نشریه علمی ـ پژوهشی سد و نیروگاه برق‌آبی ایران
سال اول / شماره سوم / زمستان ۱۳۹۳

Iranian Dam and Hydroelectric PowerPlant
First Year / No. 3 / March 2015

امکان‌سنجی فنی و به‌گزینی اقتصادی روش‌های مختلف رسوب‌زدایی در مخازن سدهای برق‌آبی؛ مطالعه موردی: سد باراسونا ـ اسپانیا

*عاطفه پرورش ریزی[۱]
سید مرتضی سادات هلبر[۲]
جواد فرهودی[۳]

چکیده

در این پژوهش، پیوست جدیدی برای الگوی واسا، که فرایندهای بارش ـ رواناب، فرسایش حوضه و انتقال رسوب در رودخانه را شبیه‌سازی می‌کند، توسعه یافته است؛ در این پیوست، روش‌های شستشوی سریع و مکش آبی، برای رسوب‌زدایی مخازن سدها امکان‌سنجی می‌شوند. شبیه‌سازی پخش یک‌بعدی رسوبات در مخزن، امکان‌پذیری روش‌های رسوب‌زدایی و انتخاب روش بهینه آن و هم‌چنین ارزیابی اقتصادی گزینه‌ها با زبان برنامه‌نویسی فرترن کدنویسی شده است. در این الگو سودهای اقتصادی تولید هر واحد برق تولیدی از نیروگاه سدها، سودهای حاصل از حجم آب ذخیره‌شده در مخزن، هزینه‌های عملیات رسوب‌زدایی و دوره بهره‌برداری از سد، ارزش فرسودگی، اسقاطی سد و هزینه ساخت سد جدید، بر اساس ارزش اقتصادی آب یک‌پارچه شده است. بنابراین می‌توان ارزیابی اقتصادی مناسبی نسبت به روش رسوب‌زدایی انجام داد. نتایج چنین نشان می‌دهند که پیوست جدید ـ که نتایج شبیه‌سازی پخش رسوب در مخزن را با روش‌های انتخاب گزینه بهینه برای رسوب‌زدایی مخزن در هم آمیخته است ـ نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

رسوب‌زدایی، امکان‌سنجی فنی، به‌گزینی اقتصادی، الگوی واسا، مخازن سدها.

۱. * استادیار رشته سازه‌های آبی، دانشگاه تهران. parvarsh@ut.ac.ir
۲. دانشجوی دکتری رشته سازه‌های آبی، دانشگاه تهران. mortezasadat@ut.ac.ir
۳. استاد رشته سازه‌های آبی، دانشگاه تهران.
تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۴ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۳

مقدمه

در مناطق مختلف جهان، رسوب‌گذاری سالانه بین ۰/۱ تا ۲/۳ درصد از حجم کل ذخیره مخازن سدها را از بین می‌برد. (وایت،[1] ۱۹۸۴) رسوب‌گذاری با نرخ متوسط ۰/۳ درصد در سال، حجم کل سدهای جهان را کاهش می‌دهد. در آسیا این رقم به ۰/۵ تا ۱ درصد نیز می‌رسد. (اولسون و باسون،[2] ۲۰۰۴) بنابراین می‌توان چنین تخمین زد که معادل ۴۵ کیلومتر مکعب در سال، از ظرفیت ذخیره سدهای جهان کاسته می‌شود. هزینه جایگزینی حجم از دست‌رفته بدون درنظرگرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی و هم‌چنین هزینه‌های اجتماعی و فرهنگی ساخت سد جدید، معادل ۱۳ هزار میلیارد دلار آمریکا در هر سال برآورد شده است. (پالمیر،[3] ۲۰۰۳)

خسارت‌های ناشی از رسوب‌گذاری در مخازن سدها در کشورهای در حال توسعه مخصوصا مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل خصوصیات جغرافیایی و نیاز بیشتر به مخازن ذخیره آب از یک سو و بهره‌برداری نامناسب از مخازن از سوی دیگر، چندین برابر کشورهای آمریکای شمالی است. (وریکات و باتالا،[4] ۲۰۰۶) در مناطق نیمه‌خشک به‌دلیل فرسایش حوضه آبخیز مخازن سدها به شدت در معرض انباشتگی رسوبات هستند، بنابراین مدیریت رسوب «از حوضه تا مخزن سدها» ضروری است. (مامد،[5] ۲۰۰۸) سدهای مخزنی زیادی به‌دلیل رسوب‌گذاری متروکه شده‌اند. این مشکل به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک به‌علت بالا بودن میزان عبور جریان رسوب، مشهودتر است. (برانت،[6] ۲۰۰۰) حجم از دست‌رفته مخازن سدهای ایران بیش از ۵۰۰ میلیون مترمکعب در سال (بیش از دو برابر حجم مخزن سد کرج) است. (حسن‌زاده، ۱۳۸۹)

در دهه‌های اخیر الگوهای عددی زیادی در خصوص الگوسازی فرایند فرسایش و رسوب‌گذاری در سطح حوضه، توسعه یافته‌اند که پیچیدگی هر یک به جزئیاتی که در دقت توزیع زمانی و مکانی عوامل و مؤلفه‌ها لحاظ می‌شود وابسته است؛ از الگوهایی مانند پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی (WEPP)[7] (نیرینگ[8] و همکاران، ۱۹۸۹) و الگوی فرسایش دوبعدی[9] (اشمیت،[10] ۱۹۹۱) برای الگوسازی یک واقعه خاص بارش رواناب در یک زیرحوضه، تا الگوهایی مانند الگوی بیابان‌زدایی مدالوس[11] (کریکبای،[12] ۱۹۹۷)، الگوی شبیه‌سازی هیدرولیکی و رسوب فرسایش خاک لایزم[13] (دی رو[14] و همکاران، ۱۹۹۶) و الگوی توزیع پویای یوروزیم[15] (مورگان[16] و همکاران، ۱۹۹۸) که برای یک حوضه کوچک با جزئیات بیشتر طراحی شده‌اند. هم چنین الگوهایی مانند شبیه‌ساز منابع آب حوضه روستایی[17] (آرنولد[18] و همکاران، ۱۹۸۹)، الگوی ادغامی آب و خاک[19] (کریسانوا[20] و همکاران، ۲۰۰۰)، الگوی حوضه آبریز در مقیاس بزرگ[21] (سیواپالان[22] و همکاران، ۱۹۹۶) و الگوی ابزار ارزیابی آب و خاک (swat)[23] (نیج[24] و همکاران، ۲۰۰۲) برای حوضه‌های بزرگ توسعه یافته‌اند که فرایند بارش و رواناب و هم‌چنین فرسایش حوضه را برای بازه‌های زمانی طولانی الگوسازی می‌کنند. در خصوص ویژگی این الگوها باید گفت به‌عنوان مثال در الگوی (SWAT) از داده‌های کاربری اراضی، پوشش گیاهی، مکان‌نگاری[25] و خصوصیات فرسایش‌پذیری خاک برای هر زیرحوضه کوچک میانگین‌گیری می‌شود و از این‌رو دقت این الگو در قیاس با الگوهایی مانند (LISEM) (جیتن،[26] ۲۰۰۲) که از شبکه‌بندی زیر حوضه‌ها استفاده می‌کند کمتر است و الگوهایی که از شبکه‌بندی زیرحوضه‌ها استفاده می‌کنند اغلب

1. White.
2. Olesen And Basson.
3. Palmieri.
4. Vericat And Batalla.
5. Georg Mamede.
6. Brandt.

7. The Water Erosion Prediction Project.
8. Nearing.
9. Erosion-2d.
10. Schmit.
11. Medalus Model.
12. Kirkby.
13. Lisem Model.
14. De Roo.
15. Eurosem Model (Euroem).
16. Morgan.
17. Simulator For Water Resources In Rural Basins (Swrrb).
18. Arnold.
19. Soil And Water Integrated Model (Swim).
20. Krysanova.
21. Large-Scale Catchment Model (Lascam).
22. Sivapalan.
23. Soil & Water Assessment Tool (Swat).
24. Neitsch.
25. Topo Graphy.
26. Jetten.

به دلیل ریز بودن شبکه‌بندی و حجم گسترده داده‌های ورودی و هم‌چنین طولانی‌بودن زمان اجرا محدودیت‌هایی دارند. هر دو الگو در مناطق ویژه (مانند مناطق واریزه‌ای و مناطقی که با خاک‌های سست پوشیده شده‌اند) که رسوبزایی بیشتری دارند در برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب کم‌دقت هستند. از این‌رو توسعه الگویی که توانایی برآورد میزان فرسایش و رسوب‌گذاری را در مناطق خشک و نیمه‌خشک داشته باشد ضروری می‌نماید. بدین منظور الگوی واسا در بخش‌های مختلف پژوهشی از سال ۲۰۰۰ میلادی تا کنون در حال توسعه است. در سال ۲۰۰۲ میلادی الگوی بارش ـ رواناب توسط گانتنر[1] ارائه شد و سپس توسط براونسترت[2] در چند حوضه آبریز در شمال شرق کشور اسپانیا ارزیابی و تایید نهایی شد و سپس به‌عنوان الگوی پایه بارش ـ رواناب برای اجزای دیگر پروژه مطرح شد. یکی از زیر بخش‌های این پروژه، الگوی رسوب در حوضه‌های آبریز نیمه‌خشک بزرگ[3] است که با همکاری دانشگاه پوتسدام[4] کشور آلمان، دانشگاه لیدا[5] کشور اسپانیا، مرکز پژوهش‌های جنگل‌داری ایالت کاتالونیای اسپانیا و دانشگاه فدرال سییرا[6] کشور برزیل در حال توسعه و ارزیابی است. در این پژوهش‌ها، کاربرد الگوی رسوب واسا[7] (WASA-SED) در دو مورد از زیر حوضه‌های شمال شرق اسپانیا بررسی شده که نتایج آن اشاره به دقت مناسب در شبیه‌سازی حوضه آبخیز است. پژوهش حاضر، در فاز ۱۳ این مطالعات تعریف شده و هدف آن توسعه الگوی واسا در محدوده مخازن سدها بوده و نتیجه آن اضافه‌شدن پیوست رسوب‌گذاری در مخزن و مدیریت رسوب‌زدایی از مخزن به این الگوست. در این مقاله ابتدا معرفی اجمالی زیربخش‌های مختلف الگوی واسا انجام شده و سپس الگوریتم انتخابی برای الگوسازی رسوب‌گذاری در مخزن، امکان‌پذیری رسوب‌زدایی مخزن و به‌گزینی اقتصادی روش رسوب‌زدائی معرفی شده و مراحل شبیه‌سازی الگو ارائه شده است.

1. Guntner.
2. Bronstert.
3. Sediment Export From Large Semi-Arid Catchments.
4. Postdam.
5. Lleida.
6. Ceara.
7. Water Availability In Semi-Arid Environments-Sediments.

هدف اصلی این برنامه ارائه راهکاری برای انتخاب روش عملی با کمترین هزینه برای مدیریت رسوب در مخازن سدهاست. در این پژوهش برای امکان‌سنجی فنی روش‌های رسوب‌زدایی از پژوهش‌های اتکینسون[8] (۱۹۹۶) در والینگفورد، برای ارزیابی اقتصادی از نتایج پژوهش‌های پالمیر[9] و همکاران (۲۰۰۳)، برای امکان‌سنجی فنی روش مکش‌آبی از پژوهش‌های هاتکیس[10] (۱۹۹۵) و برای به گزینی و انتخاب روش از نتایج پژوهش‌های آناندل[11] (۲۰۰۳) استفاده شده است. نتایج این پژوهش‌ها در محیط برنامه فرترن به‌گونه‌ای کدنویسی شده تا منطبق با ساختار الگوی فرسایش و رسوب (WASA) باشد.

بر اساس عمر باقیمانده مخزن و سود خالص سالانه ناشی از حجم باقیمانده مخزن، برای هر یک از روش‌ها، بهینه‌یابی اقتصادی انجام می‌شود. در این محاسبات، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سالانه و هم‌چنین هزینه‌های مربوط به رسوب‌زدایی برای روش‌های مختلف محاسبه می‌گردد. در این محاسبه‌ها، هزینه‌های مربوط به ساخت یک سد جدید و هم‌چنین هزینه‌های رسوب‌زدایی از سد موجود با احتساب ارزش خالص کنونی محاسبه می‌شود. بهینه‌یابی بر اساس بیشینه‌کردن سود خالص تجمعی انجام می‌شود.

برنامه فرض می‌کند که اعمال روش رسوب‌روبی سریع، روش لایروبی و روش برداشت ماشینی، همواره به بهره‌برداری پایدار سد منجر می‌شود. اما در روش مکش‌آبی اگر حجم سالانه رسوب‌زدایی - که عملا با این روش می‌توان به آن رسید ـ بیشتر از حجم سالانه رسوب ورودی باشد بهره‌برداری پایدار لحاظ می‌شود. در غیر این‌صورت، بهره‌برداری ناپایدار لحاظ خواهد شد. ارزش خالص فعلی گزینه «سازگاری با رسوب» نیز برای مقایسه با سایر گزینه‌ها محاسبه می‌گردد که در واقع این گزینه برای برخی سدها بهتر از هر اقدام دیگری است. نتایج مقایسه همه گزینه‌ها به‌طور خلاصه در قالب خروجی‌های اقتصادی ارائه می‌شود.

در گزینه‌ای که سد پس از پر شدن با رسوبات تغییر کاربری داده و به سد جریانی تبدیل می‌شود، اول اینکه فرض می‌شود که سد کاملاً پر شده و حجم مخزن آن صفر است و سپس

8. Atkinson.
9. Palmieri.
10. Hotckkiss.
11. Annandale.

فرض می‌شود منافع سد پس از پر شدن با رسوبات، فقط ناشی از استفاده از فشار جریان (مخزن جریانی) است و در نهایت فرض می‌شود پس از تبدیل سد به سد جریانی برای نگهداری سازه اصلی سد (هزینه بهره‌برداری و نگهداری) هزینه‌ای نمی‌شود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای ارزیابی الگوی به‌گزینی اقتصادی و فنی روش رسوب‌روبی در مخازن سدها، سد باراسونا (اسپانیا) ـ که نتایج الگوسازی رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی آن در پژوهش سادات هلبر و همکاران (۱۳۹۳) ارائه شده است ـ مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (۱) و (۲) نمونه‌ای از داده‌های ورودی به الگو برای به‌گزینی اقتصادی و فنی روش رسوب‌روبی مخزن سد باراسونا ارائه شده است. نتایج محاسبات امکان‌سنجی فنی روش رسوب‌روبی سریع بر اساس مطالعات آتکینسون در جدول (۳) آمده است. نتایج محاسبات امکان‌سنجی فنی روش مکش‌آبی بر اساس مطالعات هاتکیس نیز در جدول (۴) آمده است.

جدول (۱): مشخصات روش‌های رسوب‌زدایی برای الگو سازی به‌گزینی اقتصادی و فنی روش رسوب‌روبی مخزن سد باراسونا

مؤلفه	واحد	توضیحات	مقدار ورودی
HP	1 or 2	اگر سد دارای نیروگاه برق آبی است عدد ۱ و در غیر این صورت عدد ۲	۱
Q_f	(m^3/s)	میزان عبور جریان واقعی فرایند رسوب‌روبی سریع که به میزان عبور جریان آب ورودی و ظرفیت تخلیه کننده ها وابسته است.	۱۰۱
T_f	(days)	مدت زمان لازم برای یک دوره کامل رسوب‌روبی‌سریع (تخلیه مخزن)	۱۰
N	(years)	تعداد دوره‌های رسوب‌روبی سریع (فاصله سال‌های بین فرایند رسوب‌روبی سریع)	۴
D	(feet)	فرض اولیه برای قطر لوله مکش‌آبی (بین ۱ تا ۴ فوت)	۴.۰
NP	1, 2, or 3	تعداد لوله‌های لازم برای انجام فرایند مکش‌آبی	۳
YA	بین ۰ تا ۱	در روش مکش‌آبی، بیشینه مقدار مجاز از کل رسوبات که انتقال آن به پایین‌دست مخزن مجاز است.	۰.۳
CLF	(%)	در روش رسوب‌روبی سریع، بیشینه مقدار مجاز برای حجم از دست‌رفته مخزن است.	۵۰
CLH	(%)	در روش مکش‌آبی، بیشینه مقدار مجاز برای حجم از دست‌رفته مخزن است.	۵۰
CLD	(%)	در روش لایروبی، بیشینه مقدار مجاز برای حجم از دست‌رفته مخزن است.	۵۰
CLT	(%)	در روش حمل با کامیون، بیشینه مقدار مجاز برای حجم از دست‌رفته مخزن است.	۵۰
ASD	(%)	بیشینه مقدار از کل رسوباتی که به لحاظ عملیاتی و اجرایی می‌توان به روش لایروبی برداشت نمود.	۴۰
AST	(%)	بیشینه مقدار از کل رسوباتی که به لحاظ عملیاتی و اجرایی می‌توان به روش حمل رسوبات با کامیون برداشت نمود.	۴۰
MD	(m3)	بیشینه مقدار رسوبی که در یک دوره فرایند لایروبی به لحاظ اجرایی می‌توان برداشت نمود. اگر در محاسبات بیش از این مقدار به‌دست آید برنامه هشدار می‌دهد، اما محاسبات اقتصادی بدون توجه به این عامل انجام می‌شود.	۱،۰۰۰،۰۰۰
MT	(m3)	بیشینه مقدار رسوبی که در یک دوره عملیات حمل با کامیون به لحاظ اجرایی می‌توان برداشت نمود. اگر در محاسبات بیش از این مقدار به‌دست آید برنامه هشدار می‌دهد اما محاسبات اقتصادی بدون توجه به این عامل انجام می‌شود.	۵۰۰،۰۰۰
Cw	(%)	نسبت وزن رسوبات به وزن آب در عملیات لایروبی است.	۳۰

جدول (۲) مشخصات اقتصادی الگوسازی به‌گزینی اقتصادی و فنی روش رسوب‌روبی مخزن سد باراسونا

مؤلفه	واحد	توضیحات	مقدار ورودی
E	0 or 1	اگر سد، ساخته شده و موجود است عدد صفر و اگر سد در حال طراحی و ساخت است عدد یک وارد می‌شود.	۱
c	($/m^3)	هزینه ساخت سد بر اساس یک متر مکعب حجم آب ذخیره شده.	۱.۱۰
C2	($)	کل هزینه ساخت سد	۱۰۱۷۰۶۵۱۵
r	decimal	نرخ تنزیل	۰.۱
Mr	decimal	نرخ جذابیت سرمایه گذاری	۰.۱
P1	($/m^3)	سود ناشی از یک مترمکعب حجم مخزن	۰.۱۲
V	($)	ارزش اسقاطی است. آن مقدار از کل سود که از تخریب سد حاصل می‌شود منهای هزینه‌هایی که برای تخریب سد تحمیل می‌شود.	۵،۰۸۵،۳۲۶
omc		ضریب هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری مخزن است. نسبت هزینه‌های بهره‌برداری نگهداری سالانه به کل هزینه ساخت مخزن است.	۰.۰۱
PH	($/m^3)	هزینه یک مترمکعب آب که از طریق روش مکش‌آبی هدر می‌رود. این مقدار می‌تواند صفر باشد (مثلا زمانی که تأمین کننده حداقل میزان عبور جریان (دبی) حق آبه پایین‌دست و یا حق آبه زیست محیطی رودخانه باشد).	۰.۰۱۵
PD	($/m^3)	هزینه یک مترمکعب آب که از طریق روش لایروبی هدر می‌رود. این مقدار می‌تواند صفر باشد (مثلا زمانی که تأمین کننده حداقل میزان عبور جریان حق‌آبه پایین‌دست و یا حق‌آبه زیست‌محیطی رودخانه باشد).	۰.۰۱۲
CD	($/m^3)	هزینه یک مترمکعب رسوب‌برداری به روش لایروبی	۲۰.۰۰
CT	($/m^3)	هزینه یک مترمکعب رسوب‌برداری به روش حمل با کامیون	۱۲.۰۰
s1	decimal	ضریب سود قابل دسترس در مخزن جریانی در سالی که فرایند رسوب‌روبی سریع انجام می‌شود.	۰.۹
s2	decimal	ضریب منافع قابل دسترس ظرفیت کل مخزن در سالی که فرایند رسوب‌روبی‌سریع انجام می‌شود	۰.۹
FI	$	هزینه سرمایه‌گذاری برای عملیات اجرایی و تجهیزات لازم در فرایند رسوب‌روبی سریع (فقط در دوره اول فرایند رسوب‌روبی‌سریع اعمال می‌گردد).	۲،۰۰۰،۰۰۰
HI	$	هزینه سرمایه‌گذاری برای عملیات اجرایی و تجهیزات لازم در فرایند مکش‌آبی (فقط در دوره اول فرایند مکش‌آبی اعمال می‌گردد).	۱،۰۰۰،۰۰۰
DU	Years	عمر مفید تجهیزات مکش‌آبی	۲۵

جدول (۳): نتایج محاسبات روش رسوب‌روبی سریع برای مخزن سد باراسونا

شاخص	توضیحات	مقدار محاسبه شده	الزامات	نوع شاخص
SBR	اگر بزرگتر از یک باشد رسوب‌روبی سریع توجیه فنی دارد.	۲.۹۸	بزرگتر از یک	اصلی
LTCR	اگر کوچکتر از ۰,۳۵ باشد با شاخص‌های دیگر را نیز کنترل کرد و محتاط بود	۰.۵۱	بزرگتر از ۰/۳۵	اصلی
DDR	برای اینکه شدت بالا و پایین آمدن سطح آب برای رسوب‌روبی سریع کافی باشد باید شاخص DDR بزرگتر از ۰,۷ باشد.	۰.۸۰	بزرگتر از ۰/۷	فرعی
FWR	باید بزرگتر از یک باشد در غیر این صورت باید به شاخص TWR رجوع شود.	۳.۲۲	بزرگتر از یک	فرعی
TWR	اگر شاخص FWR کمتر از یک باشد آنگاه باید شاخص TWR بزرگتر از دو باشد اگر FWR بزرگتر از یک باشد شاخص TWR نزدیک به یک باشد کفایت می‌کند	۰.۲۶	در حدود یک	فرعی
SBRd	اگر بزرگتر از یک باشد رسوب‌روبی سریع توجیه فنی دارد.	۵.۹۱	بزرگتر از یک	فرعی
حداکثر مقدار رسوبات شسته‌شده در یک دوره عملیات رسوب‌روبی سریع (ton)				۲۴۰۰۸۳۲۱

جدول (۴): نتایج محاسبات روش مکش‌آبی برای مخزن سد باراسونا

نرخ انتقال رسوبات (ton/day)	۴۸۳
مقدار احیا مخزن در هر سال (m^3/year)	۱۱۵۸۹۴
سرعت مخلوط آب و رسوب (m/s)	۲,۵
میزان جریان عبور مخلوط آب و رسوب (m^3/s)	۲,۸۸
غلظت رسوبات در لوله مکش‌آبی (ppm)	۶۴۷

ارزیابی الگو

اگرچه برای مخازن سدهای بزرگ به دلیل ورود حجم بالای رسوب سالیانه به مخزن و محدودیت‌های آمدوشد و دسترسی به رسوبات مخزن، در عمل، تخلیه رسوبات با روش لایروبی و کامیون به عنوان راهکار اصلی رسوب‌روبی امکان‌پذیر نیست، اما الگوی ارائه‌شده، مفروض می‌دارد به لحاظ عملیاتی امکان تخلیه رسوبات به روش لایروبی و انتقال رسوبات با کامیون به خارج از محدوده مخزن ـ که بیشتر، مربوط به مخازن با حجم بسیار کم و بندهای انحراف جریان می‌باشد ـ امکان‌پذیر است. از این‌رو کاربر باید به مشکلات اجرایی روش‌های لایروبی و حمل با کامیون توجه داشته باشد. به لحاظ فنی عملیات رسوب‌روبی سریع برای مخزن سد باراسونا قابلیت اجرایی دارد، اما نتایج چنین می‌گوید که به‌کارگیری روش مکش‌آبی برای تخلیه رسوبات، پاسخگوی حجم رسوبات ورودی به مخزن نبوده و انتخاب روش مکش‌آبی به تنهایی نمی‌تواند تأمین‌کننده بهره‌برداری پایدار از مخزن سد باراسونا باشد. بنابراین اگر روش مکش‌آبی اجرا شود، رسوب‌روبی جزئی و روش ناپایدار خواهد بود. در رودخانه‌هایی که به لحاظ زیست‌محیطی در پایین‌دست محدودیت دارند غلظت رسوبات خروجی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در جدول (۵) غلظت رسوبات خروجی برای مخزن سد باراسونا ارائه شده است. در روش انتقال با کامیون چنین فرض شده که رسوبات به جایی خارج از مخزن و رودخانه پایین‌دست منتقل شوند. همان‌گونه که انتظار می‌رود، کمترین غلظت رسوبات مربوط به روش مکش‌آبی است؛ زیرا این روش به لحاظ حجمی نیز حجم بسیار کمی از رسوبات را تخلیه می‌کند. روش‌های رسوب‌روبی سریع و لایروبی نیز غلظت تقریباً مشابهی دارند.

جدول(۵): برآورد غلظت رسوبات خروجی از مخزن سد باراسونا (ppm[1])

غلظت رسوبات در روش رسوب‌روبی سریع	۲۷۵،۱۲۳
غلظت رسوبات در روش مکش‌آبی	۶۴۷
غلظت رسوبات در روش لایروبی	۳۰۰،۰۰۰

در جدول (۶) روش‌های مختلف رسوب‌زدایی از مخزن و حجم رسوبات تخلیه‌شده در هر روش ارائه شده است. روش مکش‌آبی فقط می‌تواند سالانه ۱۰۶ هزار متر مکعب رسوب مخزن را تخلیه کند. از آنجا که رسوب ورودی سالانه به مخزن در حدود ۱,۵ میلیون مترمکعب است لذا روش مکش‌آبی منجر به بهره‌برداری پایدار از مخزن نخواهد شد. در

1. Part Per Million.

روش رسوب‌روبی سریع در بخش اول (به‌منظور تخلیه رسوبات انباشته‌شده طی سالیان گذشته) لازم است ۱۴٫۶ میلیون مترمکعب رسوب از مخزن تخلیه شود و پس از آنکه مخزن به ظرفیت پایدار بلندمدت رسید، لازم است سالانه ۱٫۳۳ میلیون مترمکعب از طریق رسوب‌روبی سریع از مخزن تخلیه شود تا برای یک دوره طولانی مدت، مخزن در ظرفیت پایدار قرار گیرد. با روش لایروبی نمی‌توان بیشترین بخش رسوبات انباشته‌شده را از مخزن تخلیه نمود بلکه فقط برای اینکه مخزن در ظرفیت تعادلی باقی بماند می‌بایست سالانه ۱٫۳۳ میلیون مترمکعب رسوب (معادل رسوب ترسیب‌شونده سالانه) را از طریق لایروبی تخلیه نمود. در روش برداشت رسوبات با استفاده از کامیون به خارج مخزن برای رسیدن به ظرفیت تعادلی لازم است حدود ۱۲ میلیون مترمکعب رسوبات انباشته‌شده در بالادست دلتای مخزن تخلیه شود.

جدول (۶): حجم رسوبات تخلیه‌شده برای مخزن سد باراسونا در روش های مختلف رسوب‌زدایی

حجم رسوبات تخلیه‌شده (m^3)	فاز/دوره	روش	طرح‌ها
۱۰۶،۲۳۶	مداوم	مکش‌آبی	روش ناپایدار ـ رسوب‌زدایی جزیی
۱۰۶،۲۳۶	مداوم	مکش‌آبی	روش ناپایدار ـ تبدیل به مخزن جریانی ـ رسوب‌زدایی جزیی
۱۴،۶۵۰،۰۶۴	فاز یک	رسوب‌روبی سریع	روش پایدار
۱،۳۳۰،۵۵۰	فاز دو	رسوب‌روبی سریع	روش پایدار
به‌صورت پایدار امکان‌پذیر نیست	مداوم	مکش‌آبی	روش پایدار
به‌صورت پایدار امکان‌پذیر نیست	فاز یک	لایروبی	روش پایدار
۱،۳۳۰،۵۵۰	فاز دو	لایروبی	روش پایدار
به‌صورت پایدار امکان‌پذیر نیست	فاز یک	حمل رسوبات با کامیون	روش پایدار
۱۱،۹۷۴،۹۵۰	فاز دو	حمل رسوبات با کامیون	روش پایدار

جدول (۷) مدت زمان بخش‌های مختلف انواع روش‌های رسوب‌زدایی برای مخزن سد باراسونا را نشان می‌دهد. روش مکش‌آبی (بهره‌برداری ناپایدار) می‌بایست مداوم انجام شود. فاز اول روش رسوب‌روبی سریع حدود ۱۴ سال طول خواهد کشید و پس از آن باید عملیات رسوب‌روبی سریع، سالانه انجام شود. فاز اول روش لایروبی برای تخلیه رسوبات انباشته‌شده و رسیدن به ظرفیت تعادلی، ۳۴ سال طول خواهد کشید و پس از آن عملیات سالانه باید تداوم داشته باشد.

جدول (۸) مدت زمان بهره‌برداری پایدار برای روش های‌مختلف رسوب‌زدایی در مخزن سد باراسونا را نشان می‌دهد. در صورتی که عملیات رسوب‌روبی سریع مطابق برنامه انجام شود به لحاظ اقتصادی، طول دوره بهره‌برداری بلند مدت ۱۱۲ سال خواهد بود این عدد برای روش لایروبی و حمل با کامیون ۳۴ سال خواهد بود.

جدول (۹) ظرفیت بلندمدت (تعادلی) مخزن برای روش‌های مختلف رسوب‌زدایی در مخزن سد باراسونا را نشان می‌دهد. ظرفیت بلندمدت مخزن برای روش‌های رسوب‌روبی سریع و لایروبی در حدود ۴۷ میلیون مترمکعب و برای روش حمل رسوبات با کامیون حدود ۵۸ میلیون مترمکعب است. البته حتی اگر انتقال این حجم رسوب به لحاظ اجرایی امکان‌پذیر باشد طول دوره بهره‌برداری در روش حمل کامیون کمتر است.

جدول (۷): مدت زمان فازهای مختلف انواع روش‌های رسوب‌زدایی برای مخزن سد باراسونا

مدت زمان (سال)	فاز	روش	طرح
۱	یک	مکش‌آبی	روش ناپایدار ـ رسوب‌زدایی جزیی
۱	دو	مکش‌آبی	روش ناپایدار ـ تبدیل به مخزن جریانی ـ رسوب‌زدایی جزیی
۱۴	یک	رسوب‌روبی سریع	روش پایدار
۱	دو	رسوب‌روبی سریع	روش پایدار
امکان‌پذیر نیست	ـ	مکش‌آبی	روش پایدار
۳۴	یک	لایروبی	روش پایدار
۱	دو	لایروبی	روش پایدار
۳۴	یک	حمل رسوبات با کامیون	روش پایدار
۹	دو	حمل رسوبات با کامیون	روش پایدار

جدول (۸): مدت زمان بهره‌برداری پایدار برای روش‌های مختلف رسوب‌زدایی در مخزن سد باراسونا (سال)

۱۱۲	زمان لازم برای اینکه مخزن با استفاده از روش رسوب‌روبی سریع در ظرفیت بلند مدت پایدار باقی بماند.
امکان پذیر نیست	زمان لازم برای اینکه مخزن با استفاده از روش مکش‌آبی در ظرفیت بلندمدت پایدار باقی بماند
۳۴	زمان مورد نیاز برای اینکه مخزن با استفاده از روش لایروبی سنتی در ظرفیت بلند مدت پایدار باقی بماند
۳۴	زمان مورد نیاز برای اینکه مخزن با استفاده از روش حمل رسوبات با کامیون در ظرفیت بلند مدت پایدار باقی بماند
۷	تعداد دفعاتی که لازم است عملیات رسوب‌روبی‌سریع انجام شود تا به ظرفیت پایدار مخزن دست یافت

جدول (۹): ظرفیت بلندمدت مخزن برای روشهای مختلف رسوب‌زدایی برای مخزن سد باراسونا (متر مکعب)

ظرفیت بلند مدت مخزن برای روش رسوب‌روبی‌سریع	۴۶،۸۸۹،۲۲۳
ظرفیت بلند مدت مخزن برای روش مکش‌آبی	امکان‌پذیر نیست
ظرفیت بلند مدت مخزن برای روش لایروبی سنتی	۴۷،۰۹۱،۳۰۰
ظرفیت بلند مدت مخزن برای روش حمل رسوبات با کامیون	۵۷،۷۳۵،۷۰۰

مدت زمان پایان عمر سد در وضعیت‌های بهره‌برداری ناپایدار برای مخزن سد باراسونا در جدول (۱۰) ارائه شده است. آن‌چنان که مشاهده می‌شود روش مکش‌آبی در طولانی‌کردن عمر سد نیز نقش مهمی ایفا نمی‌کند. حجم باقیمانده سد در روش‌های بهره‌برداری ناپایدار از سد در زمانی که عمر سد به پایان می‌رسد نیز در جدول (۱۱) ارائه شده است.

جدول (۱۰): مدت زمان پایان عمر سد در طرح‌ها و وضعیت‌های بهره‌برداری ناپایدار برای مخزن سد باراسونا (سال)

تعداد سال‌هایی که بدون هیچ اقدامی، زمان لازم دارد تا سد با رسوب پر شود و تبدیل به مخزن جریانی شود.	۷۰
تعداد سال‌هایی که با روش مکش‌آبی جزیی زمان لازم است تا سد با رسوب پر شود و تبدیل به مخزن جریانی شود.	۷۶

جدول (۱۱): حجم باقیمانده سد در روش‌های بهره‌برداری ناپایدار از سد برای مخزن سد باراسونا (مترمکعب)

حجم باقیمانده سد در زمانی که عمر سد با طرح هیچ اقدامی‌انجام نشود پایان می‌یابد.	۵۲۲،۰۵۰
حجم باقیمانده سد در زمانی که عمر سد با انجام عملیات مکش‌آبی جزئی پایان می‌یابد.	۴۰۰،۲۲۵

مجموع ارزش خالص فعلی منافع هر یک از روش‌های رسوب‌زدایی مخزن برای وضعیت‌های پایدار و ناپایدار در جدول (۱۲) ارائه شده است. آن‌چنان که مشاهده می‌شود،

روش رسوب‌روبی سریع با رویکرد بهره‌برداری پایدار از مخـزن سد باراسونا با ۶۶۷ میلیون دلار بیشترین ارزش خالص فعلـی منافع را داراست و از منظر اقتصادی روش رسوب‌روبی سریع، روش منتخب برای رسوب‌زدایی مخزن سد باراسونا می‌باشـد. جدول (۱۳) مشخصات وضعیت برتر رسوب‌زدایی برای مخزن سد باراسونا را نشان می‌دهد.

جدول (۱۲): مجموع ارزش خالص کنونی سود هر یک از روش‌های رسوب‌زدایی مخزن برای وضعیت‌های پایدار و ناپایدار

مجموع ارزش خالص فعلی سود ($)	روش اقدام	طرح‌ها
۶۶۷۰۳۱۹۸۵.۵	-	بدون اقدام (روش ناپایدار)
۶۶۸۷۴۹۶۴۳.۹	مکش‌آبی	رسوب‌زدایی جزئی و در نهایت تخریب سد (روش ناپایدار)
۶۶۷۱۴۲۰۰۱.۷	-	بدون رسوب‌زدایی و در نهایت تبدیل سد به مخزن جریانی (روش ناپایدار)
۶۶۸۸۱۱۷۴۵.۱	مکش‌آبی	رسوب‌زدایی جزئی و در نهایت و تبدیل سد به مخزن جریانی (روش ناپایدار)
۶۷۲۵۵۲۰۴۵.۱	رسوب‌روبی سریع	رسوب‌زدایی کامل (روش پایدار)
امکان‌پذیر نیست	مکش‌آبی	رسوب‌زدایی کامل (روش پایدار)
۶۵۹۴۶۷۹۲۱.۷	لایروبی سنتی	رسوب‌زدایی کامل (روش پایدار)
۶۵۷۳۹۱۱۴۲	حمل رسوبات با کامیون	رسوب‌زدایی کامل (روش پایدار)

جدول (۱۳): مشخصات وضعیت برتر رسوب‌زدایی برای مخزن سد باراسونا

رسوب‌زدایی کامل (روش پایدار)	وضعیت برتر که بیشترین سود خالص کنونی را دارد.
رسوب‌روبی سریع	وضعیت برتر که به لحاظ فنی امکان‌پذیر است و بیشترین سود خالص کنونی را دارد.
۶.۷۲۶×۱۰^{۸}	بیشترین سود خالص کنونی (دلار)

نتیجه‌گیری

از لحاظ فنی عملیات رسـوب‌روبـی‌سـریع بـرای مخـزن سـد باراسونا قابلیت اجرایی دارد، اما نتایج چنین نشان می‌دهد که انجام روش مکش‌آبی برای تخلیه رسوبات، پاسـخگوی حجـم رسوبات ورودی به مخزن نبوده و انتخاب روش مکش‌آبـی بـه تنهایی نمی‌تواند تأمین‌کننده بهره‌برداری پایدار از مخزن سـد باراسـونا باشـد. بنـابراین اگـر روش مکـش‌آبـی اجـرا شـود رسوب‌روبی جزیی و روش، ناپایدار خواهد بود. روش مکش‌آبی تنها سالانه می‌تواند ۱۰۶ هزار متـر مکعـب رسـوب مخـزن را تخلیه کند و از آنجا که رسـوب ورودی سـالانه بـه مخـزن در حدود ۱,۵ میلیون مترمکعب است لذا روش مکش‌آبـی منجـر بـه بهـره‌بـرداری پایـدار از مخـزن نخواهـد شـد. در روش رسوب‌روبی‌سریع در فاز اول (به‌منظور تخلیه رسوبات انباشـته شده طی سالیان گذشته) باید ۱۴,۶ میلیون مترمکعب رسوب از مخزن تخلیه شود و پس از آنکه مخزن بـه ظرفیـت پایـدار بلند مدت رسید، سالانه باید ۱,۳۳ میلیون مترمکعب از طریق رسوب‌روبی‌سریع از مخـزن تخلیـه شـود تـا بـرای یـک دوره طولانی مدت، مخزن در ظرفیت پایدار قرار گیرد.

در روش لایروبی نمی‌توان بخش اعظم رسوبات انباشـته شـده را از مخزن تخلیه نمود؛ فقط برای اینکـه مخـزن در ظرفیـت تعادلی باقی بماند بایسـتی سـالانه ۱/۳۳ میلیـون مترمکعـب رسوب (معـادل رسـوب ترسـیب‌شـونده سـالانه) را از طریـق

لایروبی تخلیه نمود. در روش برداشت رسوبات با استفاده از کامیون به خارج مخزن برای رسیدن به ظرفیت تعادلی لازم است حدود ۱۲ میلیون مترمکعب رسوبات انباشته شده در بالادست دلتای مخزن تخلیه شود که به لحاظ اجرایی و جاده دسترسی امکان تخلیه در بازه زمانی کوتاه امکان‌پذیر نیست. در صورتی که عملیات رسوب‌روبی سریع مطابق با برنامه انجام شود از لحاظ اقتصادی طول دوره بهره‌برداری بلند مدت ۱۱۲ سال خواهد بود.

مقایسه مجموع ارزش خالص کنونی سود هر یک از روش‌های رسوب‌زدایی مخزن برای وضعیت‌های پایدار و ناپایدار نشان می‌دهد روش رسوب‌روبی سریع با رویکرد بهره‌برداری پایدار از مخزن سد باراسونا با ۶۶۷ میلیون دلار بیشترین ارزش خالص کنون سود را داراست و از منظر اقتصادی روش رسوب‌روبی سریع روش منتخب برای رسوب‌زدایی مخزن سد باراسونا می‌باشد.

مراجع

۱. سادات هلبر، سید مرتضی، پرورش ریزی، ع.، فرهودی، ج. ۱۳۹۳، شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در مخازن سدها با استفاده از مدل WASA-SED (مطالعه موردی سد باراسونا ـ اسپانیا)، مجله دانش آب و خاک.

۲. حسن‌زاده، ی، ۱۳۸۹، هیدرولیک رسوب مخازن، کمیته ملی سدهای بزرگ ایران.

3. Annandale G. W., 2003, Reservoir conservation and sediment management, World Bank, Washington DC. USA.
4. Arnold J. G., William J. R., Nicks A. D. and Sammons N. B., 1989, A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A&M University Press. USA.
5. Atkinson E., 1996, The feasibility of flushing sediment from the reservoir, Report OD 137. Wallingford.
6. Brandt S. A., 2000, A review of reservoir desiltation. International Journal of Sediment Research, Vol. 15, pp:321-342.
7. De Roo A. P. J, Wesseling C. G. and Ritsema C. J., 1996, A single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins. Hydrol Processes, 10, 1107–1117.
8. Guntner A. and Bronstert A. A., 2002, Large-scale hydrological modelling in the semi-arid north-east of Brazil, Dissertation, Institut fur Geologic, University of Potsdam, Germany.
9. Guntner A. and Bronstert A., 2004, Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas, J. Hydrol., 297, 136–161.
10. Guntner, A., Krol M. S., Araujo J. C. d. and Bronstert A., 2004, Simple water balance modelling of surface reservoir systems in large data-scarce semi arid region, Hydrol. Sci. J., 49(5), 901–918.
11. Hotchkiss R. H., 1995, Hydro suction sediment removal system (HHSRS), Principles and Field Test, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 121. No. 6.
12. Jetten V., 2002, LISEM user manual version 2.x. draft version January Utrecht Centre for Environment and Landscape Dynamics,Utrecht University, The Netherlands, 48 pp.
13. Krysanova F., Wechsung J., Arnold R., Srinivasan J. and Williams J., 2000, SWIM (Soil and Water Integrated Model), User Manual, PIK Report Nr. 69, 239 pp.
14. Kirkby M. J., 1997, Physically based process model for hydrology ecology and land degradation, in: Mediterranean Desertification and Land Use. UK.
15. Mamede G., 2008, Reservoir sedimentation in dryland catchments: Modelling and management, Ph.D thesis, University of Potsdam, Germany.
16. Morgan R. P. C., Quinton J. N., Smith R. E., Govers G., Poesen J. W. A., Auerswald K., Chisci G., Torri D. and Styczen M. E., 1998, The european soil erosion model (EUROSEM). Earth Surf. Proc. Land., 23, 527–544.
17. Nearing.M ,Lane, L.J., J.E. Gilley, and A.D. Nicks., 1989, The USDA Water Erosion. Prediction Project. ASCE National Conf. on Hydraulic Engineering, Colorado.
18. Neitsch S. L., Arnold J. G., Kiniry J. R., Williams J. R. and King K. W., 2002, Soil and water assessment tool, Theoretical Documentation, Version, Published by Texas Water Resources Institute, TWRI Report TR-191.
19. Olesen K. W. and Basson G., 2004, 1D and 2D modeling of sedimentation and flushing in shallow reservoirs. Conference proceeding of Hydraulic of Dams and River Structures,

Tehran, Iran.
20. Palmieri A., 2003, Social and economic aspects of reservoir conservation, World Water Forum, Kyoto, Japan.
21. Palmieri A., Shah F., Annandale G. and Dinar A., 2003, Economic and engineering evaluation of alternative strategies for managing sedimentation in storage reservoirs. In Reservoir Conservation.
22. Schmidt J., 1991, A mathematical model to simulate rainfall erosion, Catena Suppl. 19, 101-109.
23. Sivapalan M., Viney N. R. and Jeevaraj C. G., 1996, Water and salt balance modelling to predict the effects of land use changes in forested catchments. 3. The large scale model, Hydrol. Processes,10, 429–446.
24. Vericat, D., Batalla, R.J. and Garcia, C., 2006, Breakup and reestablishment of the armour layer in a large gravel-bed river below dams: the lower Ebro. Geomorphology 76, 122-136
25. White W. R. and Bettess R., 1984, The feasibility of flushing sediments through reservoirs. challenges in African hydrology and water resources Proceedings of the Harare Symposium, IAHS Publication No.144, pp: 577-587.