جغرافیا و پایداری محیط، شمارهٔ ۲۴، پاییز ۱۳۹۶
صص. ۱۴-۱

کاربرد الگوریتم رقابت استعماری در تعیین پارامترهای بهینهٔ روش تجربی کاهش سطح برای پیش‌بینی روند رسوب‌گذاری در مخزن سدّ دز

آرش آذری* - استادیار مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
صادق سوری - دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
حسین بنکداری - استاد مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

وصول: ۱۳۹۶/۰۲/۰۵ **پذیرش:** ۱۳۹۶/۰۴/۲۸

چکیده

رسوب‌گذاری در مخازن سدها به‌ویژه در نواحی مستعدّ حمل رسوب، باعث کاهش ظرفیت مفید مخزن، اختلال در کنترل سیلاب و عملکرد سرریز سد، کاهش توان تولیدی نیروگاه و تأثیر بر کیفیّت آب مخزن می‌گردد. روش کاهش سطح یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها برای تخمین توزیع رسوب در مخازن است. پارامترهای این روش، بر پایهٔ اطّلاعات تعداد محدودی از سدهای آمریکا تهیّه و تدوین شده است. استفاده از این پارامترها، برای تخمین توزیع رسوب مخازن سدهای دیگر نتایج درستی به دنبال نخواهد داشت؛ لذا هدف از این پژوهش، استخراج پارامترهای بهینهٔ روش کاهش سطح با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری برای پیش‌بینی دقیق توزیع رسوب و مقایسهٔ آن با نتایج حاصل از هیدروگرافی مخزن است. ابتدا با ترکیب این الگوریتم با روش کاهش سطح در محیط متلب، مقادیر بهینهٔ سه پارامتر m، n و c در رابطهٔ کلّی تیپ مخزن به دست آمد. در نهایت مدل بر اساس پارامترهای بهینهٔ روش کاهش سطح به روزرسانی شد؛ سپس با وارد کردن اطّلاعات جدید هیدروگرافی مخزن در مدل بهینه، روند رسوب‌گذاری در سال‌های آتی (۱۴۱۰ و ۱۴۲۰) پیش‌بینی شد. نتایج بیانگر تطابق بیشتر این روش با مقادیر واقعی حجم مخزن در ترازهای مختلف سد دز نسبت به روش‌های برلند و میلر و لارا بود. بر اساس نتایج به دست آمده، در سال‌های مذکور به ترتیب حدود ۲۶ و ۳۶٪ از ظرفیت مفید مخزن کم خواهد شد. با توجّه به نتایج رضایت‌بخش این پژوهش در خصوص ترکیب روش بهینه‌سازی با روش کاهش سطح، استفاده از این مدل به عنوان روشی سودمند در سایر سدهای مهم و استراتژیک کشور که در آنها هیدروگرافی مخزن انجام شده است، پیشنهاد می‌شود. در این صورت، با شناخت نحوهٔ توزیع و پیش‌بینی میزان رسوبات، می‌توان سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن و تصمیم‌گیری در مورد مشکلات ناشی از رسوبات را با ضریب اطمینان بالاتری انجام داد.

واژگان کلیدی: الگوریتم رقابت استعماری، بهینه‌سازی، روش کاهش سطح، توزیع رسوب، سدّ دز.

*. نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۹۱۲۵۷۶۶۳ E-mail: a.azari@razi.ac.ir

مقدّمه

پیش‌بینی مقدار و نحوهٔ توزیع رسوب برای طرّاحان سدها به منظور تعیین آستانهٔ دریچه‌های عمقی و آبگیر و بررسی تعادل پایداری سد اهمّیّت زیادی دارد. دریاچه‌ها و سدها، به عنوان عوامل انباشت بار رسوبی به حساب می‌آیند. انباشت رسوب در مخزن آنها، علاوه بر کاهش ظرفیت ذخیره، منجر به افزایش خطر سیلاب، وقفه در تولید انرژی برق آبی، تخریب بستر رودخانه در پایین‌دست و محلّ اتصال به مخزن، کاهش کیفیّت آب، دشواری در بهره‌برداری از مخزن و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌گردد؛ در واقع، این پدیده در مخازن سدها مهم‌ترین عامل تهدیدکنندهٔ سرمایه‌گذاری‌های عظیم در پروژه‌های آبی است.

هر سال حدود ۲۰ میلیارد تُن رسوب توسّط رودخانه‌ها و آب‌های دنیا جابه‌جا و در نهایت ته‌نشین شده و ساکن می‌شوند (شفیعی و صفامهر، ۲۰۱۱) که به طور تقریبی ۳۰٪ جریان رسوبی جهان پشت سدها به دام می‌افتد. کاهش سالانهٔ توانایی ذخیرهٔ سدهای جهان به دلیل ته‌نشین شدن رسوبات تقریباً ۰/۵ تا ۱٪ حجم مخزن است که برای بسیاری از سدها این مقدار بالاتر از ۴ تا ۵٪ بوده و در نتیجه بیشتر سدها، قسمت اصلی توانایی ذخیرهٔ آب خود را در طول ۲۵ تا ۳۰ سال از دست می‌دهند (ورستراتین[1] و همکاران، ۲۰۰۳). کاهش ظرفیت مخزن به علّت انباشت رسوبات، موجب کمبود آب شرب، آب مورد نیاز کشاورزی و کاهش توانایی تولید انرژی برق آبی می‌شود و اگر این مسئله نادیده گرفته شود، عملاً مخزن را غیر قابل استفاده خواهد کرد (موریس و فن[2]، ۱۹۹۸: ۳۰۲). هنگامی که سرعت حرکت آب در مخزن سد کاهش می‌یابد، رسوبات منتقل‌شده توسّط رودخانه که از بالادست حوضه به مخزن سد حمل شده‌اند، شروع به ته‌نشینی می‌کنند که از نتایج مخرّب آن، کاهش پایداری سد به دلیل کم‌شدن حجم مخزن در شرایط سیلابی است (وو[3]، ۲۰۰۷: ۳۴۷). به تدریج با انباشته شدن رسوبات در مخازن سدها، بهره‌برداری و سرویس‌دهی تأسیسات و دریچه‌های خروجی با مشکلات فراوانی مواجه می‌شوند که این اثرات مخرّب، ایمنی سد را به خطر می‌اندازد (محمدزاده هابیلی و موسوی، ۲۰۰۸).

این پژوهش‌ها نشان می‌دهند، پایش رسوب‌گذاری در مناطق مختلف مخزن امری ضروری است که به وسیلهٔ آن می‌توان از وضعیّت فعلی و آیندهٔ آب در دسترس اطمینان حاصل کرده و اصلاحات لازم را جهت بهره‌برداری پایدار از مخزن انجام داد. حجم رسوبات وارده به مخزن، تابعی از نحوهٔ حفاظت از خاک در حوضهٔ آبریز، عمر مفید مخزن، مدیریت بهره‌برداری از مخزن و سایر پدیده‌های طبیعی است که همواره خطری بالقوّه برای مخزن به شمار می‌روند. رسوب در مخازن با استفاده از تکنیک‌های متداول مانند مطالعات هیدروگرافی، روش‌های ورودی - خروجی جریان[4] و یا روش جدید طبقه‌بندی تصاویر دیجیتالی سنجش از دور محاسبه می‌شود.

اگر محاسبهٔ حجم کلّ رسوبات مخزن مدّ نظر باشد، رسوب توزیع‌شده در یک مخزن را می‌توان با کمک روش تجربی کاهش سطح که توسّط برلند و میلر[5] (۱۹۵۸) ارائه شد و بعداً توسّط لارا[6] (۱۹۶۲: ۱۹)، مورد تجدید نظر واقع شد، محاسبه کرد. در این روش، پارامترهای C، m و n با کمک منحنی حجم – سطح - ارتفاع مخزن محاسبه می‌شوند. روش تجربی کاهش سطح می‌تواند با استفاده از منحنی‌های حجم – سطح - ارتفاعی که ارائه می‌دهد، برای پیش‌بینی مقدار رسوب در مخزن مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات متعدّدی در زمینهٔ روش‌های تجربی انجام

1- Verstraeten
2- Morris & Fan
3- Wu
4- Inflow-Outflow Methods
5- Borland & Miller
6- Lara

شده است. آناندال[1] (۱۹۸۴)، روش کاهش سطح را با مقایسهٔ داده‌های حجم ذخیرهٔ مخزن با مقادیر محاسبه‌شده، برای تعدادی از مخازن آفریقای جنوبی مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد رسوب انباشته‌شده، حدود ۱/۱۴ تا ۴۴/۹٪ حجم مخازن را دربر می‌گیرد که طیف وسیعی از شرایط را نشان می‌دهد. در نهایت، توزیع رسوبات با روش‌های تجربی در هر چهار نوع مخزن استاندارد صورت گرفت و روشی که مجموع مربعات خطای بین نمودار حجم – سطح - ارتفاع مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در آن کمترین مقدار را داشت، به عنوان روش مناسب انتخاب شد. در همین رابطه نیز موسوی و همکاران (۲۰۰۶)، نحوهٔ توزیع رسوبات پشت سدّ زاینده‌رود را با استفاده از روش‌های افزایش و کاهش سطح، مورد بررسی قرار دادند. مقایسهٔ نتایج مدل‌ها با توزیع رسوبات اندازه‌گیری‌شده در مخزن نشان داد که روش کاهش سطح، بیشترین شباهت را با توزیع رسوب اندازه‌گیری‌شده در مخزن دارد.

نکتهٔ مهم در استفاده از روش کاهش سطح، واسنجی روش بر اساس داده‌های حجم – سطح - ارتفاع برداشت‌شده از مخازن سدها است. نتایج به دست آمده از مقایسهٔ مدل‌های واسنجی‌شدهٔ سد درودزن، در مقایسه با استفاده از داده‌های اوّلیّه برای تنظیم پارامترهای روش کاهش سطح، نشان‌دهندهٔ کاهش ۳۰٪ در خطای تخمین مقدار رسوب و مشخّصات توزیع آن در مخزن است؛ همچنین واسنجی پارامترها برای سدّ کرج نیز مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج حاکی از کاهش ۲۰ درصدی میزان خطای روش کاهش سطح بود (قره‌گزلو و همکاران، ۲۰۱۴؛ عمادی و همکاران، ۲۰۱۲).

در برخی از مطالعات، به منظور تخمین میزان توزیع رسوبات با استفاده از روش کاهش سطح، پارامترهای این روش با بهینه‌سازی، تخمین زده می‌شوند. در سال‌های اخیر، برخی از روش‌های بهینه‌سازی که مفهومی متفاوت از تکنیک‌های برنامه‌ریزی سنّتی ریاضی دارند، توسعه یافته‌اند (انگلبرکت[2]، ۲۰۰۲: ۳). استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی در ترکیب با داده‌های اندازه‌گیری‌شدهٔ میدانی، راه‌حلّی نوین در یافتن منحنی رسوبات انباشته‌شده در مخزن است. در همین راستا، تبی[3] و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از نتایج هشت اندازه‌گیری میدانی رسوبات مخزن در مدت ۴۴ سال (۲۰۰۷-۱۹۵۰) و با بهره‌گیری از تکنیک بهینه‌سازی، منحنی رسوب تله‌اندازی‌شده در مخزن سدّ فوم الخرزا[4] را پیش‌بینی نمودند؛ همچنین عمادی و کاکویی (۲۰۱۴)، نشان دادند استفاده از الگوریتم ارزیابی مجدّد پیچیده[5] برای تعیین پارامترهای بهینه روش تجربی کاهش سطح، منجر خواهد شد مقدار ریشهٔ میانگین مربعات خطا[6] بین توزیع رسوب محاسباتی و نتایج هیدروگرافی مخزن (تابع هدف بهینه سازی)، در دورهٔ واسنجی، از ۶۲٪ به ۴۸٪ کاهش یابد.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی کارایی الگوریتم رقابت استعماری در استخراج پارامترهای بهینهٔ روش کاهش سطح و پیش‌بینی روند رسوب‌گذاری توسّط این روش است؛ به طوری که مقدار رسوب‌گذاری مخزن در روش کاهش سطح با نتایج هیدروگرافی مخزن در انتهای دوره، کمترین اختلاف را داشته باشد. با توجّه به اهمّیّت منحنی‌های سطح حجم ارتفاع در برنامه‌ریزی و مدیریت مخزن و لزوم اصلاح مکرّر آن در طول دورهٔ بهره‌برداری، بررسی عملکرد الگوریتم رقابت استعماری در واسنجی روش کاهش سطح از نظر دقّت، زمان همگرایی و جواب‌های بهینه برای اصلاح این منحنی‌ها از اهمّیّت ویژه‌ای برخوردار است.

1- Annandale
2- Engelbrecht
3- Tebi
4- Foum El Kherza
5- Shuffled Complex Evaluation
6- Root Mean Square Error (RMSE)

مواد و روش‌ها

محدودهٔ مطالعاتی این پژوهش دربر گیرندهٔ مخزن سدّ دز است. این سد بر روی رودخانهٔ دز و در فاصلهٔ ٢٣ کیلومتری شمال شرقی شهرستان اندیمشک احداث و مورد بهره برداری قرار گرفته است. هدف اصلی از احداث این سد، کنترل سیلاب‌ها، تنظیم آب برای مصارف آبیاری و کشاورزی و تأمین نیروی لازم به منظور تولید برق است. این سد از نوع بتنی دو قوسی جداره نازک با ارتفاع ٢٠٣ متر ساخته شده که شامل دریاچه‌ای به طول ۶۵ کیلومتر و با ظرفیت نهایی ٢/٨۵ میلیارد متر مکعب آب است (شکل ١).

روش تجربی کاهش سطح، روشی ریاضی مبتنی بر اصول مشاهده‌ای در مخازن است که اوّلین‌بار در سال ١٩۵٨ توسّط برلند و میلر با مطالعهٔ ٣٠ سد در آمریکا ارائه شد و سپس در سال ١٩۶٢ لارا اقدام به اصلاح این روش کرد (بلانتون و فراری[1]، ١٩٩٢: ٨).

محاسبات این روش به طور عمده شامل دو قسمت می‌شود: الف: طبقه‌بندی مخزن بر اساس یکی از چهار تیپ استاندارد در نظر گرفته شده؛ ب: به کار بردن روشی پویا برای محاسبهٔ روابط حجم – سطح - ارتفاع.

رابطهٔ اصلی در این روش توسّط لارا ارائه شده است (رابطهٔ ١):

$$S = \int_0^{y_0} Ady + \int_{y_0}^{H} kady$$ رابطهٔ ١

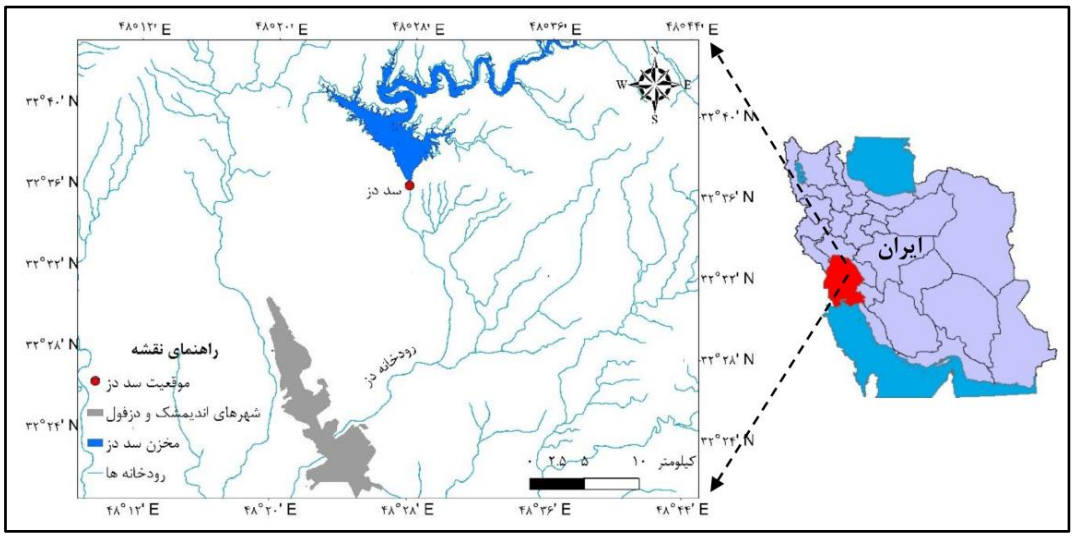
پس از انتگرال‌گیری از رابطهٔ ١ و ساده کردن جملات آن، رابطهٔ ٢ به دست می‌آید:

$$\frac{1-V_0}{a_0} = \frac{S-v_0}{h.A_0}$$ رابطهٔ ٢

برای حلّ رابطهٔ ٢ داریم:

$$h_{(p)} = \frac{1-V_{(p)}}{a_{(p)}}$$ رابطهٔ ٣

$$h'_{(p)} = \frac{S-V_{(y)}}{H.A_{(y)}}$$ رابطهٔ ۴



شکل ١. موقعیّت منطقهٔ مطالعاتی در ایران

1- Blanton & Ferrari

در رابطهٔ ۱، S: کلّ رسوبات ورودی به مخزن سد در طول دورهٔ طرّاحی است. مقدار صفر در انتگرال اوّل تراز اوّلیّهٔ بستر رودخانه در محلّ احداث، y_0: تراز بستر رودخانه در محلّ احداث سد پس از انباشت رسوبات، A: سطح مخزن در ارتفاعات مختلف، dy: جزء ارتفاع، H: ارتفاع مخزن در تراز نرمال سد، a: سطح نسبی رسوب و k: ضریب تناسب جهت تبدیل سطح نسبی رسوب به سطح واقعی است (رابطهٔ ۵):

$$k = \frac{A_0}{a_0}$$ رابطهٔ ۵

در رابطهٔ ۲، v_0 و V_0: به ترتیب حجم نسبی و واقعی مخزن در تراز؛ y_0، a_0 و A_0: به ترتیب سطح نسبی و واقعی مخزن در تراز y_0 هستند.

در رابطهٔ ۳ و ۴، $h'_{(p)}$: تابعی از عمق نسبی برای مخزن، $h_{(p)}$: تابعی از عمق و سطح و حجم برای مخزن، $V_{(y)}$: ظرفیت مخزن در تراز مفروض و $A_{(y)}$: سطح مخزن در تراز مفروض است.

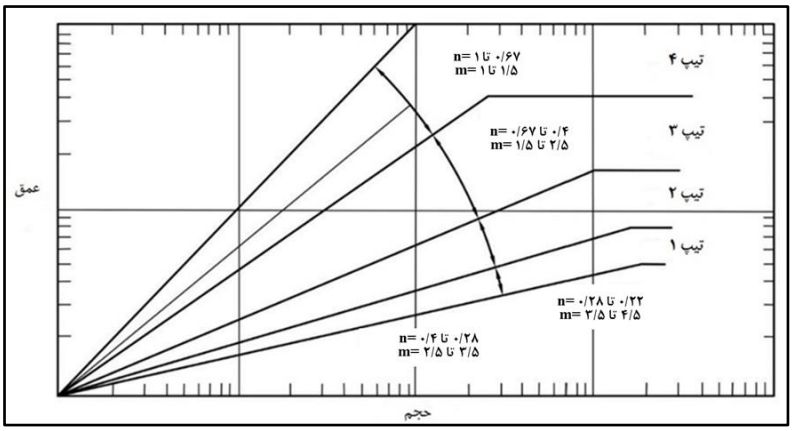
$a_{(p)}$: بیان‌کنندهٔ مساحت نسبی مخزن است (رابطهٔ ۶):

$$a_{(P)} = cp^m(1-p)^n$$ رابطهٔ ۶

هنگامی که C، m و n، ضرایب ثابتی باشند، نوع مخزن با استفاده از جدول ۱ مشخّص می‌شود؛ البتّه مقادیر این جدول، بر اساس یافته‌های برلند و میلر است و برای سایر مخازن نیاز به واسنجی دارد (شکل ۲).

جدول ۱. تیپ‌های استاندارد مخازن (برلند و میلر، ۱۹۵۸)

درجه‌بندی مخزن	نوع مخزن	پارامتر m
تیپ ۱	دریاچه‌ای	۳/۵-۴/۵
تیپ ۲	دشت سیلابی	۲/۵-۳/۵
تیپ ۳	تپّه‌ای	۱/۵-۲/۵
تیپ ۴	درّه‌ای‌شکل کوهستانی	۱/۰-۱/۵



شکل ۲. طبقه‌بندی نوع مخزن بر اساس رابطهٔ حجم - عمق (برلند و میلر، ۱۹۵۸)

جدول ۲. پارامترهای روش کاهش سطح (یانگ[1]، ۱۹۹۶)

نوع مخزن	c	m	n
تیپ ۱	۵/۰۷۴	۱/۸۵	۰/۳۶
تیپ ۲	۲/۴۸۷	۰/۵۷	۰/۴۱
تیپ ۳	۱۶/۹۶۷	-۱/۱۵	۲/۳۲
تیپ ۴	۱/۴۸۶	-۰/۲۵	۱/۳۴

1- Yang

در روش کاهش سطح، برای تعیین مشخّصات توزیع رسوب، بایستی گام‌های زیر طی شود:

گام ۱: در یک کاغذ لگاریتمی، عمق در برابر ظرفیت مخزن رسم می‌شود تا فاکتور شکل مخزن (m) به دست آید و بر اساس آن و با استفاده از جدول ۱، تیپ مخزن انتخاب می‌شود.

گام ۲: محاسبهٔ تابع بدون بعد $h_{(p)}$ برای به دست آوردن مقادیر عمق نسبی p با استفاده از رابطهٔ ۴.

گام ۳: مقادیر تابع بی‌بعد F، برای مقادیر مختلف عمق نسبی p با استفاده از رابطهٔ ۷ به دست می‌آید:

$$F = (S - V_h) / (H \times A_h)$$ رابطهٔ ۷

که در آن F: تابع بی‌بعدی از کلّ رسوب ته‌نشین‌شده است که دربرگیرندهٔ ظرفیت، عمق و مساحت مخزن است. S: حجم کلّ رسوب ته‌نشین‌شده؛ V_h: ظرفیت مخزن در رقوم؛ h، H: عمق اوّلیّهٔ مخزن و A_h: مساحت مخزن در رقوم h است.

گام ۴: مقادیر تابع بی‌بعد F برحسب عمق نسبی p و همچنین F-p به دست آمده از شکل ۳ در یک سیستم دکارتی رسم می‌شود، محلّ تلاقی این دو منحنی تراز صفر جدید در محلّ مخزن است.

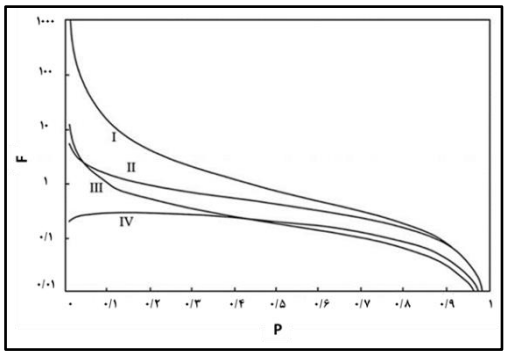
گام ۵: در پایان با استفاده از منحنی ظرفیت - عمق مخزن، حجم رسوب موجود در زیر تراز صفر مخزن تعیین و در نهایت با توجّه به رابطهٔ اصلی روش کاهش سطح، یعنی رابطهٔ ۱، حجم رسوب در سایر ترازهای مخزن محاسبه می‌شود.

باید توجّه کرد که این روش بر پایهٔ سعی و خطا است و اگر حجم رسوب به دست آمده دارای اختلاف زیادی با رسوبات ورودی اندازه‌گیری‌شده باشد، ضریب k دوباره از رابطهٔ ۸ محاسبه می‌شود:

$$k_2 = k_1 \frac{S}{S_1}$$ رابطهٔ ۸

k_2: ضریب نسبت جدید و k_1: نسبت ضریب نسبت قبلی وS_1: حجم انباشتهٔ رسوبات است؛ سپس این مقادیر با آنچه از هیدروگراف واقعی به دست می‌آید مقایسه و میزان خطای روش کاهش سطح محاسبه می‌شود.

الگوریتم رقابت استعماری بر پایهٔ رشد و تکامل نظام امپراطوری بنا شده است و اوّلین‌بار توسّط آتش‌پز و لوکاس[1] (۲۰۰۷) مطرح و معرّفی شد. به طور ویژه، این الگوریتم به فرایند استعمار، به عنوان مرحله‌ای از تکامل اجتماعی - سیاسی بشر نگریسته و با مدل‌سازی ریاضی این پدیدهٔ تاریخی، از آن به عنوان ایدهٔ اصلی یک الگوریتم قدرتمند در زمینهٔ بهینه‌سازی بهره می‌گیرد. در مدّت کوتاهی که از معرّفی این الگوریتم می‌گذرد، از آن برای حلّ مسائل بسیاری در حوزهٔ بهینه‌سازی استفاده شده است.

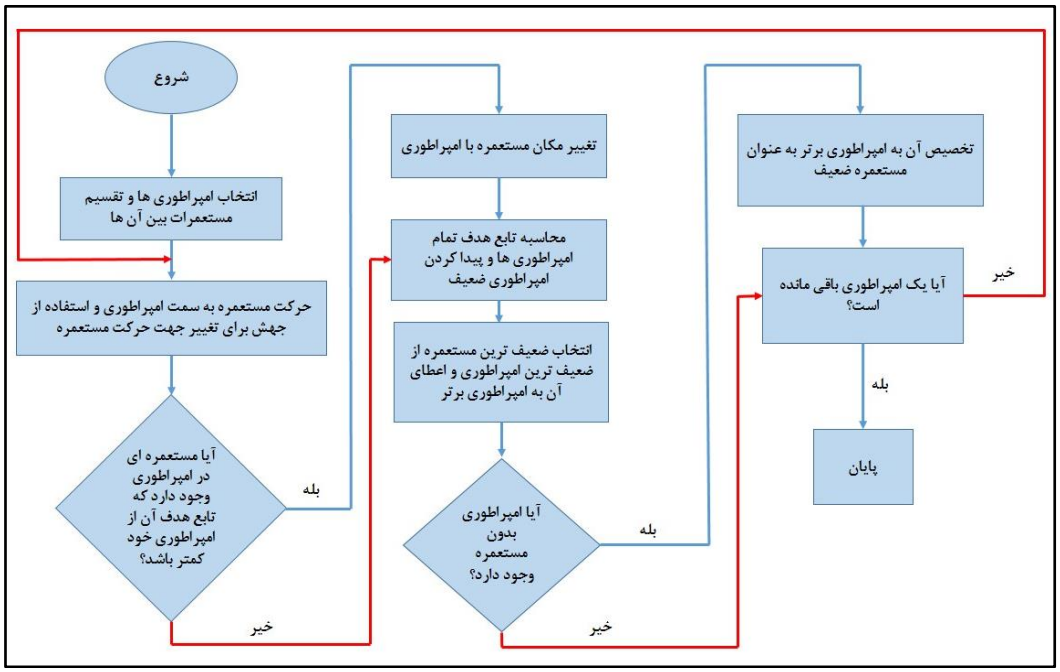


شکل ۳. منحنی تعیین عمق رسوب سدها (استرند و پامبرتون[2]، ۱۹۸۲)

1- Atashpaz & Lucas
2- Strand & Pemberton

به منظور ارزیابی کارایی این الگوریتم، مسائلی که با دیگر الگوریتم‌های تکاملی حل شده است را با این الگوریتم، بهینه‌سازی کردند که نتایج آن نسبت به نتایج سایر الگوریتم‌ها بهبود خوبی داشت.الگوریتم رقابت استعماری همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، با تعدادی جمعیّت اوّلیّهٔ تصادفی که هر کدام از آنها یک «کشور» نامیده می‌شوند، شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیّت (معادل نخبه‌ها در الگوریتم ژنتیک و ذرّه در ازدحام ذرّات) به عنوان امپریالیست[1] انتخاب و باقی‌ماندهٔ جمعیّت نیز به عنوان مستعمره[2] در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران، بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با روند خاصّی به سمت خود می‌کشند. قدرت کلّ هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل‌دهندهٔ آن، یعنی کشور امپریالیست (به عنوان هستهٔ مرکزی) ومستعمرات آن بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور امپریالیست، به اضافهٔ درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن مدل‌سازی شده است.

با شکل‌گیری امپراطوری‌های اوّلیّه، رقابت امپریالیستی میان آنها شروع می‌شود. هر امپریالیستی که نتواند در رقابت استعماری، موفّق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنهٔ رقابت استعماری حذف خواهد شد؛ بنابراین، بقای یک امپراطوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری‌های رقیب و به سیطره درآوردن آنها خواهد بود. در نتیجه در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراطوری‌های بزرگ‌تر افزوده شده و امپراطوری‌های ضعیف‌تر، حذف خواهند شد. امپراطوری‌ها برای افزایش قدرت خود مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند. با گذشت زمان، مستعمرات از لحاظ قدرت به امپراطوری‌ها نزدیک‌تر خواهند شد و شاهد یک نوع همگرایی خواهیم بود. حدّ نهایی رقابت استعماری، زمانی است که امپراطوری واحدی در دنیا داشته باشیم و بقیهٔ مستعمراتی که از لحاظ موقعیّت، به خود کشور امپریالیست خیلی نزدیک هستند. در ادامه شمای کلّی از گام‌های بهینه‌سازی الگوریتم رقابت استعماری نشان داده شده است (شکل ۴).



شکل ۴. فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری

1- Imperialist
2- Colony

برای مدل کردن این رقابت، فرض می‌شود که امپراطوری در حال حذف، ضعیف‌ترین امپراطوری موجود است و بدین ترتیب در تکرار الگوریتم، یک یا چند مستعمره ضعیف از ضعیف‌ترین امپراطوری جدا شده و برای تصاحب این مستعمرات، رقابتی بین کلّیّهٔ امپراطوری‌ها ایجاد می‌شود. مستعمرات یادشده، لزوماً توسّط قوی‌ترین امپراطوری، تصاحب نخواهند شد؛ بلکه تنها امپراطوری‌های قوی‌تر احتمال تصاحب بیشتری نسبت به سایر امپراطوری‌ها دارند.

بدین منظور، ابتدا از روی هزینهٔ کلّ امپراطوری، هزینهٔ کلّ نرمالیزه‌شدهٔ آن مطابق رابطهٔ ۹ تعیین می‌شود:

$$N.T.C_n = \max_i \{T.C_i\} - T.C_n$$ رابطهٔ ۹

$T.C_n$: هزینهٔ کلّ امپراطوری n ام. $N.T.C_n$: هزینهٔ کلّ نرمالیزه‌شدهٔ امپراطوری n ام.

در واقع اگر یک امپراطوری $T.C_n$ کمتری داشته باشد، $N.T.C_n$ آن بیشتر می‌شود؛ به عبارت دیگر، $T.C_n$: معادل هزینهٔ کلّ یک امپراطوری و $N.T.C_n$: معادل قدرت کلّ آن امپراطوری است. بدیهی است که امپراطوری با کمترین هزینه، دارای بیشترین قدرت است.

در ادامه، احتمال تصاحب مستعمرات در یک رقابت استعماری برای هر امپراطوری که در واقع تابعی از هزینهٔ کلّ نرمالیزه‌شده است محاسبه می‌شود (رابطهٔ ۱۰):

$$P_{P_n} = \left| \frac{N.T.C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.C_i} \right|$$ رابطهٔ ۱۰

با داشتن احتمال تصاحب هر امپراطوری، برای اینکه مستعمرات مذکور را به صورت تصادفی، ولی با احتمال وابسته به احتمال تصاحب هر امپراطوری، بین امپراطوری‌ها تقسیم کنیم، بردار P با استفاده از مقادیر رابطهٔ ۱۰ محاسبه می‌شود (رابطهٔ ۱۱):

$$P = [P_{P1}, P_{P2}, P_{P3}, \ldots, P_{P_{N_{imp}}}]$$ رابطهٔ ۱۱

این بردار که از مقادیر احتمال تصاحب امپراطوری‌ها تشکیل شده، دارای ابعاد $1 \times N_{imp}$ است. در مرحلهٔ بعد، بردار تصادفی R که از نظر بُعد با بردار P مشابه است، تشکیل می‌شود که آرایه‌های این بردار اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازهٔ [۰,۱] است (رابطهٔ ۱۲):

$$R = [r_1, r_2, r_3, \ldots, r_{N_{imp}}]$$ رابطهٔ ۱۲

$$r_1, r_2, r_3, \ldots, r_{N_{imp}} \sim U(0,1)$$ رابطهٔ ۱۳

پس از تشکیل بردار R، بردار D که حاصل تفاضل دو بردار P و R است تشکیل می‌شود (رابطهٔ ۱۴):

$$D = P - R = [D_1, D_2, D_3, \ldots, D_{N_{imp}}] = [P_{p1} - r_1, P_{P2} - r_2, P_{P3} - r_3, \ldots, P_{P_{N_{imp}}} - r_{N_{imp}}]$$ رابطهٔ ۱۴

با محاسبهٔ بردار D، کشورهای مستعمره به آن امپریالیستی می‌رسد که اندیس مربوط به آن در بردار D، بزرگ‌تر از بقیه باشد. امپراطوری‌ای که بیشترین احتمال تصاحب را داشته باشد، با احتمال بیشتریِ اندیس مربوط

به آن، در بردار D بیشترین مقدار را خواهد داشت. با تصاحب مستعمره توسّط یکی از امپراطوری‌ها، عملیات این مرحله از الگوریتم نیز به پایان می‌رسد (رضایی، ۱۳۸۸). برای سقوط یک امپراطوری می‌توان شروط متنوّع و متفاوتی را در نظر گرفت. در الگوریتم رقابت استعماری، یک امپراطوری زمانی ساقط می‌شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد. شرط توقّف الگوریتم رقابت استعماری، برآورده شدن یک شرط همگرایی و یا اتمام تعداد کلّ تکرارهاست. در واقع پس از مدّتی همهٔ امپراطوری‌ها سقوط کرده و تنها یک امپراطوری باقی می‌ماند و بقیهٔ کشورها تحت کنترل این امپراطوری واحد، قرار می‌گیرند. در سیستم فرمانروایی جدید، همهٔ مستعمرات توسّط یک امپراطوری اداره می‌شوند و موقعیّت‌ها و هزینه‌های مستعمرات برابر با موقعیّت و هزینهٔ کشور امپریالیست است. در این دنیای جدید، نه‌تنها تفاوتی میان مستعمرات بلکه میان مستعمرات وکشور امپریالیست نیز وجود ندارد؛ به عبارت دیگر، همهٔ کشورها در عین حال هم مستعمره و هم استعمارگرند که در چنین موقعیّتی رقابت امپریالیستی به پایان رسیده و به عنوان یکی از شروط توقّف الگوریتم متوقّف می‌شود (کریمی و شکوهی، ۲۰۱۲).

مرحلهٔ بعد شامل ترکیب الگوریتم بهینه‌ساز و روش کاهش سطح بود که در نهایت با انتخاب سه پارامتر تأثیرگذار در روش کاهش سطح (سه پارامتر m، n و C در رابطهٔ کلّی تیپ مخزن) به عنوان متغیّرهای تصمیم و تابع هدف بر اساس رابطهٔ ۱۵ در بدنهٔ الگوریتم بهینه‌ساز، واسنجی این روش در محیط متلب انجام شد:

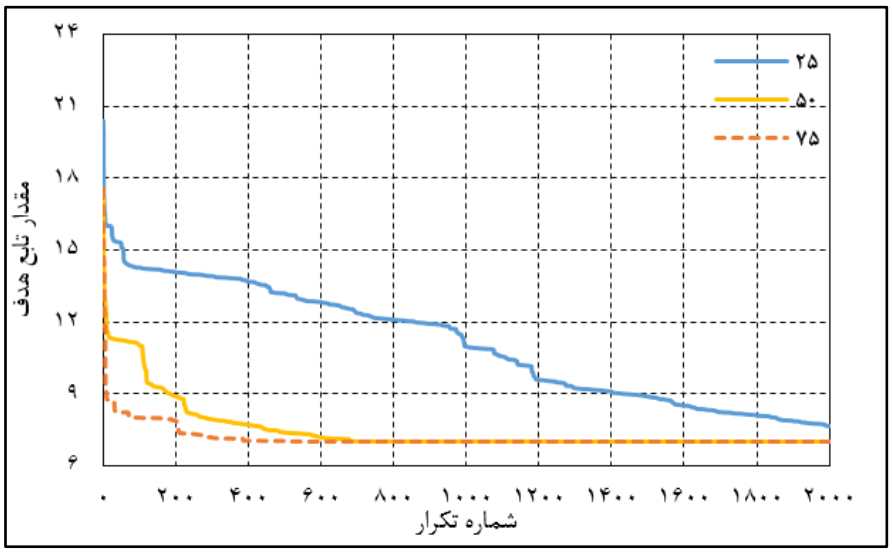
$$F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(V_{pi} - V_{oi})^2}{n}} \qquad \text{رابطهٔ ۱۵}$$

که در آن V_{pi}: حجم پیش‌بینی‌شدهٔ مخزن بر اساس روش کاهش سطح در تراز i ام؛ V_{oi}: حجم مشاهداتی مخزن در تراز i ام بر اساس هیدروگرافی مخزن؛ n: تعداد ترازهای محاسباتی در منحنی حجم - سطح - ارتفاع مخزن و F: مقدار تابع هدف محاسباتی است. با انتخاب جمعیّت‌های مختلف و شرط توقّف رسیدن به ۲۰۰۰ تکرار و در نظر گرفتن حدود قابل قبول برای هر یک از متغیّرهای تصمیم، بهینه‌سازی ضرایب بالا صورت گرفت و نتایج حاصل ارزیابی شد.

نتایج

بر اساس مطالعات هیدروگرافی مخزن سدّ دز در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۹ برای واسنجی روش کاهش سطح و استخراج متغیّرهای بهینهٔ این روش، الگوریتم بهینه‌ساز رقابت استعماری با روش کاهش سطح در محیط متلب ترکیب و اجرا شد. شکل ۵، تغییرات تابع هدف در این الگوریتم را به ازای انتخاب جمعیّت‌های اوّلیّهٔ مختلف نشان می‌دهد. شرط توقّف الگوریتم، رسیدن به ۲۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شد. شکل ۵، نشان می‌دهد با انتخاب جمعیّت اوّلیّهٔ ۲۵، الگوریتم پس از ۲۰۰۰ تکرار هنوز به همگرایی نمی‌رسد. با انتخاب جمعیّت ۵۰ و ۷۵، تا تکرار ۷۰۰ شیب کاهشی تابع هدف زیاد و بعد از آن روند کاهشی تابع هدف بسیارکند پیش می‌رود. در نهایت، در هر کدام از جمعیّت‌های انتخابی ۵۰ و ۷۵ به ترتیب در تکرارهای ۱۶۹۳ و ۱۳۱۰، تابع هدف به حداقل مقدار خود می‌رسد. پس از این تکرارها، روند کاهش آن متوقّف می‌شود. شکل ۵، نشان می‌دهد انتخاب جمعیّت اوّلیّه، نقش مهمّی در کاهش مقدار تابع هدف داشته طوری که هرچه مقدار جمعیّت اوّلیّه افزایش یابد، جواب نهایی الگوریتم کمتر خواهد بود.

عملکرد الگوریتم رقابت استعماری به ازای جمعیّت‌های اوّلیّهٔ مختلف در استخراج پارامترهای بهینهٔ روش کاهش سطح مقایسه شده است (جدول ۳). به طور کلّی جدول ۳ نشان می‌دهد با انتخاب جمعیّت‌های اوّلیّهٔ ۵۰ و ۷۵، مقدار تابع هدف در آخرین تکرار تفاوت معنی‌داری ندارد؛ امّا در حالت جمعیّت اوّلیّهٔ ۵۰، توانسته در زمان کمتری مسئله را حل کند.



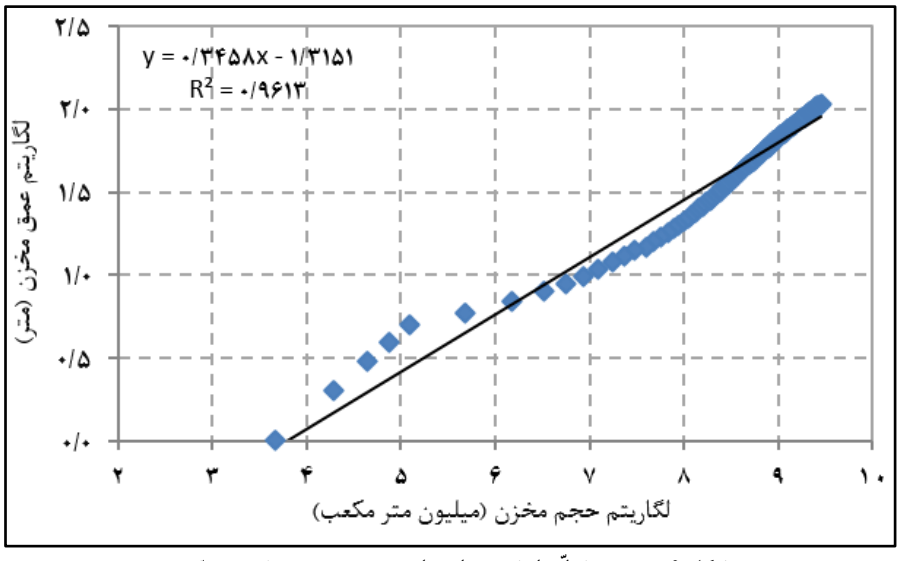
شکل ۵. تغییرات تابع هدف تا ۲۰۰۰ تکرار به ازای اندازهٔ جمعیّت‌های مختلف

جدول ۳. مقایسهٔ عملکرد الگوریتم رقابت استعماری در جمعیّت‌های اوّلیّهٔ مختلف

تعداد جمعیّت	شمارهٔ تکرار همگرایی	زمان همگرایی (دقیقه)	کمترین مقدار تابع هدف (بهترین جواب)
۲۵	عدم همگرایی	عدم همگرایی	۷/۶۸۰۱
۵۰	۱۶۹۳	۱۳/۳۸	۷/۰۰۳۹
۷۵	۱۳۱۰	۲۳/۹۳	۷/۰۰۳۶

عکس شیب بهترین خطّ نمایشی ترسیمی عمق مخزن برحسب ظرفیت مخزن، برای استفاده در روش‌های برلند و میلر (۱۹۵۸)، لارا (۱۹۶۲) و یانگ (۱۹۹۶)، برابر با ۲/۹ به دست آمد (شکل ۶)؛ لذا مخزن سدّ دز در این روش‌ها از نوع تیپ ۲ در نظر گرفته شد.

در این پژوهش در نهایت متغیّرهای تصمیم بهینهٔ ارائه‌شده توسّط این الگوریتم در حالت انتخاب جمعیّت اوّلیّهٔ ۵۰، به عنوان پارامترهای بهینهٔ روش کاهش سطح مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر پارامترهای بهینهٔ به دست آمده توسّط الگوریتم بهینه‌ساز و مقادیر پیشنهادی آنها توسّط سایر روش‌های معمول (برای مخزن تیپ ۲) نشان داده شده است (جدول ۴).



شکل ۶. بهترین خطّ برازش بر داده‌های عمق – حجم مخزن سدّ دز

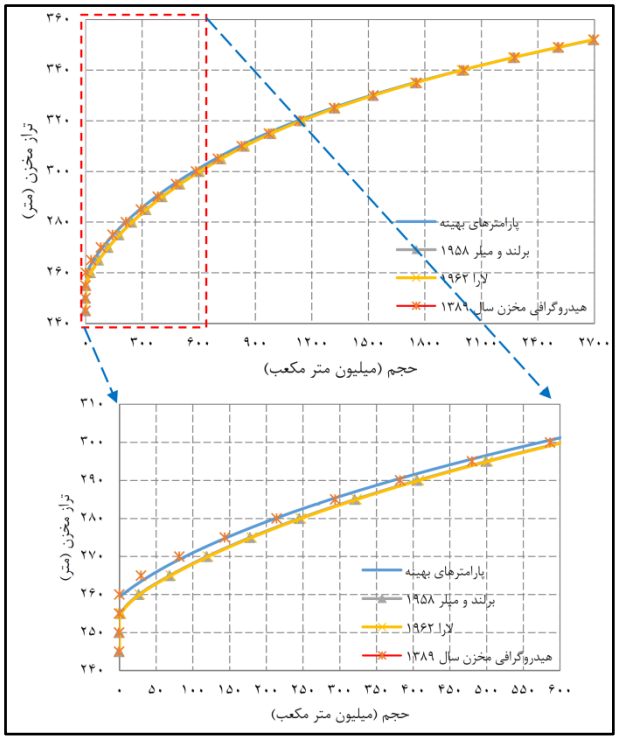
همان‌طور که مشخّص است پارامترهای پیشنهادی توسّط الگوریتم رقابت استعماری با پارامترهای توصیه‌شده برای مخزن تیپ ۲ که توسّط برلند و میلر (۱۹۵۸) و لارا (۱۹۶۲) طبق جدول ۴ پیشنهاد شده، متفاوت است. با اعمال پارامترهای بهینه در معادلات روش کاهش سطح، حجم مخزن در تراز‌های مختلف توسّط این روش برای سال ۱۳۸۹ تخمین زده شد. منحنی حجم - ارتفاع پیش‌بینی‌شده در این سال، بر اساس پارامترهای بهینه و روش‌های یادشده با نتایج حاصل از هیدروگرافی مخزن سد مقایسه شده است (شکل ۷).

شکل یادشده، همخوانی خوبی را بین منحنی پیش‌بینی‌شده بر اساس پارامترهای بهینهٔ روش کاهش سطح با منحنی واقعی حجم ارتفاع مخزن (طبق هیدروگرافی مخزن) نسبت به سایر روش‌ها نشان می‌دهد. روش‌های برلند و میلر (۱۹۵۸) و لارا (۱۹۶۲) به‌ویژه در تراز های پایین‌تر (تراز کمتر از ۳۰۰ متر)، حجم رسوب کمتری تخمین می‌زنند؛ لذا در این ترازها، حجم مخزن را بیشتر از واقعیّت پیش‌بینی می‌کنند. مقدار ریشهٔ میانگین مربعات خطا بین دو منحنی پیش‌بینی و مشاهداتی (هیدروگرافی مخزن در سال ۱۳۸۹)، به ترتیب در روش‌های استفاده از پارامترهای بهینه، برلند و میلر (۱۹۵۸) و لارا (۱۹۶۲) به ترتیب ۷، ۳۹۶ و ۴۶۱ میلیون متر مکعب محاسبه شد که روش پارامترهای بهینه از این نظر دارای کمترین میزان خطاست.

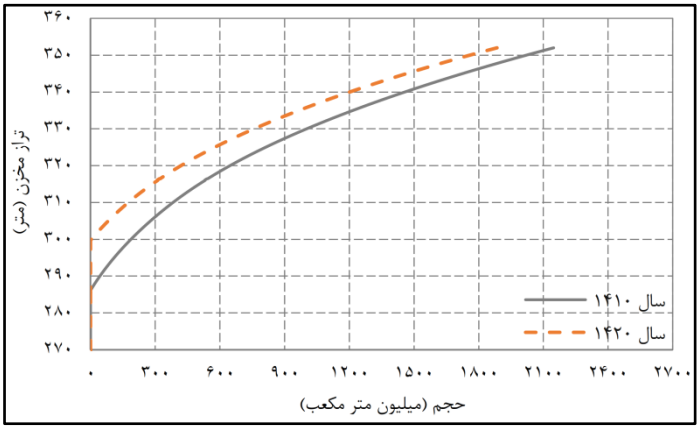
در نهایت با اعمال پارامترهای بهینهٔ مستخرج از الگوریتم رقابت استعماری در روش کاهش سطح، روند رسوب‌گذاری (منحنی حجم - ارتفاع) مخزن سدّ دز، برای سال‌های آینده (۱۴۱۰ و ۱۴۲۰) پیش‌بینی شد (شکل ۸).

جدول ۴. مقدار بهینهٔ پارامترهای روش کاهش سطح برای مخزن تیپ ۲ بر اساس الگوریتم رقابت استعماری و سایر روش‌های معمول

روش	n	m	c
الگوریتم رقابت استعماری	۰/۶۶۶	-۰/۰۰۰۰۴۱	۰/۳۰۴
برلند و میلر (۱۹۵۸)	۰/۴	۰/۵	۲/۳۲۴
لارا (۱۹۶۲) و یانگ (۱۹۹۶)	۰/۴۱	۰/۵۷	۲/۴۸۷



شکل ۷. نمودار حجم - ارتفاع مخزن پیش‌بینی‌شده و واقعی در سال ۱۳۸۹



شکل ۸. منحنی حجم - ارتفاع سدّ دز در سال‌های ۱۴۱۰ و ۱۴۲۰

با توجّه به شکل ۸، به ترتیب در سال‌های ۱۴۱۰ و ۱۴۲۰، به میزان ۷۰۹/۵ و ۹۷۲ میلیون متر مکعب از ظرفیت مفید مخزن کم خواهد شد. با توجّه به لزوم تأمین آب اراضی پایین‌دست سد، با وسعت ۱۲۵ هزار هکتار در این سال‌ها، این وضعیّت، چالش بزرگی پیش روی متخصّصین منابع آب در منطقه ایجاد خواهد کرد.

بحث

الگوریتم رقابت استعماری به عنوان یکی از روش‌های فراکاوشی قابلیّت بالایی در پیش‌بینی منحنی حجم - ارتفاع مخازن نسبت به روش‌های معمول دارد. این امر، به‌ویژه در مورد مخازن بزرگی مانند سدّ دز اهمّیّت ویژه‌ای دارد. در چنین مخازنی به دلیل گستردگی مخزن (مساحت دریاچهٔ آن در تراز حداکثر بیش از ۶۵ کیلومتر مربع است) و تغییرات زیاد حجم و سطح آن در ترازهای مختلف، پیش‌بینی روند رسوب‌گذاری و کاهش حجم آن با استفاده از روش‌های معمول و بر اساس ضرایب پیشنهادی در این روش‌ها با خطای قابل توجّهی همراه است. منحنی‌های حجم – سطح - ارتفاع سد، اهمّیّت زیادی در برنامه‌ریزی منابع آب دارند. به خاطر نوسانات تراز آب مخزن در ماه‌های مختلف، میزان تخمین حجم آب مخزن در هر یک از این ترازها تأثیر مستقیمی بر تخصیص آب به مصارف پایین‌دست و منحنی فرمان سد دارد.

همان‌طور که نتایج این پژوهش نشان داد، روش کاهش سطح بر اساس ضرایب پیشنهادی برلند و میلر (۱۹۵۸) و لارا (۱۹۶۲) از مجموع رسوبات انباشته‌شده در انتهای دوره به عنوان تنها شاخص ارزیابی روش استفاده می‌کند؛ لذا در این روش‌ها، پس از انتخاب تیپ مخزن، اگر مقدار حجم تجمّعی رسوب تخمین‌زده‌شده با مقدار کلّ رسوب ورودی به مخزن در طول دورهٔ مورد نظر برابر باشد، یا کمترین اختلاف را داشته باشد، محاسبات متوقّف می‌شود؛ بنابراین، در این روش‌ها اگر حجم مخزن پس از رسوب‌گذاری در تراز حداکثر به درستی تخمین زده شود، این امر برای تأیید روش کافی است و مدل درستی حجم تخمینی مخزن در سایر ترازها را بررسی نمی‌کند. اختلاف حجم مخزن تخمینی در تراز حداکثر در این روش‌ها به ترتیب ۴۶۸ و ۴۷۰ هزار متر مکعب (کمتر از ۰/۱٪) به دست آمد؛ امّا با در نظر گرفتن تمامی ترازهای مخزن و مقایسهٔ منحنی حجم - ارتفاع این روش‌ها و منحنی حجم - ارتفاع حاصل از هیدروگرافی مخزن، این اختلاف به ترتیب ۳۹۶ و ۴۶۱ میلیون متر مکعب (۱۴/۷ و ۱۷٪) است که رقم قابل توجّهی است؛ اما با این حال، روش برلند و میلر نسبت به روش لارا دارای خطای کمتری بود. موسوی و همکاران (۲۰۰۶) و هوشمندزاده و همکاران (۱۳۸۷) نیز در پژوهش‌های خود به ترتیب در سدهای زاینده‌رود و کرخه تأیید کردند که روش برلند و میلر نسبت به روش‌های معمول دیگر دقّت بیشتری دارد.

در روش بهینه‌سازی ضرایب با الگوریتم استعماری، اختلاف حجم مخزن تخمینی در تراز حداکثر با نتایج

هیدروگرافی مخزن بسیار ناچیز و در حدود صفر به دست آمد. با در نظر گرفتن تمامی ترازهای مخزن، این اختلاف در حدود ۷ میلیون متر مکعب یعنی ۰/۲۵٪ است که نسبت به روش‌های معمول مورد استفاده، رقم بسیار پایینی است؛ بنابراین، انتخاب ضرایب محاسباتی و تیپ مخزن بر اساس ضرایب پیشنهادی این پژوهشگران که بر اساس تحقیقات انجام‌شده در مخازن سدهای دیگر صورت گرفته و همچنین واسنجی روش تنها بر اساس حجم رسوب انباشته‌شده در انتهای دوره، نتایج رضایت‌بخشی برای سایر سدها به دنبال ندارد. استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند رقابت استعماری برای استخراج ضرایب بهینه و همچنین به کار بردن تابع هدف بر اساس میزان خطا در تمامی ترازهای سد، میزان خطای محاسباتی را به مقدار قابل توجّهی کاهش می‌دهد. عمادی و همکاران (۲۰۱۲) و عمادی و کاکویی (۲۰۱۴) نیز در استفاده از الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید و تکامل تصادفی جوامع برای بهینه‌سازی روش کاهش سطح در مخزن سدّ کرج نتایج رضایت‌بخشی را با درصد خطای حدود ۱٪ به دست آوردند. این در حالی است که استفاده از الگوریتم رقابت استعماری در سدّ دز با حجم ذخیرهٔ حدود ۱۳ برابر سدّ کرج با درصد خطای کمتری (حدود ۰/۲۵٪) همراه بود؛ لذا استفاده از این تکنیک، در تمامی سدها به‌ویژه سدهای با مخازن بزرگ و استراتژیک مانند سدّ دز، به دلیل تأثیر انکارناپذیر مدیریت درست آنها بر پیشرفت و توسعهٔ مناطق تحت پوشش خود، به شدّت پیشنهاد می‌گردد.

نتیجه‌گیری

منحنی‌های حجم – سطح - ارتفاع سدها یکی از مهم‌ترین ابزارها در برنامه‌ریزی منابع آب و مدیریت مخزن است. با گذشت زمان و انباشت رسوبات در پشت مخزن سد، حجم و همچنین عمر مفید مخزن کاسته شده و این منحنی‌ها نیز نیاز به اصلاح خواهند داشت. روش‌های معمول برای اصلاح این منحنی‌ها پس از رسوب‌گذاری مخزن بر اساس شرایط و آمار و اطّلاعات ثبت‌شده در مخازن خارج کشور توسعه یافته‌اند و استفاده از همان روش‌ها در مورد سدهای داخل کشور بدون بهینه‌سازی ضرایب خالی از اشکال نبوده و گاهی با خطای زیاد همراه است؛ از این رو، واسنجی روش کاهش سطح و استخراج پارامترهای بهینهٔ این روش، اهمّیّت ویژه‌ای در پیش‌بینی روند رسوب‌گذاری در مخازن داشته و این امر خطای پیش‌بینی را به شدّت کاهش می‌دهد. در این راستا، استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری نتایج چشمگیری به دنبال داشت. این الگوریتم، با استخراج مقادیر بهینهٔ پارامترهای روش کاهش سطح، باعث شد همخوانی بیشتری بین مقادیر حجم برآوردی و واقعی مخزن در ترازهای مختلف سدّ دز ایجاد شود. نتایج نشان داد مقدار خطای پیش‌بینی در حدود ۷ میلیون متر مکعب است که با توجّه به حجم کلّ مخزن، بسیار پایین است. بر این اساس، مدل تهیّه‌شده بر اساس پارامترهای بهینهٔ روش کاهش سطح و با وارد نمودن اطّلاعات مربوط به هیدروگرافی جدید مخزن برای پیش‌بینی روند رسوب‌گذاری در سال‌های آینده (۱۴۱۰ و ۱۴۲۰) به کار برده شد. نتایج نشان داد در این سال‌ها به ترتیب حدود ۲۶ و ۳۶٪ از ظرفیت مفید مخزن کم خواهد شد. این امر، با توجّه به اهمّیّت اطّلاع از تغییرات حجم مفید مخزن در سال‌های آینده، نقش بسزایی در مدیریت منابع آب منطقه در این سال‌ها خواهد داشت؛ لذا با توجّه به نتایج رضایت‌بخش این پژوهش در خصوص ترکیب روش بهینه‌سازی با روش کاهش سطح، استفاده از این مدل در سایر سدهای مهم و استراتژیک کشور که در آنها هیدروگرافی مخزن انجام شده است، پیشنهاد می‌گردد.

منابع

رضایی، زهرا (۱۳۸۸) **ارائهٔ الگوریتم فراابتکاری کارا برای حلّ مدل کنترل موجودی چند سطح**، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، استاد راهنما: داوود طالبی، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

محمدزاده هابیلی، جهانشیر؛ موسوی، فرهاد (۱۳۸۷) بهبود روش تعیین ضریب شکل مخازن سدها و بررسی تغییرات آن در اثر رسوب‌گذاری، **آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)**، ۲۲(۲)، صص. ۴۱۶-۴۰۷.

موسوی، سید فرهاد؛ حیدرپور، منوچهر؛ شعبانلو، سعید (۱۳۸۵) بررسی رسوب در مخزن سدّ زاینده‌رود با استفاده از مدل‌های تجربی افزایش و کاهش سطح، **آب و فاضلاب**، ۲۲ (۵۷)، صص. ۸۲-۷۶.

هوشمندزاده، محمد؛ محمودیان شوشتری، محمد؛ کاشفی‌پور، محمود؛ تقوی‌فر، امین (۱۳۸۷) مقایسهٔ مدل کامپیوتری GSTAR-3 روش‌های تجربی افزایش و کاهش سطح در برآورد حجم و توزیع رسوب در مخزن سدّ کرخه، **سوّمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران**، دانشگاه تبریز، صص. ۳۱۳.

Annandale, G. W. (1984) Predicting the Distribution of Deposited Sediment in Southern African Reservoir, **Nat Hydrol Symp**, 144, pp. 549-557.

Atashpaz Gargari, E., Lucas, C. (2007) Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition, **In Evolutionary computation, 2007, CEC 2007, IEEE Congress on**, pp. 4661-4667.

Blanton, J. O., Ferrari, R. L. (1992) **Lake Texana 1991 Sedimentation Survey**, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado.

Borland, W. M., Miller, C. R. (1958) Distribution of Sedimentation in Large Reservoirs, **Hydraulics Division**, ASCE, 84 (HY2), pp. 1-18.

Emadi, A. R., Kakouei, S. (2014) Determination of Optimal Parameters of Empirical Area Reduction Method in Karaj Reservoir Dam using SCE, **Water & Soil Conservation**, 21 (4), pp. 179-195.

Emadi, A. R., Khademi, M., Mohamadiha, A. (2012) Application of Simulated Annealing Algorithm in Calibration of Area Reduction Method in Sediment Distribution of Dams Reservoir (Case Study: Karaj Dam), **Water and Soil Conservation**, 4, pp. 173-188.

Engelbrecht, A. P. (2002) **Computational Intelligence an Introduction**, Wiley, New York.

Gharaghezlou, M., Masoudian, M., Fendereski, R. (2014) Calibrating the Experimental Area Reduction Method in Assessing the Distribution of Sediments in Droodzan Reservoir Dam in Iran, **Civil Engineering and Urbanism**, pp. 54-58.

Karami, S., Shokouhi, S. B. (2012) Optimal Hierarchical Remote Sensing Image Clustering Using Imperialist Competitive Algorithm, **Recent Advances in Computer Science and Information Engineering**, pp. 555-561.

Lara, J. M. (1962) **Revision of the Procedure to Compute Sediment Distribution in Large Reservoirs**, US Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.

Morris, G. L., Fan, J. (1998) **Reservoir Sedimentation Handbook**, McGraw-Hill Book Co, New York.

Shafiee, A. H., Safamehr, M. (2011) Study of Sediments Water Resources System of Zayanderud Dam Through Area Increment and Area Reduction Methods, **Procedia Earth and Planetary Science,** 4, pp. 29-38.

Strand, R. I., Pemberton, E. L. (1982) **Reservoir sedimentation**, US Bureau of Reclamation, Denver.

Tebi, F. Z., Dridi, H. Morris, G. L. (2012) Optimization of Cumulative Trapped Sediment Curve for an Arid Zone Reservoir: Foum El Kherza (Biskra, Algeria), **Hydrological Sciences Journal**, 57 (7), pp. 1368-1377.

Verstraeten, G., Poesen, J., de Vente, J., Koninckx, X. (2003) Sediment Yield Variability in Spain: A Quantitative and Semiqualitative Analysis Using Reservoir Sedimentation Rates, **Geomorphology**, 50 (4), pp. 327-348.

Wu, W. (2007) **Computational River Dynamics**, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi, MS, USA.

Yang, C. T. (1996) **Sediment Transport: Theory and Practice**, McGraw-Hill, New York.