برآورد رسوب‌دهی سالانه رودخانه‌ها با استفاده از روش "نسبت‌ها"

حسین صمدی‌بروجنی[۱]، محمد زمانیان[۲] و فرشته حسین‌پور[۳]

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۹/۲۳
تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۸/۱۰
مقاله برگرفته از کار تحقیقاتی

چکیده

برآورد رسوب‌دهی رودخانه به دلیل پیچیدگی‌های آن یکی از مواردی است که در بررسی‌های هیدرولوژیکی مورد توجه خاص محققان است. در یک رودخانه که فقط در برخی از روزهای ماه دارای آمار رسوب می‌باشد، برآورد رسوب‌دهی غالباً از طریق روش منحنی سنجه رسوب انجام می‌گیرد. در این مطالعه به منظور برآورد دقیق‌تر بار رسوب رودخانه‌ها، روش جدیدی به نام روش نسبت دبی به رسوب معرفی می‌شود. این روش بر پایه توسعه منحنی تداوم تغییرات غلظت رسوب از روی داده‌های غلظت رسوب (که در برخی از روزهای ماه موجود می‌باشد)، استوار است. در این روش غلظت بار معلق بین دو اندازه‌گیری متوالی، براساس نسبت غلظت رسوب به دبی جریان در این دو اندازه‌گیری، بازسازی می‌شود. در این تحقیق، روش نسبت‌ها برای برآورد رسوب رودخانه دز به عنوان یک مطالعه موردی به کار گرفته شد. همچنین میزان رسوب ورودی به مخزن سد دز از طریق روش سنجه رسوب USBR نیز برآورد گردید. مقایسه نتایج با داده‌های به دست آمده از عملیات هیدروگرافی مخزن سد دز نشان داد که درصد خطای روش نسبت‌ها در تخمین بار سالانه رسوب ورودی به سد، ۸/۵ درصد بود حال آن‌که این مقدار برای روش سنجه رسوب USBR برابر ۲۷ درصد به دست آمد. این نتیجه بیانگر این است که روش توصیه شده در این تحقیق می‌تواند به عنوان یک روش خوب برای برآورد رسوب‌دهی رودخانه‌ها در حوضه‌های دارای آمار مورد توجه باشد.

واژه‌های کلیدی: رسوب‌دهی، رودخانه دز، منحنی سنجه.

[۱] استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد و رئیس مرکز تحقیقات منابع آب، شهرکرد، ایران، ۰۹۱۳۳۸۴۹۱۷۹
samadi153@yahoo.com
[۲] دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، ۰۹۱۸۳۵۲۱۱۰۶
mohammad.zamaniyan@gmail.com
[۳] کارشناس ارشد مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، ۰۹۳۶۶۸۹۱۷۲۱
hoseinpoor_fereshteh@yahoo.com (نویسنده مسئول)

مقدمه

برآورد مقدار رسوب موجود در رودخانه‌ها (آورد رسوب رودخانه) یکی از عوامل مهم و مؤثر در تعیین طول عمر سدها، دوره بهره‌برداری از تأسیسات مربوطه و همچنین ظرفیت کانال‌های آبیاری، تونل‌های آبرسانی، تأسیسات پایین‌دست سدها و بالاخره شناخت و تنظیم تغییرات بستر و کناره رودخانه‌ها می‌باشد. محققین مختلف معادلات متعدد انتقال رسوب مبتنی بر هیدرولیک جریان ارائه نموده‌اند که به دلیل پیچیدگی شرایط رودخانه و نیاز به اطلاعات وسیع، این معادلات برای برآورد رسوبدهی سالانه رودخانه‌ها به سادگی قابل کاربرد نمی‌باشد. از این‌رو اغلب برای محاسبه رسوبدهی رودخانه‌ها، از روش‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. برخی از روش‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های رسوب رودخانه هستند. در واقع نمونه‌برداری از بار معلق و گذر حجمی متناظر با آن، این امکان را به وجود می‌آورد که بتوان مقادیر درازمدت رسوبات حمل شده توسط رودخانه را تخمین زد. بر این اساس، روش‌های تجربی موسوم به منحنی سنجه رسوب یا روابط "دبی- دبی رسوب" ارائه شدند. تجربیات و مطالعات متعددی که توسط منابع علمی مختلف از جمله اداره عمران اراضی آمریکا (USBR) انجام شد به این نتیجه انجامید که بین دبی جریان و دبی مواد معلق رابطه نهائی می‌تواند برقرار شود. روش USBR که روش منحنی تداوم جریان- سنجه رسوب نیز اطلاق می‌گردد، بر اساس لحاظ کردن دوره کاملی از آمار موجود دبی رسوب و دبی جریان و تشابه فراوانی دبی آب و رسوب می‌باشد. با تعیین این رابطه، می‌توان در روزهایی که نمونه‌برداری از بار معلق انجام نگرفته با معلوم بودن دبی جریان، دبی رسوب را محاسبه کرد. این رابطه به شرح زیر ارائه شده است:

$$Q_S = aQ_w^b \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، Q_w دبی جریان برحسب مترمکعب بر ثانیه، Q_s تناژ رسوب بر حسب تن در روز و a و b مقادیر ثابت هستند. . بسیاری از محققان برای برآورد بار رسوب از رابطه فوق استفاده کردند (الکساندرو و همکاران، ۲۰۱۰؛ کازامیا و همکاران، ۲۰۰۵؛ مانو و همکاران ۲۰۰۹؛ کویلبی و دوچمین ۲۰۰۶).

در صورتی که غلظت مواد رسوبی در رودخانه معلوم باشد، جهت محاسبه Q_s برحسب تن در روز، می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$Q_S = 0.0864CQ_W \qquad (۲)$$

که در این رابطه، Q_w بر حسب مترمکعب بر ثانیه و C متوسط غلظت مواد رسوبی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. . بر اساس تحقیقی که زو و همکاران (۲۰۱۲) در زمینه غلظت بار معلق انجام دادند به این نتیجه رسیدند که جریان‌های جزر و مدی مهمترین عامل موثر بر میزان غلظت رسوب می‌باشند. والینگ و وب (۱۹۸۱) با بررسی رسوب رودخانه گیردی انگلستان نشان دادند که برای بهبود منحنی سنجه نیاز به آمار مشاهده‌ای دبی و رسوب می‌باشد. بنابراین در برون‌یابی که به وسیله منحنی‌های سنجه رسوب صورت می‌گیرد، دامنه تاثیر دبی جریان و غلظت آن از عوامل مهم است. البته کویلبی و دوچمین (۲۰۰۶) بیان کردند در صورتی‌که داده‌ها پراکنش زیادی داشته باشند به منظور برآوردهای دقیق‌تر، پیش از آغاز تجزیه و تحلیل باید داده‌ها را بر پایه یک ویژگی معین به گروه‌هایی طبقه‌بندی کرد.

پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه چگونگی ترسیم و بررسی درستی و دقت منحنی‌های سنجه رسوب در برآورد رسوب همگی حکایت از اهمیت این منحنی‌ها در این زمینه دارند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد رسم منحنی‌های سنجه با برازش تابع توانی به داده‌های جریان و رسوب، به کارگیری عامل‌های تصحیح و رگرسیون غیر خطی، کوتاه کردن فاصله‌های نمونه‌برداری، رسم منحنی‌های سنجه مجزا برای فصل‌های مختلف سال و ...، موجب افزایش درستی و دقت منحنی‌ها می‌شود (میرزایی، ۱۳۸۱؛ همتی، ۱۳۷۹ و کرم، ۲۰۰۳).

معادله(۱) در واقع تابع حاصل از رگرسیون خطی بین دبی آب و دبی مواد معلق می‌باشد. معمولاً میانگین مقادیری که از رابطه "دبی- دبی رسوب" به دست می‌آید، کمتر از مقادیر مشاهده شده است. توماس (۱۹۸۵) اعلام داشت که روش‌های متداول به وسیله منحنی سنجه رسوب و منحنی تداوم جریان، میزان رسوب را در حدود ۵۱ درصد پایین‌تر برآورد می‌کنند.

بر مبنای ملاحظه فوق، سازمان خوار و بار جهانی (FAO) برای تعدیل ارقام به دست آمده و نزدیک شدن نتایج حاصل از رابطه(۱) به واقعیت، استفاده از ضریب a' را به جای ضریب a به صورت زیر توصیه کرده است (فائو، ۱۹۸۱):

$$a' = \frac{\overline{Q_S}}{\left(\overline{Q_w}\right)^b} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، $\overline{Q_s}$ میانگین دبی رسوب مشاهده شده در طول دوره آماری بر حسب تن در روز، $\overline{Q_w}$ میانگین دبی آب در طول دوره بر حسب مترمکعب در ثانیه و b نمای معادله (۱) می‌باشد. بر این اساس رابطه "دبی- دبی رسوب" به صورت زیر تعدیل می‌گردد:

$$Q_S = a' Q_w^b \qquad (۴)$$

در واقع وجود داده‌های حداکثری رسوب (در مواقع سیلابی) در زوج متناظر دبی آب- دبی رسوب، تاثیر زیادی روی افزایش ضریب a' به وجود می‌آورند. زیرا در رابطه(۳) تغییرات مخرج کسر به مراتب محدودتر از صورت کسر است. این بدان معنا است که رابطه(۴) میزان بار معلق محاسبه شده را بیشتر از مقدار مشاهداتی نشان می‌دهد که این از نقاط ضعف روش اخیر (اصلاحی فائو) قلمداد می‌شود. حمادی و نوذریان (۱۳۸۵) با ارزیابی روابط دبی آب- دبی رسوب در ایستگاه‌های مورد مطالعه به این نتیجه رسیدند که روش معمول و متداول، بار رسوب معلق را کمتر و روش اصلاحی فائو میزان آن را بیشتر از مقدار مشاهداتی نشان می‌دهد. روش پیشنهادی در این بررسی، مبتنی بر اصول آماری ساده است که یک سطح احتمالاتی دامنه‌ای برای ضرائب رگرسیونی در نظر می‌گیرد. دامنه بالای ضرائب، شاخص نسبت اختلاف بار رسوب محاسباتی و مشاهداتی را به میزان قابل توجهی بهبود داد.

محققین روش‌های مختلفی را جهت بهبود منحنی سنجه مورد استفاده قرار داده و نظرات متفاوتی در مورد آنها ابراز داشته‌اند.

کراوفرد (۱۹۹۱) چندین روش را برای محاسبه پارامترهای منحنی سنجه رسوب (a و b) مقایسه کرده است. این محقق در نهایت نتیجه گرفت که مدل خطی تغییر یافته (مدل توانی لگاریتمی شده) نسبت به روش‌های غیر خطی ارجحیت دارد. در این رابطه، وروانی و همکاران (۱۳۸۷) نیز در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که کاربرد ضریب حداقل واریانس ناریب باعث افزایش صحت و دقت منحنی‌های سنجه می‌گردد.

سیویتسکی و همکاران (۲۰۰۰) پارامترهای مربوط به منحنی‌های دبی آب- دبی رسوب در ۵۹ ایستگاه هیدرومتری را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مقادیر آبدهی متوسط طولانی‌مدت، بار معلق، تداوم جریان، اوج جریان، توزیع مکانی بارش، دما، تغییرات دما در حوضه آبریز و ارتفاع حوضه را در شکل‌گیری ضرائب منحنی دبی- رسوب مؤثر یافتند.

به منظور ایجاد دقت بیشتر در تخمین بار معلق روش‌های اصلاحی دیگری نیز پیشنهاد شده‌اند. از جمله می‌توان به روش منحنی سنجه فصلی، ماهانه و حد وسط دسته‌ها اشاره نمود. در این زمینه در تحقیقی توسط مساعدی و همکاران (۱۳۸۵)، به منظور انتخاب مناسب‌ترین روش برآورد رسوب معلق در ایستگاه هیدرومتری قزاقلی، ۳۵۹۵ داده متناظر دبی جریان و دبی رسوب رودخانه گرگانرود مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و با برقراری رابطه بین مقادیر متناظر دبی آب و دبی رسوب بر اساس پنج مدل خطی، خطی شکسته (چند خطی)، حد وسط دسته‌ها، فصلی و ماهانه نشان دادند که مدل حد وسط داده‌ها بهترین قابلیت پیشگویی را در برآورد رسوب رودخانه دارا است.

بهرامی و صمدی‌بروجنی (۱۳۸۴) نیز با کاربرد معادلات مختلف سنجه رسوب مخازن سدهای دز، کرخه، شهید عباسپور و مارون نشان دادند که

معادلات بدست آمده به تفکیک ماه‌های کم آبی و ماه‌های پرآبی بیشترین دقت را در برآورد رسوبدهی حوضه داشته است. در تحقیق دیگری استفاده از روش تحلیل منطقه‌ای توسط قربانی و همکاران (۱۳۹۰) مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل منطقه‌ای عبارت است از کاربرد داده‌های برداشت‌شده از محل‌های مشخص و تعمیم آنها به تمام سطح یک ناحیه. افزایش دقت تهیه مدل رسوب به واسطه همگن‌بندی مناطق و دستیابی به پارامترهای مهم‌تر و موثرتر در تولید رسوب و اهمیت آنها در انجام بهترین اقدامات مدیریتی از یافته‌های این تحقیق است.

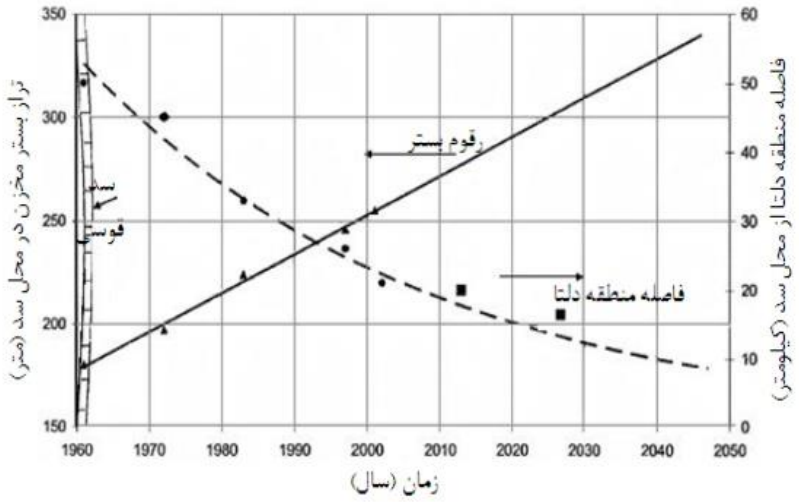
مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که کاهش سالانه توانایی ذخیره سدهای جهان به دلیل ته‌نشین شدن رسوبات تقریباً ۰/۵ تا ۱ درصد حجم مخزن می‌باشد که برای بسیاری از سدها این مقدار بالاتر از ۴ تا ۵ درصد بوده و در نتیجه اغلب سدها قسمت اصلی توانایی ذخیره آب خود را در طول ۲۵ تا ۳۰ سال از دست می‌دهند (ورستراتن و همکاران، ۲۰۰۳). نلسون و بوت (۲۰۰۲) نیز با بررسی‌هایی که در حوضه آبریز رودخانه ایساکو انجام دادند، تولید رسوب سالیانه این رودخانه را حدوداً ۶۴۰۰ تن در سال برآورد نمودند و رسوب‌گذاری ویژه را نیز ۴۴ تن برکیلومتر مربع در سال تخمین زدند.

از آنجا که آگاهی از میزان مواد جامد رسوب که توسط جریان حمل یا ترسیب می‌گردد جزو اطلاعات لازم و اولیه هر پروژه آبی و یکی از عوامل مهم تصمیم‌گیری در مورد احداث سازه‌های آبی بر روی رودخانه‌ها می‌باشد لذا در این تحقیق به منظور برآورد دقیق‌تر بار رسوب رودخانه‌ها، روش جدیدی به نام روش نسبت‌ها معرفی می‌شود. برای ارزیابی دقت این روش نیز از نتایج عملیات هیدروگرافی مخزن سد دز استفاده می‌گردد.

مواد و روش‌ها

معرفی سد دز

سد بتنی دو قوسی دز با ارتفاع ۲۰۳/۵ متر از پی و حجم اولیه معادل ۳/۳ میلیارد متر مکعب در سال ۱۳۴۲ به بهره‌برداری رسید. اگرچه پایداری بدنه آن پس از حدود نیم قرن در حد مطلوب حفظ شده است ولی مهمترین مشکل آن رسوبگذاری در مخزن می‌باشد. براساس نتایج رسوبسنجی انجام گرفته در مخزن سد، روند افزایش رقوم رسوبات نزدیک بدنه و همچنین کاهش فاصله منطقه دلتا از بدنه سد نسبت به زمان در شکل(۱) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود بطور متوسط سالانه تراز رسوب پشت بدنه سد دو متر افزایش داشته و پیشانی دلتای مخزن نیز سالانه حدود یک کیلومتر به سمت بدنه سد پیشروی داشته است.



شکل(۱): روند افزایش رقوم رسوبات نزدیک بدنه سد و کاهش فاصله منطقه دلتا از بدنه سد نسبت به زمان

آمار و اطلاعات مورد استفاده

در این تحقیق از آمار دبی و رسوب اندازه‌گیری شده در ایستگاه ورودی به مخزن سد دز، موسوم به ایستگاه آب‌سنجی تله‌زنگ استفاده گردید. این ایستگاه در سال ۱۳۳۴ تاسیس شده و آمار دبی روزانه این ایستگاه در طول دوره بهره‌برداری از سد موجود می‌باشد ولی اندازه‌گیری بار معلق به طور معمول ماهیانه یک یا دو بار انجام گردیده است. در طول دوره آماری موجود (۱۳۵۰ لغایت ۱۳۸۵)، مجموعاً در ۵۰۹ روز نمونه‌برداری بار معلق در ایستگاه صورت گرفته که از این داده‌ها در مطالعه حاضر استفاده می‌گردد.

روش محاسبات

در این مطالعه، براساس داده‌های جریان و رسوب اندازه‌گیری شده، رابطه دبی آب- دبی رسوب طبق روش USBR و در دو حالت، با و بدون اعمال ضرایب اصلاحی فائو استخراج و با استفاده از این رابطه، دبی رسوب در روزهایی که فقط آمار دبی جریان موجود بود، محاسبه گردید. این رابطه در حالت‌های مختلف سالانه، فصلی و ماهانه بدست آمد. در جدول (۱) فرم معادلات ارائه شده است. چون این روش‌ها تنها بار معلق را بدست می‌دهند لذا سهم بار بستر بصورت درصدی از بار معلق لحاظ شد. این سهم در سه سناریو ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در نظر گرفته شد.

جدول(۱): معادلات دبی- دبی رسوب در روش‌های مورد مطالعه

روش		معادله	R^2
USBR- سالانه		$Q_s = 0.0617Q^{2.1546}$	۰/۸۱
FAO- سالانه		$Q_s = 0.1739\,Q^{2.1546}$	*
USBR- ماهانه	دوره خشک	$Q_s = 0.0329\,Q^{2.2871}$	۰/۶۴
	دوره تر	$Q_s = 0.1023\,Q^{2.0678}$	۰/۸
FAO- ماهانه	دوره خشک	$Q_s = 0.304\,Q^{2.2871}$	*
	دوره تر	$Q_s = 0.182\,Q^{2.0678}$	*
USBR- فصلی	فصل خشک	$Q_s = 0.0531\,Q^{2.1781}$	۰/۵۸
	فصل تر	$Q_s = 0.1107Q^{2.0613}$	۰/۸
FAO- فصلی	فصل خشک	$Q_s = 0.476\,Q^{2.1781}$	*
	فصل تر	$Q_s = 0.2032Q^{2.0613}$	*
روش جدید(نسبتها)		$Q_s = 0.1528\,Q^{2.0059}$	۰/۷۹

* پس از تعیین معادله از طریق داده‌های مربوط به هر دوره، در روش فائو فقط ضریب a در معادله تغییر پیدا کرد.

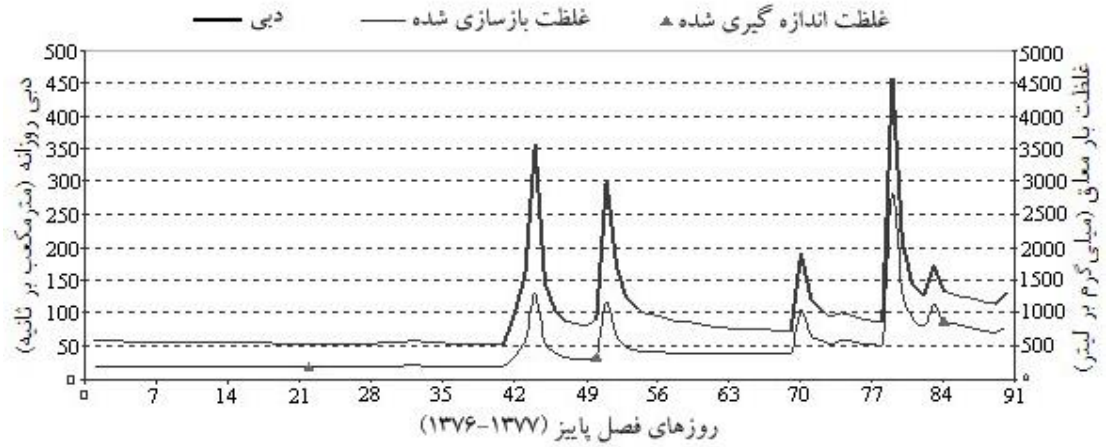
روش پیشنهادی در این تحقیق

میزان رسوبات رودخانه غالباً تحت تاثیر دبی جریان است. بنابراین منحنی تغییرات غلظت رسوب بایستی از منحنی تغییرات دبی پیروی نماید. با توجه به اینکه آمار دبی روزانه ایستگاه تله‌زنگ موجود است، لذا منحنی تغییرات دبی در طول سال مشخص می‌باشد. در حالی‌که غلظت رسوب فقط در برخی از روزهای سال اندازه‌گیری شده است. در صورتی‌که از بین نقاطی که غلظت معلوم است یک منحنی به گونه‌ای ترسیم شود که از منحنی تغییرات دبی تبعیت کند، می‌توان برای کلیه روزهای سال آمار غلظت بار معلق را بازسازی نمود. در این روش که در این مقاله به آن روش نسبت‌ها گفته می‌شود، تاثیر دبی در غلظت بار معلق با دقت بیشتری انجام می‌شود و در روزهای سیلابی که بار معلق زیاد است با دقت بیشتری میزان رسوبات برآورد می‌گردد. برای ترسیم منحنی تغییرات غلظت به نحوی که از منحنی تغییرات دبی تبعیت کند، از نسبت غلظت به دبی به صورت زیر استفاده شده است:

$$k = \frac{C}{Q} \qquad (۵)$$

که در آن C بیانگر غلظت رسوب و Q دبی جریان می‌باشد.

به طور مثال اگر فاصله زمانی بین دو اندازه‌گیری غلظت (C_1 و C_2) برابر n روز باشد، ابتدا در این دو روز نسبت غلظت به دبی ($k_1=C_1/Q_1$ و $k_2=C_2/Q_2$) محاسبه می‌گردد. با خطی فرض کردن تغییرات k، هر روز به میزان ثابتی به آن اضافه می‌شود تا در طول n روز مقدار آن از k_1 به k_2 به صورت خطی افزایش یابد. بنابراین برای n روز مذکور مقدار k بازسازی شده و با داشتن k در این دوره n روزه و ضرب کردن آن در دبی مربوط به هر روز، غلظت آن روز محاسبه و بازسازی می‌گردد. بنابراین در مقایسه با روش منحنی سنجه که یک رابطه کلی بین دبی و رسوب در کل دوره آماری بر قرار می‌کند، در این روش محاسبه غلظت بار معلق در هر روز با توجه به نسبت غلظت به دبی در نزدیکترین روزهای دارای آمار و کاملاً بر اساس دبی جریان در همان روز انجام می‌گیرد. این به آن معنی است که شرایط زمانی بطور مؤثرتری نسبت به روش منحنی سنجه در محاسبات دخالت داده می‌شود. در مورد ایستگاه تله-زنگ این محاسبات در محیط اکسل انجام و نتیجه در شکل (۲) به صورت منحنی ارائه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل حجم زیاد داده‌ها، فقط منحنی مربوط به فصل پائیز ۷۷-۱۳۷۶ نشان داده شده است. بدین ترتیب با معلوم بودن دبی رسوب در هر روز و جمع کردن آن در هر سال، دبی رسوب به صورت تن در سال محاسبه شده و میانگین آن در سال‌های آماری، معرف متوسط رسوب‌دهی دراز مدت خواهد بود که با هیدروگرافی مخزن مورد مقایسه قرار می‌گیرد.



شکل (۲): منحنی تداوم جریان و غلظت رسوب در روش نسبت‌ها (فصل پائیز ۱۳۷۷-۱۳۷۶)

نتایج و بحث

با توجه به اهداف تحقیق، محاسبات رسوب‌دهی حوضه سد دز با هفت روش مورد مطالعه انجام گرفت. با توجه به اینکه در نظر است برای ارزیابی دقت روش‌های مورد مطالعه از نتایج عملیات هیدروگرافی مخزن سد استفاده شود و روش‌های منحنی سنجه تنها سهم بار معلق را محاسبه می‌کنند، لازم است که سهم بار بستر نیز اضافه گردد و بار کل رسوب ورودی به مخزن بدست آید. در بیشتر منابع ذکر شده که بار بستر معادل حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد بار معلق است لذا در این مطالعه، سهم بار بستر در سه حالت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد مد نظر قرار گرفته و بر این اساس میانگین درازمدت رسوب‌دهی حوضه در هفت روش مورد نظر محاسبه شد. نتایج این محاسبات در جدول(۲) ارائه شده است.

جدول(۲): نتایج محاسبات رسوب معلق و کل سالانه در روش‌های مختلف (میلیون تن در سال)

شرح		USBR سالانه	FAO سالانه	USBR ماهانه	FAO ماهانه	USBR فصلی	FAO فصلی	روش جدید (نسبت‌ها)
متوسط سالانه بار معلق		۱۱/۵۳	۳۲/۴۸	۱۱/۱۳	۳۷/۸۸	۱۰/۸۵	۲۹/۲۹	۱۴/۴۶
متوسط سالانه بارکل	سهم بار بستر ۱۰٪	۱۲/۶۸	۳۵/۷۳	۱۲/۲۴	۴۱/۶۷	۱۱/۹۴	۳۲/۲۲	۱۵/۹۱
	سهم بار بستر ۲۰٪	۱۳/۸۴	۳۸/۹۸	۱۳/۳۶	۴۵/۴۶	۱۳/۰۲	۳۵/۱۵	۱۷/۳۵
	سهم بار بستر ۳۰٪	۱۴/۹۹	۴۲/۲۲	۱۴/۴۷	۴۹/۲۴	۱۴/۱۱	۳۸/۰۸	۱۸/۸۰

درصد خطای هر روش از رابطه زیر به دست آمده است:

$$\%E = \frac{V_{S_{(cal)}} - V_{S_{(obs)}}}{V_{S_{(obs)}}} * 100 \qquad (۵)$$

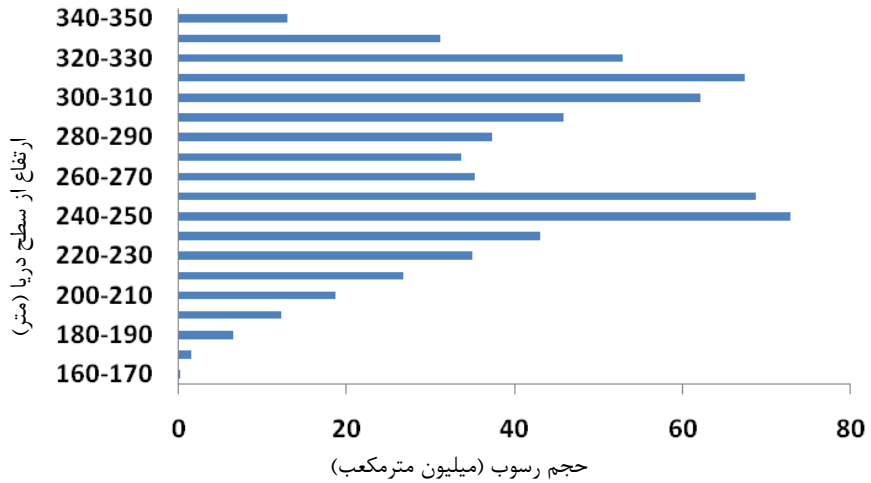
که در آن:

E%: درصد خطای برآورد رسوب‌دهی حوضه

$V_{S(cal)}$: متوسط حجم رسوب سالانه محاسبه شده از روش مورد نظر

$V_{S(obs)}$: متوسط حجم رسوب سالانه به دست آمده از عملیات هیدروگرافی مخزن می‌باشد.

نتایج آخرین رسوبسنجی انجام شده در مخزن سد دز در سال ۱۳۸۲ نشان می‌دهد که به طور متوسط، سالانه ۱۵/۶ میلیون مترمکعب رسوب در مخزن ته‌نشین شده است. بر اساس این عملیات هیدروگرافی، نحوه توزیع رسوبات در پشت سد نیز در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل(۳): حجم رسوب سد دز و نحوه توزیع آن در ترازهای مختلف (هیدروگرافی سال ۱۳۸۲)

با لحاظ کردن راندمان تله اندازی مخزن (با توجه به روش بران) مشخص می‌شود متوسط سالانه حجم رسوب ورودی به مخزن معادل ۱۵/۸ میلیون مترمکعب در سال بوده است. این رقم مبنای ارزیابی روش‌های برآورد رسوب مورد نظر در این مطالعه می‌باشد. البته برای مقایسه لازم می‌شود، وزن رسوب محاسبه شده از طریق روش‌های مختلف، به حجم تبدیل شود که این کار با توجه به وزن مخصوص ظاهری رسوبات انجام می‌شود. براساس اندازه‌گیری‌های انجام گرفته (صمدی‌بروجنی و همکاران، ۲۰۰۹) وزن مخصوص رسوبات مخزن سد دز برابر ۱/۲ گرم بر سانتیمتر مکعب گزارش شده است. لذا برای جامعیت بخشیدن به کار و آنالیز حساسیت، در این مطالعه دو حالت دیگر برای وزن مخصوص رسوبات یعنی رقم‌های ۱/۱۵ و ۱/۳ گرم بر سانتیمتر مکعب نیز در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس دقت هر یک از روش‌های مورد مطالعه بدست آمد که نتایج در جدول (۳) ارائه شده‌است. با عنایت به ارقام این جدول، روش نسبت‌ها درصد خطای تخمین بار رسوب را به طور چشمگیری کاهش داده است که بیانگر مزیت این روش جدید نسبت به روش‌های متداول می‌باشد.

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد کمترین درصد خطا (۰/۹ درصد) مربوط به فرض ۳۰ درصد بار بستر و وزن مخصوص برابر ۱/۲ می‌باشد.

جدول (۳): نتایج میانگین دراز مدت رسوب‌دهی و بررسی درصد خطای هفت روش مورد مطالعه

روش	فرض ۱۰ درصد بار بستر		فرض ۲۰ درصد بار بستر		فرض ۳۰ درصد بار بستر	
	MCM/yr	درصد خطا	MCM/yr	درصد خطا	MCM/yr	درصد خطا
	$\gamma = 1.15 gr/cm^3$					
USBR- سالانه	۱۱/۰۳	-۳۰/۲	۱۲/۰۴	-۲۳/۸	۱۳/۰۴	-۱۷/۵
FAO– سالانه	۳۱/۰۷	۹۶/۶	۳۳/۹	۱۱۴/۶	۳۶/۷۲	۱۳۲/۴
USBR- ماهانه	۱۰/۶۵	-۳۲/۶	۱۱/۶۲	-۲۶/۵	۱۲/۵۸	-۲۰/۴
FAO- ماهانه	۳۶/۲۴	۱۲۹/۴	۳۹/۵۳	۱۵۰/۲	۴۲/۸۳	۱۷۱/۱
USBR- فصلی	۱۰/۳۸	-۳۴/۳	۱۱/۳۲	-۲۸/۴	۱۲/۲۶	-۲۲/۴
FAO- فصلی	۲۸/۰۱	۷۷/۳	۳۰/۵۶	۹۳/۴	۳۳/۱۱	۱۰۹/۶
روش جدید (نسبت‌ها)	۱۳/۸۳	-۱۲/۵	۱۵/۰۹	-۴/۵	۱۶/۳۴	۳/۴

جدول (۳): نتایج میانگین دراز مدت رسوب‌دهی و بررسی درصد خطای هفت روش مورد مطالعه

روش	فرض ۱۰ درصد بار بستر		فرض ۲۰ درصد بار بستر		فرض ۳۰ درصد بار بستر	
	MCM/yr	درصد خطا	MCM/yr	درصد خطا	MCM/yr	درصد خطا
	$\gamma = 1.2 gr/cm^3$					
USBR- سالانه	۱۰/۵۷	-۳۳/۱	۱۱/۵۳	-۲۷	۱۲/۵	-۲۰/۹
FAO– سالانه	۲۹/۷۸	۸۸/۵	۳۲/۴۸	۱۰۵/۶	۳۵/۱۹	۱۲۲/۷
USBR- ماهانه	۱۰/۲	-۳۵/۴	۱۱/۱۳	-۲۹/۶	۱۲/۰۶	-۲۳/۷
FAO- ماهانه	۳۴/۷۳	۱۱۹/۸	۳۷/۸۸	۱۳۹/۷	۴۱/۰۴	۱۵۹/۷
USBR- فصلی	۹/۹۵	-۳۷	۱۰/۸۵	-۳۱/۳	۱۱/۷۵	-۲۵/۶
FAO- فصلی	۲۶/۸۵	۶۹/۹	۲۹/۲۹	۸۵/۴	۳۱/۷۳	۱۰۰/۸
روش جدید (نسبت‌ها)	۱۳/۲۵	-۱۶/۱	۱۴/۴۶	-۸/۵	۱۵/۶۶	-۰/۹
	$\gamma = 1.3 gr/cm^3$					
USBR- سالانه	۹/۷۶	-۳۸/۲	۱۰/۶۵	-۳۲/۶	۱۱/۵۳	-۲۷
FAO– سالانه	۲۷/۴۹	۷۴	۲۹/۹۸	۸۹/۷	۳۲/۴۸	۱۰۵/۶
USBR- ماهانه	۹/۴۲	-۴۰/۴	۱۰/۲۸	-۳۴/۹	۱۱/۱۳	-۲۹/۶
FAO- ماهانه	۳۲/۰۶	۱۰۲/۹	۳۴/۹۷	۱۲۱/۳	۳۷/۸۸	۱۳۹/۷
USBR- فصلی	۹/۱۸	-۴۱/۹	۱۰/۰۱	-۳۶/۶	۱۰/۸۵	-۳۱/۳
FAO- فصلی	۲۴/۷۸	۵۶/۸	۲۷/۰۳	۷۱/۱	۲۹/۲۹	۸۵/۴
روش جدید (نسبت‌ها)	۱۲/۲۳	-۲۲/۶	۱۳/۳۵	-۱۵/۵	۱۴/۴۶	-۸/۵

در جدول(۱) با مقایسه ضرائب منحنی سنجه در روش USBR سالانه (آمار واقعی) و روش نسبت‌ها (بازسازی آمار) مشخص می‌شود که روش نسبت‌ها باعث افزایش ۵۹ درصدی در ضریب a شده است در صورتی که مقدار تغییر در ضریب b ناچیز و برابر کاهش ۷ درصدی می‌باشد.

روش‌های USBR سالانه، ماهانه و فصلی، رسوب را کمتر از مقدار واقعی آن برآورد کرده‌اند. این نتیجه با نتایج مطالعات توماس (۱۹۸۵) که اعلام داشت روش‌های متداول به وسیله منحنی سنجه رسوب و منحنی تداوم جریان، میزان رسوب را در حدود ۵۱ درصد پایین‌تر برآورد می‌کنند، مطابقت دارد. این در حالیست که با اعمال ضریب فائو، مقدار رسوب بسیار بیشتر از مقدار مشاهداتی بدست آمده است، در واقع استفاده از این ضریب باعث ایجاد خطای بیشتر در تخمین بار رسوب گردیده است. در این زمینه، حمادی و نوذریان (۱۳۸۵) نیز با ارزیابی روابط دبی آب- دبی رسوب در ایستگاه‌های مورد مطالعه به این نتیجه رسیدند که روش معمول و متداول، بار رسوب معلق را کمتر و روش اصلاحی فائو میزان آن را بیشتر از مقدار مشاهداتی نشان می‌دهد. از طرفی به کارگیری روش‌های اصلاحی ماهانه و فصلی باعث افزایش دقت برآورد نشده است.

درصد خطای روش نسبت‌ها در در سه حالت سهم بار بستر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، به ترتیب ۱۶/۱، ۸/۵ و ۰/۹ درصد بدست آمد که نسبت به تمامی روش‌ها کمتر می‌باشد. در آنالیز حساسیت وزن مخصوص رسوبات نیز نتایج مشابه بدست آمد و باز هم روش نسبتها دارای دقت بیشتری بود. در واقع

در این روش تاثیر دبی در غلظت بار معلق با دقت بیشتری انجام شده و در روزهای سیلابی که بار معلق زیاد است با دقت بیشتری میزان رسوبات برآورد می‌گردد.

نتیجه‌گیری

از آن‌جا که برآورد مقدار رسوب موجود در رودخانه‌ها (آورد رسوب رودخانه) یکی از عوامل مهم و مؤثر در تعیین طول عمر سدها و شناخت و تنظیم تغییرات بستر و کناره رودخانه‌ها می‌باشد و از طرفی به دلیل پیچیدگی شرایط رودخانه و نیاز به اطلاعات وسیع، معادلات هیدرولیکی برای برآورد رسوبدهی سالانه رودخانه‌ها به سادگی قابل کاربرد نمی‌باشند، لذا برآورد رسوب‌دهی غالباً از طریق روش منحنی سنجه رسوب انجام می‌گیرد. معمولاً میانگین مقادیری که از رابطه "دبی- دبی رسوب" منحنی سنجه به دست می‌آید، کمتر از مقادیر مشاهده شده است. محققین روش‌های مختلفی را جهت بهبود منحنی سنجه مورد استفاده قرار داده و نظرات متفاوتی در مورد آنها ابراز داشته‌اند. روش‌های اصلاحی که به منظور ایجاد دقت بیشتر در تخمین بار معلق پیشنهاد گردید از جمله روش منحنی سنجه فصلی، ماهانه و حد وسط دسته‌ها تا حدودی باعث بهبود نتایج گردیدند اما هنور هم دارای درصد خطای قابل توجهی هستند. در این مطالعه به منظور برآورد دقیق‌تر بار رسوب رودخانه‌ها، روش جدیدی به نام روش نسبت دبی به رسوب معرفی گردید. این روش بر پایه توسعه منحنی تداوم تغییرات غلظت رسوب از روی داده‌های غلظت رسوب (که در برخی از روزهای ماه موجود می‌باشد) و متناسب با دبی، استوار است. بر اساس نتایج این مطالعه، با نمونه‌برداری از بار معلق و گذر حجمی متناظر با آن و کابرد روش پیشنهادی این امکان به وجود می‌آید که بتوان مقادیر درازمدت رسوبات حمل شده توسط رودخانه را با دقت بالایی نسبت به روش‌های موجود، تخمین زد به طوری‌که مقایسه نتایج با داده‌های به دست آمده از عملیات هیدروگرافی مخزن سد دز نشان داد که درصد خطای روش نسبت‌ها در تخمین بار سالانه رسوب ورودی به سد، ۸/۵ درصد بود حال آن‌که این مقدار برای روش سنجه رسوب USBR برابر ۲۷ درصد به دست آمد. این نتیجه بیانگر این است که روش توصیه شده در این تحقیق می‌تواند به عنوان یک روش خوب برای برآورد رسوب‌دهی رودخانه‌ها در حوضه‌های دارای آمار مورد توجه باشد.

منابع

۱. بهرامی، ح.، ح. صمدی بروجنی. ۱۳۸۴. بررسی توزیع زمانی رسوب ورودی به مخازن سدهای استان خوزستان. اولین همایش مدیریت رسوب. دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲. حمادی، ک.، ل. نوذریان. ۱۳۸۵. پیشنهاد یک روش آماری به منظور اصلاح رابطه دبی آب- دبی رسوب و محاسبه بار رسوبی معلق. مجموعه مقالات هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز.
۳. قربانی، م. ع.، ا. فاخری‌فرد، س. نعمتی و س. طلوعی. ۱۳۹۰. تعیین نواحی همگن توزیع مکانی بار معلق در حوضه آبریز رودخانه آجی چای. مجله دانش آب و خاک، جلد ۲۱، شماره ۲، ص ۲۱۴-۲۰۱.
۴. مساعدی، ا.، ا. محمدی و م. ه. حسین‌علیزاد. ۱۳۸۵. انتخاب مناسب‌ترین روش برآورد رسوب معلق در ایستگاه هیدرومتری قزاقلی. مجموعه مقالات هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز.
۵. میرزایی، م. ر. ۱۳۸۱. مقایسه روش‌های آماری برآورد بار معلق رودخانه‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده منابع طبیعی. دانشگاه تهران.
۶. وروانی، ج.، ع. نجفی‌نژاد و آ. میرمعینی کرهرودی. ۱۳۸۷. اصلاح منحنی سنجه رسوب با استفاده از روش حداقل واریانس نااریب. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۵، شماره ۱، ویژه‌نامه منابع طبیعی، ص ۱۳-۱.
۷. همتی، م. ۱۳۷۹. بررسی رابطه رسوب‌دهی حوضه‌های آبخیز با لیتولوژی و عوامل بارش موثر، مطالعه موردی: حوضه‌های آبخیز قم و قره‌چای، دریاچه ارومیه و مرکزی مازندران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده منابع طبیعی. دانشگاه تهران.

8. Alexandrov, Y., H. Cohen, J. B. Laronne and I. Reid. 2010. Suspended sediment load, bed load, and dissolved load yields from a semiarid dranage basin: a 15-year study. Water Resourse Research, 45, W08408. doi: 10.1029/2008WR007314.
9. Crawford, C. G. 1991. Estimating of suspended sediment rating curves and mean suspended sediment load. Journal of Hydrology, 129: 331-348.
10. FAO. 1981. Arid zone hydrology for agricultural development. Chp. 13-14.
11. Kazama, S., K. Suzuki and M. Sawamoto. 2005. Estimation of rating-curve parameters for sedimentation using a physical model. Hydrol. Process. 19, 3863-3871.
12. Kerem. H. C. 2003. Estimation and forecasting daily-suspended sediment data by multilayer perceptions advances in water resources, 27: 185-195.
13. Mano, V., J. Nemery, P. Belleudy and A. Poirel. 2009. Assessment of suspended sediment transport in four alpine watersheds (France): influence of the climatic regime. Hydrol. Process. 23: 777-792.
14. Nelson, E. J., D. B. Booth. 2002. Sediment sources in an urbanizing, mixed land-use watershed. Journal of Hydrology, 264: 51-68.
15. Quilbe-Rousseau, R., A. N. Duchemin. 2006. Selecting a calculation method to estimate sediment and nutrient load in streams: Application to the Beaurivage River (Quebec, Canada). jounal of Hydrorogy, 326: 295-310.
16. Samadi-Boroujeni, H., M. Fathi-Moghaddam and M. Shafaie-Bajestan. 2009. Investigation on bulk density of deposited sediments in Dez reservoir. Journal of Trend in Applied Sciences Research, 4(3): 148-157.
17. Syvitski, J. P., M. D. Morehead, D. B. Bahr and T. Mulder. 2000. Estimating fluvial sediment transport: the rating parameters. Water Resources Research, 36(9): 2747-2760.
18. Thomas, R. B. 1985. Estimating total suspended sediment yield with probability sampling. Journal of Water Resources Research, 21: 1381-1388.
19. Verstraeten, G. J., J. D. Vente and X. Koninckx. 2003. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiqualitative analysis using reservoir sedimentation rates. Geomorphology, 50: 327-348.
20. Walling, D. E., A. W. Webb. 1981. Ratability of suspended sediment load data, erosion and sediment transport. Proceeding of Florence Symp. IAHS. pub no, 133: 177-194.
21. Zuo, S. H., N. C. Zhang, B. Li and S. L. Chen. 2012. A study of suspended sediment concentration in Yangshan deep-water port in Shanghai, China. International Journal of Sediment Research, 27(1): 50-60.

Discharge-Sediment Relative Approach (DSRA) to Estimate of the Annual River Sediment Delivery

H. Samadi-Boroujeni[1], M. Zamaniyan[2], F. Hoseinpoor [3]

Abstract

Estimating river sediment delivery is one of the important issues for researchers in hydrological studies because of its complexity. In a river that has sediment data in a few days per month, estimating of river sediment delivery is carried out by using sediment rating curve method. In this study in order to exactly estimation for such rivers, a new approach has been developed which it can be called as "Discharge-Sediment Relative Approach (DSRA)". It is developed based on expanding sediment concentration continuity curve based on individual sediment concentration data in a few days of each month. In this method, the fluctuation of sediment concentration between two continuous measurements is reconstructed based on the ratio of the measured sediment concentration and water discharge. In this paper the DSRA method has been applied to estimate of Dez river sediment delivery as a case study. Also the amount of sediment inflow to Dez reservoir were calculated by using the USBR rating curve method. Comparison of calculated results with measured data obtained from Dez reservoir bathymetry showed that errors of the DSRA method to estimate of the annual sediment inflow to Dez reservoir was obtained as 8.5% while this value for USBR rating curve method was about 27%. This means that the DSRA Method could be considered as a good approach to estimate of river sediment delivery for gauged basins.

Keywords: sediment discharge, Dez river, rating curve.

[1] Assis. Professor, Dept. of Water Engineering, Shahrekord University; samadi153@yahoo.com
[2] Ph.D student, Dept. of Water Engineering, Shahrekord University; mohammad.zamaniyan@gmail.com
[3] Graduate student, Dept. of Water Engineering, Shahrekord University; hoseinpoor_fereshteh@yahoo.com