‌باشد، چرا که در ماههای غیرسیلابی دبی جریان کم بوده و اغلب در حالت پایه می‌باشد و حداقل تأثیر را بر میزان فرسایش خواهد داشت. اما در مقابل در ماههای سیلابی، افزایش دبی جریان، فرسایش آبراهه‌ای بیشتری را در پی خواهد داشت که با نتایج حیدرنژاد و همکاران (۴) در برآورد بار رسوب دو ایستگاه هیدرومتری سیرا و بیلقان حوزه آبخیز سد مخزنی امیر کبیر (کرج) مطابقت دارد.

با جمع‌بندی نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف رگرسیون آماری، می‌توان

با مراجعه به جدول ۴ مشخص می‌شود که بیشترین نسبت، متعلق به روش تلفیق مدل یک خطی و دبی متوسط روزانه بوده و کمترین آنها متعلق به روش تلفیق مدل چندخطی با دبی متوسط ماهانه است. بنابراین با تقسیم آنها بر هم (تقسیم ۲/۰۹ بر ۰/۴۳) تقریباً عدد ۵ بدست می‌آید. در نتیجه می‌توان گفت برآورد بار رسوب معلق سالانه به روش FAO تا ۵ برابر نسبت به هم اختلاف دارند که با نتایج مطالعات میرابوالقاسمی و مرید (۸) در رسوب‌خیزی حوزه آبریز رودخانه کرخه مطابقت دارد. هم‌چنین، استفاده از روش متداول (روش منحنی تداوم جریان و منحنی سنج رسوب)، میزان رسوب‌دهی را ۲۱ درصد کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند، اما به دلیل سادگی روش، در مقایسه با روش مبتنی بر محاسبه رسوب روزانه کاربرد بیشتری دارد.

نتایج مدل سالانه نشان می‌دهد که این مدل نسبت به سایر حالات به مدل مناسب این ایستگاه نزدیک‌تر است، چون داده‌ها بر اساس

دریافت که منحنی سنج رسوب بدون تفکیک نمودن داده‌ها همواره با مقداری خطا همراه است. بنابراین، استفاده از متوسط دسته‌های دبی، کلاسه‌بندی دقیق و تفکیک زمانی داده‌ها می‌تواند به کاهش خطای برآورد دبی رسوب کمک نماید. همچنین بهره‌گیری از دبی متوسط روزانه بجای دبی متوسط ماهانه و منحنی تداوم جریان و تلفیق آن با مدل بهینه، بار معلق درازمدت سالانه را بهتر برآورد خواهد نمود.

## منابع

1. Asselman, N.E.M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*. 234: 234-248.
2. Balamurugan, G. 1989. The use of suspended sediment rating curves in Malaysia: some preliminary considerations. *Pertanika*, 12(3): 367-376.
3. Cigizoglu, K. 2003. Estimation and forecasting of daily suspended sediment data by multi-layer perceptrons. *Advances in Water Resources*. 27: 185-195.
4. Heydarnejad, M., S. Golmaei, A. Mosaedi and M.Z. Ahmadi. 2004. Optimized sediment load estimation model (Case Study: inlet and outlet of Karaj Hydrometric stations). *Bulletin of Khazar Agricultural Sciences and Natural Resources*. 2(6): 54-67. (In Persian)
5. Horowitz, A.J. 2002. The use of rating (transport) curves to predict suspended sediment concentration: a matter of temporal resolution. *Turbidity and other sediment surrogates Workshop*. U.S. Geological Survey. 3 pp.
6. Khozestan. Power and Water Organization. 2006. A review of phase one studies on hydroelectric power plant. Sadat Hosseini of Izeh. Ministry of Energy. 250 pp. (In Persian)
7. Mazandaran Regional Water Authority. 1985. Water resources development plan of Talar, Babol and Haraz Rivers. Phase one. *Hydrology Report*. 3: 195 pp. (In Persian)
8. Miraboulghasemi, M. and S. Morid. 1995. Investigation of hydrological method in river suspended sediment load estimation. *Journal of Water and Technology*. 3(3): 54-67. (In Persian)
9. Mirzaei, M. 2002. Comparison of statistical method of suspended load estimation in rivers (Case study: Gorganrood river). MSc Thesis. University of Tehran, 130 pp. (In Persian)
10. Mosaedi, A., F. Hashemin Najafi, M. Heydarnejad, M. Nabizade and M.A. Meshkati. 2009. Estimation of settling loads in Karaj and Dez Dam reservoirs. *Journal of Gorgan Agricultural Sciences and Natural Resources University*, 16(2). 261-272. (In Persian)
11. Pedram, I. and G.A. Barani. 2007. Evaluation of suspended sediment in dams reservoirs with separation of wet and dry periods (case study: Zayanderood dam), Iran. 6<sup>th</sup> Hydraulic Conference, Shahrekord University, 7 pp. (In Persian)
12. Phillips, J., B. Webb, D. Walling and G. Leeks. 1999. Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples. *Hydrological Processes*, 13(7): 1035-1050.

13. Piri, A. 2003. Optimization of flow and sediment discharge relation in Moarref Emame Basin. MSc Thesis, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. 120 pp. (In Persian)
14. Pour Aghniaei, M.J., M. Domiri Ganji, A. Yousef Pour and B. Ghermezcheshmeh. 2008. A review on estimation methods for suspended load (Case Study: Seydon Basin). *Iran-Water Resources Research*, 3(3): 73-75. (In Persian)
15. Rostami, M. and A. Ardeshir. 2001. A suggestion method to improve suspended sediment load estimation in rivers. 3<sup>rd</sup> Conference on Hydraulic of Sediment. Tehran University, 8 pp. (In Persian)
16. Youssefvand, F. 2004. Suggestion of a method for estimation of suspended load in rivers (case study: Ghresoo river). MSc Thesis, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, 138 pp. (In Persian)

## Comparison of Statistical Methods for Long-Term Suspended Sediment Yield Estimation (Case Study: Babolrood River)

Eassa Kia<sup>1</sup> and Alireza Emadi<sup>2</sup>

---

1- MSc Student, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University  
2- Assistant Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University  
(Corresponding author: emadia355@yahoo.com)

Received: December 10, 2011      Accepted: October 30, 2012

---

### Abstract

In the present study, by classifying the flow rate and dividing the time series, some statistical regression models are investigated and with the establishment of regression relationship between observed flow rate versus sediment rate and simulate it according to the least square error and USBR and FAO methods, the sediment rating curves are presented with the its statistical analysis. Then, the most appropriate model is selected according to statistical indexes viz. mean square error and determination coefficient. Moreover, the value of long term suspended sediment yield are estimated by combination of the proposed models and the type of flow rate such as flow integrated curve, mean daily flow rate and mean monthly flow rate. In this case, the daily measuring flow rate and sediment concentration for 23 years at Ghoran Talar Hydrometric station located in Babolrood River is used. Finally, the combined mid classes model according to FAO method with mean daily flow rate have been recommended as a suitable model.

**Keywords:** Long term suspended load, Sediment rating curve, Statistical model, Flow integrated curve