برآورد بار رسوب معلق رودخانه ها با استفاده از روش های هیدرولوژیکی مختلف (مطالعه موردی: رودخانه سیاهرود مازندران)

رضا صالحی طالشی[*1]، عسکری تشکری[2] و نجم الدین واصلی[3]

1) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات فارس،گروه عمران، فارس، ایران.
2) استادیار ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم شهر، گروه مهندسی آب، قائم شهر ، ایران.
3) استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات فارس، گروه مهندسی آب، فارس، ایران.

*** نویسنده مسئول مکاتبات**: rezasalehi2013@gmail.com

تاریخ دریافت: 91/3/25 **تاریخ پذیرش**:91/6/4

چکیده

در یک حوزه آبخیز، رسوب در اثر فرسایش و تحت تاثیر عواملی مانند تخریب مراتع، تغییر کاربری، کشاورزی غیر اصولی و سایر موارد بوجود می‌آید که مشکلاتی نظیر رسوب‌گذاری در مخازن و کاهش حجم مفید آن ها، کاهش کیفیت آب از لحاظ مصارف کشاورزی، کاهش بازدهی سازه‌های هیدرولیکی و نیز برخی مشکلات زیست محیطی را سبب می شود. تغییرات بار رسوبی در یک رودخانه پارامتر مهمی در مدیریت پروژه‌های آبی و شاخصی جهت نشان دادن وضعیت فرسایش خاک و شرایط اکولوژیکی حوزه می‌باشد. تخمین بار رسوبی رودخانه در محدوده وسیعی از مسائل، نظیر طراحی مخازن سدها، انتقال رسوب رودخانه‌ها، تعیین تاثیرات مدیریت آبخیزها و حفاظت محیط زیست کاربرد دارد. این تحقیق در مورد رودخانه سیاهرود استان مازندران انجام شده است که منبع اصلی تامین کننده آب بخش وسیعی از مزارع کشاورزی منطقه محسوب می شود. در این پژوهش با بررسی کارآیی منحنی‌های سنجه رسوب و انتخاب مناسب‌ترین منحنی، سعی شده است تخمین نسبتاً قابل اطمینانی از میزان بار معلق رسوبی رودخانه ارائه گردد. بدین منظور از آمار دبی روزانه جریان و آمار متناظر دبی جریان- دبی رسوب معلق که به صورت همزمان در برخی از روزهای سال اندازه‌گیری شده اند، طی یک دوره آماری 13 ساله (از سال آبی 78-1377 تا سال آبی 90-1389) از تنها ایستگاه هیدرومتری واقع در مسیر اصلی رودخانه استفاده شد. انتخاب مناسب‌ترین منحنی با استفاده از شاخص‌های آماری میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین انجام گردیده و با ترسیم منحنی های سنجه یک خطی، چند خطی و حد وسط دسته ها برای رودخانه‌ی مورد مطالعه، منحنی سنجه حد وسط دسته‌ها با ضریب تبیین 0/93 بعنوان منحنی سنجه رسوب مناسب انتخاب گردید و سپس با استفاده از روش‌های مختلف گذر حجمی، میزان بار معلق رودخانه برآورد شد. این روش‌ها شامل تلفیق منحنی سنجه حد وسط دسته‌ها با: دبی متوسط روزانه، دبی متوسط ماهانه، منحنی تداوم جریان و روش تلفیق دبی متوسط ماهانه و روزانه می‌باشد. در نهایت نتایج حاصل از این 4 روش باهم مقایسه گردید و روش منحنی سنجه حد وسط دسته ها و تلفیق آن با دبی متوسط روزانه، بعنوان مدل بهینه در برآورد بار رسوب معلق رودخانه سیاهرود مازندران انتخاب شد. ضمنا میزان بار رسوب معلق در محل ایستگاه هیدرومتری به روش انتخابی، 55855 تن در سال برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: رودخانه، رسوب، بار معلق، منحنی سنجه رسوب، منحنی تداوم جریان.

مقدمه

مواد رسوبی حمل شده در رودخانه ها به تبعیت از تغییر مشخصه های هندسی رودخانه و خصوصیات جریان، فرصت ترسیب یافتـه و این فرآیند به صورت پدیده ی رسوبگذاری در بازه های مختلف رودخانه خودنمایی می کند. بطورکلی رسوباتی که همراه با آب حرکت می کنند، به دو دسته ی بار بستر و بار معلق تقسیم می شوند که در این تحقیق به بررسی بار معلق می پردازیم. مقدار بار معلق عبـوری در یک مقطع از رودخانه ممکن است به ترکیبی از اثرات عمق و عرض جریان، شیب انرژی، دما، خصوصیات سیال، تلاطم جریـان آب و نیـز اندازه، شکل، چگالی، چسبندگی و غلظت ذرات معلق بستگی داشته باشد. تخمین بار معلق رسوب در محدوده وسیعی ازجمله بحث انتقال بار معلق و آلودگی رودخانه ها، طراحی مخازن سدها، حفاظت زیستگاه ماهی‌ها، تاثیرات مدیریت آبخیزها، مقابله با خطرات ناشی از تجمع مواد معلق رسوب در سازه‌های آبی و مخازن سدها و بحث تأمین آب مناسب برای مصارف کشاورزی کاربرد دارد. بار معلـق شـامل ذرات کوچکی می شود که در بدنه اصلی جریان در حال تعلیق می‌باشند و با سرعتی تقریبا معادل سرعت جریان حرکت می‌کنند.

در طول سالیان متمادی شمار زیادی از روابط برای محاسبه میزان بار رسوبات معلق رودخانه پیشنهاد گردیده است. متأسـفانه تعـدد روابط تجربی ارائه شده، اصلاح آن ها و ارائه ضرایب جدید واسنجی معادلات نشان می دهد هنوز روش تحلیلی جدید و مناسـبی کـه بـر اساس آن به تخمین درستی از میزان رسوبات حمل شده توسط جریان دسـت یافـت، ارائـه نشـده اسـت. میرزائـی (1381)، در مقایسـه روش‌های آماری برآورد بار رسوب معلق رودخانه گرگانرود به این نتیجه رسید که روش‌های مختلف گاهی تا 13 برابر نسبت بـه یکـدیگر اختلاف دارند. قبل از این، میرابوالقاسمی و مرید (1374) نیز در مقاله خود تحت عنوان بررسی روش‌های هیدرولوژیکی برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ها، بار معلق برآورد شده رودخانه کرخه را با استفاده از روش‌های متفاوت تا 5/85 برابر نسبت به یکدیگر متغیر دانستند.

همچنین باید توجه داشت که روابط بوجود آمده، حداکثر ظرفیت حمل رودخانه را برآورد می کنند. در حالی که ممکن است این مقدار رسوب در اختیار رودخانه نباشد و دبی رسوب اندازه‌گیری شده خیلی کمتر از میزان محاسبه شده از روابط موجود باشد. به طور مثـال در رودخانه های کوهستانی، در فصل کم آبی سطح بستر آن ها از لایه‌ی درشت دانه پوشیده می شود و عملا مقدار رسوب اندازه‌گیری شده خیلی ناچیز می باشد. در عین حال روابط موجود ممکن است میزان حمل رسوب را بطور قابل توجهی محاسبه کنند (شـفاعی بجسـتان، 1378). به همین دلیل به منظور دستیابی به تخمین نزدیک به واقعیت، از میزان رسوبات حمل شده رودخانه از داده های همزمان اندازه گیری شده آبدهی- دبی رسوب در ایستگاه هیدرومتری استفاده و با رسم منحنی سنجه مربوطه، معادله ای جهت تخمین بار رسوب برای استفاده در دبی های مختلف بدست می آید.

بیاضی و همکاران (1390)، با استفاده از آمار و اطلاعات دبی رسوب و آبدهی متناظر با آن در 4 ایستگاه رسوب‌سنجی استان آذربایجان شرقی، به واسنجی منحنی سنجه رسوب و انتخاب بهترین منحنی سنجه برای رودخانه‌های این استان اقدام کردند. آن ها منحنی سـنجه یک‌خطی، چندخطی، حد وسط دسته‌ها، ضریب اصلاح FAO و ضریب اصلاح پارامتری را مورد بررسی قـرار داده و نهایتـاً روش منحنـی سنجه حد وسط دسته‌ها را به‌عنوان بهترین روش برگزیدند. آن ها روش ضریب اصلاح پارامتری را به‌دلیل دقت بسیار پایین آن، به‌شدت رد کردند.

احمدی، ملکیان و عابدی (1391)، به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین روش آماری جهت برآورد رسوب معلق رودخانه جاجرود از داده‌های متناظر دبی جریان- دبی رسوب در طی سال‌های 1351 تا 1387 ایستگاه رودک این رودخانه استفاده کردند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که روش منحنی سنجه دوخطی، دقیق‌تر و صحیح‌تر از سایر روش‌ها بوده و به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای برآورد بار رسوب معلق انتخاب شد. ضمن آن‌که، روش FAO کمترین دقت را نسبت به سایر روش‌ها دارا بود.

شمس عالم و همکاران (1390)، با بررسی آمار دبی رسوب و دبی جریان، منحنی سنجه 12 ایستگاه مهم استان فارس را ترسیم کرده و ضمن تعیین تاثیر عوامل فیزیوگرافی، اقلیمی، پوشش گیاهی و زمین شناسی بر روی فاکتورهای a و b در مدل توانی $Q_s=aQ_w^b$ ، منحنی سنجه حد وسط دسته‌ها را برای برآورد بار معلق رودخانه‌های این استان مناسب‌ترین روش دانستند.

این تحقیق به مطالعه و بررسی و همچنین برآورد میزان رسوبات معلق در رودخانه سیاهرود می پردازد. این امر به ما این امکان را می دهد که درصورت نیاز اقدامات لازم را جهت جلوگیری از مشکلات احتمالی آینده و نیز در زمان بهره برداری از ایستگاه‌های پمپاژ به انجام رسانیم. بدین منظور مجموعه اطلاعات و داده های آماری موجود برای تنها ایستگاه اصلی در محدوده مطالعاتی، جمع آوری شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. و با استفاده از روش‌های تحلیلی و آماری، نسبت به برازش، ارزیابی و مقایسه معادلات مناسب جهت برآورد بار معلق رودخانه سیاهرود اقدام می‌گردد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل تنها ایستگاه هیدرمتری واقع بر رودخانه سیاهرود از توابع شهرستان قائمشهر می باشد. رودخانه سیاهرود از جمله منابع تامین آب بخش وسیعی از اراضی کشاورزی شهرستان های قائمشهر و جویبار است. این رودخانه از نقطه‌ای با طول جغرافیایی 53 درجه و 28 دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی 36 درجه و 27 دقیقه شمالی و از ارتفاع 620 متری شرق روستای پرچینک، واقع در ارتفاعات بین قائم شهر و ساری در استان مازندران سرچشمه گرفته و پس از عبور از قائم شهر و شرق شهرستان جویبار، مستقلا به دریای مازندران می‌ریزد. وسعت سرشاخه سیاهرود 131/9 کیلومتر مربع بوده و طول شاخه اصلی آن تا دریا 73/61 کیلومتر است. حوزه سیاهرود با میزان بارش 759 میلی متر یکی از پر باران ترین مناطق کشور می باشد. تنها ایستگاه هیدرومتری فعال واقع بر این رودخانه که در سال 1377 در منطقه ساروکلا تأسیس گردیده، در طول جغرافیایی4-53-52 و عرض جغرافیایی 58-27-36 و در ارتفاع 37 متری قرار داشته که ارتفاع متوسط بالادست آن 252/4 متر می باشد.

مواد و روش‌ها

دراین تحقیق به آمار دبی متوسط روزانه جریان و دبی رسوب اندازه‌گیری شده در طول یک دوره آماری طولانی مدت در ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب‌سنجی واقع بر شاخه اصلی رودخانه سیاهرود نیاز می‌باشد. بدین منظور از آمار دبی روزانه جریان و آمار دبی جریان-

دبی رسوب معلق که به صورت همزمان در برخی از روزهای سال اندازه‌گیری شده اند، طی یک دوره آماری 13 ساله (از سال آبی 78-1377 تا سال آبی 90-1389) از تنها ایستگاه هیدرومتری واقع در مسیر اصلی رودخانه استفاده خواهد شد.

یکی از پارامترهای مهمی که در هیدرولوژی رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، منحنی تداوم جریان یا دبی کلاسه است. این منحنی از رسم تجمعی دبی رودخانه نسبت به زمان بدست می‌آید. برای این کار روش‌های مختلفی معمول است که از میان آن ها بهترین و مطمئن‌ترین روش، استفاده از متوسط گیری داده‌های درازمدت می‌باشد. در این تحقیق برای رسم منحنی‌های احتمال درازمدت از متوسط دادههای دبی روزانه درازمدت استفاده خواهد شد و سپس احتمال وقوع برابر و بیشتر آن ها را بدست آورده و در یک صفحه مختصات رسم می‌کنیم. یکی از راه‌های کاربرد گذر حجمی رودخانه برای تخمین بار معلق درازمدت و استخراج آن از منحنی‌های سنجه رسوب، همین منحنی های تداوم جریان می‌باشد.

نمونه‌های غلظت رسوب در مقاطع مورد نظر برحسب میلی‌گرم بر لیتر گرفته شده و سپس غلظت متوسط آن ها محاسبه می‌گردد. برای تبدیل مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت متوسط مواد رسوبی معلق به دبی رسوب معلق از رابطه زیر استفاده می شود:

$$Q_S = 0.0864 \times C.Q_W \quad (1)$$

که در آن Q_S دبی مواد رسوبی معلق بر حسب تن بر روز، C متوسط غلظت مواد رسوبی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر، Q_W دبی جریان آب بر حسب متر مکعب بر ثانیه است.

تجربیات و مطالعات مختلفی که توسط منابع علمی مختلف از جمله اداره عمران اراضی امریکا (USBR) انجام شد به این نتیجه انجامید که بین دبی جریان و دبی مواد معلق رابطه زیر می‌تواند برقرار شود:

$$QS = a.QWb \quad (2)$$

در این رابطه Q_S میزان رسوب برحسب تن در روز و Q_W دبی جریان برحسب متر مکعب برثانیه و a وb مقادیر ثابت هستند. با بدست آمدن ضرائب a وb که به‌ترتیب شیب خط بهترین برازش برروی کاغذ لگاریتمی و فاصله محل تقاطع خط بهترین برازش با محور قائم تا مبدا مختصات می‌باشند، معادله سنجه رسوب برای مدل‌های مختلف بدست می‌آید. همچنین به منظور انتخاب بهترین مدل از شاخص حداقل میانگین مربعات خطا استفاده می شود (آسلمن،2000).

معادله (1) در واقع تابع حاصل از رگراسیون توانی بین دبی آب و دبی مواد معلق می باشد. معمولا میانگین مقادیری که از منحنی سنجه بدست می آید کمتر از میانگین مقادیر مشاهده شده است. همچنین چون محاسبه ضرائب این رابطه براساس تبدیل لگاریتمی داده ها و استفاده از روش حداقل مربعات انجام می شود، پراکندگی داده ها حول خط بهترین برازش غیر متقارن و فاصله حد اطمینان بالایی با خط رگراسیون بیشتر از حد از اطمینان پایینی خواهد بود (حمادی، 1378).

با در نظر گرفتن این مسأله که غلظت رسوب فقط در بعضی از روزهای سال اندازه گیری می شود به کمک معادله (1) دبی رسوب بـرای روز هایی که غلظت رسوب در آن روزها اندازه گیری نشده است، برآورد می شود. با توجه به اینکه عموماً در همه روزهای سال دبی جریان اندازه گیری می شود در نتیجه با استفاده از رابطه رگرسیونی (2) و بادر اختیار داشتن مقادیر Q_w می‌توان مقادیر دبی رسوب Q_s را برای کل دوره‌ی آماری مورد نظر برآورد نمود (کرافورد،1991).

جهت برآورد رسوب معلق دراز مدت روش های زیر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند:

1-روش منحنی سنجه رسوب یک خطی

2-روش منحنی سنجه رسوب چند خطی

3-روش منحنی سنجه حد وسط

روش های کاربرد گذر حجمی جریان رودخانه برای تخمین رسوبدهی بار معلق نیز به شرح زیر می باشند:

1-استفاده از منحنی تداوم جریان رودخانه

2-استفاده از دبی متوسط جریان روزانه

3-استفاده از دبی متوسط جریان ماهانه

4- استفاده از تلفیق دبی متوسط روزانه و ماهانه

ترسیم منحنی سنجه رسوب

براساس روشهای پیشنهادی، روابط شدت رسوبدهی برای ایستگاه مورد مطالعه به صورت زیر تعیین گردیده است:

منحنی سنجه رسوب یک خطی یا روش U.S.B.R

در این روش داده‌های موجود از اندازه‌گیری Qs و Qw متناظر با آن به صفحه مختصات لگاریتمی منتقل شده و خط بهترین برازش بر مبنای روش حداقل مربعات از میان آن ها عبور داده می شود و یک رابطه‌ی خطی به‌صورت معادله توانی $Q_S=a.Q_w^b$ استخراج می‌گردد که به منحنی سنجه رسوب یک‌خطی معروف است. یعنی تنها از یک رابطه رگرسیونی بین تمامی مقادیر دبی رسوب و دبی جریان اندازه‌گیری شده استفاده می شود(میلر،1951).

منحنی سنجه رسوب چند خطی

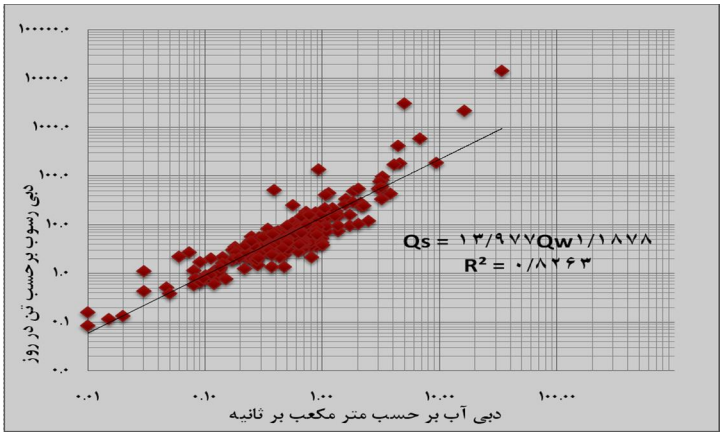
بر اساس توصیه U.S.B.R بر مبنای دسته‌بندی گذر حجمی رودخانه‌ها و چنانچه وضعیت پخشیدگی داده‌ها اقتضا کند به‌جای یک خط رگرسیون می‌توان دو یا چند خط از میان داده‌های اندازه گیری شده عبور داد که خط بهترین برازش نیز بر مبنای روش حداقل مربعات می‌باشد. یعنی از دو رابطه رگرسیونی یا بیشتر برای محاسبه بار معلق دراز مدت با توجه به چگونگی کاربردهای مختلف گذر حجمی استفاده می شود. خطوط برازش داده شده بایستی از ضریب همبستگی قابل قبولی برخوردار باشند. در شکل 2 منحنی سنجه چند خطی با بهترین برازش ممکن در ایستگاه ساروکلا آمده است. همچنین برای تعیین محدوده دبی در روش منحنی سنجه چند خطی با توجه به پیشنهادات U.S.B.R استفاده شده است (میرابوالقاسمی،1374).

منحنی سنجه حد وسط دسته ها

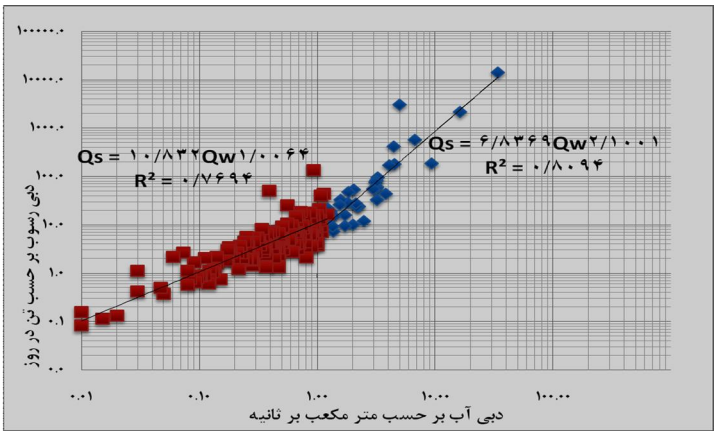
معمولاً بیشتر اندازه گیری‌های غلظت رسوب در رودخانه‌ها مربوط به حالت‌های آرام رودخانه و شرایط دبی پایین می‌باشد و در شرایط طغیان و مواقع سیلابی نمونه‌برداری کمتر صورت می‌گیرد. جانسون در سال 1996 روشی را در نظر گرفت که به دبی های بالا ارزش بیشتری داده شود که در این روش دبی های جریان با یک نمو معین به تعدادی دسته تقسیم شده و برای دبی متوسط هردسته، دبی رسوب متوسط اندازه گیری شده همان دسته تعیین می شود. در این روش ارزش بیشتری به دبی‌های سیلابی که مسئول حمل قسمت اعظم رسوب هستند داده می شود و چون میزان خطای ناشی از تبدیل لگاریتمی به تعداد و پراکنش نقاط در نمودار منحنی سنجه رسوب بستگی دارد و از آنجاییکه در روش همبستگی بین متوسط داده‌ها، تعداد نقاط به حداقل می‌رسد، بنابراین خطای ناشی از تبدیل لگاریتمی تا حدود زیادی کاهش یافته که با استفاده از معادله سنجه رسوب و روش‌های مختلف دبی جریان می توان وزن دراز مدت رسوب معلق را محاسبه نمود (یوسفوند، 1385).

نتایج

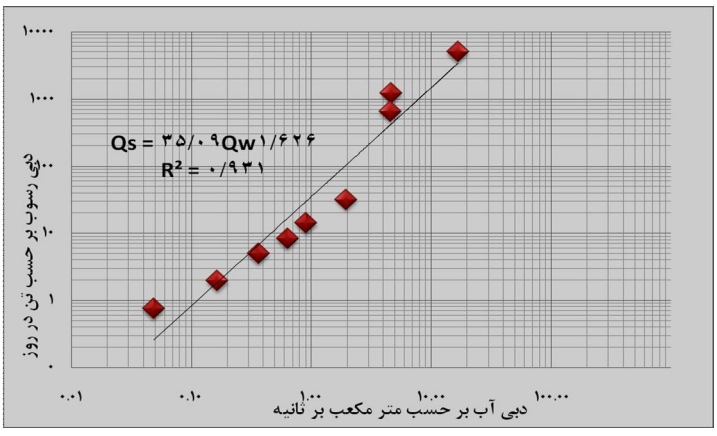
منحنی‌های لگاریتمی دبی جریان- دبی رسوب معلق (منحنی های سنجه رسوب) با استفاده از سه روش فوق برای ایستگاه ساروکلا از رودخانه سیاهرود در اشکال 1، 2 و 3 آمده است.



شکل 1: منحنی سنجه رسوب یک خطی



شکل2: منحنی سنجه رسوب چند خطی



شکل3: منحنی سنجه رسوب حد وسط دسته‌ها

با توجه به منحنی های ترسیم شده، معادلات سنجه رسوب بصورت زیر می باشند:

$$\begin{cases} Q_S = 13.977 Q_W^{1.188} \\ R^2 = 0.826 \end{cases}$$

(1)، معادله سنجی یک خطی

$$\begin{cases} Q_S = 10.832 Q_W^{1.0064} & Q_w < 1.21 \\ R^2 = 0.769 \\ Q_S = 6.84 Q_W^{2.1001} & Q_w > 1.21 \\ R^2 = 0.809 \end{cases}$$

(2)، معادله سنجه چند خطی

$$\begin{cases} Q_S = 35.09 Q_W^{1.6261} \\ R^2 = 0.931 \end{cases}$$

(3)، معادله سنجی حد وسط دسته ها

در همه این معادلات Q_s بر حسب تن بر روز و Q_w بر حسب متر مکعب بر ثانیه می باشد.

انتخاب مناسب‌ترین منحنی سنجه رسوب

با توجه به مقادیر شاخصهای ضریب تبیین و میانگین مربعات خطا در جدول1 در ایستگاه مورد مطالعه، معادله موجود در جدول 2، یعنی معادله $Q_S = 35.09\ Q_W^{1.6261}$ به عنوان روش مبنا انتخاب می شود.

بمنظور انتخاب بهترین مدل و دقت در برآورد رگرسیون، از شاخص میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین استفاده شد. براساس شاخص میانگین مربعات خطا هرچه مقادیر برآورد شده از مدل‌های انتخابی به مقادیر مشاهده‌ای نزدیکتر باشند، مجموع مربعات خطا کاهش یافته و در نتیجه میانگین مربعات خطا که از تقسیم مجموع مربعات خطا به درجه آزادی بدست می‌آید، کمتر می شود.

بررسی های به عمل آمده نشان داد مدل رگرسیونی حد وسط دسته‌ها که کمترین میانگین مربعات خطا و بالاترین ضریب تبیین را دارا بوده به عنوان مدل بهینه انتخاب گردید.

جدول 1: خلاصه ای از پارامترهای بدست آمده از مدلهای مورد استفاده در ایستگاه ساروکلا

نام مدل	تعداد داده ها	مجموع مربعات خطا	میانگین مربعات خطا	میانگین مربعات خطا	ضریب تبیین
سنجه یک خطی	186	18/56	0/101	0/101	**0/826**
سنجه چند خطی	35	3/64	0/11	0/18	**0/811**
	152	10/45	0/07	0/18	**0/769**
سنجه حد وسط دسته ها	**11**	**0/985**	**0/1**	**0/1**	**0/931**

جدول2: روش انتخابی در ایستگاه مورد مطالعه

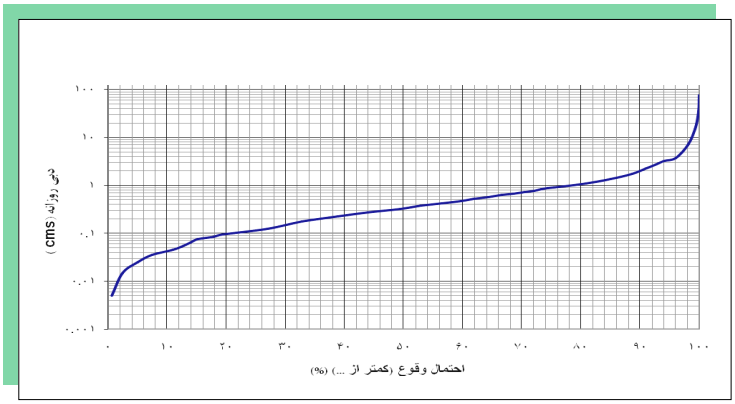
نام ایستگاه	روش انتخابی (منحنی سنجه حد وسط دسته ها)
ساروکلا	$Q_S = 35.09\,Q_W^{1.6261}$

روش‌های استفاده از دبی جریان

حال با توجه به انتخاب مناسب‌ترین منحنی سنجه‌ی رسوب و با استفاده از آن و تلفیق آن با دبی متوسط روزانه، دبی متوسط ماهانه، منحنی تداوم جریان و تلفیق دبی متوسط روزانه و ماهانه، اقدام به برآورد درازمدت بار رسوبی معلق رودخانه می‌نماییم.

روش منحنی تداوم جریان و تلفیق آن با منحنی سنجه رسوب

در این روش برای برآورد میانگین رسوب معلق درازمدت سالانه با استفاده از منحنی تداوم جریان به این طریق عمل شد که در یک دوره زمانی مشخص، می‌توان برای دبی‌های مختلف جریان، دبی رسوب متناظر را با استفاده از منحنی سنجه بدست آورد. همچنین احتمال وقوع دبی‌های جریان مذکور را در آن دوره محاسبه کرده و سپس رسوب معلق را برای دوره زمانی مورد نظر بدست آورد. بدین صورت که در جدول، ستون اول حدود دسته های احتمالاتی، ستون دوم فاصله دسته ها، ستون سوم حد وسط دسته ها، ستون چهارم دبی جریان با احتمال حد وسط هر دسته احتمالاتی که از منحنی تداوم بدست می آید. ستون پنجم حاصلضرب ستون دوم در ستون چهارم (ارزش وزنی گذر حجمی با احتمال وقوع حد وسط دسته) که مجموع ارقام این ستون متوسط روزانه دبی جریان رودخانه بر حسب متر مکعب بر ثانیه است. ستون ششم بار معلق برآورد شده از منحنی سنجه رسوب برای دسته مورد نظر و ستون هفتم ارزش وزنی تولید رسوب معلق (سهم هر دسته در متوسط تولید رسوب) هر دسته است که از حاصل ضرب ستون دوم در ستون ششم بدست می‌آید. مجموع ارقام ستون هفتم متوسط بار معلق درازمدت رودخانه بر حسب تن بر روز است. منحنی تداوم جریان برای ایستگاه مورد مطالعه در شکل4 آمده است.



شکل4: منحنی تداوم جریان درازمدت سالانه رودخانه سیاهرود در ایستگاه ساروکلا

نتایج حاصل از برآورد درازمدت سالانه رسوبدهی بار معلق به روش منحنی تداوم جریان و تلفیق آن با منحنی سنجه رسوب حد وسط دسته‌ها در جدول شماره 3 آمده است.

جدول3: محاسبه رسوب معلق دراز مدت با استفاده از روش معادله سنجه حد وسط دسته ها و تلفیق آن با منحنی تداوم جریان

1	2	3	4	5	6	7
			مقادیر منحنی دوام	(2*4)	با بهره گیری از منحنی سنجه رسوب	(۲*۶)
حدود دسته ها (%)	فواصل دسته ها	حد وسط فواصل احتمالی(%)	دبی آب با احتمال وقوع حد وسط (m3/s)	دبی روزانه آب (m3/s)	میزان دبی رسوب برای دبی آب نظیر از ستون(4) (تن در روز)	رسوب روزانه بار معلق (تن)
۰	۱۰	۰/۱	۵	۰/۰۰۲۰	۰/۱	۰/۰
۱۰	۲۰	۰/۱	۱۵	۰/۰۰۹۰	۰/۷	۰/۱
۲۰	۳۰	۰/۱	۲۵	۰/۰۱۵۰	۱/۶	۰/۲
۳۰	۴۰	۰/۱	۳۵	۰/۰۲۴۰	۳/۴	۰/۳
۴۰	۵۰	۰/۱	۴۵	۰/۰۳۵۰	۶/۴	۰/۶
۵۰	۶۰	۰/۱	۵۵	۰/۰۵۰۰	۱۱/۴	۱/۱
۶۰	۷۰	۰/۱	۶۵	۰/۰۶۲۰	۱۶/۱	۱/۶
۷۰	۸۰	۰/۱	۷۵	۰/۰۹۵۰	۲۳/۳	۳/۲
۸۰	۹۰	۰/۱	۸۵	۰/۱۹۰۰	۹۹/۷	۱۰/۰
۹۰	۹۵	۰/۰۵	۹۲/۵	۰/۱۴۹۰	۲۰۷/۲	۱۰/۴
۹۵	۹۸	۰/۰۳	۹۶/۵	۰/۱۸۰۰	۶۴۶/۶	۱۹/۴
۹۸	۹۹	۰/۰۱	۹۸/۵	۰/۱۱۵۰	۱۸۲۶/۵	۱۸/۶
۹۹	۹۹/۵	۰/۰۰۵	۹۹/۲۵	۰/۰۷۳۳	۲۷۶۴/۱	۱۳/۸
۹۹/۵	۹۹/۸	۰/۰۰۳	۹۹/۶۵	۰/۰۸۰۴	۷۳۷۲/۲	۲۲/۱
۹۹/۸	۹۹/۹	۰/۰۰۱	۹۹/۸۵	۰/۰۴۶۰	۱۷۷۴۶/۷	۱۷/۷
۹۹/۹	۹۹/۹۵	۰/۰۰۰۵	۹۹/۹۲۵	۰/۰۳۳۸	۳۳۱۰۸/۴	۱۶/۶
۹۹/۹۵	۹۹/۹۷	۰/۰۰۰۲	۹۹/۹۶	۰/۰۱۳۸	۳۴۳۹۴/۰	۶/۹
۹۹/۹۷	۹۹/۹۹	۰/۰۰۰۲	۹۹/۹۸	۰/۰۱۴۲	۳۵۹۵۳/۲	۷/۲

روش دبی متوسط روزانه و تلفیق آن با منحنی سنجه رسوب

در این روش با قراردادن داده‌های دبی روزانه جریان در معادله‌ی سنجه رسوب، بار رسوب معلق آن روز بدست می‌آید. بر این اساس برای هر سال با جمع بار معلق تمام روزهای سال، تولید رسوب معلق همان سال بدست می آید که اگر مجموع تولید رسوبات معلق سالهای دوره آماری را به تعداد سالها تقسیم کنیم، متوسط تولید رسوب معلق سالانه بدست می آید. بار رسوب معلق سالانه در طی دوره آماری با استفاده از منحنی سنجه حد وسط دسته‌ها و تلفیق آن با آبدهی روزانه در جدول 4 آورده شده است.

جدول4: برآورد بار رسوب معلق سالانه به روش منحنی سنجه حد وسط دسته ها و دبی متوسط روزانه جریان

رودخانه	ایستگاه	کد	سال آبی		رسوب (تن)
سیاهرود	ساروکلا	14 -024	1377	78	22760
سیاهرود	ساروکلا	14 -024	1378	79	99882
سیاهرود	ساروکلا	14 -024	1379	80	57627
سیاهرود	ساروکلا	14 -024	1380	81	41003
سیاهرود	ساروکلا	14 -024	1381	82	42424
سیاهرود	ساروکلا	14 -024	1382	83	84355
سیاهرود	ساروکلا	14 -024	1383	84	112690
سیاهرود	ساروکلا	14 -024	1384	85	74321
سیاهرود	ساروکلا	14 -024	1385	86	42509
سیاهرود	ساروکلا	14 -024	1386	87	16468
سیاهرود	ساروکلا	14 -024	1387	88	53809
سیاهرود	ساروکلا	14 -024	1388	89	65797
سیاهرود	ساروکلا	14 -024	1389	90	12491

روش دبی متوسط ماهانه و تلفیق آن با منحنی سنجه رسوب

در این روش با استفاده از معادله‌ی سنجه رسوب و دبی‌های متوسط ماهانه در طول دوره آماری، برای هر یک از 12 ماه متوسط تولید رسوب در تمام دوره آماری محاسبه شده و با جمع کردن بارهای رسوبی متوسط ماهانه هر سال، تولید رسوب معلق سالانه بدست آمده است. حال اگر مجموع تولید رسوب سالهای دوره آماری را به تعداد سالها تقسیم کنیم، تولید رسوب معلق سالانه بدست می آید. بار رسوب معلق سالانه در طی دوره آماری، با استفاده از روش حد وسط دسته‌ها و تلفیق آن با آبدهی متوسط ماهانه در جدول 5 آورده شده است.

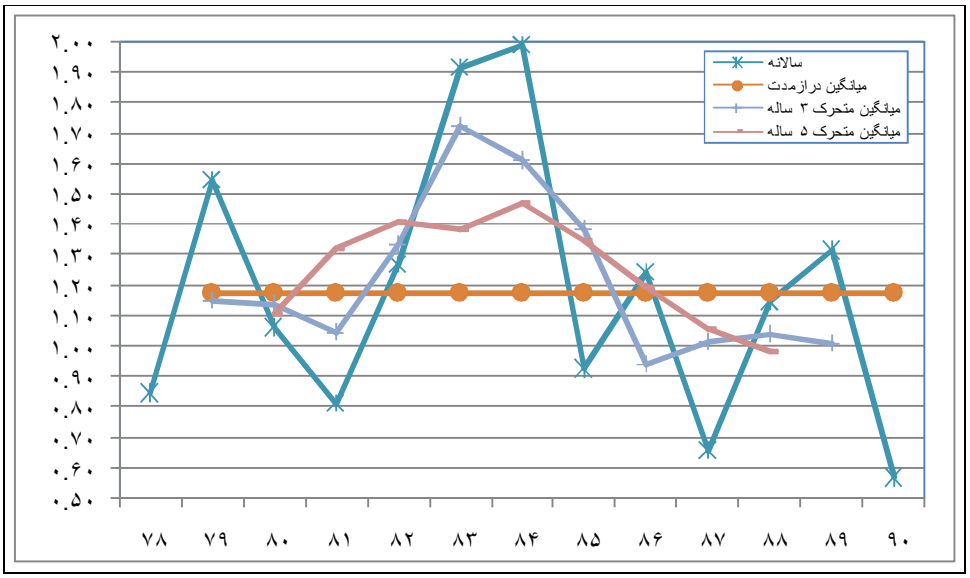
جدول5: برآورد بار رسوب معلق سالانه به روش منحنی سنجه حد وسط و دبی متوسط ماهانه

رسوب (تن)	سال آبی		کد	ایستگاه	رودخانه
435	78	1377	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
1173	79	1378	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
708	80	1379	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
400	81	1380	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
726	82	1381	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
1483	83	1382	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
1908	84	1383	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
771	85	1384	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
868	86	1385	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
373	87	1386	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
716	88	1387	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
929	89	1388	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
245	90	1389	14 -024	ساروکلا	سیاهرود

روش تلفیق دبی متوسط روزانه و ماهانه و تلفیق آن با منحنی سنجه رسوب

در این روش از دوره آماری مورد نظر، سه سال از آمار جریان طوری انتخاب می شود که بیانگر دوره‌های ترسالی، خشکسالی و متوسط باشند. دبی رسوب روزانه این سه سال به تفکیک ماه و با استفاده از معادلات منحنی سنجه رسوب بدست آمده و با جمع کردن دبی رسوب روزانه برای هر یک از ماه‌ها، تولیدرسوب این 36 ماه بدست می‌آید. حال رابطه‌ای بین دبی متوسط ماهانه و تولید رسوب معلق ماهانه متناظر با آن برقرار می‌گردد. با استفاده از این رابطه و دبی‌های متوسط ماهانه در طول دوره آماری معین، برای هریک از 12ماه، متوسط تولید رسوب در تمام دوره آماری محاسبه می‌شود و سپس با جمع کردن دبی‌های متوسط ماهانه، تولید رسوب معلق سالانه بدست می‌آید.این روش توسط شرکت مهندسین مشاور جاماب توصیه و بکارگرفته شده است.

در این راستا میانگین متحرک 3 و 5 ساله در طی دوره آماری در شکل 5 آورده شده است. با توجه به این نمودار، سال آبی 83-82 بعنوان ترسالی، سال آبی 87-86 خشکسالی و سال آبی 88-87 متوسط در نظر گرفته شده است. در نهایت نتایج محاسبات برآورد رسوب معلق سالانه در طی سالهای آماری 78-1377 الی 90-1389 با استفاده از روش منحنی سنجه حد وسط دسته‌ها و تلفیق آن با آبدهی روزانه، در جدول 6 آورده شده است (رستمی،1380).



شکل 5: میانگین متحرک 3 و 5 ساله آبدهی میانگین درازمدت سالانه

جدول6: برآورد بار رسوب معلق سالانه به روش منحنی سنجه حدوسط و تلفیق آن با دبی متوسط روزانه و ماهانه

رسوب (تن)	سال آبی	کد	ایستگاه	رودخانه
23167	78	1377	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
65149	79	1378	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
38822	80	1379	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
21241	81	1380	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
39051	82	1381	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
82542	83	1382	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
109181	84	1383	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
43766	85	1384	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
47892	86	1385	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
20214	87	1386	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
39068	88	1387	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
51205	89	1388	14 -024	ساروکلا	سیاهرود
12862	90	1389	14 -024	ساروکلا	سیاهرود

برآورد درازمدت سالانه رسوبدهی بار معلق

اگر مجموع تولید رسوب برآوردی سالهای دوره آماری 78-1377 الی 90-1389 را به تعداد سالها تقسیم کنیم، تولید رسوب معلق درازمدت سالانه بدست می آید. نتایج برآورد بار رسوبدهی معلق دراز مدت بر حسب تن در سال به روش منحنی سنجه حد وسط دسته‌ها و روش‌های مختلف دبی جریان در جدول 7 ارائه گردیده است.

جدول 7: برآورد بار رسوبدهی معلق دراز مدت (تن در سال) به روش منحنی سنجه حد وسط دسته‌ها و روش‌های مختلف دبی جریان

نام ایستگاه		ساروکلا
معادله منحنی سنجه رسوب حد وسط دسته ها		$Q_S = 35.09Q_W^{1.6261}$
برآورد دراز مدت رسوب معلق با استفاده از روشهای دبی جریان	روش منحنی تداوم جریان	54672
	روش دبی متوسط روزانه	55855
	روش دبی متوسط ماهانه	826
	روش تلفیق دبی متوسط روزانه و ماهانه	45705

بحث و نتیجه‌گیری

بهترین روش برای برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ها، روش‌های برآورد مستقیم می‌باشد. در این روش باید آمار مفصلی از غلظت که معرف تغییرات غلظت در طول دوره زمانی موردنظر می‌باشد و نیز دبی جریان متناظر با آن در دست باشد. معمولا دبی جریان آب اغلب با فواصل زمانی روزانه، ساعتی و حتی کوتاهتر در ایستگاه‌های اندازه‌گیری موجود است ولی از آنجایی که نمونه‌برداری‌های غلظت رسوب معمولا با نمونه‌بردارهای دستی صورت می‌گیرد، جمع‌آوری چنین آماری برای غلظت رسوب بعلت هزینه بالا، کمبود نیروی انسانی و مسائل دیگر بسیار مشکل است. در سالهای اخیر برای حل این مشکل، تکنولوژی اندازه‌گیری مداوم با استفاده از گل‌آلودگی سنج‌ها، که تغییرات گل‌آلودگی را ثبت می‌کنند و یا نمونه‌برداری پمپی از نوع اتوماتیک در فواصل زمانی کوتاه فراهم شده است (دهقانی و همکاران، 2010). اما متأسفانه این فن‌آوری‌ها هنوز در ایران بکار گرفته نشده‌اند. بنابراین در حال حاضر استفاده از روش مستقیم بخصوص برای شرایط ایران تقریبا منتفی است.

از این رو، در نبود آمار مفصلی از غلظت رسوب، باید از روشهای غیرمستقیم برآورد بار معلق که شامل روش‌های درون‌یابی و برون‌یابی داده‌های غلظت رسوب است، استفاده کرد. با توجه به معایب روش‌های درون‌یابی، معمولا از روش‌های برون‌یابی (روشهای منحنی سنجه رسوب) برای برآورد بار معلق رودخانه‌ها در ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب‌سنجی استفاده می‌گردد. در روش‌های منحنی سنجه رسوب بین نمونه‌های محدودی از غلظت رسوب که در طول دوره آماری جمع‌آوری شده‌اند و دبی جریان متناظر با آن، رابطه‌ای برقرار شده و سپس با استفاده از این رابطه و دبی جریان، بار معلق دوره آماری به‌دست می‌آید. روش‌های زیادی در این زمینه وجود دارند که یا در نوع منحنی سنجه و یا شیوه استفاده از دبی جریان با هم متفاوت‌اند.

روش متداولی که از زمآن های قدیم جهت برآورد بار رسوب معلق به‌کار می‌رفته است، روش منحنی تداوم جریان و تلفیق آن با منحنی سنجه رسوب می‌باشد. طبق گزارش وانونی (1977)، استفاده از منحنی تداوم جریان در برآورد رسوب‌دهی سالانه از اواخر سال‌های

دهه 1950 یعنی بیش از 50 سال پیش مرسوم گشته است. در سالهای اخیر با ابداع فنون جدید نمونه‌برداری و اندازه‌گیری غلظت جریان به‌صورت مداوم و تعیین مقدار واقعی رسوب‌دهی معلق رودخانه مشخص شد که روش مذکور، میزان رسوب‌دهی را کم‌تر از مقدار واقعی خود برآورد می‌کند. مسئله برآورد کم‌تر بار معلق به‌وسیله روش متداول (روش منحنی تداوم جریان و تلفیق آن با منحنی سنجه رسوب) توسط سازمآن های مختلفی مانند FAO و محققینی نظیر فرگوسن (1986) و کرافورد (1991) و در کشورمان نیز توسط میرابوالقاسمی و مرید (1374) و عرب‌خدری و همکاران (1378) مورد تأیید قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین محاسن این روش، صرفه‌جویی در وقت و کاهش میزان محاسبات است. اما با توجه به توسعه تکنولوژی رایانه‌ها و افزایش سرعت محاسبات، برآورد رسوبدهی روزانه برای یک دوره آماری بلندمدت در لحظه‌ای کوتاه امکان‌پذیر می‌باشد.

جانسون (1996)، عامل اصلی برآورد کم‌تر از مقدار واقعی بار معلق را تعداد زیاد نمونه‌برداری‌های رسوبی در دبی‌های پایین ذکر کرده و روش حد وسط دسته‌ها را پیشنهاد کرده است. چراکه قسمت اعظم رسوبات، در چند سیل بزرگ حمل می‌شوند که تنها بخش کوچکی از دوره زمانی موردنظر را تشکیل می‌دهد. از طرف دیگر، نمونه‌برداری از غلظت رسوب به دلایل مختلف به تعداد محدود صورت می‌گیرد و این نمونه‌ها، معرف شرایط سیلابی و پرآبی رودخانه‌ها نخواهند بود. بنابراین تعدد نمونه‌های دبی پایه در روند منحنی سنجه مذکور، معرف دوره‌های سیلابی نخواهد بود. در روش حد وسط دسته‌ها ارزش بیشتری به دبی‌های بالا داده می‌شود. در ضمن چون در این روش تعداد نمونه‌ها به حداقل رسیده است، خطای ناشی از تبدیل لگاریتمی که به پراکنش داده‌ها و تعداد نقاط بستگی دارد نیز تا حدود زیادی کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق و با استفاده از شاخص های آماری میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین (مطابق با جدول 1)، نگارنده با توجه به دلایل زیر، برآورد به روش «منحنی سنجه رسوب حد وسط دسته‌ها و تلفیق آن با دبی متوسط روزانه» را صحیح‌تر و آن را به واقعیت نزدیک‌تر می داند:

الف) با توجه به این‌که عموماً در مواقع سیلابی و طغیان آب به‌دلیل کمبود امکانات، نمونه‌برداری از بار معلق در رودخانه‌ها انجام نشده و یا به‌ندرت انجام می‌شود و بیش‌تر نمونه‌های برداشت شده در ایستگاه‌ها مربوط به دبی‌های پائین و شرایط عادی رودخانه است، بنابراین تراکم نقاط در قسمت پائین، روند منحنی‌های سنجه ترسیم شده از طریق رگرسیون و روش حداقل مربعات را تحت تاثیر قرار داده و طبعاً این منحنی نمی‌تواند معرف دوره‌های پررسوب باشد. در مقابل، در روش حد وسط دسته‌ها به‌واسطه کاهش اثر دبی‌های پائین، وزن بیش‌تری به دبی‌های بالا داده می شود.

ب) با توجه به این‌که فرگوسن (1986) و سایر پژوهشگران، تبدیل لگاریتمی را عامل اصلی تخمین کم‌تر از مقدار واقعی معرفی کرده‌اند و این‌که میزان خطای ناشی از تبدیل لگاریتمی به تعداد پراکنش نقاط در نمودار منحنی سنجه رسوب بستگی دارد، و از آن‌جائی‌که در روش حد وسط دسته‌ها، تعداد نقاط به حداقل خود می‌رسد، بنابراین خطای ناشی از تبدیل لگاریتمی تا حدود زیادی کاهش می‌یابد.

ج) با توجه به این‌که به‌منظور انتخاب بهترین مدل و بیش‌ترین دقت در برآورد رگرسیون، از شاخص میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین استفاده شده است، بدین منظور برای روابط رگرسیونی استخراج شده در ایستگاه موردنظر، میانگین مربعات خطا محاسبه شده و بر این اساس در هر مدلی که میانگین مربعات خطا کم‌تر باشد، آن مدل نسبت به بقیه از دقت بیش‌تری برخوردار است. هم‌چنین در مورد ضریب

تبیین، هر چه مقدار آن بیش‌تر باشد، مجموع مربعات خطا در آن کم‌تر است و هر چه مجموع مربعات خطا کم‌تر باشد، میانگین مربعات خطا کم‌تر خواهد بود.

د) از نظر شیوه به‌کارگیری دبی جریان، روش‌های منحنی تداوم جریان و تلفیق دبی روزانه و ماهانه، سهم جداگانه هر یک از دبی‌های متوسط روزانه در تولید رسوب را در نظر نمی‌گیرند. به‌همین منظور نگارنده روش دبی متوسط روزانه را به‌عنوان روش منطقی در نظر گرفته است، چراکه نزدیکی بیشتری با مقادیر واقعی دبی رسوب معلق رودخانه دارد.

بدین ترتیب طی مطالعه صورت گرفته، میزان بار رسوب معلق در محل تنها ایستگاه هیدرومتری رودخانه سیاهرود مازندران به روش انتخابی، 55855 تن در سال برآورد شد.

همچنین، با توجه به نتایج بدست آمده، روش دبی متوسط ماهانه و تلفیق آن با منحنی سنجه رسوب برای این رودخانه توصیه نمی شود. ضمنا استفاده از منحنی‌های سنجه‌ی رسوب یک خطی و چند خطی، با توجه به نتایج بدست آمده در جدول1، برای این رودخانه مناسب نبوده و توصیه می‌گردد که برای برآورد بار رسوبی معلق رودخانه ها، از منحنی سنجه‌ی حد وسط دسته‌ها استفاده گردد.

از آنجا که رسوبات ورودی به مخازن سدها، کانالها و دیگر سازه‌های آبی عامل محدودکننده عمر مفید آن ها می باشد، عدم توجه به تخمین کمتر بار معلق باعث اتلاف سرمایه‌های عظیم می‌گردد. بنابراین برای واسنجی دقیق‌تر روش‌های مختلف از جمله روش منطقی این تحقیق ضروری است تا با استفاده از فنون جدید اندازه‌گیری، غلظت رسوب را برای مدت حداقل یک سال آماری با فواصل زمانی بسیار کوتاه ثبت و سپس با استفاده از روش‌های مستقیم، رسوبدهی ایستگاه مربوطه را برآورد نمود.

منابع

احمدی، ح.، ملکیان، آ. و عابدی، ر.(1391). مناسب‌ترین روش آماری برآورد رسوب معلق رودخانه جاجرود (مطالعه موردی: ایستگاه رودک حوزه آبخیز جاجرود). فصلنامه علمی- پژوهشی پژوهش‌های فرسایش محیطی، شماره2،ص.78-77.

بیاضی، م. ، عرفانیان، م.، عبقری، ه. و اسمعیلی عوری، ا.(1390). ارزیابی منحنی‌های سنجه رسوب در برآورد بار معلق رودخانه‌های آذربایجان شرقی. هفتمین همایش علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه صنعتی اصفهان، ص.9-14.

حمادی، ک.(1378). بررسی روند رسوبگذاری در مخزن شهید عباسپور با استفاده از مدل Hec-6. پایان نامه کارشناسی ارشد، اهواز، دانشگاه شهید چمران، ص.120-126.

رستمی، م و اردشیر، ع.(1380). ارائه روشی به منظور بهبود برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ها. کنفرانس هیدرولیک ایران، سومین دوره، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ص. 1- 8.

شفاعی‌بجستان، م.(1378). هیدرولیک رسوب. اهواز، انتشارات دانشگاه شهید چمران، ص.496-499.

شمس عالم، ش.، عباسی‌زاده، م.، عادل‌پور، ع. و سمیعی، م.(1390). بررسی منطقه‌ای منحنی سنجه رسوب در حوزه‌های آبخیز استان فارس. هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ص.8-12.

عرب‌خدری، م.، حکیم‌خانی، ش. و خوجینی، ع.(1378). ضرورت تجدیدنظر در روشهای متداول برآورد بار معلق رودخانه‌ها. پنجمین سمینار مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ص. 438-429.

میرابوالقاسمی، م و مرید، س.(1374). بررسی روشهای هیدرولوژیکی برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ها. مجله آب و تکنولوژی وزارت نیرو، سال سوم، شماره 3، ص. 67-54.

میرزائی، م.(1381). مقایسه روش‌های آماری برآورد بار معلق رودخانه‌ها (مطالعه موردی گرگانرود). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ص.130-137.

یوسفوند، ف.(1385). برآورد بار رسوب و تعیین ظرفیت برداشت شن و ماسه رودخانه رازآور. سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، هفتمین دوره، دانشگاه شهید چمران اهواز، ص.9-12.

Asselman, A. (2000). Fitting and interpretation of sediment rating curves. Journal of Hydrology, 234,pp. 234-248.

Dehghani, A. and Zanganeh, M.E. and Mosaedi, A.and Kohestani, N. (2010). Comparison of suspended sediment estimation by artificial neural network an sediment rating curve methods (Case Study: Doogh river in Golestan Province). J. Agric. Sci. Natur. Resour, 16: 1, 266-278.

Crawford, C.G. (1991). Estimation of suspended-sediment rating curves and mean suspended-sediment loads. Journal of Hydrology, 129,pp. 331-348.

Ferguson, R. I. (1986). River loads underestimated by rating curves. Journal of Water Resources Research, 22, PP. 74-76.

Jansson, M.B. (1996). Estimating Sediment Rating Curves of the Reventazon River at palomo using logged loads within dischege classes. Journal of Hydrology, 183: pp.227-241.

Miller, C. R. (1951). Analysis of flow duration sediment rating curve method of computing sediment yield. report, U.S. Bur. Of Reclam., Washington, D.C.pp.55-57.

Vanoni, E.D. (1977). Sedimentation Engineering. American Society of Civil Engineers, New York, N.Y. U.S.A., pp. 745-748.