نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۶، شماره ۴، ۱۳۹۳، صفحات ۳۹۰-۳۹۹

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 6, Issue 4, 2015, Pages 390-399

برآورد نسبت بار کف به بار معلق در رودهای دز و میناب

محمود عرب‌خدری[*1]
[1] استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۱/۱۸

چکیده

در اکثر مطالعات منابع آب، مقدار بار کف رودخانه‌ها به‌صورت نسبتی ثابت از بار معلق در نظر گرفته می‌شود که معقول نیست. یک روش تعیین دقیق‌تر این نسبت، استفاده از اطلاعات باتیمتری نهشته‌های بستر مخازن سدها است. در این پژوهش، نقشه‌های متوالی تهیه شده از کف مخازن دو سد دز (۱۳۶۲ و ۱۳۷۶) و میناب (۱۳۶۴ و ۱۳۷۷) و آمار رسوب معلق در ایستگاه‌های ورودی بررسی شد. پس از تعیین محل قله دلتا در مخزن و تفکیک رسوب به دو بخش دلتایی و دریاچه‌ای روی نقشه‌ها، حجم رسوب بین دو دوره در هر مخزن برآورد و با لحاظ وزن مخصوص، وزن رسوب محاسبه شد. سپس، تاثیر عواملی از قبیل نشست و فشرده شدن تدریجی نهشته‌ها، ضریب تله‌اندازی رسوب سد، تاثیر سهم حوضه بالادست و دامنه‌های مشرف به مخزن سد در رسوب تعیین شد. از سوی دیگر، رسوبدهی معلق به‌روش اداره عمران اراضی در محل ایستگاه‌های تله‌زنگ و برنطین (ورودی سدهای مذکور) برآورد شد. در مرحله بعد، به دو روش الف) لحاظ رسوبات دلتایی و دریاچه‌ای به‌ترتیب به‌عنوان بار کف و بار معلق و ب) محاسبه بار کف با کسر رسوب معلق ایستگاه ورودی (با رعایت ضریب اصلاحی مساحت دامنه‌های مشرف به مخزن سد) از کل رسوب نهشته شده، نسبت بار کف به بار معلق تعیین شد. نسبت بار کف به بار معلق با روش "ب" در دریاچه‌های سدهای دز و میناب به‌ترتیب ۳۴۸ و ۲۵۱ درصد برآورد شد که ناشی از خطای برآورد رسوب معلق در ایستگاه هیدرومتری ورودی سد بوده و غیر قابل قبول است. نسبت وزنی بارکف به بار معلق در رودهای دز و میناب با روش "الف" به‌ترتیب ۴۵ و ۵۶ درصد به‌دست آمد. دو عامل عدم اطمینان بسیار مهم در این روش به‌ترتیب ضریب تله‌اندازی و وزن مخصوص رسوب به‌ویژه رسوب دلتا می‌باشد. با تغییر ضریب تله‌اندازی از حدود ۹۵ درصد به ۶۰ درصد، نسبت بار کف به بار معلق در دز از ۴۲ درصد به ۲۳ درصد و در میناب از ۵۳ درصد به ۲۷ درصد کاهش یافت. یک مورد کاهش ۱۴ درصدی وزن مخصوص رسوب دلتایی در سد میناب نیز سبب تقلیل هفت درصدی نسبت بارکف به بار معلق شد. اگرچه اختلاف زیادی بین نتایج در سناریوهای مختلف دیده می‌شود، حتی کمترین مقادیر به‌دست آمده بسیار بالاتر از رقم‌های کارشناسی ۲۰-۱۵ درصد متداول در مطالعات منابع آب است.

واژه‌های کلیدی: رسوبدهی معلق، رسوب‌سنجی مخزن، سد دز، سد میناب، ضریب تله‌اندازی

مقدمه

مواد رسوبی از نظر شیوه انتقال به دو دسته بار معلق و بار کف تقسیم می‌شوند. مقدار بار معلق معمولا با روش‌های آماری بر اساس اندازه‌گیری‌های غلظت و دبی جریان در محل ایستگاه‌های هیدرومتری محاسبه می‌شود. در مقایسه، برآورد بار کف به‌دلیل

[*] مسئول مکاتبات: arabkhedri@scwmri.ac.ir

پیچیده بودن اندازه‌گیری رسوب بستر رودخانه‌ها، با مسائل و مشکلات زیادی توام است. اصولا، قرار دادن هر گونه وسیله اندازه‌گیری در کف رودخانه، شرایط طبیعی جریان و حمل رسوب را مختل می‌کند. به‌علاوه، ساخت دستگاهی که بتواند به‌طور صحیح تمام اندازه ذرات را جمع‌آوری کند، مشکل است (Simons و Senturk، ۱۹۹۲). پر زحمت بودن نصب تجهیزات اندازه‌گیری بار کف را نیز باید به این موارد اضافه کرد. استفاده از تجهیزات برآورد بار کف مبتنی بر صوت[1] نیز همچنان در مراحل تحقیقاتی است (McLelland، ۲۰۱۰؛ Holmes، ۲۰۱۰).

با توجه به این مشکلات، از روابط تجربی انتقال بار کف نظیر دوبوآ، شوکلیتش، مایر-پتر-مولر و انشتین که بر اساس خصوصیات آبراهه، جریان و مواد بستری توسعه داده شده‌اند، در برخی از بررسی‌ها استفاده شده است (Kazemi و همکاران، ۲۰۱۲). این روابط عمدتا از داده‌های فلوم‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده‌اند. Graf (۱۹۸۴) ضمن تاکید بر تجربی و یا نیمه تجربی بودن این روابط، استفاده از آن‌ها را محدود به شرایط خاص توسعه این معادلات از قبیل شرایط هیدرولیکی و دانه‌بندی ذرات می‌داند، چون پیچیدگی پدیده انتقال رسوب در شرایط طبیعی رودخانه به‌دلیل اندرکنش تعداد زیادی از عوامل هیدرولیک و رسوبی در مقایسه با فلوم، سبب برآوردهای متفاوت و دور از واقعیت روابط تجربی می‌شود. به این دلیل، هیچ یک از روابط تجربی مذکور مقبولیت همگانی نیافته‌اند (Habibi، ۱۹۹۶). اصولا، این‌گونه معادلات، حداکثر بار کف حمل شده در بازه‌ای از یک رودخانه که در شرایط تعادل (نه فرسایش و نه رسوبگذاری) است را محاسبه می‌نمایند. این مقدار با مقدار واقعی بار کف در بازه‌ای دیگر از همان رودخانه که در حال کنش یا رسوبگذاری باشد، متفاوت است (Graf، ۱۹۸۴). برای اطمینان از نتایج این گونه روابط، تحقیقات بیشتری به‌ویژه در شرایط طبیعی رودخانه‌ها لازم است.

برای حل این مشکل، در برخی از منابع بر اساس جنس مواد بستر، دانه‌بندی مواد معلق و غلظت بار معلق (Morris و Fan، ۱۹۹۸؛ Vanoni، ۲۰۰۶) و شیب آبراهه (Bahadori Khosroshahi، ۲۰۱۲)، حدودی (کمتر از دو تا بالغ بر ۳۰۰ درصد) برای نسبت بار کف به بار معلق به‌صورت جدول یا نمودار ارائه داده‌اند. بعضی از کارشناسان حداقل به‌واسطه سهولت، نسبت متوسطی در حدود ۲۰-۱۰ درصد از بار معلق را به‌عنوان بار کف در نظر می‌گیرند (مثلا Kalvandi و همکاران، ۲۰۱۰).

اندازه‌گیری‌های موجود از رودخانه‌های مختلف از سطح جهان نشان می‌دهد که این نسبت‌ها تغییرات زیادی دارند. Walling و Webb (۱۹۸۷) با جمع‌آوری نتایج چند بررسی نسبت بار کف به بار معلق ۱۲ رودخانه از مناطق مختلف جهان را بین ۰/۳ تا ۱۳۰۰ درصد گزارش کردند. Babinski (۲۰۰۵) داده‌های موجود از تعداد زیادی رودخانه را جمع‌بندی و متوسط سهم بار کف از کل رسوب را در حوضه‌های بزرگ هفت درصد، در منطقه جنگلی/استپی ۳۵ درصد و در منطقه معتدل/مجاور یخبندان[2] ۵۰ درصد ذکر کرده است. معتبر نبودن مقادیر متعارف نسبت بار کف به بار معلق در حد ۲۰-۱۰ درصد توسط محققین دیگر نیز تاکید شده است (Habibi، ۱۹۹۶؛ Bahadori Khosroshahi، ۱۹۹۶؛ Pratt-Sitaula و همکاران، ۲۰۰۷). به این ترتیب، دست‌یابی به روشی قابل اعتماد ضروری به نظر می‌رسد.

اندازه‌گیری رسوب نهشته شده در مخازن سدها می‌تواند به رفع این نقیصه کمک کند. با رسوب‌سنجی مواد نهشته شده، به دو طریق می‌توان سهم رسوبدهی کف و معلق را به‌دست آورد. در روش اول ابتدا بار معلق ایستگاه بالادست اندازه‌گیری یا برآورد شده و با کسر آن از کل رسوب مخزن، بار کف تعیین می‌شود. با استفاده از این روش، Bahadori Khosroshahi (۱۹۹۶) نسبت بار کف به بار معلق در محل سدهای کرج، لتیان و سفیدرود را به‌ترتیب معادل ۳۸۵، ۱۴۸ و ۱۹ درصد به‌دست آورد. این یافته‌ها در نشریه راهنمای محاسبه بار رسوب معلق و بستر رودخانه از انتشارات معاونت راهبردی ریاست جمهوری (Bahadori Khosroshahi، ۲۰۱۲) منعکس شده است

[1] Acoustic

[2] Periglacial

که به‌عنوان دستورالعمل مهندسین مشاور در مطالعات به‌کار می‌رود. چنان‌چه رسوب معلق ورودی و خروجی مشخص باشد، ضریب تله‌اندازی واقعی تعیین و با لحاظ رسوب‌سنجی کف مخزن سد، می‌توان نسبت بار کف به بار معلق را با دقت بالاتری برآورد کرد. مثلا Vali-Khodjeini و Mohamed (۱۹۷۶) با آگاهی از داده‌های رسوب معلق ورودی و خروجی و باتیمتری مخزن سد سفیدرود، این نسبت را ۱۲ درصد به‌دست آوردند.

در روش دوم، ذرات درشت‌دانه که به شکل دلتا در ورودی مخزن نهشته می‌شود؛ بارکف و ذرات ریز که به‌سمت دیواره سد یا انتهای مخزن حرکت می‌کنند و نهشته‌های دریاچه‌ای را تشکیل می‌دهند، بار معلق ملحوظ می‌شوند. مثلا Duck و McManus (۱۹۹۳) با استفاده از رسوب‌سنجی یک مخزن تخلیه شده سد، نسبت رسوب کف به بار معلق در طول ۸۵ سال عمر سد را ۸۴ درصد محاسبه نمودند. در پژوهشی دیگر، Arabkhedri (۲۰۰۱) با نقشه‌برداری رسوبگذاری سه-ساله رودخانه چمرود کاشان (مساحت ۹۹۸ کیلومتر مربع) در یک گودال بزرگ و تفکیک رسوب دلتایی و دریاچه‌ای نسبت بار کف به بار معلق را ۳۱ درصد محاسبه کرد. اخیرا Pratt-Sitaula و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی رسوب نهشته شده در مخزن پشت یک سد زمین‌لغزشی به ارتفاع بیش از ۴۰۰ متر در شمال نپال، نسبت رسوب کف به بار معلق را ۵۶ درصد حجمی تعیین کردند.

مشکلاتی برای این دو روش متصور است که باید در تحلیل‌ها مدنظر قرار گیرد. مثلا لغزش دیواره‌های مخزن (Shfaee Bejestan، ۲۰۱۲) در سال‌های اولیه آبگیری بر سهم رسوب دلتایی و دریاچه‌ای تاثیر می‌گذارد. از مشکلات دیگر می‌توان به دقت در تعیین حجم رسوب نهشته شده، وزن مخصوص، ضریب تله‌اندازی، نرخ نشست رسوب و ... اشاره کرد. این مقاله به بررسی مقدار رسوب کف و معلق ورودی و نهشته شده در مخزن دو سد دز و میناب پرداخته و در قالب آن تاثیر عدم اطمینان‌ها بر تخمین نسبت بارکف به بار معلق تشریح می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: سدهای دز و میناب برای اجرای این پژوهش انتخاب شدند. سد دز در ۲۵ کیلومتری شمال شهر دزفول و بر روی رودخانه دز قرار گرفته است. این سد از نوع بتونی قوسی است که در سال ۱۳۴۱ به بهره‌برداری رسید.

سد میناب در سه کیلومتری شهر میناب و بر روی رودخانه میناب قرار گرفته و از نوع بتونی به ارتفاع ۶۰ متر است. ساختمان این سد از سال ۱۳۵۳ شروع و در سال ۱۳۶۲ به پایان رسیده است. تعدادی از مشخصات این دو سد و حوضه بالادست آن‌ها در جدول ۱ ملاحظه می‌شود.

جدول ۱- تعدادی از مشخصات مربوط به سدهای دز و میناب

سد	دز	میناب
سطح دریاچه (کیلومتر مربع)	۲۶/۵	۲۱
حجم کل (میلیون متر مکعب)	۳۳۱۵	۳۴۴
مساحت کل حوزه آبخیز (کیلومتر مربع)	۱۷۵۲۳	۱۱۹۵۸
مساحت حوضه اصلی سد در محل ایستگاه هیدرومتری ورودی (کیلومتر مربع)	۱۶۱۳۰	۱۰۲۰۰
مساحت حوضه‌های مستقیم مشرف به مخزن (کیلومتر مربع)	۱۳۹۳	۱۷۵۸

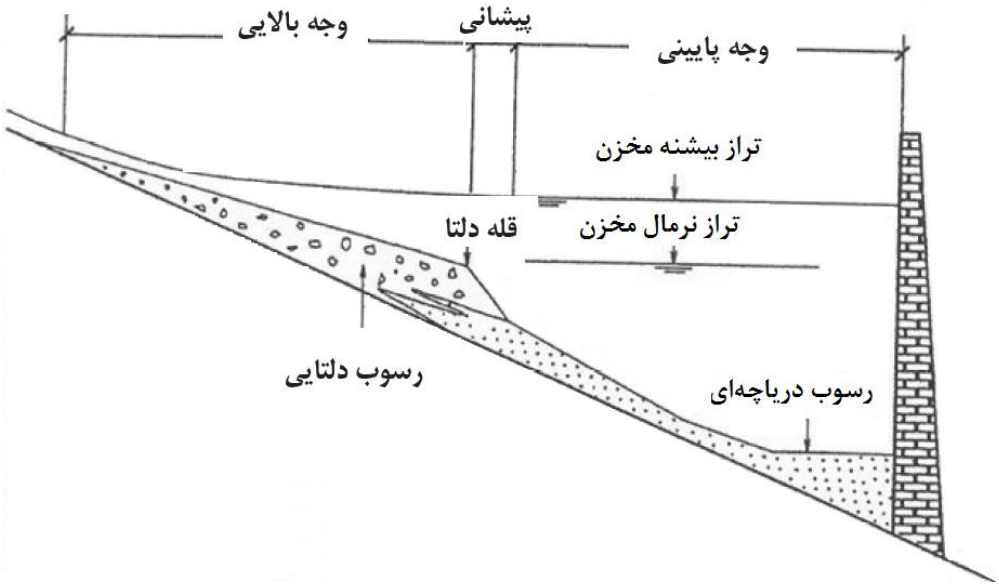
روش پژوهش: وضعیت رسوبگذاری در مخزن سد به-ویژه موقعیت رسوب دلتایی و دریاچه‌ای به همراه سایر اجزا در شکل ۱ مشاهده می‌شود. با توجه به احتمال وقوع لغزش دامنه‌های مشرف به سد در سال‌های اولیه آبگیری و همچنین، عدم شکل‌گیری دلتا در این مدت، از رسوبگذاری مخزن تا زمان اولین رسوب‌سنجی صرف‌نظر شد. از سوی دیگر، با توجه به رشد طولی سالانه دلتا و پوشانیدن رسوب دریاچه‌ای، از در نظر گرفتن دوره بسیار طولانی اجتناب شد. داده‌های مورد نیاز پژوهش از گزارش‌ها و نقشه‌های زیر به‌دست آمد.

-گزارش "بررسی رسوبات مخزن سد دز" تهیه شده توسط موسسه تحقیقات منابع آب، در سال ۱۳۶۲، (WRRI، ۱۹۸۶)، مقیاس نقشه هیدروگرافی مخزن ۱۰۰۰۰: ۱

-گزارش "رسوب‌سنجی مخزن سد دز"تهیه شده توسط شرکت مهندسین مشاور دریا نقشه، در سال ۱۳۷۶، (Darya Naghsheh، ۱۹۹۷)، مقیاس نقشه هیدروگرافی مخزن ۱۰۰۰۰: ۱

-گزارش "رسوب‌سنجی و رسوب‌شناسی مخزن سد استقلال (میناب)" تهیه شده توسط موسسه تحقیقات منابع آب، در سال ۱۳۶۴ (WRRI، ۱۹۸۸)، مقیاس نقشه هیدروگرافی مخزن ۵۰۰۰: ۱

-گزارش "رسوب‌سنجی مخزن سد میناب" تهیه شده توسط شرکت مهندسین مشاور دریا نقشه، در سال ۱۳۷۷، (DaryaNaghsheh، ۱۹۹۸)، مقیاس نقشه هیدروگرافی مخزن ۱۰۰۰۰: ۱



شکل ۱- وضعیت تقریبی رسوبات دلتایی و دریاچه‌ای در مخازن سدها (Bahadori Khosroshahi، ۲۰۱۲)

روش محاسبه حجم: با بررسی تراز نرمال مخزن و وضعیت خطوط تراز در پیشانی، قله دلتا به‌عنوان مرز رسوب دلتایی و دریاچه‌ای روی نقشه توپوگرافی رسوب‌گذاری کف مخزن مشخص شد. سپس، از ورودی مخزن (تراز بیشنه مخزن)، سطح محصور بین هر دو خط تراز تعیین و در مرحله بعد به‌روش شبه‌منشوری اصلاح شده (Vanoni، ۲۰۰۶)، حجم واقع بین هر دو خط تراز محاسبه و از مجموع جزء حجم‌ها، ظرفیت مخزن در بالادست قله دلتا به‌دست آمد. این ظرفیت، از ظرفیت متناظر دوره قبل کسر و حجم نهشته‌های بالادست قله دلتا تعیین شد. با کسر حجم این نهشته‌ها از حجم کل نهشته‌ها اعلام شده در گزارش رسوب‌سنجی، حجم نهشته‌های پایین‌دست مرز نیز به‌دست می‌آید.

روش تعیین وزن مخصوص: وزن مخصوص تعدادی از نمونه‌ها از لایه سطحی قسمت‌های مختلف مخزن به هنگام رسوب‌سنجی کف مخزن اندازه‌گیری می‌شود. برای محاسبه وزن مخصوص متوسط، لازم است اثر تحکیم ناشی از گذشت زمان نیز مورد توجه قرار گیرد. به این منظور از رابطه Lane و Koelzer (Vanoni، ۲۰۰۶) که به‌صورت رابطه (۱) است، استفاده شد.

$$\gamma = \gamma_s P_s + (\gamma_m + K_m LogT) P_m + (\gamma_c + K_c LogT) P_c \quad (۱)$$

که در آن، γ وزن مخصوص نهشته‌ها پس از T سال (Kgm^{-3})، γ_s، γ_m و γ_c به‌ترتیب وزن مخصوص‌های اولیه ماسه، سیلت و رس (kgm^{-3})، K_m و K_c به‌ترتیب ضرایب تراکم سیلت و رس (kgm^{-3}) (در مورد ماسه $K_s = 0$)، P_s، P_m و P_c به‌ترتیب

نسبت ماسه، سیلت و رس در مخلوط رسوبی (به عدد اعشاری) و T زمان به سال است.

مقادیر ضرایب تراکم و وزن مخصوص‌های اولیه ذرات رسوبی ماسه، سیلت و رس تابع نحوه بهره‌برداری مخزن است و جدولی برای تعیین آن‌ها ارائه شده که در Vanoni (۲۰۰۶) قابل دسترسی است. رابطه Lane و Koelzer وزن مخصوص رسوب را پس از T سال بر اساس وزن مخصوص اولیه آن‌ها به‌دست می‌دهد. وزن مخصوص متوسط کل رسوب ورودی به مخزن در T سال با فرض رسوبگذاری یکنواخت، با استفاده از رابطه Miller قابل محاسبه است (Bina و Qomshi، ۱۹۸۹).

$$\gamma_{av} = \gamma_{\circ} + 0.4343K\left(\frac{T}{T-1}(LnT)-1\right) \qquad (۲)$$

که در آن، γ_{av} وزن مخصوص متوسط (kgm^{-3})، $\gamma_{\circ}$ وزن مخصوص اولیه (kgm^{-3}) می‌باشد.

مقادیر پیشنهادی Miller برای K و $\gamma_{\circ}$ به‌صورت جدول در Bina و Qomshi (۱۹۸۹) برای ذرات رس، سیلت و ماسه قابل دستیابی است. البته لازم است، ابتدا برای رسوب مورد نظر میزان K و $\gamma_{\circ}$ وزنی محاسبه شده و سپس در معادله مذکور قرار گیرد.

روش اصلاح حجم رسوب: سطح نهشته‌ها در هنگام رسوب‌سنجی قبلی، با ته‌نشینی رسوب ورودی جدید و تحت تاثیر وزن آن‌ها مقداری پایین می‌افتد. بنابراین لازم است، حجم نهشته‌های بین دو رسوب‌سنجی اصلاح شود. برای یافتن مقدار افت سطح و به‌عبارتی کاهش حجم نهشته‌های قبلی باید مقدار فشردگی یا تغییرات وزن مخصوص ظاهری آن‌ها تعیین شود. بدین منظور وزن مخصوص متوسط آن‌ها در هنگام رسوب‌سنجی قبلی محاسبه و با وزن مخصوص متوسط در زمان رسوب‌سنجی بعدی مقایسه شد. وزن مخصوص متوسط نهشته‌ها به‌روش Miller (انتگرال-گیری از معادله Lane و Koelzer نسبت به زمان) به‌دست آمد.

محاسبه وزن رسوب: با داشتن حجم و وزن مخصوص نهشته‌ها، وزن آن‌ها قابل محاسبه است. به این ترتیب که حجم مربوط به هر کدام از نهشته‌ها در وزن مخصوص مربوط به آن ضرب شد.

ضریب تله‌اندازی: در مخازن ذخیره‌ای بزرگ نظیر دز و میناب، تمام بار کف و درصد عمده‌ای از رسوب معلق ورودی ته‌نشین می‌شوند. برای به‌دست آوردن بار کل ورودی به مخزن باید بار خارج شده نیز به رسوب نهشته شده مربوط اضافه شود. برای این کار از منحنی‌های Brune استفاده به عمل آمد. این منحنی‌ها بر اساس داده‌های ۴۴ مخزن در آمریکا (Linsley و همکاران، ۱۹۸۲) با رژیم غالب رواناب زمستانه و بهاره به‌دست آمده و در آن ضریب تله‌اندازی، تابع نسبت ظرفیت مخرن به جریان ورودی سالانه می‌باشد (Lewis و همکاران، ۲۰۱۳). پس از تعیین ضریب تله‌اندازی، از تقسیم وزن بار کل نهشته شده در مخزن به آن، وزن کل رسوب محاسبه شد.

تعیین سهم حوضه مشرف به مخزن و حوضه بالادست در رسوب معلق و رسوب کف: در این پژوهش، فرض شد که سهم حوضه مستقیم یا دامنه‌های مشرف به سد و سهم حوزه آبخیز در محل ایستگاه ورودی قبل از دریاچه (ایستگاه‌های تله‌زنگ و برنطین) در تولید رسوب معلق و کف متناسب با مساحت آن‌هاست. البته، به دلایل زیادی از قبیل اختلاف در جنس سازند، شیب آبراهه، میزان بارش و ضریب رواناب، وضعیت پوشش، این فرض ضعف‌هایی دارد. با این همه، به‌دلیل فقدان اندازه‌گیری، تکیه بر این فرض اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. با این توضیحات، پس از محاسبه وزن کل رسوب معلق، سهم رسوب معلق مربوط به حوضه مستقیم سد و حوضه بالادست در محل ایستگاه هیدرومتری تفکیک شد. با تعیین سهم رسوب حوضه بالادست، امکان مقایسه بین رقم برآورد از طریق بررسی نهشته‌های مخزن با رقم به‌دست آمده از طریق آمار رسوب معلق در محل ایستگاه فراهم شد. از طرف دیگر، پس از مشخص شدن حجم دلتای اصلی در محل ورودی، حجم دلتاهای فرعی مربوط به آبراهه‌های کوچکی که از دامنه‌های مشرف به دریاچه به‌طور مستقیم به مخزن سد وارد می‌شود، تعیین شد.

برآورد رسوب معلق در محل ایستگاه: مقدار رسوب معلق در محل ایستگاه تله‌زنگ برای دوره آماری ۱۳۷۶-۱۳۶۲ و در محل ایستگاه برنطین برای

دوره آماری ۱۳۷۷-۱۳۶۴ به‌روش تلفیق منحنی سنجه رسوب یک‌خطی یا چندخطی با تداوم جریان (مشهور به‌روش USBR) برآورد شد.

محاسبه اختلاف دو برآورد: درصد خطای نسبی رسوب معلق به‌دست آمده از آمار ایستگاه نسبت به رسوب مشاهده شده در مخزن از رابطه (۳) محاسبه شد.

$$e_i = 100 \times (SY_{sta} - SY_{res}) / SY_{res} \quad (۳)$$

که در آن، SY_{sta} رسوبدهی معلق محاسبه شده با استفاده از آمار جریان و غلظت در محل ایستگاه رسوب‌سنجی و SY_{res} وزن رسوب معلق به‌دست آمده از رسوب‌سنجی مخزن هر دو با واحد مشترک می‌باشند. هر چه خطا به صفر نزدیک‌تر باشد، نتیجه مناسب‌تر است.

نتایج و بحث

با توجه به پروفیل طولی کف مخزن در دومین اندازه‌گیری، محل قله دلتا در دو مخزن دز و میناب به‌ترتیب در کیلومتر ۲۰ و ۹/۳ بالادست دیواره سد که تغییر شیب ناگهانی رخ داده، تعیین شد. با تفکیک مرز رسوب دلتایی و دریاچه‌ای، دانه‌بندی نمونه‌های رسوبات نهشته‌شده ریز و درشت‌دانه به‌طور جداگانه در دو مخزن بررسی و با استفاده از روابط (۱) و (۲) وزن مخصوص متوسط برای هر یک محاسبه شد که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود.

وزن مخصوص رسوب ریزدانه در هر دو مخزن بسیار به هم نزدیک است. مقایسه وزن مخصوص رسوب دریاچه‌ای در بدو رسوبگذاری و متوسط آن در فاصله دو اندازه‌گیری، حکایت از حدود ۱۰ درصد افزایش را دارد که تا حدی در مخزن دز بیشتر از میناب می‌باشد. با فشرده شدن تدریجی رسوب دریاچه‌ای، حجم رسوب کاهش می‌یابد. وزن مخصوص رسوب درشت‌دانه در سد میناب کمی بیشتر از سد دز است. دلیلی که می‌توان ذکر کرد، وجود فقط یک نمونه دانه‌بندی مناسب در راس دلتای مخزن سد میناب است.

جدول ۲- وزن مخصوص رسوب ریز و درشت دانه بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب

مخزن سد	دز	میناب
رسوب ریزدانه در سال اول	۹۲۵	۹۴۵
متوسط رسوب ریزدانه در کل دوره	۱۰۴۶	۱۰۳۲
رسوب درشت‌دانه	۱۵۱۱	۱۷۵۳

با مشخص شدن تراز ارتفاعی مرز رسوب دلتایی و دریاچه‌ای، حجم نهشته‌های هر قسمت محاسبه شد که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود. به‌طور کلی، حدود ۴۵۱ میلیون مترمکعب در سد دز طی ۱۴ سال (متوسط سالانه ۳۲/۲ میلیون مترمکعب) و ۸۷ میلیون مترمکعب در سد میناب طی ۱۳ سال (متوسط سالانه ۶/۷ میلیون مترمکعب) در اثر رسوب‌گذاری از گنجایش مخازن کاسته شده است.

به‌دلیل وزن لایه‌های رسوب دوره مورد مطالعه (۱۴-۱۳ سال)، حجم رسوب قبل از شروع دوره نیز نشست می‌کند. تاثیر نهایی ناشی از فشار رسوبات جدید بر رسوبات قدیمی‌تر بر حجم اندازه‌گیری شده در دو سد دز و میناب به‌ترتیب کمی بیشتر از دو و یک درصد است که نشان‌دهنده ناچیز بودن اثر آن برای دوره مورد مطالعه در محاسبات دارد. حدود یک‌چهارم حجم کل نهشته‌های دو سد، رسوب دلتایی و سه‌چهارم باقی‌مانده، رسوب دریاچه‌ای ریزدانه است که سهم بیشتر رسوبات دریاچه‌ای را در کاهش حجم مفید مخازن نشان می‌دهد. نسبت حجمی بارکف به رسوب معلق دو مخزن دز و میناب به‌ترتیب حدود ۳۱ و ۳۳ درصد حجمی می‌باشد.

با توجه به حجم رسوب ورودی به سد میناب در ۱۳ سال، حجم سالانه رسوب تقریبا ۶/۷ میلیون مترمکعب قابل محاسبه است که تقریبا بین دو تا سه برابر برآورد مشاور طرح اولیه سد می‌باشد.

مهندسین مشاور طرح اولیه سد، رسوب ورودی را چهار میلیون مترمکعب برآورد کرده و با لحاظ رسوب خروجی به میزان ۴۰ درصد، طراحی سد را بر اساس ۲/۵ میلیون مترمکعب در سال انجام داده بود (WRRI، ۱۹۸۸).

جدول ۳- خلاصه نتایج حجم رسوب نهشته شده (میلیون مترمکعب)

ردیف	مخزن سد	دز (۱۳۷۶-۱۳۶۲)	میناب (۱۳۷۷-۱۳۶۴)
۱	حجم کل نهشته‌ها	۴۵۰/۹۹	۸۶/۷۳
۲	حجم نهشته‌های درشت‌دانه دلتای اصلی	۱۰۱/۱۹	۱۸/۵۵
۳	حجم سایر رسوبات (۲-۱)	۳۴۹/۸۰	۶۸/۱۸
۴	حجم دلتاهای فرعی*	۸/۷۴	۳/۲۰
۵	حجم کل دلتاها (۴+۲)	۱۰۹/۹۳	۲۱/۷۵
۶	حجم کل رسوبات ریز (۵-۱)	۳۴۱/۰۶	۶۴/۹۸
۷	حجم نشست رسوبات قبل از اولین اندازه‌گیری	۷/۹۴	۰/۷۳
۸	حجم بار معلق نهشته شده (۶+۷)	۳۴۹/۰۰	۶۵/۷۱

* با فرض تولید بار کف حوضه مستقیم سد متناسب با مساحت حوضه اصلی در دز (۱۳۹۳ کیلومتر مربع به ۱۶۱۳۰ کیلومتر مربع) و در میناب (۱۷۵۸ کیلومتر مربع به ۱۰۲۰۰ کیلومتر مربع)

جدول ۴ خلاصه نتایج محاسبات وزن رسوب نهشته شده در مخازن دو سد دز و میناب را نشان می‌دهد. از نظر وزنی، نسبت رسوب دلتایی به دریاچه‌ای در سدهای دز و میناب به‌ترتیب ۴۵ و ۵۶ درصد می‌باشد. با لحاظ ضریب تله‌اندازی به‌روش Brune و محاسبه بار کل، نسبت بار کف به بار معلق برای دز و میناب به‌ترتیب به ۴۲ و ۵۳ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به متکی بودن وزن مخصوص رسوب درشت‌دانه سد میناب (۱۷۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب) به تنها یک اندازه‌گیری در راس دلتا، اگر وزن مخصوص ۱۵۱۱ کیلوگرم بر مترمکعب مربوط به دلتای مخزن دز جایگزین شود، نسبت بار کف به بار معلق در این سد به ۴۶ درصد تقلیل می‌یابد که به نسبت ۴۲ درصد دز نزدیک است. مقایسه مقادیر فوق، نسبت به مقادیر کارشناسی (۲۰-۱۰ درصد) و همچنین، رقم ۱۰ درصد فرض شده توسط مشاور در طراحی سد میناب (WRRI، ۱۹۸۸)، اختلاف زیادی دارد. در مقابل نسبت‌های به‌دست آمده با مقادیر ذکر شده توسط Pratt-Sitaula و همکاران (۲۰۰۷) همخوانی دارد.

جدول ۴- خلاصه نتایج وزن رسوب نهشته شده بر حسب میلیون تن

ردیف	مخزن سد	دز (۱۳۷۶-۱۳۶۲)	میناب (۱۳۷۷-۱۳۶۴)
۱	وزن کل نهشته دلتاها	۱۶۶/۱۰	۳۸/۱۳
۲	وزن بار معلق نهشته شده	۳۶۵/۰۶	۶۷/۸۱
۳	وزن کل رسوبات نهشته شده (۲+۱)	۵۳۱/۱۶	۱۰۵/۹۴
۴	ضریب تله اندازی به‌روش Brune	۹۵/۰	۹۶/۸
۵	وزن کل رسوب حوضه ((۱۰۰÷۴)÷۳)	۵۵۹/۱۱	۱۰۹/۴۴
۶	وزن رسوب معلق کل حوضه (۱-۵)	۳۹۳/۰۱	۷۱/۳۱
۷	سهم وزن رسوب معلق حوضه اصلی در محل ایستگاه ورودی سد*	۳۶۱/۷۷	۶۰/۸۲

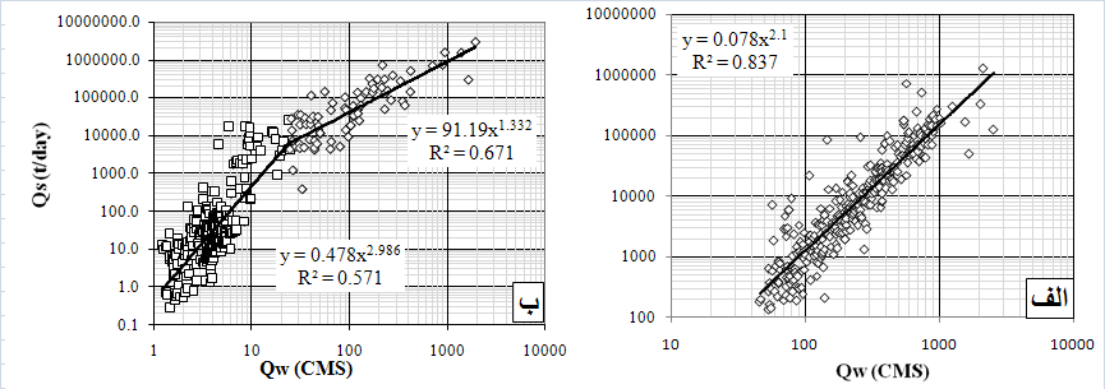
* با فرض تولید بار معلق حوضه مستقیم سد متناسب با مساحت حوضه اصلی در دز (۱۳۹۳ کیلومتر مربع به ۱۶۱۳۰ کیلومتر مربع) و در میناب (۱۷۵۸ کیلومتر مربع به ۱۰۲۰۰ کیلومتر مربع)

اگرچه به گزارش مهندسین مشاور طراح اولیه سد میناب و جزئیات طراحی آن‌ها دسترسی وجود ندارد، ولی مطابق گزارش WRRI (۱۹۸۸)، مشاور مذکور، ضریب تله‌اندازی را خیلی پایین‌تر در حد ۶۰ درصد در نظر گرفته است. با لحاظ این ضریب برای هر دو مخزن، که سطح بالای مدیریت دریچه‌های سد برای خروج جریان‌های غلیظ سیلابی را نمایندگی می‌کند، نسبت بار کف به بار معلق دو سد دز و میناب به‌ترتیب ۲۳ و ۲۸ درصد می‌شود که نشان‌دهنده نقش بسیار موثر این ضریب بر نسبت بار کف به بار معلق است.

شکل ۳ منحنی‌های سنجه رسوب برای دو ایستگاه تله‌زنگ روی دز و برنطین روی میناب را نشان

می‌دهد. با توجه به پراکنش نقاط اندازه‌گیری برای ایستگاه تله‌زنگ، یک خط (شکل ۲-الف) و برای ایستگاه برنطین، دو خط (شکل ۲-ب) برازش داده شد. برای هر یک از خطوط برازش یافته، معادله رگرسیون و ضریب تعیین در حاشیه منحنی آورده شده است. بر اساس روابط به‌دست آمده و با استفاده از آمار جریان، مقدار رسوب‌دهی معلق دوره مورد مطالعه برآورد شد که در جدول ۵ به‌همراه خطای برآورد در مقایسه با مقدار به‌دست آمده از بررسی نهشته‌های دریاچه‌ای ملاحظه می‌شود. روش دفتر عمران اراضی آمریکا در دو سد دز و میناب به‌ترتیب ۶۰ و ۶۶ درصد خطای کم‌برآوردی را نشان می‌دهند. خطای کم برآوردی این روش نسبت به مقدار مشاهده‌ای تا ۷۰ درصد در بررسی‌های مختلف گزارش شده است (Arabkhedri و همکاران، ۲۰۰۴؛ Walling و Webb، ۱۹۸۸؛ Ferguson، ۱۹۸۶).

اگر مقدار بار کف از کسر رسوب معلق برآوردی در محل ایستگاه ورودی مخزن به‌روش دفتر عمران اراضی از وزن کل رسوب نهشته شده محاسبه شود، نسبت بار کف به بار معلق این دو سد به‌ترتیب ۲۵۱ و ۳۴۸ درصد می‌شود. این نسبت‌های بالا، بسیار شبیه به نتایج Bahadori Khosroshahi (۱۹۹۶) برای سدهای کرج و لتیان است. اشکالات موجود ناشی از تبدیل لگاریتم در منحنی سنجه معمول به‌همراه استفاده از منحنی تداوم جریان به‌جای دبی روزانه سبب برآورد کمتر از مقدار واقعی بار معلق ایستگاه به‌روش USBR (Arabkhedri و همکاران، ۲۰۰۳) و در نتیجه تخمین بیشتر بار کف مخزن شده باشد.



شکل ۲- منحنی‌های سنجه الف) یک خطی دز، تله‌زنگ؛ ب) دو خطی میناب، برنطین

جدول ۵- رسوب‌دهی معلق در محل ایستگاه ورودی به مخزن به‌روش دفتر عمران اراضی و خطای برآورد نسبت به نهشته‌های ریزدانه مخزن

دز، تله‌زنگ (۱۳۷۶-۱۳۶۲)		میناب، برنطین (۱۳۷۷-۱۳۶۴)	
رسوب‌دهی معلق (میلیون تن)	خطای برآورد (٪)	رسوب‌دهی معلق (میلیون تن)	خطای برآورد (٪)
۱۴۴/۲۱	-۶۰/۱۴	۲۰/۶۰	-۶۶/۱۳

در این پژوهش، ابتدا سهم رسوب ریز و درشت، با بررسی نهشته‌های دلتایی و دریاچه‌ای در بستر مخازن دو سد دز و میناب به‌صورت حجمی و وزنی تعیین شد. نسبت حجمی رسوب دلتایی به دریاچه‌ای در مخزن سد دز حدود ۳۱ درصد و در مخزن سد میناب حدود ۳۳ درصد اندازه‌گیری شد. با توجه به اختلاف در وزن مخصوص بار درشت‌دانه دو مخزن، نسبت وزنی رسوب دلتایی به دریاچه‌ای در این دو سد به‌ترتیب حدود ۴۵ و ۵۶ درصد به‌دست آمد. با لحاظ اثر ضریب تله‌اندازی به‌روش Brune (در حدود ۹۵ درصد) بر مقدار بار معلق، نسبت بار کف به بار معلق حدود سه درصد تقلیل یافت. با فرض ضریب تله‌اندازی ۶۰ درصد، نسبت بار کف به بار معلق کاهش قابل توجهی نشان داد و به‌ترتیب در سدهای دز و میناب به حدود ۲۳ و ۲۷ درصد رسید. در شرایط ضریب تله‌اندازی نزدیک ۱۰۰، کاهش ۱۴ درصدی در وزن مخصوص بار کف، نسبت بار کف به بار معلق سد میناب را از ۵۳ به ۴۶ درصد تقلیل داد که فقط چهار درصد از دز بیشتر

است. با روش کسر رسوب معلق برآورد شده متکی به آمار ایستگاه ورودی سد از حجم کل رسوب نهشته شده در مخزن، نسبت بار کف به بار معلق دو سد دز و میناب به‌ترتیب ۲۵۱ و ۳۴۸ درصد تعیین شد که غیر واقعی بودن آن کاملا مشخص است.

به این ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت سه عامل عدم اطمینان بسیار مهم به‌ترتیب اتکا به آمار رسوب معلق ایستگاه ورودی، ضریب تله‌اندازی و وزن مخصوص رسوب به‌ویژه رسوب کف می‌باشد. عواملی از قبیل لحاظ رسوب دلتایی حوضه مستقیم مخزن سد و تغییر در حجم رسوب ریزدانه به‌دلیل نشست تدریجی در درجه اهمیت بعدی قرار دارند.

با توجه به احتمال خطای بسیار زیاد در برآورد بار معلق ایستگاه ورودی سد و تاثیر آن بر نسبت بار کف به بار معلق، رسوب‌سنجی مخازن سدها و سایر رسوبگیرها، می‌تواند چشم‌انداز روشنی از برآورد صحیح‌تر را ایجاد کند. مشکلی که عملا در مخازن سدهای بزرگ وجود دارد، عدم دسترسی مستقیم به رسوب و ضرورت اتکا به اطلاعات کف‌سنجی رسوب زیر آب است. توصیه می‌شود، در پژوهش‌های آینده، بر تعیین دقیق‌تر ضریب تله‌اندازی با اتکا به آمار مداوم رسوب معلق ایستگاه‌های ورودی و خروجی سد و باتیمتری دقیق نهشته‌های داخل مخزن توجه بیشتری مبذول شود. همچنین، توصیه می‌شود از به کار بردن نسبت کارشناسی ۲۰-۱۵ درصد بار کف به بار معلق در مطالعات، بدون داشتن شواهد و دلایل کافی اجتناب شود.

تشکر و قدردانی

این مقاله از گزارش نهایی طرح برآورد رسوبدهی و تهیه نقشه تولید رسوب برای کشور با شماره ثبت ۸۸/۶۹۲ استخراج شده است. بدین‌وسیله از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به‌خاطر تامین اعتبار و تسهیل شرایط اجرای پژوهش تشکر می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Arabkhedri. M. 2001. Determining bed load to suspended load ratio using reservoir survey and sediment particle size distribution. Journal of Engineering Agriculture Research. 2(6): 81-91 (in Persian).
2. Arabkhedri. M., S. Hakimkhani and D. Nikkami. 2003. A comparison among several statistical suspended sediment estimation methods in a watershed with rainy snowy regime. Final research report. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute,63 pages (in Persian).
3. Arabkhedri. M., S. Hakimkhani and J. Varvani. 2004. Reliability of extrapolation methods on average annual sediment yield estimations (17 gauging site). Agriculture and Natural Resources Quarterly, 11(3): 123-132 (in Persian).
4. Babinski, Z. 2005. The relationship between suspended and bed load transport in river channels. In: Sediment budgets, Volume 1, Eds: Walling D.E. and A.J. Lorowitz. International Association of Hydrological Sciences, IAHS Press, , 358: 182-188.
5. Bahadori Khosroshahi, F. 1996. Bed load to suspended ratio in Iranian rivers. Proceedings of the First Conference on Erosion and Sediment. Ministry of Jihad Sazandegi, 161-178 (in Persian).
6. Bahadori Khosroshahi, F. 2012. Guideline for calculation of suspended load and bed load of rivers. Office of Deputy for Strategic Supervision, No 590 (in Persian).
7. Bina, M. and M. Qomshi. 1989. Estimation of inflow sediment and trap efficiency assessment in Dez reservoir using different methods. Proceedings of the First Conference on Iran Hydrology. Mahab Qods Co. Publication, 898-916 (in Persian).
8. Darya Naghsheh (Consultants Engineering Co.). 1997. Dez dam's reservoir sedimentation survey. Water Resources Management Organization. Ministry of Energy (in Persian).
9. Darya Naghsheh (Consultants Engineering Co.). 1998. Report on sedimentation survey in Minab Esteghlal dam. Water Resources Management Organization. Ministry of Energy.
10. Duck, R.W. and J. McManus. 1994. A long-term estimate of bed load and suspended sediment yield derived from reservoir deposits. Journal of hydrology, 159: 365-373 (in Persian).
11. Ferguson, R.I. 1986. River loads underestimated by rating curves, Water Resources Research, 22(1): 74-76.
12. Graf, W.H. 1984. Hydraulics of sediment transport. Water Resources Publication, LLC, 513 pages.
13. Habibi, M. 1996. Application of suspended sediment calculation methods in selected rivers in Iran. Proceedings of the First Conference on Erosion and Sediment. Ministry of Jihad Sazandegi, 161-178 (in Persian).

14. Holmes, R.R. 2010. Measurement of bedload transport in sand-bed rivers: A look at two indirect sampling methods. http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5091/papers/Holmes.pdf/, Accessed 10 Dec. 2013.
15. Kalvandi, S.M., S.R. Khodashenas, B. Ghahreman, R. Tahmasebi and A. Boostani. 2010. Analysis of different sediment rating curves in estimation of sediment inflow to reservoirs (Case study: Doosty dam). Irrigation and Water Journal, 1(1): 10-20.
16. Kazemi, Y., A. Salajegheh, M. Mahdavi, N. Rostami and M. Abbassi. 2012. The relation of bed and suspended loads in Central Alborz Rivers, Iran. Elixir Agriculture, (42): 6120-6123.
17. Lewis, S.E., Z.T. Bainbridge, P.M. Kuhnert, B.S. Sherman, B. Henderson, C. Dougall, M. Cooper, and J.E. Brodie. 2013. Calculating sediment trapping efficiencies for reservoirs in tropical settings: A case study from the Burdekin Falls Dam, NE Australia. Water Resources Research, (49): 1017–1029.
18. Linsley, R.K., M.A. Kohler and J.L.H. Paulhus. 1982. Hydrology for Engineers. McGraw Hill, New York.
19. McLelland, S.J. 2010. Observing bed load/suspended load using multi-frequency-acoustic backscatter. http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5091/papers/McLelland.pdf/, Accessed 10 Dec. 2013.
20. Morris, G.L. and J. Fan. 1998. Reservoir sedimentation handbook-design and management of dams. Reservoirs and Watersheds for Sustainable Use. McGraw-Hill, New York.
21. Pratt-Sitaula, B., M. Garde, D.W. Burbank, M. Oskin, A. Heimsath and E. Gabet. 2007. Bed load-to-suspended load ratio and rapid bedrock incision from Himalayan landslide-dam lake record. Quaternary Research, (68): 111-120.
22. Shafaee Bejestan, M. 2012. Guideline for Dams reservoirs sedimentation and de siltation studies. Office of Deputy for Strategic Supervision, No 589 (in Persian).
23. Simons, D.B. and F. Senturk. 1992. Sediment transport technology. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.
24. Vali-Khodjeini, A. and A. Mohamed. 1976. Etude du debit solide et de la sedimentation du barrage de Sefidrud. Bulletin des Sciences Hydrologiques, 206: 223-231.
25. Vanoni, V.A. 2006. Sedimentation engineering. A.S.C.E., 418 pages.
26. Walling, D.E. and B.W. Webb. 1987. Material transport by the world's rivers. In: Hydrology in Perspective. IAHS Publication, 169: 313-329.
27. Walling, D.E. and B.W. Webb. 1988. The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield: some further comments. In: Sediment budgets (Proceedings of Porto Alegre Symposium, IAHS Publication, 174: 337-350.
28. WRRI (Water Resources Research Institute). 1986. Dez dam sedimentation survey. Ministry of Energy, Publication No. 89 (in Persian).
29. WRRI (Water Resources Research Institute). 1988. Report on sedimentation survey and sedimentology of Minab dam's reservoir. Water Resources Research Institute (in Persian).

Estimation of bed load to suspended load ratio in Dez and Minab rivers

Mahmood Arabkhedri[*1]
[1] Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran

Received: 03 January 2014 Accepted: 07 April 2014

Abstract

River bed load is usually estimated as a ratio of suspended load due to difficulty in direct measurement. The ratio of bed load to suspended load can be determined more accurately using reservoir sediment bathymetric information. In this research, two successive top bathymetric maps from reservoirs of Dez dam (1983 and 1997), and Minab dam (1985 and 1998) as well as suspended sediment data measured at the inflow were analyzed. After determining the position of delta crest and dividing deltaic and lacustrine parts in each reservoir, the volume of sediment were estimated followed by weight calculation based on sediment bulk density. Then, the influence of factors such as the temporal compactness of deposits, the dam sediment trap efficiency, and the contribution of upstream basin and the sub basins adjacent to the reservoir in sediment production was determined. On the other hand, the suspended sediment yield was estimated in Telehzang and Barantyn gauging stations (at reservoirs inflow) using USBR method. In the next step, the ratio of bed load to suspended load was estimated with two scenarios A) by considering the deltaic and lacustrine sediments as bed load and suspended load respectively and B) calculating the bed load by subtracting suspended sediment estimated in reservoir inflow gauge from total deposited sediment. The BLSLR was overestimated as much as 251 and 348 percent in Dez and Minab dams respectively under the Scenario "B" due to underestimation error of suspended load. Under the Scenario "A", the BLSLRs of Dez and Minab were 45 and 56 percent respectively. Two very important uncertainty factors in this method are the dam trap efficiency and bulk density of deposits particularly the deltaic coarse sediment. By changing the trap efficiency from approximately, 95 percent to 60 percent the BLSLRs were decreased from 42 percent to 23 percent in Dez River and from 53 percent to 27 percent in Minab River. A 14 percent cut in bulk density of deltaic deposit in Minab reservoir causes a reduction of seven percent in the BLSLR. Although, large differences are observed among the results of different scenarios, even the minimum ratios are much higher than 15-20 percent BLSLR that are commonly used in water resources studies.

Key words: Bed load to suspended load ratio, Dez reservoir, Minab reservoir, Reservoir bathymetric survey, Suspended sediment load, Trap efficiency

[*] Corresponding author: arabkhedri@scwmri.ac.ir