نشریه دانش آب و خاک / جلد23 شماره1 صفحه‌های27 تا37 / سال 1392

تحلیل عدم قطعیت در تعیین جرم مخصوص رسوبات ته‌نشین شده در مخازن سدها

فرهاد ایمان شعار[1*]، یوسف حسن‌زاده[2]، محمدتقی اعلمی[3]، علی داننده مهر[4]

تاریخ دریافت: 89/01/16 تاریخ پذیرش: 90/09/12

[1-] دانشجوی دکتری عمران- مهندسی آب، دانشگاه تبریز

[2-] استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

[3-] دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

[4-] کارشناس ارشد مهندسی رودخانه، شرکت مدیریت منابع آب ایران

* نویسنده مسئول: Email: imanshoar@tabrizu.ac.ir

چکیده

جرم مخصوص رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد تابع متغیرهای زیادی از قبیل خصوصیات فیزیکی ذرات رسوب، میزان تراکم لایه‌های رسوب ته‌نشین شده و سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن است. تمام این شاخص‌ها دارای عدم قطعیت بوده که در نتیجه تعیین جرم مخصوص رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد نیز دارای عدم قطعیت خواهد بود. در این مقاله سعی شد ابتدا عوامل مؤثر بر جرم مخصوص رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سدها طبقه بندی شوند و سپس مبانی روش دلتا به عنوان یکی از معروفترین روش‌های تحلیل عدم قطعیت بیان گردد. به منظور تبیین نحوه تحلیل عدم قطعیت به روش دلتا، یک مطالعه موردی نیز بر اساس داده‌های میدانی سد مخزنی کنی واقع در شمال ایالت کلرادو صورت گرفت. هدف از این مطالعه تعیین جرم مخصوص ذرات رسوب ته‌نشین شده و ضریب تغییرات آن در مخزن سد پس از گذشت 15 سال از بهره‌برداری است. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که جرم مخصوص رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد مذکور در حدود 125/6 ± 1267 (انحراف معیار ± متوسط جرم مخصوص) کیلوگرم بر متر مکعب برآورد شده و این در حالی است که در بازه زمانی 15 سال از شروع بهره‌برداری، ضریب تغییرات محاسبه شده برای تعیین جرم مخصوص رسوبات در مخزن سد برابر با 9/9% می‌باشد.

واژه های کلیدی: جرم مخصوص رسوبات، رسوبگذاری، روش دلتا، عدم قطعیت، مخزن سد

Archive of SID

www.SID.ir

Uncertainty Analysis for Determining Density of Deposits in Dams' Reservoirs

F Imanshoar[1*], Y Hassanzadeh[2], MT Aalami[3], A Danandeh-mehr[4]

Received: 5 April 2012 Accepted: 3 December 2012
[1-] PhD. Student, Faculty of Civil Engin., Univ. of Tabriz. Iran.
[2-] Prof., Faculty of Civil Engin., Univ. of Tabriz. Iran.
[3-] Assoc. Prof., Faculty of Civil Engin., Univ. of Tabriz. Iran.
[4-] MSc., River Engin. Expert, Iran Water Recourses Management Company
* Corresponding Author Email: imanshoar@tabrizu.ac.ir

Abstract

Density of deposits is bounded on different variables e.g. physical properties of sediment particles, rate of deposits' layer compaction and type of reservoir operation. These criteria have uncertainty and so the specific weight of deposits has the same problem. In this paper, the effective factors that influence the density of deposits in the reservoirs had been classified and then the basic concept of Delta method was stated as one of the popular techniques for analysis of uncertainties. Further, the case of Kenny reservoir in the White River basin at northern Colorado was selected to determine the specific weight of deposits in the reservoir and the coefficient of variation. The results of this investigation indicate that in the case of Kenny Reservoir the density of deposits is 1267 ± 125.6 (Mean ± SD) kg/m^3, and the coefficient of variation of specific weight for accumulated deposits equals 9.9% for the period of 15 years of reservoir operation.

Keywords: Dam reservoir, Delta method, Density of deposits, Sedimentation, Uncertainty

مقدمه

عموماً مخازن سدها مهمترین نقش را در زنجیره سیستم‌های منابع آب ایفا می‌کنند و مسائل فنی و اقتصادی، ضرورت کارکرد آنها را در حدود سطح بهینه ایجاب می‌کند. مجموع ذخیره مخازن سدها در سطح جهان در حدود 7000 میلیارد مترمکعب برآورد می‌شود که از این مقدار سالانه به طور میانگین بین 0/5 تا 1 درصد به علت رسوبگذاری از دست می‌رود (ژاکوبسن 2009). شایان ذکر است طبق آمار موجود، متوسط نرخ سالانه رسوبگذاری در مخازن سدها متناظر با اقلیم‌ها و ساختگاه‌های مختلف، متفاوت بوده (ورستراتن و همکاران 2003) و حتی متوسط این نرخ در بعضی از کشورها به بیش از 1 درصد هم می‌رسد. جدول 1 متوسط نرخ رسوبگذاری در مخازن سدها را در برخی از کشورها نشان می‌دهد (ژاکوبسن 2009).

در ایران نیز طبق آمار وزارت نیرو در انتهای سال آبی 1391-1390، تعداد 320 سد بزرگ و کوچک با مجموع حجم مخازنی در حدود 42/58 میلیارد مترمکعب در حال بهره‌برداری است (بی‌نام 1391) و این در حالی است که نرخ رسوبگذاری سالانه در ایران در حدود 0/55 تا 0/75 درصد تخمین زده می‌شود (ایمان‌شعار و همکاران 2009) که تقریباً معادل 277 میلیون مترمکعب رسوب در سال خواهد بود.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول 1- متوسط نرخ رسوبگذاری سالانه در مخازن سدها در برخی از کشورهای جهان (ژاکوبسن 2009)

کشور	متوسط نرخ رسوبگذاری سالانه (%)
چین	2/3
ترکیه	1/5
هندوستان	0/72
ایران	0/65
مراکش	0/45
آمریکا	0/22
ژاپن	0/15

اهمیت موضوع رسوبگذاری در مخازن سدها از یک سو و رشد روزافزون تقاضا برای دسترسی به منابع آب مطمئن از سوی دیگر، باعث شده تا طی سه دهه اخیر صنعت سد سازی در سطح جهان شاهد رشد قابل توجهی در احداث سدهای مخزنی جدید و همچنین توسعه و احیاء مخازن سدهای در دست بهره‌برداری باشد (ونگ و هو 2009). به طور مثال بررسی‌های انجام شده در سطح ایران حاکی از آن است که علی رغم جوان بودن اکثر سدهای مخزنی کشور، به دلیل افزایش نیاز آبی در بخش‌های مختلف و کاهش حجم مؤثر سدها به دلایل مختلف از قبیل رسوبگذاری، نشت و تبخیر قابل توجه، احداث سدهای مخزنی جدید کماکان در کانون توجه قرار دارد به طوری که در بازه زمانی انتهای تابستان سال 1391، 134 سد مخزنی با مجموع حجمی در حدود 26/6 میلیارد مترمکعب در حال ساخت و 349 سد مخزنی با مجموع حجمی در حدود 47/2 میلیارد مترمکعب در مرحله انجام مطالعات هستند (بی‌نام 1391).

ترسیب در مخزن یک سد از چالش‌های اساسی و مستمر پس از شروع آبگیری آن است که بهره‌برداری بهینه از آب ذخیره شده در مخزن سد را با نقصان مواجه می‌سازد. اکثر مخازن بزرگ به صورت چند هدفه برنامه‌ریزی، طراحی و احداث می‌شوند حال آنکه ته‌نشین شدن رسوبات در مخزن سد علاوه بر کاهش ظرفیت ذخیره مؤثر مخزن، باعث کاهش توان کنترل سیلاب و کاهش توان تولید انرژی برق آبی نیز خواهد شد؛ از طرف دیگر، کاهش حجم مفید مخزن باعث ایجاد تغییرات ناخواسته در اهداف مخزن و حق‌آبه‌هایی می‌شود که در بدو امر مورد توافق قرار گرفته است که این نیز به نوبه خود عواقب اقتصادی و حقوقی خاص خود را دربر خواهد داشت. همچنین، تحت تأثیر قرار گرفتن عملکرد سامانه‌های خروجی سد و بروز مشکلات محیط‌زیستی در پائین‌دست سد را نیز باید به موارد مذکور قبل اضافه کرد. با عنایت به این موارد به وضوح می‌توان نتیجه‌گیری کرد که توجه جدی به مقوله رسوبگذاری در مخازن سدها به عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت پایدار سدهای مخزنی، همواره مطرح خواهد بود. بنابراین برای هر سد لازم است تا ظرفیت مخزن آن هرچند وقت یکبار ارزیابی شده و سیاست‌های بهره‌برداری نیز به تناسب وضعیت مخزن تنظیم و تعدیل شود تا به کمک آن امکان هماهنگ‌سازی شرایط متغیر مخزن و اهداف اقتصادی پروژه فراهم شود.

همان‌طور که اشاره شد اکثر سدها بر روی رودخانه‌های حامل رسوب ساخته می‌شوند و در نتیجه بجا ماندن تمامی یا بخشی از رسوبات در مخازن آنها امری اجتناب ناپذیر است. به عبارت دیگر، به تدریج از حجم اولیه مخزن کاسته می‌شود و اگر از قبل پیش‌بینی‌ها و روش‌های کنترل مناسب مد نظر نباشد، ممکن است در عملکرد بهینه مخزن انحراف معنی‌داری را به همراه داشته باشد. یکی از این روش‌ها در نظر گرفتن ظرفیتی یدکی به نام حجم مرده است که برای تجمع رسوبات در طول عمر اقتصادی پروژه و در قالب حجمی مضاف بر حجم مفید مخزن طراحی می‌شود.

تعیین ظرفیت حجم مرده یک سد از تصمیمات مهم فنی و اقتصادی آن است. چنانچه این ظرفیت بیش از پتانسیل رسوبخیزی ساختگاه سد طراحی شود، مخارج اولیه پروژه را بدون جهت افزایش می‌دهد و اگر کمتر از حجم مورد نیاز در نظر گرفته شود، باعث آن خواهد شد تا رسوبات ورودی در مدت زمان کوتاهتری نسبت به عمر مفید سد، حجم مرده آن را پر کنند و ادامه ورود رسوبات باعث تقلیل ظرفیت حجم مفید سد شود؛ به عبارت دیگر عمر اقتصادی پیش‌بینی شده پروژه کاهش

Archive of SID
www.SID.ir

می‌یابد به نحوی که حتی ممکن است قادر به بازپرداخت سرمایه اولیه نیز نباشد (طلوعی 1384).

برای تعیین حجم مرده یک سد ملاحظات خاصی از قبیل میزان اهمیت مخزن در چرخه سیستم منابع آب منطقه و به طور کلی اقتصاد کشور، شرایط امکان احیاء حجم مرده یا عدم امکان آن، وضعیت زیرساخت‌های لازم جهت به کارگیری تدابیر آبخیزداری و تمهیدات کنترل رسوب باید در نظر گرفته شوند. در این زمینه، هیچ روش مطلقی در استانداردهای صنعت سدسازی وجود ندارد و معمولاً احجام یک سد با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی و محدودیت‌های اقتصادی آن مطالعه و طراحی می‌شود؛ به عنوان یک توصیه کلی ظرفیت حجم مرده برای انباشت رسوبات در طول عمری متوسط و در حدود 30 تا 50 سال پیش‌بینی می‌شود (موریس و فان 1997، می 2005).

عوامل مؤثر در رسوبگذاری مخازن سدها

اکثر مراجع معتبر در زمینه سدسازی و مهندسی رودخانه، رسوب را به عنوان محصول نهائی فرسایش سطح زمین به وسیله جریان آب، ذوب یخ ها و وزش باد تعریف می‌نمایند. به عبارت دیگر، مواد جامد رسوبی به مواد جامد با چگالی‌های متفاوت گفته می‌شود که از هوازدگی، غلتیدن و یا خرد شدن سنگ‌ها حاصل می‌شوند. این مواد خاصیت انفرادی خود را در داخل جریان آب و در حین تغییر مکان‌ها حفظ کرده و تحت تأثیر نیروهای بین مولکولی و یا پدیده لخته شدن قرار نمی‌گیرند (حسن زاده 1389).

عوامل مؤثر در رسوبگذاری مخازن سدها را می‌توان به دو دسته عوامل طبیعی و غیر طبیعی (انسانی) تقسیم کرد:

عوامل طبیعی

عوامل طبیعی مؤثر در فرسایش خاک سطحی حوضه‌های آبریز و رسوبگذاری در مخازن سدها به ماهیت گردش هیدرولوژیک آب در جهان و روند تغییرات سطح خشکی‌ها باز می‌گردند. این عوامل به شرح زیر دسته‌بندی می‌شوند:

الف) شرایط جوی و توزیع زمانی و مکانی آن: بارش باران، برف و تگرگ، وزش باد و نوسانات دمایی هوا (بهرامی و صمدی 1384، طلوعی 1384، ورستراتن و همکاران 2003، سالاس و شین 1999، شین و سالاس 1996)

ب) ویژگی‌های جغرافیائی، توپوگرافی و زمین شناسی حوضه آبریز: عرض جغرافیائی، ارتفاع از سطح دریا، شیب حوضه، زمان تمرکز حوضه و خصوصیات زمین‌شناسی منطقه (حسن‌زاده 1389، طلوعی 1384، ونته و پوئسن 2005، موریس و فان 1997)

پ) پوشش گیاهی: نوع پوشش گیاهی، تراکم پوشش گیاهی، شرایط ریشه و ساقه گیاه و موقعیت رشد گیاه (ونگ و هو 2009، طلوعی 1384، موریس و فان 1997)

ت) بلایای طبیعی: وقوع سیلاب‌های بزرگ، وقوع خشکسالی و رخداد زمین لغزش (ایمان شعار و همکاران 2009، موریس و فان 1997)

ث) شرایط هیدرولیکی مخزن (راندمان تله اندازی مخزن): نسبت حجم ذخیره مخزن به حجم جریان آب ورودی، شکل مخزن، مشخصات دریچه‌های تحتانی، شرایط بهره‌برداری از مخزن، شدت آشفتگی جریان (حسن‌زاده 1389، جاتیپراکاش و گارگ 2008)

ج) خصوصیات فیزیکی ذرات رسوب: دانه‌بندی ذرات رسوب، شکل ذرات و سرعت سقوط ذرات رسوب (حسن‌زاده 1389، موریس و فان 1997)

عوامل غیرطبیعی (انسانی)

فرسایش خاک یکی از صدماتی است که انسان با دخالت نابجای خود در طبیعت به تشدید آن کمک کرده است (ضیائی و بهنیا 1386). از آنجائیکه فرسایش خاک، اولین گام در فرآیند رسوبگذاری در مخازن سدها محسوب می‌شود، در نتیجه با تمرکز بر این مطلب و مطالعه سایر مراحل این زنجیره، می‌توان عوامل غیر

Archive of SID

www.SID.ir

طبیعی مؤثر در رسوبگذاری در مخازن سدها را به شرح زیر دسته‌بندی کرد:

الف) فعالیت‌ها و دخالت‌های بشر در سطح حوضه‌های آبریز: تخریب جنگل‌ها و مراتع، تجاوز به عرصه های طبیعی به صورت تغییر کاربری اراضی، نبود نقشه کاداستر، بهره‌برداری نامناسب کشاورزان از زمین و منابع طبیعی، نبود هماهنگی بین ارگان‌های مختلف در امر مدیریت حوضه‌های آبریز و عدم وجود سیستم نظارتی قانونمند (طلوعی 1384، ضیائی و بهنیا 1386، موریس و فان 1997)

ب) کاستی‌های طراحی و بهره‌برداری: تمایل به طراحی مخازن حجیم برای ذخیره آب از سال‌های تر به سال‌های خشک بدون در نظر گرفتن تمهیدات مهندسی رسوب، طراحی نادرست تأسیسات تخلیه کننده سد، ضعف دستورالعمل‌های بهره‌برداری و یا به روز نبودن این دستورالعمل‌ها، عدم تمایل بهره‌بردار در مانور دریچه‌های عمقی به دلیل عدم پذیرش ریسک و یا افزایش احتمالی هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، عدم آمادگی تجهیزات هیدرومکانیک و یا مخاطره آمیز بودن مانور آنها برای تخلیه جریان‌های غلیظ و نبود مطالعات و ارزیابی زیست‌محیطی در ارتباط با تخلیه جریان‌های غلیظ به پایین‌دست (طلوعی 1384، جاتیپراکاش و گارگ 2008، موریس و فان 1997)

مواد و روش‌ها

مفهوم و زیرساخت روش‌های تحلیل عدم قطعیت

ضعف طراحان در شناخت، مدل‌سازی و به کمیت درآوردن متغیرهای نامطمئن حاکم بر فرآیندهای مؤثر در پروژه‌ها، از عمده دلایل ناکامی در عملکرد بهینه پروژه‌ها محسوب می‌شود؛ از اینرو کافی نبودن دانش بشر در تحلیل وقایع طبیعی، مهندسین را ملزم به استفاده از روابط و روش‌های محاسباتی کرده است که علیرغم به همراه داشتن فرضیات ساده کننده، تا حدی امکان شناسایی، بررسی و پیش‌بینی احتمالاتی بازه تغییرات پارامترهای غیرقطعی را فراهم می‌نماید. به عبارت دیگر تجزیه و تحلیل عدم قطعیت برای هر پدیده، ضمن آشکارسازی منظره‌ای نیمه واقعی از پارامترهای غیرقطعی آن، امکان تخمین نزدیک به واقعیت و درنهایت تصمیم گیری در مورد آن پدیده را میسر خواهد ساخت.

برای شناسایی، ارزشیابی و کسب آگاهی از احتمال وقوع یک پدیده متغیر در رخدادهای آتی و امکان تحلیل آن جهت اهداف کاربردی، باید تغییرات رفتاری و بازه تغییرات آن پدیده در طول یک دوره پایش و ثبت گردد که از آن تحت عنوان بررسی بازه تغییرات فرآیندهای غیر قطعی نام می‌برند.

طبق تعریف تحلیل عدم قطعیت به مجموعه روش‌هائی گفته می‌شود که با هدف بررسی بازه تغییرات یک فرآیند غیرقطعی و تعیین مبانی احتمالاتی آن جهت مدل‌سازی در علوم مهندسی تدوین می‌گردد (هال 2003 و شین و سالاس 1996). تاکنون روش‌های گوناگونی برای تحلیل عدم قطعیت‌های حاکم بر سیستم‌های آبی مطرح و توسعه یافته‌اند که در آن میان می‌توان به روش تحلیل مرتبه اول[1] (*FOA*) و روش شبیه‌سازی مونت کارلو[2] (*MCS*) اشاره کرد (سالاس و شین 1999).

مبانی روش *FOA* بر تولید متغیرهای تصادفی مستقل به کمک خطی‌سازی معادلات حاکم بین متغیرهای سیستم استوار است، در حالیکه در روش *MCS* ابتدا برای داده‌های غیرقطعی ورودی، توابع توزیع احتمالاتی برازش داده می‌شود و پس از جاگذاری آنها در معادلات تجربی و یا مدل‌های نیمه تحلیلی، خروجی‌های غیرقطعی تولید می‌شوند. سپس این خروجی‌ها تحلیل آماری شده و پس از محاسبه خصوصیات آماری و احتمالاتی آنها امکان قضاوت، تصمیم‌گیری و طراحی فراهم می‌گردد.

سالاس و شین (1999) با توسعه یک مدل مبتنی بر روش مونت کارلو، شیوه جدیدی برای تخمین حجم تجمعی رسوبگذاری سالانه در یک سد را ارائه نمودند. طبق تحقیقات آنها تغییرات دبی متوسط رودخانه و همچنین نوسان غلظت رسوبات معلق در آبراهه مهمترین پارامترهای غیرقطعی تأثیرگذار در تخمین حجم رسوبات

[1] First Order Analysis (FOA)
[2] Monte Carlo Simulation (MCS)

Archive of SID
www.SID.ir

نهشته شده در مخزن سد بوده‌اند (سامانی و همکارن 2007، سالاس و شین 1999).

ورستراتن و همکاران (2003) با مطالعه 22 حوضه آبریز در کشور اسپانیا با هدف تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر نرخ رسوبگذاری سدهای احداث شده در آنها به این نتیجه رسیدند که وسعت حوضه آبریز تنها 17% در نرخ رسوبگذاری سدهای واقع در آن نقش دارد و عوامل غیرقطعی دیگری از قبیل شرائط اقلیمی، وضعیت توپوگرافی حوضه و تغییرات کاربری اراضی نیز در این فرآیند اثربخشی زیادی داشته‌اند (ورستراتن و همکاران 2003).

امروزه اغلب روش‌های ارائه شده برای تحلیل عدم قطعیت‌های حاکم بر سیستم‌ها به صورت مدل‌های رایانه‌ای تدوین می‌شوند که متناسب با فرضیات مورد استفاده، دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود هستند به طوری که در واسنجی 9 مدل مختلف رایانه‌ای و مقایسه آنها با داده‌های مشاهداتی در یک حوضه معرف واقع در کشور آمریکا، به این نتیجه رسیده‌اند که مدل‌های نیمه کمی به دلیل استفاده از معادلات دارای پارامترهای کمتر و یا به عبارت دیگر کاهش نقش عدم قطعیت پارامترها در روند محاسبات، در مقایسه با مدل‌های کمی نتایج قابل قبول‌تری را ارائه کرده‌اند (ونته و پوئسن 2005).

مبانی تحلیل عدم قطعیت به روش دلتا[1]

روش تحلیل مرتبه اول که به روش دلتا نیز معروف است در اکثر شاخه های علوم مهندسی کاربرد داشته و برای تحلیل عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی استفاده می‌شود. در این روش، بازه تغییرات پارامتر غیرقطعی پایش شده و پس از محاسبه مقادیر میانگین و واریانس تغییرات، درنهایت ضریب تغییرات به عنوان شاخص ارزیابی و کنترل عدم قطعیت محاسبه می‌گردد.

اساس روش دلتا به این نحو است که اگر متغیر y به صورت تابع ریاضی G، شامل متغیرهای تصادفی x_1 تا x_j تعریف شده باشد، میانگین پارامتر y که با نماد m_y نشان داده می‌شود، با مدنظر قرار دادن تخمین مرتبه اول بسط سری تیلور و بر اساس میانگین های x_i که با نماد $\bar{x}_i$ نمایش می‌دهند، از معادلات زیر قابل تخمین خواهد بود (میز 2005):

$$y = G(x_1, x_2, ..., x_j) = G(x_i) \;\; ; \;\; i = 1 \sim j \qquad [1]$$

$$m_y \approx G(\bar{x}) + \sum_{i=1}^{j} \left(\frac{\partial G}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}} (x_i - \bar{x}_i) \qquad [2]$$

در معادله [2]، عبارت $\left(\frac{\partial G}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}}$ به ضریب حساسیت معروف بوده و بنا به تعریف، نشانگر شدت تغییرات تابع $G(x_i)$ در نقطه $x_i = \bar{x}_i$ است. اگر در معادله 2 متغیرهای $\bar{x}_i$ نسبت به یکدیگر مستقل فرض شوند، مقدار واریانس پارامتر y به شرح معادله زیر قابل محاسبه است (میز 2005):

$$s_y^2 = Var(y) \approx \sum_{i=1}^{j} \left(\frac{\partial G}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}}^2 . s^2{}_{x_i} \qquad [3]$$

در نتیجه ضریب تغییرات پارامتر y (Ω_y)، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega_y = \left\{ \sum_{i=1}^{j} \left[\left(\frac{\partial G}{\partial x_i} \right)_{\bar{x}}^2 . \left(\frac{\bar{x}_i}{m_y} \right)^2 . \Omega^2{}_{x_i} \right] \right\}^{0.5} \qquad [4]$$

شایان ذکر است اگر یک پارامتر دارای توزیع آماری یکنواخت داده‌ها و حد چپ و راست تغییرات به صورت بازه $[a,b]$ باشد، میانگین تغییرات برابر $\frac{a+b}{2}$ و مقدار واریانس آن نیز برابر با $\frac{(b-a)^2}{12}$ خواهد شد (میز 2005). بنابراین مقدار ضریب تغییرات آن پارامتر (Ω) به شرح زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\Omega = \frac{s}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{3}}{3} \left(\frac{b-a}{b+a} \right) \qquad [5]$$

تحلیل عدم قطعیت برآورد جرم مخصوص رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد

بنا به تعریف، جرم مواد رسوبی نهشته شده در واحد حجم را جرم مخصوص ظاهری یا چگالی می‌نامند. مقدار جرم مخصوص رسوبات مخزن تحت تأثیر تراکم لایه‌های رسوب به مرور زمان افزایش یافته و در نتیجه حجم کمتری از مخزن را اشغال می‌کنند. از اینرو به

[1] Delta method

Archive of SID

www.SID.ir

منظور برآورد دقیق حجم از دست رفته مخزن، باید جرم مخصوص رسوبات و تغییرات آن بر حسب زمان را مد نظر قرار داد (حسن‌زاده 1389، موریس و فان 1997).

جرم مخصوص (چگالی) رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد تابع متغیرهای زیادی از قبیل خصوصیات فیزیکی ذرات رسوب، زمان، میزان تراکم لایه‌های رسوب ته‌نشین شده و سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن است. تمام این شاخص‌ها دارای عدم قطعیت بوده که در نتیجه، تعیین جرم مخصوص رسوبات ته‌نشین شده در مخزن نیز دارای عدم قطعیت خواهد بود (حسن‌زاده 1389، موریس و فان 1997).

چگالی رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد به شرح زیر تخمین زده می‌شود (موریس و فان 1997، سالاس و شین 1999):

$$W_0 = W_c P_c + W_m P_m + W_s P_s \qquad [6]$$

در رابطه مذکور W_0 معرف جرم مخصوص اولیه توده رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد بوده و W_c، W_m، W_s، P_c، P_m و P_s به ترتیب معرف جرم مخصوص ظاهری ذرات رس، سیلت و ماسه بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار دانه بندی آنها بر حسب درصد هستند.

همان‌طور که ذکر شد شرایط بهره‌برداری از مخزن سد بر میزان جرم مخصوص رسوبات ته‌نشین شده در مخزن مؤثر خواهد بود. دفتر عمران ایالات متحده آمریکا، شرایط بهره‌برداری از مخازن سدها را به چهار دسته تقسیم بندی کرده است: (سالاس و شین 1999، سامانی و همکاران 2007)

(I) رسوبات همیشه مستغرق یا تقریباً مستغرق هستند.

(II) رسوبات گاهی به همراه آب از مخزن خارج می‌شود.

(III) مخزن معمولاً خالی از رسوب است.

(IV) بستر رودخانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با توجه به شرایط بهره‌برداری از مخزن، مقادیر W_c، W_m و W_s از جدول 2 بدست می‌آیند.

جدول 2- مقادیر جرم مخصوص ظاهری ذرات رسوب (سالاس و شین 1999)

شرایط بهره‌برداری از مخزن	جرم مخصوص $W(kgm^{-3})$		
	رس (W_c)	سیلت (W_m)	ماسه (W_s)
I	416	1120	1500
II	561	1140	1550
III	641	1150	1550
IV	961	1170	1550

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد عواملی از قبیل ترکیب دانه‌بندی ذرات رسوب، میزان تراکم لایه‌های رسوب و نحوه بهره‌برداری از مخزن بر جرم مخصوص نهشته‌های رسوبی اثر گذار هستند. به طور مثال با گذشت زمان و انباشت رسوبات در مخزن، نیروی وزن لایه‌های رسوب فوقانی باعث فشرده شدن لایه‌های زیرین می‌شود و به این ترتیب جرم مخصوص رسوبات با گذشت زمان افزایش می‌یابد. از اینرو برای تخمین جرم مخصوص ظاهری رسوبات ته‌نشین شده در مخزن با توجه به گذشت زمان و فشرده شدن لایه‌های رسوب به ازای $T > 1$ سال، از روابط زیر استفاده می‌شود (موریس و فان 1997):

$$W_T = W_0 + 0.4343K\left[\frac{T}{T-1}(\ln T) - 1\right] \qquad [7]$$

$$K = K_c P_c + K_m P_m + K_s P_s \qquad [8]$$

در معادله 8، K به شرایط بهره‌برداری از مخزن و اندازه ذرات رسوب بستگی دارد و به ضریب تحکیم معروف است. با توجه به شرایط بهره‌برداری از مخزن، مقادیر ضریب تحکیم در جدول 3 درج شده است:

جدول 3- مقادیر ضریب تحکیم (موریس و فان 1997)

شرایط بهره‌برداری از مخزن	مقدار ضریب $K(kg/m^3)$		
	رس (K_c)	سیلت (K_m)	ماسه (K_s)
I	256	91	0
II	135	29	0
III	0	0	0
IV	0	0	0

Archive of SID

www.SID.ir

با تلفیق معادلات [6]، [7] و [8] خواهیم داشت:

$$W_T = P_c\left\{W_c + 0.4343K_c\left[\frac{T}{T-1}(\ln T)-1\right]\right\} + P_m\left\{W_m + 0.4343K_m\left[\frac{T}{T-1}(\ln T)-1\right]\right\} + P_s\left\{W_s + 0.4343K_s\left[\frac{T}{T-1}(\ln T)-1\right]\right\} \quad [9]$$

در معادله 9، W_T معرف جرم مخصوص ذرات رسوب ته‌نشین شده در مخزن سد پس از گذشت T سال از بهره‌برداری است. در این معادله مقادیر P_c، P_m و P_s که به ترتیب نشانگر مقدار ذرات رس، سیلت و ماسه بر حسب درصد هستند، دارای عدم قطعیت بوده و در نتیجه پارامتر W_T نیز دارای عدم قطعیت خواهد بود. از اینرو به موازات انجام محاسبات مربوط به تعیین جرم مخصوص ذرات رسوب ته‌نشین شده در مخزن سد، تحلیل عدم قطعیت و محاسبه ضریب تغییرات پارامتر W_T پس از گذشت T سال از بهره‌برداری نیز باید انجام گیرد.

بر اساس معادلات 4 و 9، ضریب تغییرات جرم مخصوص ذرات رسوب ته‌نشین شده در مخزن سد پس از گذشت T سال از بهره‌برداری که با نماد Ω_{W_T} نشان داده می شود، به شرح زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\Omega_{W_T} = \left[\left(\frac{\partial W_T}{\partial P_c}\right)^2.\left(\frac{\overline{P_c}}{m_{W_T}}\right)^2\Omega_{P_c}^2 + \left(\frac{\partial W_T}{\partial P_m}\right)^2.\left(\frac{\overline{P_m}}{m_{W_T}}\right)^2\Omega_{P_m}^2 + \left(\frac{\partial W_T}{\partial P_s}\right)^2.\left(\frac{\overline{P_s}}{m_{W_T}}\right)^2\Omega_{P_s}^2\right]^{0.5} \quad [10]$$

در معادله 10، Ω_{P_c}، Ω_{P_m} و Ω_{P_s} به ترتیب نشانگر ضریب تغییرات متغیرهای P_c، P_m و P_s (درصد نوع رسوبات به لحاظ رس، سیلت و ماسه) هستند. این معادله را پس از انجام محاسبات ریاضی به صورت معادله 11 می‌توان بازنویسی کرد:

$$\Omega_{W_T} = \left\{\left\{W_c + 0.4343K_c\left[\frac{T}{T-1}(\ln T)-1\right]\right\}\left(\frac{\overline{P_c}}{\mu_{W_T}}\right)^2\Omega_{P_c}^2 + \left\{W_m + 0.4343K_m\left[\frac{T}{T-1}(\ln T)-1\right]\right\}\left(\frac{\overline{P_m}}{\mu_{W_T}}\right)^2\Omega_{P_m}^2 + \left\{W_s + 0.4343K_s\left[\frac{T}{T-1}(\ln T)-1\right]\right\}\left(\frac{\overline{P_s}}{\mu_{W_T}}\right)^2\Omega_{P_s}^2\right\}^{0.5} \quad [11]$$

مطالعه موردی

در این قسمت از مقاله، به منظور تبیین روند ذکر شده در قسمت 4، یک مطالعه موردی بر اساس داده‌های گزارش شده توسط سالاس و شین (1999) انجام شده است.

هدف از این مطالعه تعیین جرم مخصوص ذرات رسوب ته‌نشین شده و ضریب تغییرات آن در مخزن سد کنی و پس از گذشت 15 سال از بهره‌برداری است. سد کنی در اوایل سال 1980 بر روی رودخانه وایت واقع در شمال ایالت کلرادو احداث شده و گنجایش حجم آن در حدود 17 میلیون مترمکعب است (سالاس و شین 1999).

داده‌های گزارش داده شده مخزن سد کنی از طریق نمونه‌برداری از رسوبات ته‌نشین شده در مخزن بدست آمده‌اند. خلاصه نتایج حاصل از نمونه‌برداری و تحلیل آماری داده‌های خام (میزان درصد نوع رسوب) در جدول4 ارائه شده‌اند.

شایان ذکر است این مخزن به لحاظ شرایط بهره‌برداری از نوع I بوده و نمونه‌گیری‌های انجام شده دارای ساختاری با ترکیب $P_c + P_m + P_s = 100\%$ بوده‌اند (سالاس و شین 1999).

Archive of SID

www.SID.ir

جدول 4- نتایج دانه‌بندی ذرات رسوب در نمونه‌های سد کنی (سالاس و شین 1999)

عنوان	حد چپ تغییرات	حد راست تغییرات	توزیع آماری
P_c (%)	16	41	یکنواخت
P_m (%)	39	63	یکنواخت
P_s (%)	14	43	یکنواخت

همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد P_c، P_m و P_s به ترتیب معرف درصد رس، درصد سیلت و درصد ماسه در ترکیب دانه‌بندی نمونه رسوب هستند.

نتایج و بحث

با توجه به داده‌های ذکر شده در جدول 4 و به کمک معادله 5، مقادیر میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات دانه‌بندی ذرات رسوب به شرح جدول 5 محاسبه شده و سپس به کمک معادله 9 و با توجه به شرایط بهره‌برداری از مخزن سد کنی (نوع I)، مقدار متوسط جرم مخصوص ذرات رسوب ته‌نشین شده در مخزن سد (m_{W_T}) محاسبه می‌شود.

جدول 5- نتایج حاصل از آنالیز آماری درصد دانه‌بندی ذرات رسوب در مخزن سد کنی

عنوان داده	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
P_c (%)	28/5	7/216884	$2/53224\times10^{-1}$
P_m (%)	51	6/928197	$1/35847\times10^{-1}$
P_s (%)	28/5	8/37159	$2/93740\times10^{-1}$

$$m_{W_T} = \frac{28.5}{100}\left\{416+0.4343\times256\left[\frac{15}{15-1}(\ln 15)-1\right]\right\} + \frac{51}{100}\left\{1120+0.4343\times91\left[\frac{15}{15-1}(\ln 15)-1\right]\right\} + \frac{28.5}{100}\{1500+0.0\} = 1266.88 \quad kg/m^3 \qquad [12]$$

در گام بعد، با توجه به داده‌های ذکر شده در جدول 5 و معادله 11، مقدار ضریب تغییرات جرم مخصوص ذرات رسوب ته‌نشین شده در مخزن سد کنی به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\Omega_{W_T} = (0.00983)^{0.5} = 0.99153\times10^{-1}$$

به عبارت دیگر میزان دقت تخمین جرم مخصوص ذرات رسوب ته‌نشین شده در مخزن سد کنی، برابر با ±9.9153% است. در نتیجه انحراف معیار تعیین جرم مخصوص ذرات رسوب ته‌نشین شده در این سد به کمک معادله 13 محاسبه می‌شود:

$$s_{W_T} = m_{W_T}.\Omega_{W_T} \qquad [13]$$

$$s_{W_T} = 1266.88\times0.099153 = 125.6 \quad kg/m^3$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به تحلیل انجام شده در این مطالعه، جرم مخصوص ذرات رسوب ته‌نشین شده در مخزن سد کنی به صورت بازه $1266.88\pm125.6 \quad kg/m^3$ تخمین زده می‌شود. به عبارت دیگر میزان دقت انجام محاسبات برابر با 9/9% بوده که این بازه در مقایسه با حداکثر ریسک قابل قبول در طرح (کمتر از 10%)، نشانگر مطلوب بودن روند طراحی انجام شده برای تعیین ظرفیت حجم مرده در این سد می‌باشد.

شایان ذکر است نتایج حاصل از کاربرد روش دلتا برای تحلیل عدم قطعیت‌های حاکم بر تعیین جرم مخصوص ذرات رسوب ته‌نشین شده در مخزن سد کنی در مقایسه با نتایج حاصل از روش مونت کارلو که قبلاً توسط سالاس و شین (1999) و سامانی و همکاران (2007) بررسی شده است، همخوانی بسیار خوبی را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری کلی

به طور کلی، رسوبگذاری در مخازن سدها همانند اغلب فرآیندهای فیزیکی طبیعت، رفتاری غیرقطعی دارد و در مقیاس زمان و مکان تغییرات زیادی دارد. به عبارت دیگر، فرآیند رسوبگذاری در مخازن سدها چه به لحاظ محدوده عمل و چه به لحاظ مدل‌سازی بسیار گسترده است. اگرچه این گستردگی سنجش نرخ رسوبگذاری و پایش منابع اصلی تولید رسوب را دشوار می‌سازد ولی کنترل محصول نهائی فرآیند مذکور که همان رسوبگذاری در مخزن سد است امکان بررسی وضعیت موجود و روند تغییرات وضعیت مخزن را فراهم می‌سازد. یکی از مؤثرترین پارامترهای قابل

Archive of SID
www.SID.ir

سنجش در مخازن سدها، تعیین چگالی رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد است زیرا به دلیل ارتباط مستقیم این مفهوم با حجم رسوبات نهشته شده در مخزن سد، شناخت هرچه دقیقتر آن می‌تواند به عنوان کلیدی راهگشا برای تدقیق برنامه‌های تدوین شده در خصوص تأمین حق‌آبه‌های سد، کنترل حجم رسوبات نهشته شده، ارزیابی کفایت حجم مرده سد و نیازسنجی عملیات تخلیه رسوب از مخزن سد عمل نماید.

در این تحقیق عوامل مؤثر در فرآیند رسوبگذاری در مخازن سدها در دو گروه اصلی طبیعی و غیرطبیعی و زیر گروه‌های فرعی (6 زیر گروه طبیعی و 2 زیرگروه غیرطبیعی) طبقه‌بندی شدند. سپس روند تحلیل عدم قطعیت برآورد جرم مخصوص رسوبات ته نشین شده در مخزن سد و ضریب تغییرات آن پس از گذشت T سال از آغاز بهره‌برداری و بر اساس داده‌های مشاهداتی در یک سد مخزنی مطالعه شد. این بررسی حاکی از آن بود که با محاسبه میانگین و انحراف معیار پارامتر مورد نظر و مقایسه آن با ریسک مورد قبول در طراحی می‌توان در خصوص کفایت فرضیات طراحی قضاوت کرد و در صورت نیاز با تدقیق روند تغییرات مخزن با برنامه‌های بهره‌برداری از بروز مشکلات و یا مناقشات آتی جلوگیری کرد.

تحلیل عدم قطعیت‌های حاکم بر تعیین جرم مخصوص رسوبات ته‌نشین شده در مخازن سدها ضمن ارائه یک نگرش سیستمی به اجزای مؤثر در عملکرد سد نقش مفیدی در تعیین دقیقتر حجم توده رسوبات نهشته شده و تعدیل اهداف سد با توجه به میزان حجم مؤثر آن ایفا می‌نماید و در حقیقت مکمل مناسبی برای تدقیق نتایج حاصل از روش‌های سنتی از قبیل منحنی‌سنجه رسوب و معادله جهانی فرسایش خاک می تواند باشد.

شایان ذکر است نگارندگان این مقاله بسیار مشتاق بودند تا روند توسعه داده شده در این مقاله را برای یک مطالعه موردی در داخل کشور ارزیابی نمایند ولیکن متأسفانه علیرغم پیگیری فراوان، برای هیچ یک از سدهای مخزنی کشور بانک اطلاعاتی مناسب در زمینه رسوبگذاری در سد و اطلاعات مورد نیاز در خصوص نمونه‌برداری از رسوبات نهشته شده یافت نشد و به ناچار مطالعه موردی انجام شده با استناد به داده‌های رسوب سد کنی صورت گرفت. هرچند که روند توسعه داده شده محدود به یک سد خاص نبوده و برای تمامی سدها کاربرد دارد ولیکن این امر ایجاد بانک‌های اطلاعاتی کاربردی در زمینه رسوب را در سطح کشور بیش از پیش خاطرنشان می‌نماید.

منابع مورد استفاده

بهرامی ح و صمدی بروجنی ح، 1384. بررسی توزیع زمانی رسوب ورودی به مخازن سدهای استان خوزستان. صفحه های 8 تا 19. مجموعه مقالات نخستین همایش مدیریت رسوب. دانشگاه شهید چمران. اهواز.

بی‌نام، 1391. سیستم شناسنامه ملی سدهای ایران. شرکت مدیریت منابع آب ایران. *(http://daminfo.wrm.ir)*

حسن‌زاده ی، 1389. هیدرولیک رسوب مخازن. نشریه شماره 89. انتشارات کمیته ملی سدهای بزرگ ایران.

ضیائی ح و بهنیا ع، 1386. اصول مهندسی آبخیزداری. انتشارات دانشگاه امام رضا.

طلوعی ا، 1384. طراحی و بهره‌برداری سدها و مخازن از دیدگاه رسوب. صفحه‌های 82 تا 91. مجموعه مقالات نخستین همایش مدیریت رسوب. دانشگاه شهید چمران. اهواز.

Hall JW, 2003. Handling uncertainty in the hydroinformatic process. Journal of Hydroinformatics 5: 215-232.

Imanshoar F, Hassanzadeh Y and Aalami MT, 2009. An introduction to environmental impacts of sedimentation and erosion due to dam's construction. Workshop on Reservoir Sedimentation Control. Regional Centre on Urban Flood Management. Karaj, Iran.

Archive of SID

www.SID.ir

Jacobsen T, 2009. Some aspects of reservoir sedimentation. Workshop on Reservoir Sedimentation Control. Regional Centre on Urban Flood Management. Karaj, Iran.

Jothiprakash V and Garg V, 2008. Re-look to conventional techniques for trapping efficiency estimation of a reservoir. International Journal of Sediment Research 23: 76-84.

Mays LW, 2005. Water Resources Engineering. John Wiley & Sons.

Morris G and Fan J, 1997. Reservoir Sedimentation Handbook. US Army Corps of Engineers. McGraw-Hill. New York. USA.

Salas JD and Shin H, 1999. Uncertainty analysis of reservoir sedimentation. Journal of Hydraulic Engineering 125: 339-350.

Samani JM, Tehrani M and Montaseri M, 2007. The evaluation of three methods of uncertainty in dam reservoir sedimentation. Journal of Engineering and Applied Science 6: 1074-1084.

Shin H and Salas JD, 1996. Uncertainty analysis of reservoirs sedimentation volume and accumulation time. pp. 765-771. International Conference on Reservoir Sedimentation. Colorado, USA.

Vente J and Poesen J, 2005. Predicting soil erosion and sedimentation yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. Journal of Earth-Science Reviews 71: 95-125.

Verstraeten G, Poesen J, Vente J and Koninckx X, 2003. Sediment yield variability in Spain: A quantitative and semi-qualitative analysis using reservoir sedimentation rates. Journal of Geomorphology 50: 327-348.

Wang Z and Hu C, 2009. Strategies for managing reservoir sedimentation. International Journal of Sediment Research 24: 369-384.

Archive of SID

www.SID.ir