تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۴، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۲ (ص ۳۲۷-۳۲۱)
(یادداشت فنی)

واسنجی روش منحنی سنجه در برآورد میزان رسوبات حوضهٔ قزل‌اوزن بر اساس داده‌های سد سفیدرود

اسماعیل بیات[1]*، دالی بندار[2]، سعید لطفی[3]

۱. کارشناس منابع آب، مهندسان مشاور یکم
۲. رئیس گروه بررسی‌های فنی و اجتماعی دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا وزارت نیرو
۳. کارشناس گروه سیاست‌گذاری و تخصیص آب دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا وزارت نیرو
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۲۹ ـ تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۱۰/۳۰)

چکیده

رسوب‌گذاری در مخازن سبب کاهش حجم ذخیره و بروز مشکلات عدیده در بهره‌برداری از سدها می‌شود. محاسبهٔ حجم دقیق رسوبات وارد به مخزن برای طراحی مناسب سد و مدیریت بهینهٔ مخزن سد در دورهٔ بهره‌برداری الزامی است. در این تحقیق از داده‌های میدانی درازمدت سد سفیدرود به‌منزلهٔ نقطهٔ بررسی حوضهٔ قزل‌اوزن استفاده شد. مقادیر محاسباتی رسوب به‌روش منحنی سنجه و اصلاحی FAO با حجم واقعی رسوبات (به‌دست‌آمده از هیدروگرافی مخزن) به‌منظور ارزیابی و واسنجی روابط محاسباتی مقایسه شد. نتایج نشان داد روش منحنی سنجه میزان رسوبات را کم برآورد می‌کند (تقریباً نصف مقدار رسوبات واقعی)؛ در حالی که برآورد روش اصلاحی FAO حدود ۱۰ برابر مقدار واقعی رسوبات است. بررسی‌ها نشان می‌دهد ضریب اصلاحی ۲ برای تعدیل روش منحنی سنجه در حوضهٔ قزل‌اوزن نتایج معقولی ارائه می‌کند. ازاین‌رو، این ضریب برای کاربردهای میدانی در این حوضهٔ آبریز پیشنهاد می‌شود. به بیان دیگر، میزان رسوبات محاسباتی به‌روش معمول منحنی سنجه باید دوبرابر شود تا مقدار واقعی رسوب در حوضهٔ قزل‌اوزن به‌دست آید.

کلیدواژگان: حوضهٔ آبریز قزل‌اوزن، رسوب‌گذاری در مخزن، روش رسوب‌سنجی اصلاحی FAO، روش رسوب‌سنجی منحنی سنجه، هیدروگرافی مخزن.

مقدمه

مطالعهٔ دربارهٔ رسوب همواره با عدم قطعیت همراه است و میزان خطا در محاسبات فقط با دردست‌داشتن داده‌های میدانیِ درست کاهش می‌یابد و روابط موجود را تدقیق می‌کند. با توجه به اهمیت تعیین میزان رسوبات حمل‌شده به‌وسیلهٔ رودخانه، مطالعات مختلفی در این زمینه صورت گرفته و روش‌های متعدد برای تعیین میزان رسوبات حمل‌شده پیشنهاد شده است. اما در این مطالعات همواره بر این نکته تأکید کرده‌اند که برآورد رسوب به‌روش‌های مختلف با عدم قطعیت همراه است (Mosaedi, 1998; Asselman, 2000).

ترسیب رسوب در مخازن سدها باعث ازدست‌رفتن حجم مفید مخزن می‌شود و تعیین حجم درست رسوبات واردشده به مخزن برای طراحی مناسب سد و همچنین مدیریت بهینهٔ مخزن سد در دورهٔ بهره‌برداری الزامی است. میزان متوسط رسوب‌گذاری سالیانه، بسته به موقعیت جغرافیایی و وضعیت توپوگرافی و شرایط هیدرولوژی و اقلیمی، در مناطق مختلف جهان متفاوت است و به‌طور متوسط سالیانه ۰٫۳ درصد از حجم کل ذخیرهٔ مخازن سدهای جهان را از بین می‌برد. در مناطقی مانند آسیا این رقم به ۰٫۵ تا ۱ درصد نیز می‌رسد (Olesen and Basson, 2004). با توجه به میزان متوسط کاهش حجم مفید مخازن سد، می‌توان تخمین زد که سالیانه حجمی معادل ۴۵ کیلومتر مکعب از ظرفیت ذخیرهٔ سدهای جهان کاهش می‌یابد. هزینهٔ جایگزین‌کردن حجم ازدست‌رفته، بدون درنظرگرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های اجتماعی و فرهنگی ساخت سد جدید، معادل ۱۳ بیلیون دلار امریکا در هر سال برآورد شده است (Palmieri, 2003).

در این تحقیق کاربردی، که روابط مفیدی برای محاسبهٔ حجم رسوبات در حوضهٔ قزل‌اوزن ارائه شده، از داده‌های درازمدت سد سفیدرود، که حدود ۵۰ سال از بهره‌برداری آن می‌گذرد، استفاده شد. بر اساس گزارش دفتر بهره‌برداری و نگهداری از سدها در وزارت نیرو، حجم رسوبات ورودی به مخزن سد سفیدرود در ۳۱ سال پس از بهره‌برداری، بر اساس آمار هیدروگرافی، به‌طور متوسط، ۱۷ میلیون متر مکعب در سال است. به‌علت رسوب‌خیزبودن حوضهٔ بررسی‌شده، مطالعات متعددی در سطح حوضه یا به‌طور خاص برای مخزن سد سفیدرود انجام شده است. Motamedvaziri *et al* (2009) به

* نویسنده مسئول: bayat.esmaeel@gmail.com

مدل‌سازی بار معلق با استفاده از منطق فازی در حوضهٔ زنجان‌رود پرداختند، Ashraf Vaghefi *et al*. (2009) بهینه‌سازی مقدار خروج رسوبات سدها را در عملیات فلاشینگ با استفاده از مدل بهره‌برداری از مخزن با مطالعهٔ موردی سد سفیدرود بررسی کردند، Emadi *et al*. (2011) روابط برآورد رسوب ورودی به مخزن سد سفیدرود را در دو ایستگاه گیلوان و لوشان ارائه کردند، و Zabihian *et al*. (2006) مطالعه‌ای در مؤسسهٔ تحقیقات آب انجام دادند که در آن ضمن تهیهٔ بانک اطلاعاتی داده‌ها برای ایستگاه‌های هیدرومتری ورودی (گیلوان و لوشان) و خروجی سد سفیدرود (پارودبار) روشی نیز برای محاسبهٔ بار معلق رودخانه پیشنهاد دادند.

در هیچ‌یک از تحقیقات انجام‌شده در حوضهٔ سفیدرود، مقادیر محاسباتی رسوب با وضعیت واقعی (نتایج حاصل از هیدروگرافی مخزن) مقایسه نشده است؛ به‌طوری که بتوان روابط استفاده‌شده در محاسبهٔ رسوب را واسنجی کرد. در مطالعه‌ای مشابه که Mosaedi *et al*. (2009) انجام دادند، حجم رسوب‌گذاری در مخازن سد کرج و دز بررسی شد. نتایج نشان داد روش منحنی سنجه مقدار رسوب‌گذاری سد دز را حدود ۷۰ درصد حجم واقعی و مقدار رسوب‌گذاری سد کرج را حدود ۹۷ درصد حجم واقعی برآورد می‌کند.

در این تحقیق، با استفاده از اطلاعات هیدروگرافی مخزن سد سفیدرود، حجم رسوب‌گذاری واقعی این مخزن با روش معمول محاسباتی رسوب (روش منحنی سنجه) مقایسه شد و اختلاف قابل توجهی بین مقادیر واقعی و محاسباتی مشاهده گردید. به‌کارگیری روش متداول اصلاح مقدار رسوب (FAO) نیز خطای زیادی در محاسبهٔ رسوب منطقهٔ یادشده وارد می‌کند که لزوم واسنجی روابط فوق را نشان می‌دهد. بنابراین، در این تحقیق، با مقایسهٔ مقادیر واقعی رسوب‌گذاری در مخزن سد سفیدرود با روش منحنی سنجه، ضریب مناسب اصلاحی جهت برآورد واقعی‌تر حجم رسوبات با استفاده از منحنی سنجه ارائه شد که می‌تواند در حوضهٔ آبریز قزل‌اوزن، با توجه به وجود طرح‌های مختلف سدسازی و نیاز به برآورد حجم رسوبات حمل‌شده، بسیار کاربردی باشد.

مواد و روش‌ها

محدودهٔ مطالعه‌شده

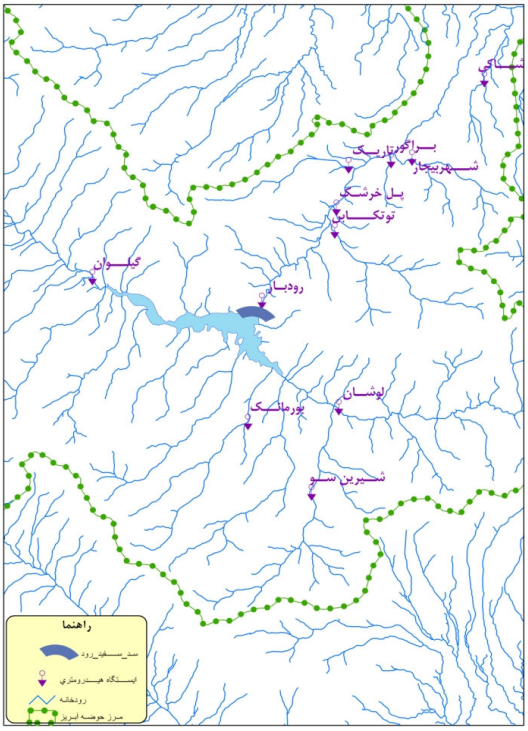
سفیدرود بزرگ‌ترین رودخانهٔ جاری در بخش جنوبی حوضهٔ آبریز دریای خزر است که از به‌هم‌پیوستن دو رودخانهٔ قزل‌اوزن و شاهرود و با زهکشی گستره‌ای به مساحت بیش از ۵۶۵۰۰ کیلومتر مربع (تا محل سد سفیدرود) شکل گرفته است. رواناب جمع‌آوری‌شدهٔ رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود، با احتساب مواد معلق موجود در آن، به‌طور متوسط در سال بیش از ۴ میلیارد متر مکعب است که به دریاچهٔ سد سفیدرود، در حاشیهٔ غربی شهر منجیل و در ۲۵۰ کیلومتری شمال‌غربی تهران، می‌ریزد. حدود ۲۷ درصد مساحت حوضهٔ آبریز سفیدرود را آبرفت و دشت تشکیل می‌دهد و از نظر زمین‌شناسی، به‌دلیل گستردگی بالا، انواع سازندهای زمین‌شناسی را دارد و از نظر فرسایش خاک یکی از حوضه‌های با فرسایش بالا معرفی شده است. سد سفیدرود، با حجم مخزن ۱۷۶۰ میلیون متر مکعبی، سازه‌ای بتنی با ارتفاع ۱۰۶ متر و طول تاج ۴۲۵ متر است. از اهداف آن می‌توان به تأمین آب کشاورزی و شرب و تولید برق، با ظرفیت اسمی نیروگاه ۸۷٫۵ مگاوات، اشاره کرد.

ایستگاه‌های رسوب‌سنجی مطالعه‌شده

در این مطالعات رسوبات ورودی و خروجی سد سفیدرود، با توجه به ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در منطقه، بررسی شد. برای بررسی رسوبات رودخانهٔ قزل‌اوزن ایستگاه آب‌سنجی- رسوب‌سنجی گیلوان انتخاب شد. این ایستگاه هم‌زمان با بهره‌برداری از سد سفیدرود در سال ۱۳۴۲ راه‌اندازی شده است و از آن زمان تا کنون، به غیر از ماه‌های تابستان پس از زلزلهٔ سال ۱۳۶۹، به‌طور منظم اندازه‌گیری آب‌دهی و بار معلق در آن صورت گرفته است. برای بررسی رسوبات رودخانهٔ شاهرود نیز ایستگاه آب‌سنجی لوشان استفاده شد که از سال ۱۳۳۳ تا کنون آمار جریان و از سال ۱۳۴۲ تا حال حاضر (به غیر از ماه‌های تابستان ۱۳۶۹) مقادیر آب‌دهی و رسوب هم‌زمان در آن اندازه‌گیری شده است. رسوبات خروجی از سد نیز به‌وسیلهٔ ایستگاه آب‌سنجی- رسوب‌سنجی پارودبار، که در فاصلهٔ حدود ۱ کیلومتری پایین‌دست سد قرار دارد، بررسی شد. این ایستگاه در سال ۱۳۲۸ راه افتاد. قبل از بهره‌برداری از سد سفیدرود، این ایستگاه مجموع رواناب رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود (رودخانهٔ سفیدرود) را تحت کنترل داشت و بعد از بهره‌برداری از سد به‌عنوان ایستگاه آب‌سنجی- رسوب‌سنجی خروجی سد فعال شد. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری در جدول ۱ و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری لوشان، گیلوان، پارودبار، و نیز سد سفیدرود در شکل ۱ می‌آید.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده‌شده در این گزارش

کد ایستگاه	نام ایستگاه	نام رودخانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m.a.s.l.)	مساحت تحت پوشش (کیلومتر مربع)	سال بهره‌برداری
۱۷-۰۳۳	گیلوان	قزل‌اوزن	۴۹-۰۷-۵۸	۳۶-۴۶-۴۲	۳۱۱	۵۱۴۵۴	۱۳۴۲
۱۷-۰۴۱	لوشان	شاهرود	۴۹-۳۰-۴۸	۳۶-۳۷-۲۳	۳۳۴	۴۸۶۴	۱۳۳۳
۱۷-۰۴۳	پارودبار	سفیدرود	۴۹-۲۳-۴۸	۳۶-۴۶-۱۹	۲۰۴	۵۶۲۰۰	۱۳۲۸



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و سد سفیدرود

آمار و اطلاعات استفاده‌شده

در محاسبات بار معلق در این مطالعه، برای ایستگاه‌های لوشان و گیلوان، فقط از نمونه‌برداری‌های هم‌زمان اندازه‌گیری آب‌دهی و رسوب معلق استفاده شد. تعداد نمونه‌برداری‌های بار معلق در طول دورهٔ یادشده در ایستگاه‌های گیلوان و لوشان به‌ترتیب حدود ۳۵۰۰ و ۳۰۰۰ داده بود. در ایستگاه خروجی سد سفیدرود نیز بیش از ۱۰۰۰۰۰ نمونهٔ رسوبی برداشت شده است که حدود ۵ درصد نمونه‌ها در ۱۷ سال اول و به‌طور متوسط یک نمونه در روز و حدود ۹۵ درصد نمونه‌ها در سال‌های بعد و به‌طور متوسط ۱۱ نمونه در روز بوده است. این تفاوت برداشت‌ها به‌دلیل شروع عملیات رسوب‌زدایی (عملیات شاس) پشت دریاچهٔ سد در سال‌های آبی ۱۳۵۹ و ۱۳۶۰ است و به‌منظور آگاهی از میزان رسوبات تخلیه‌شده در طی این عملیات نمونه‌برداری‌ها حتی در طول شبانه‌روز و در اوج تخلیهٔ رسوبات با تواتر زمانی نیم‌ساعت هم انجام گرفته است.

یافته‌ها و بحث

محاسبهٔ رسوبات معلق و بار بستر در ایستگاه‌های هیدرومتری

رایج‌ترین روش محاسبهٔ رسوبات معلق در جریان رودخانه‌ها، که در محاسبات رسوب طرح‌های عمرانی استفاده می‌شود، به‌کاربردن منحنی‌های دبی- رسوب (منحنی سنجه) است. در این روش برای یک دورهٔ چندین ساله بین کلیهٔ دبی‌های رسوب لحظه‌ای (تن در روز) Q_s و دبی‌های لحظه‌ای نظیر (متر مکعب بر ثانیه) Q_w، با به‌کارگیری رابطهٔ توانی، همبستگی به شکل رابطه ۱ برقرار می‌شود.

$$Q_s = aQ_w^{\ b}$$ (رابطه ۱)

برای محاسبهٔ آورد رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری منحنی تداوم جریان با استفاده از دبی‌های روزانه تهیه و با کمک روش دسته‌بندی دبی (Alizadeh, 2010) و رابطهٔ دبی- رسوب معلق به‌دست‌آمده برای ایستگاه‌های فوق میزان رسوبات حمل‌شده محاسبه می‌شود.

روش منحنی سنجه به‌دلیل تأثیر تعداد زیادتر نمونه‌های برداشت‌شده در آب‌دهی‌های پایین‌تر از متوسط، که طبیعتاً وزن بیشتری را هم در رابطهٔ همبستگی به‌وجود می‌آورند، و با توجه به آورد عمدهٔ رسوب در رژیم سیلابی و تعداد کم برداشت دبی رسوب در مواقع سیلابی، در حالت معمول، عمدتاً میزان رسوب را کم برآورد می‌کند. برای برآورد مقدار واقعی رسوب معادلهٔ فوق به روش‌های مختلف تصحیح و استفاده می‌شود. بر اساس پیشنهاد FAO (Jones *et al.*, 1981) ضریب معادلهٔ توانی تصحیح می‌شود و سپس رابطهٔ دبی- رسوب اصلاحی به‌دست می‌آید و رابطه ۲ استفاده می‌شود.

$$Q_s = a'Q_w^{\ b}$$ (رابطه ۲)

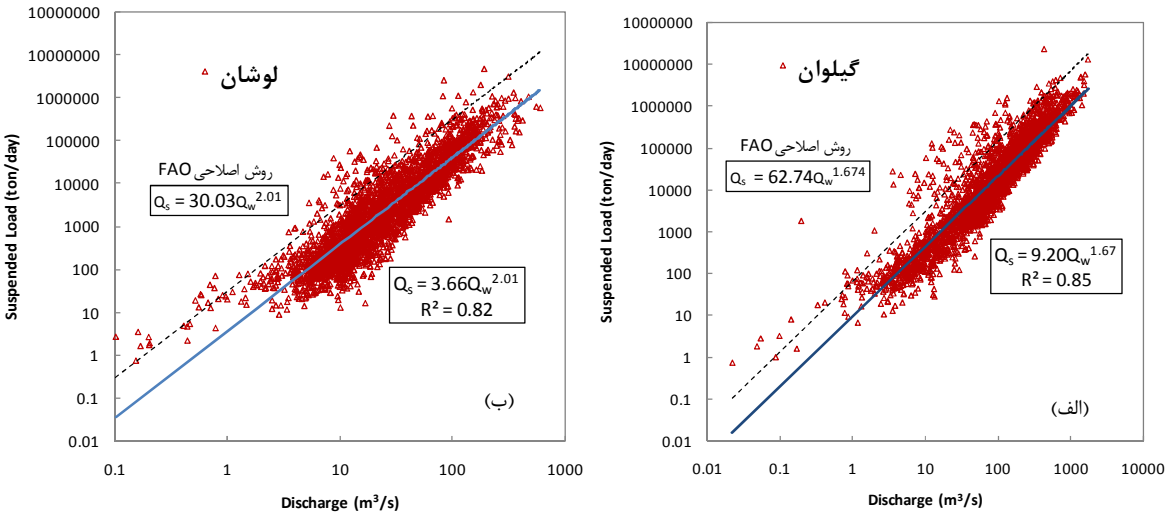
در این حالت، ضریب تصحیحی a' به‌صورت رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$a' = \frac{\overline{Q_s}}{\overline{Q_w}^{b}}$$ (رابطه ۳)

$\overline{Q_s}$ متوسط دبی رسوب‌های معلق اندازه‌گیری‌شده (تن بر روز) و $\overline{Q_w}$ متوسط دبی جریان روزانه (متر مکعب بر ثانیه) است.

جدول ۲. مقادیر ضرایب توانی در معادلهٔ دبی رسوب و مقادیر اصلاح‌شده به روش FAO

نام ایستگاه	ضریب a	ضریب b	ضریب همبستگی (R^2) در حالت بدون ضریب اصلاحی	ضریب اصلاح‌شدهٔ 'a به روش FAO
گیلوان	۹٫۲۰	۱٫۶۷	۰٫۸۵	۶۲٫۷
لوشان	۳٫۶۶	۲٫۰۱	۰٫۸۲	۳۰٫۰۳



شکل ۱. رابطهٔ دبی رسوب در ایستگاه‌های گیلوان (الف) و لوشان (ب)

در شکل‌های ترسیم‌شده برای رابطهٔ دبی- رسوب معلق (شکل ۲) خط‌های نقطه‌چین، که بالای خط برازش‌داده‌شده قرار دارند، به رابطهٔ اصلاح‌شدهٔ FAO مربوط‌اند. در جدول ۲ مقادیر ضرایب a و b و مقدار اصلاح‌شدهٔ 'a و نیز ضریب همبستگی در حالت بدون ضریب اصلاحی می‌آید.

برای محاسبهٔ کل بار رسوبی، با توجه به عدم اندازه‌گیری بار بستر در زمان اندازه‌گیری بار معلق، از تعداد داده‌های کم اندازه‌گیری‌شده (شش اندازه‌گیری هم‌زمان بار بستر و بار معلق) استفاده شد. میزان بار بستر در حدود ۲۰ درصد بار معلق به‌دست آمد. از طرف دیگر مراجع مختلف، از جمله Alizadeh (2010)، نیز اعلام کرده‌اند در رودخانه‌هایی که اطلاعات اندازه‌گیری‌شده بار بستر وجود ندارد بار بستر به‌مثابهٔ درصدی از بار معلق (معمولاً بین ۱۰ تا ۵۰ درصد) در محاسبات تخمین زده می‌شود. بنابراین در محاسبات این تحقیق نیز بار بستر ۲۰ درصد بار معلق در نظر گرفته شد. از طرف دیگر، برای تبدیل جرم بار معلق و بار بستر به حجم باید از وزن مخصوص استفاده شود که به‌دلیل وجودنداشتنِ داده‌های اندازه‌گیری‌شده از مقادیر متوسط ارائه‌شده در مراجع Alizadeh (2010) و Shafaei Bajestan (2005) استفاده شد. وزن مخصوص بار معلق به‌طور متوسط ۱٫۳۵ و بار بستر ۲٫۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد. با این فرضیات، محاسبات رسوب ۵۰ ساله در ایستگاه‌های هیدرومتری گیلوان و لوشان و نیز ورودی به سد سفیدرود، با استفاده از روابط معمول و نیز پس از اصلاح با استفاده از روش FAO، در جدول ۳ می‌آید. گفتنی است اطلاعات ورودی سد سفیدرود در جدول ۳ از مجموع ایستگاه‌های لوشان و گیلوان به‌دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان رسوب محاسبه‌شده با روش معمول منحنی سنجه و نیز روش اصلاح‌شده تفاوت چشمگیری دارد و نمی‌توان بر اساس این اعداد قضاوت درستی انجام داد. بنابراین، برای مطالعهٔ دقیق‌تر، مقدار واقعی رسوب‌گذاری با درنظرگرفتن اثر عملیات شاس (رسوب‌زدایی) مخزن سد سفیدرود بررسی شد تا مشخص شود کدام‌یک از روش‌های فوق مناسب‌تر است و چگونه می‌توان روش منحنی سنجه را به‌منظور تدقیق نتایج اصلاح کرد.

محاسبهٔ مقدار واقعی رسوبات ته‌نشین‌شده در مخزن سد سفیدرود و واسنجی روش‌های استفاده‌شده

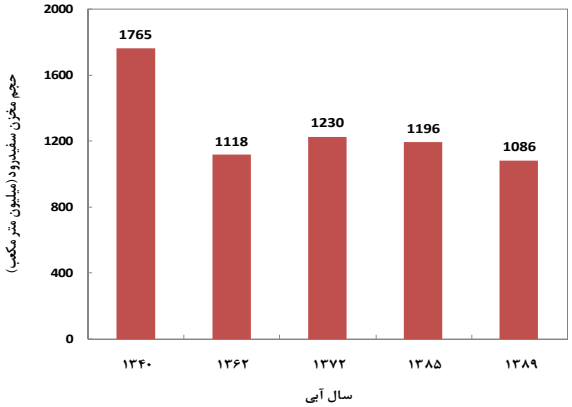
برای محاسبهٔ مقدار واقعی رسوب واردشده به مخزن سفیدرود از نقشه‌برداری‌های مخزن این سد استفاده شد تا مشخص شود در طول ۵۰ سال بهره‌برداری از مخزن چه میزان از حجم مخزن در

اثر رسوب‌گذاری کاهش یافته است. روند تغییرات حجم مخزن سد سفیدرود در شکل ۳ می‌آید. نتایج به‌دست‌آمده از هیدروگرافی مخزن سد سفیدرود نشان می‌دهد حجم مخزن در شروع بهره‌برداری در سال ۱۳۴۰ از میزان ۱۷۶۵ میلیون متر مکعب به ۱۱۱۸ در سال ۱۳۶۲ رسید. با شروع عملیات شاس در سال ۱۳۵۹ و خروج رسوبات ذخیره‌شده این حجم در سال ۱۳۷۲ به ۱۲۳۰ میلیون متر مکعب رسید. با توقف رسوب‌زدایی از مخزن سد سفیدرود از سال ۱۳۷۸، حجم مخزن دوباره کاهش یافت. این حجم در سال ۱۳۸۵ به ۱۱۹۶ و در سال ۱۳۸۹ به ۱۰۸۶ میلیون متر مکعب رسید.

جدول ۳. نتایج محاسبات رسوب ۵۰ ساله در ایستگاه‌های هیدرومتری بررسی‌شده

نام ایستگاه	متوسط آورد سالیانه	رسوب ۵۰ ساله با روش منحنی سنجه (میلیون متر مکعب)	رسوب ۵۰ ساله با اصلاح FAO (میلیون متر مکعب)
گیلوان	۳۱۶۳	۶۳۴	۱۳۲۹۶
لوشان	۹۹۹	۶۳	۲۰۶
ورودی به سفیدرود*	۴۱۶۲	۶۹۷	۱۳۵۰۲

* مقادیر ورودی به سفیدرود از جمع مقادیر ایستگاه‌های گیلوان و لوشان به‌دست می‌آید.



شکل ۳. تغییرات حجم به‌دست‌آمده از مخزن سفیدرود طی سال‌های مختلف در اثر عملیات هیدروگرافی

با توجه به عملیات شاس در مخزن سفیدرود، باید میزان خروج رسوبات در هر دوره مشخص شود تا بتوان میزان دقیق رسوبات ورودی به مخزن سد را محاسبه کرد. گفتنی است، با توجه به وجود داده‌های فراوان (حداقل یک دادهٔ رسوب در روز و حتی نمونه‌برداری ساعتی طی عملیات رسوب‌زدایی) و تنظیمی‌بودن ایستگاه (خروجی سد سفیدرود) و عدم کارایی منحنی سنجه، محاسبهٔ رسوب بر اساس مقدار متوسط دبی‌های روزانه و بارهای رسوبی روزانه انجام گرفت. بدین‌ترتیب می‌توان با وجود داده‌های فراوان مقدار متوسط دبی و بار معلق را در هر سال و برای دورهٔ شاس و غیر شاس محاسبه کرد. میزان رسوب خروجی از سد سفیدرود در هر سال و برای دورهٔ شاس و غیر شاس در جدول ۴ می‌آید؛ که با نتایج تحقیق Zabihian *et al* (2006) نیز مطابقت دارد.

با استفاده از مقادیر جدول ۴ می‌توان میزان رسوبات خارج‌شده از مخزن به‌صورت عادی (ستون ۵ جدول ۵) و نیز حجم خارج‌شده از مخزن در اثر رسوب‌زدایی (ستون ۴ جدول ۵) را به‌دست آورد تا بتوان مقدار آورد رسوب به مخزن را با دقت بالاتری محاسبه کرد و در ارزیابی‌ها آن‌ها را به‌کار برد.

با توجه به مقدار کاهش حجم مخزن سد سفیدرود در اثر رسوب‌گذاری، که مقدار آن از هیدروگرافی‌های انجام‌شدهٔ مخزن به‌دست می‌آید، و مقدار رسوب خارج‌شده در اثر شاس و میزان رسوب خارج‌شده از مخزن سد در دورهٔ غیر شاس، که هر دو از اندازه‌گیری‌های دقیق ایستگاه هیدرومتری پارودبار به‌دست آمد، می‌توان میزان کل رسوب واردشده به مخزن سد سفیدرود را با جمع مقادیر فوق به‌دست آورد و با نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های محاسباتی یادشده مقایسه کرد. نتایج محاسبات فوق در جدول ۵ می‌آید. گفتنی است مقادیر حجم رسوبات درج‌شده در جدول ۵ به‌صورت تجمعی تا سال یادشده است.

میزان واقعی رسوبات ته‌نشین‌شده در مخزن سد سفیدرود از شروع بهره‌برداری تا سال ۱۳۶۲، ۱۳۷۲، ۱۳۸۵، و ۱۳۸۹ به‌ترتیب ۷۲۶، ۱۰۴۹، ۱۲۳۴، و ۱۳۵۶ میلیون متر مکعب به‌دست آمده است. میزان کاهش حجم سد سفیدرود در اثر رسوب‌گذاری در سال‌های اخیر کم شده و میزان آورد رسوب از ۳۳ میلیون متر مکعب در سال در ۳۲ سال اول بهره‌برداری به ۲۷ میلیون متر مکعب در سال در حال حاضر (۵۰ سال پس از بهره‌برداری) رسیده است. به بیان دیگر، میزان کاهش سالیانهٔ حجم مخزن از ۱٫۸۷ درصد حجم کل مخزن به ۱٫۵۳ درصد در بازه‌های زمانی یادشده کاهش یافته است. با درنظرگرفتن اثر عملیات شاس کاهش حجم در اثر رسوب‌گذاری در دوره‌های یادشده از ۲۹ (۱٫۶۴ درصد حجم کل مخزن در سال) به ۱۴

میلیون متر مکعب در سال (۰/۷۹ درصد حجم کل مخزن در سال) رسیده است و مطمئناً در صورت ادامهٔ عملیات شاس یا انجام‌دادن آن در سال‌های ابتدایی میزان کاهش حجم در اثر رسوب‌گذاری به‌مراتب کاهش می‌یافت.

جدول ۴. میزان رسوب خروجی از سد سفیدرود در هر سال و برای دورهٔ شاس و غیر شاس (احجام بر حسب میلیون متر مکعب)

سال آبی	تاریخ دورهٔ شاس			متوسط آب خروجی (میلیون متر مکعب)		متوسط رسوبات خروجی (میلیون تن)		متوسط رسوبات خروجی (میلیون متر مکعب)	
	شروع	خاتمه	تعداد روز	دورهٔ شاس	باقی سال آبی	دورهٔ شاس	باقی سال آبی	دورهٔ شاس	باقی سال آبی
۱۳۵۹-۶۰	۵۹/۸/۱۱	۵۹/۱۰/۱۱	۶۱	۵۳۶	۴۹۳۶	۲۴	۱۰	۱۸	۸
۱۳۶۰-۶۱	۶۰/۷/۹	۶۰/۹/۱۳	۶۵	۳۹۰	۳۱۴۵	۱۱	۴	۸	۳
۱۳۶۱-۶۲	۶۱/۷/۱۱	۶۱/۱۱/۱۷	۱۲۷	۱۵۱۳	۳۶۶۵	۴۳	۱۵	۳۲	۱۱
۱۳۶۲-۶۳	۶۲/۸/۱۱ ۶۳/۶/۱۶	۶۲/۱۱/۲۷ ۶۳/۶/۳۱	۱۱۲	۱۱۸۲	۲۵۷۶	۷۰	۱۲	۵۲	۹
۱۳۶۳-۶۴	۶۳/۷/۱ ۶۴/۶/۲۷	۶۳/۱۱/۲۱ ۶۴/۶/۳۱	۱۴۷	۱۵۷۴	۴۶۶۱	۱۳۹	۱۰	۱۰۳	۸
۱۳۶۴-۶۵	۶۴/۷/۱	۶۴/۱۱/۲۲	۱۴۲	۱۰۷۶	۳۰۲۶	۴۷	۷	۳۵	۵
۱۳۶۵-۶۶	۶۵/۸/۱۳	۶۵/۱۱/۲۴	۱۰۲	۱۰۰۳	۲۸۹۴	۳۲	۶	۲۴	۵
۱۳۶۶-۶۷	۶۶/۸/۴	۶۶/۱۱/۲۳	۱۱۰	۱۸۱۲	۶۵۷۷	۵۸	۲۵	۴۳	۱۹
۱۳۶۷-۶۸	۶۷/۷/۲۳	۶۷/۱۱/۲۵	۱۲۳	۱۰۵۷	۲۶۲۶	۵۹	۵	۴۴	۴
۱۳۶۸-۶۹	۶۸/۷/۱۰ ۶۹/۶/۲۹	۶۸/۱۰/۲۷ ۶۹/۱۱/۱۶	۱۱۱	۶۹۸	۲۷۶۷	۳۲	۲	۲۳	۱
۱۳۶۹-۷۰	۶۹/۷/۱	۶۹/۱۱/۱۶	۱۳۶	۶۳۴	۲۴۷۳	۲۰	۳	۱۵	۳
۱۳۷۰-۷۱	۷۰/۷/۱۳	۷۰/۱۱/۲	۱۱۰	۶۷۷	۵۸۷۵	۲۰	۹	۱۵	۶
۱۳۷۱-۷۲	۷۱/۹/۲۵	۷۱/۱۱/۱۴	۵۰	۵۲۶	۴۰۶۱	۲۲	۸	۱۶	۶
۱۳۷۲-۷۳	۷۲/۷/۱۲	۷۲/۱۱/۱۰	۱۱۹	۲۳۱۸	۵۴۵۲	۵۸	۷	۴۳	۵
۱۳۷۳-۷۴	۷۳/۸/۱۴	۷۴/۱۱/۱۵	۹۲	۲۱۳۰	۴۴۹۴	۴۴	۹	۳۲	۶
۱۳۷۴-۷۵	۷۴/۸/۲۱	۷۴/۱۱/۳۰	۱۰۰	۸۱۱	۴۶۹۷	۱۴	۱۳	۱۰	۹
۱۳۷۵-۷۶	۷۵/۷/۲۵	۷۵/۱۱/۱۶	۱۱۲	۸۴۸	۱۸۳۴	۱۷	۳	۱۳	۲
۱۳۷۶-۷۷	۷۶/۸/۱۵	۷۶/۱۰/۲	۴۸	۳۰۴	۳۸۹۳	۸	۱۵	۶	۱۱
۱۳۷۷-۷۸	۷۷/۸/۱۵	۷۷/۱۰/۸	۶۴	۲۹۷	۱۱۵۷	۶	۱۱	۵	۸
مجموع			۱۹۳۰	۱۹۳۸۸	۷۱۵۰۷	۷۲۳	۱۷۵	۵۳۵	۱۲۹

جدول ۵. محاسبهٔ رسوب واقعی واردشده به مخزن سد سفیدرود (احجام بر حسب میلیون متر مکعب)

سال	حجم مخزن	کاهش حجم مخزن	حجم رسوب‌زدایی	رسوبات خارج‌شده (به‌صورت غادی)	بازهٔ زمانی بررسی‌شده (سال)	رسوب واقعی	متوسط رسوب سالیانه	متوسط رسوب سالیانه (با عملیات شاس)	رسوب محاسباتی (منحنی سنجه)	رسوب محاسباتی (FAO)
۱۳۴۰	۱۷۶۵	--	--	--	--	--	--	--	--	--
۱۳۶۲	۱۱۱۸	۶۴۷	۵۸	۲۲	۲۲	۷۲۶	۳۳	۲۹	۳۰۷	۵۹۴۱
۱۳۷۲	۱۲۳۰	۵۳۵	۴۲۷	۸۷	۳۲	۱۰۴۹	۳۳	۱۷	۴۴۶	۸۶۴۱
۱۳۸۵	۱۱۹۶	۵۶۹	۵۳۵	۱۲۹	۴۵	۱۲۳۴	۲۷	۱۳	۶۲۷	۱۲۱۵۲
۱۳۸۹	۱۰۸۶	۶۷۹	۵۳۵*	۱۴۱	۴۹	۱۳۵۶	۲۸	۱۴	۶۸۳	۱۳۲۳۲

* به‌دلیل توقف عملیات رسوب‌زدایی از سال ۱۳۷۸ این مقدار ثابت مانده است.

نتایج حجم رسوبات حمل‌شده با مقادیر واقعی نشان‌دهندهٔ عدم قطعیت محاسبات است. روش منحنی سنجه حجم رسوبات را تقریباً نصف مقادیر واقعی برآورد می‌کند؛ در حالی که روش اصلاحی FAO مقادیر رسوبات حمل‌شده را حدود ۱۰ برابر بیشتر برآورد می‌کند. بنابراین، با به‌کاربردن روش منحنی سنجه در حوضهٔ قزل‌اوزن و استفاده از ضرایب اصلاحی ۲ می‌توان

برآوردی نزدیک به واقعیت از حجم رسوبات حمل‌شده در این حوضه به‌دست آورد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با مقایسهٔ میزان رسوب محاسبه‌شده در روش منحنی سنجه و مقدار واقعی رسوبات ته‌نشین‌شده در مخزن سد سفیدرود (بر اساس هیدروگرافی مخزن سد در سال‌های مختلف)، مشاهده می‌شود که روش فوق میزان رسوبات را در حدود ۵۰ درصد کم برآورد می‌کند. از طرف دیگر روش اصلاحی FAO نیز مقدار رسوبات را حدود ۱۰ برابر بیشتر برآورد می‌کند. بنابراین، در صورتی که روش منحنی سنجه برای محاسبات رسوب در این حوضه به‌کار رود، باید دوبرابر مقدار رسوب محاسباتی به‌دست‌آمده از این روش در طراحی‌ها استفاده شود. با توجه به ضریب اصلاحی به‌دست‌آمده در حوضهٔ قزل‌اوزن، می‌توان در محاسباتِ آتیِ رسوبِ این حوضه از این ضریب جهت تدقیق محاسبات و کاهش عدم قطعیت استفاده کرد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد در مناطق رسوب‌خیز محاسبات رسوبْ عدم قطعیتِ بالایی دارد که لزوم بررسی مشابه را در سطح حوضه‌های مختلف کشور با این دیدگاه مشخص می‌کند.

نمادها

a، b: ضرایب معادلهٔ منحنی سنجه

a': ضریب اصلاحی معادلهٔ FAO

Q_s: رسوب لحظه‌ای (تن در روز)

Q_w: دبی لحظه‌ای (متر مکعب بر ثانیه)

R^2: ضریب همبستگی

$\bar{Q}_s$: متوسط دبی رسوب‌های معلق اندازه‌گیری‌شده (تن بر روز)

$\bar{Q}_w$: متوسط دبی جریان روزانه (متر مکعب بر ثانیه)

REFERENCES

Alizadeh, A. (2010). *Principles of Applied Hydrology* (28th ed.). Mashahd: University of Imam Reza.

Ashraf Vaghefi, S. S., Zahraei B., Malek Mohammadi, B., and Bani Hashemi, M. A. (2009). Flushing sediment removal optimization using reservour operation model: Sefidrud case study, *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 3 (6), 39-48, (In Farsi).

Asselman, N. E. M. (2000). Fitting and interpretation of sediment rating curves, *Journal of Hydrology*, 234, 228-248.

Emadi, A. R., Seyfizadeh, M., and Rezaei, M. (2011). Determining appropriate equation to estimate Sefidrud reservoir sediment in two Gilavan and Loshan stations, In: Proceeding of *10th Iranian Hydraulic Conference*, 7-9 November, University of Guilan, Rasht, Iran, (In Farsi).

Jones, K. R., Berney, O., Carr, D. P., and Barret, E. C. (1981). Arid zone hydrology for agricultural development, *FAO Irrigation and Drainage Paper*, FAO no. 37. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Mosaedi, A. (1998). *Hydrological sizing of sedimenting reservoir system for irrigation and water supply*, Ph. D. dissertation, Technical University of Budapest, Hungary.

Mosaedi, A., Hashemi Najafi, S. F., Heydarnezhad, M., Nabizade, M., and Meshkati, M. E. (2009). Estimation of sediment volume in Karaj and Dez reservoir and their comparison with hydrographic surveying, *Journal of Agriculture Sciences and Natural Resources*, 16 (2), 261-272, (In Farsi).

Motamedvaziri, B., Ahmadi, H., Mahdavi, M., Sharifi, F., and Javaheri, N. A. (2009). Modeling river suspended load using fuzzy logic approach (Case study: Zanjanroud Basin), *Journal of Range and Watershed Management (Iranian Journal of Natural Resources)*, 62 (2), 283-298, (In Farsi).

Olesen, K. W. and Basson, G. (2004). 1D and 2D modeling of sedimentation and flushing in shallow reservoirs, In: Proceeding of *9th International Symposium on River Sedimentation (ISRS)*, 18-21 October, Yichang, China.

Palmieri, A. (2003). Social and economic aspects of reservoir conservation, In: Proceeding of *3rd World Water Forum*, 16-23 March, Kyoto, Japan.

Shafaei Bajestan, M. (2005). *Sediment Hydraulics* (3rd ed.), Ahvaz: Shahid Chamran University.

Zabihian, M. A., Aladini, E., and Tajdary, K. (2006). *Calculation of in and outflowing precipitate from Sefid-rood Dam and providing of inputs data bank*, Research Report, Ministry of Energy, Water Resources Management Co. (WRMC), Water Research Institue (WRI), Tehran, Iran.