

بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخزن سد با در نظر گرفتن رسوب‌زدایی و تأمین نیاز پایین دست به کمک الگوریتم رقابت استعماری

سعید اشرف واقفی^۱
سیدجمشید موسوی^{۲*}
بنفشه زهرایی^۳

چکیده

بیشتر مطالعات رسوب‌زدایی از مخازن سدها از یک سو، به طور مستقل و جداگانه از مسئله بهره‌برداری از مخزن به موضوع می‌پردازند و از طرف دیگر، مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از سدهای مخزنی نیز تاکنون و به طور عمده با تأکید بر اهداف تأمین نیازهای آبی، انرژی، سیلاب و زیست‌محیطی و بدون توجه به مسئله خروج رسوبات ورودی به مخزن توسعه یافته‌اند که این مسئله منجر به ناهماهنگی بین تصمیم‌های مرتبط با رسوب‌زدایی و سایر اهداف بهره‌برداری از مخازن سدها می‌شود. در این تحقیق براساس یک دیدگاه نوین تلفیقی، یک مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد ارائه شده است که در آن هم‌زمان، دو هدف تأمین نیاز پایین دست و خروج رسوبات از مخزن پیگیری می‌شود. در تدوین تابع هدف خروج رسوبات از مخزن از روش برنامه‌ریزی عملیات فلاشینگ استفاده شده است و مقدار خروجی سالانه رسوبات از مخزن، از این روش برآورد گردیده است. با وزن دادن به دو تابع هدف تأمین نیاز و خروج رسوبات، عملکرد مدل بهینه‌سازی در اهمیت دادن به دو معیار در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل مدل بهینه‌سازی غیرخطی به دست آمده، از الگوریتم رقابت استعماری (Imperialist Competitive Algorithm) استفاده شده است. با در نظر گرفتن مطالعه موردی سد سفیدرود، در سناریوهای مختلف عملکرد مدل بهینه‌سازی بررسی شده است. بر این اساس و با مقایسه نتایج مدل بهینه‌سازی با نتایج واقعی بهره‌برداری از مخزن سد سفیدرود در یک دوره پنج ساله، راهکارهای اجرایی مناسب برای عملیات آینده فلاشینگ در مخزن سد مذکور برای دست‌یابی به راندمان رسوب‌زدایی بالاتر و تأمین بهتر نیازهای پایین دست ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی

رسوب‌زدایی از مخزن سد، فلاشینگ، مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن، الگوریتم رقابت استعماری، سد سفیدرود.

۱. دانشجوی دکتری دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

* Jmosavi@aut.ac.ir

۲. دانشیار دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۳. دانشیار دانشکده عمران پردیس فنی دانشگاه تهران.

مقدمه

ورود رسوبات به دریاچه سدها در طول سالیان متمادی و رسوب گذاری در داخل مخازن آنها پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر است. برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سد و تخصیص آب برای موارد گوناگون؛ نظیر: کشاورزی، صنعت و شرب با توجه به کاهش حجم ذخیره مخزن سدها دچار مشکل می‌شود. تقریباً ۱٪ از حجم ذخیره مخازن جهان سالانه به علت رسوب گذاری کاهش می‌یابد. بنابراین رسوب‌زدایی سدها مسئله مهمی در جهت نگهداری آنهاست. در این راستا، راهکارهای متفاوتی برای رسوب‌زدایی و هم‌چنین کاهش سرعت رسوب گذاری و به دنبال آن، پر شدن مخازن از آب وجود دارد که استفاده از آنها هزینه‌های بسیار سنگینی در بر دارد. از این رو، تخلیه مخزن به وسیله فلاشینگ (عملیات شاس) را می‌توان از جمله روش‌های ساده و ارزان رسوب‌زدایی مخازن سدها به شمار آورد. شاس یا فلاشینگ به عملیات تخلیه رسوبات با استفاده از فشار آب روی دریچه‌های عمقی و باز نمودن آنها گفته می‌شود. این عمل بر رسوبات قسمت‌های دورتر مخزن نیز تأثیرگذار است. برای انجام عملیات فلاشینگ محدودیت‌هایی وجود دارد که باعث عدم استفاده گسترده آن می‌شود. محدودیت‌هایی مانند حجم زیاد آب مورد نیاز، عدم وجود دریچه‌های مناسب در ساختار برخی از سدها و لزوم پایین آوردن آب مخزن در دوره‌های مهم که با تأمین نیاز پایین دست در تضاد می‌باشد.

رسوب‌زدایی از مخازن سدها به روش‌های گوناگونی

صورت می‌گیرد. در برخی موارد با وجود تبعات منفی زیست‌محیطی، عملیات فلاشینگ به عنوان تنها گزینه مؤثر شناسایی شده است. به منظور تخلیه رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد، تخلیه ناقص^۱ و یا تخلیه کامل^۲ مخزن در

زمان‌های مناسب با در نظر گرفتن جریان‌های ورودی و نیازهای پایین دست، به عملیات فلاشینگ معروف است. راندمان عملیات فلاشینگ در رسوب‌زدایی مخزن به عوامل مختلفی وابسته است. برخی از این عوامل شامل شیب مخزن، ظرفیت و موقعیت تخلیه‌کننده‌ها، میزان جریان‌های ورودی و خروجی و طول زمان عملیات، دامنه تغییرات تراز آب مخزن و روند این تغییرات در طول عملیات، درجه تحکیم رسوبات نهشته شده در مخزن و مشخصات رسوبات ورودی می‌باشد.

معیارهای پیشنهادی برای فلاشینگ موفق سدها تا پیش از سال ۱۹۹۶ بیشتر یا کیفی بوده است و یا برای بعضی از سدها با وجود اینکه عملیات فلاشینگ در آنها موفقیت آمیز بوده است، نتایج قابل قبولی به دست نمی‌داد. (پیت و تامسون^۳ ۱۹۸۴، آناندال^۴ ۱۹۸۷، محمود^۵ ۱۹۸۷، اسلاف^۶ ۱۹۹۱) در سال ۱۹۹۶ مؤسسه تحقیقاتی والینگفورد (اتکینسون^۷ ۱۹۹۶) در یک گزارش جامع به ارائه معیارهایی برای ارزیابی موفقیت عملیات فلاشینگ اشاره نمود. در این گزارش، شش معیار توسط اتکینسون معرفی شد که عبارتند از:

۱. نسبت تعادل رسوب (SBR^A);
۲. نسبت ظرفیت دراز مدت مخزن ($LTCR^B$);
۳. نسبت مقدار کاهش تراز آب حین فلاشینگ (DDR^{10});

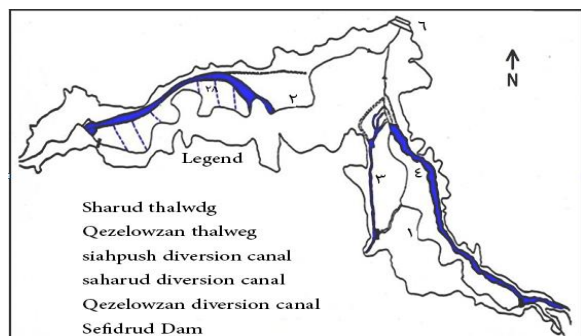
2. Complete Drawdown
3. Pitt and Thompson 1984
4. Annandale 1987
5. Mahmood 1987
6. Sloff 1991
7. Atkinson 1996
8. Sediment Balance Ratio
9. Long Term Capacity Ratio
10. Draw Down Ratio

1. Partial Drawdown

هدف تأمین نیاز پایین دست در نظر گرفته شده است. به منظور تدوین تابع هدف خروج رسوبات از مخزن، از روش برنامه‌ریزی عملیات فلاشینگ استفاده شده است. برای حل مدل بهینه‌سازی از مدل الگوریتم رقابت استعماری (ICA^{10}) استفاده گردیده است. هم‌چنین ساختار و فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی شامل توابع هدف و محدودیت‌ها در بخش‌های بعد ارائه شده است.

مطالعه موردی

سد سفیدرود در پایین دست نقطه تلاقی دو رودخانه قزل‌اوزن و شاهرود در نزدیکی شهر منجیل، حدود ۲۵۰ کیلومتری شمال غربی تهران واقع شده است. (شکل ۱) به منظور آبیاری دشت گیلان و تولید برق، بهره‌برداری از این سد در اردیبهشت ۱۳۴۱ آغاز شده است. میانگین درازمدت سالیانه جریان ورودی به مخزن، معادل ۴۹۰۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. دو سرریز تخلیه نیلوفری به ظرفیت تخلیه ۳۰۰۰ مترمکعب در ثانیه، دو سرریز نیمه‌عمقی کمکی با ظرفیت کل ۲۰۰۰ مترمکعب در ثانیه، پنج دهنه آبگیر نیروگاه با ظرفیت تخلیه ۱۶۰ مترمکعب در ثانیه و پنج مجرای خروجی کف (گالری تحتانی) با ظرفیت ۹۸۰ مترمکعب در ثانیه در سد وجود دارد.



شکل (۱): موقعیت سد سفیدرود و رودخانه‌های منتهی به آن

در شکل (۲) نمودار تغییرات حجم مخزن در تراز نرمال در طول دوره بهره‌برداری ارائه شده است. همان‌گونه که در این

۴. نسبت عرض کانال فلاشینگ (FWR^1);

۵. نسبت تعادل رسوب برای افت کامل تراز آب (SBR_4);

۶. نسبت عرض بالایی (TWR^2).

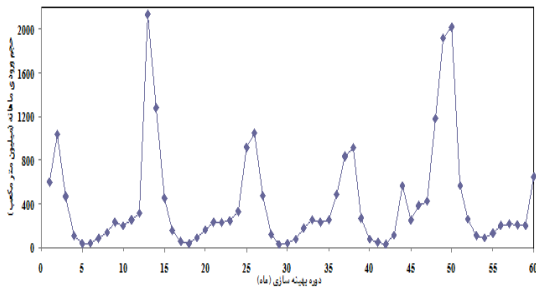
کواشیما و همکاران^۳ (۲۰۰۳) یک مدل کاربردی را به نام RESCON^۴ در رابطه با نگهداری مخازن سدها ارائه دادند. آنها در این مدل از شش معیار مؤسسه والینگفورد در قسمت فلاشینگ سد استفاده کردند. مدل آنها در نظر گرفتن مسائل اقتصادی به ارائه راهکاری برای احیای حجم مفید مخازن می‌پردازد. در تحقیقات قبلی، ترکیب توابع هدف مختلف برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن، مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات انجام شده توسط استدینجر و همکاران^۵ (۱۹۸۴) رایپور و موهان^۶ (۱۹۹۲) فونتانو و بالتر^۷ (۲۰۰۶) چن و همکاران^۸ (۲۰۰۶) و شی یوای و همکاران^۹ (۲۰۰۴) از نمونه مواردی است که در آنها توابع هدف تأمین آب، تولید برق و مهار سیلاب در مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن در نظر گرفته شده است.

مرور تحقیقات گذشته در زمینه رسوب‌زدایی مخازن سدها، بیانگر این است که با در نظر گرفتن سایر اهداف بهره‌برداری در انجام عملیات رسوب‌زدایی، بهینه‌سازی مقادیر جریان‌های خروجی از مخزن، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در سدهایی با حجم زیاد رسوبات ورودی، علاوه بر برآورده شدن اهداف بهره‌برداری از مخازن، نظیر تأمین نیاز آبی پایین دست، توجه به مسئله تخلیه رسوبات و احیای حجم مفید مخزن نیز ضروری به نظر می‌رسد.

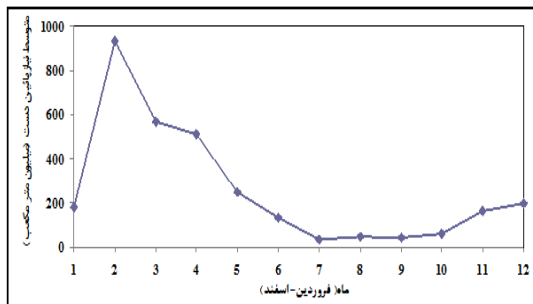
در این مقاله در تدوین مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن تابع هدف خروج رسوبات از مخزن سد در کنار تابع

1. Flushing Width Ratio
2. Top Width Ratio
3. Kawashima et al. 2003
4. Reservoir Conservation
5. Stedinger et al. 1984
6. Mohan and Raipure 1992
7. Fontane and Baltar 2006
8. Chen et al. 2006
9. Shi-Yui et al. 2004

۸۰-۷۹ تا ۸۵-۸۴) استفاده شده است. مطابق شکل (۴) میانگین نیاز پایین دست برای سال های آبی (۸۵-۸۴) و (۸۴-۸۵) در مدل بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۳): سری زمانی دبی ماهانه ورودی به سد سفیدرود (شرکت سهامی آب منطقه ای گیلان)



شکل (۴): میانگین نیاز پایین دست برای سال های آبی (۸۵-۸۴) و (۸۴-۸۵) (شرکت سهامی آب منطقه ای گیلان)

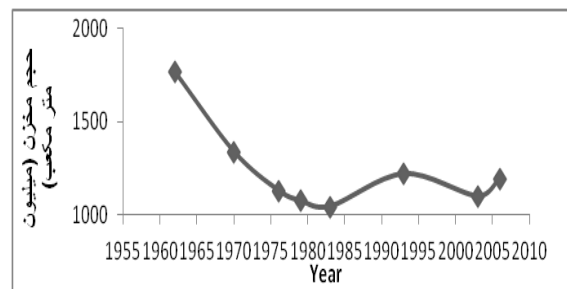
مواد و روش ها

الف. الگوریتم رقابت استعماری

منظور از بهینه سازی در اینجا، تعیین مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم برای حداقل یا حداکثر کردن تابع هدف است. در سال های اخیر، الگوریتم های فراکوشی با پیشرفت چشمگیر در مسایل مشکل و پیچیده بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته اند که از آن جمله می توان به الگوریتم نورد شبیه سازی شده^۱ (SA)، الگوریتم ژنتیک^۲ (GA)،

شکل دیده می شود، حجم اولیه مخزن ۱۷۶۰ میلیون مترمکعب است که بعد از ۱۸ سال بهره برداری از آن، این حجم به ۱۰۴۰ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. با انجام عملیات رسوب زدایی، حجم مخزن افزایش و تا حجم ۱۲۴۴ میلیون مترمکعب رسانده شده است. تغییر حجم مخزن از سال ۶۹ (۱۹۹۰) بسیار اندک بوده است. این تغییرات حاکی از این است که در دوره های اولیه فلاشینگ، این عملیات تأثیر بسزایی در احیای مخزن داشته است، اما در سال های بعد تقریباً رسوبات سالیانه ورودی، خارج شده است.

سد سفیدرود یک حلقه مهم در زنجیره اقتصادی استان گیلان است که به طور شایانی با مسئله رسوب گذاری گسترده، مواجه است. متوسط سالیانه رسوبات ورودی به مخزن سد ۴۶ میلیون تن است که مقدار حدود ۳۸ میلیون تن از شاخه قزل اوزن و ۷/۹ میلیون تن از شاخه شاهرود وارد مخزن می شود. توزیع ماهانه آب و رسوبات وارد شده به مخزن نشان می دهد که متجاوز از ۵۰ درصد جریان های ورودی تنها در ماه های فروردین و اردیبهشت وارد مخزن می گردد و متجاوز از ۶۰ درصد رسوبات وارد شده به مخزن در ماه های فوق بوده است. (گزارش رسوب زدایی از سد سفیدرود- آب منطقه ای گیلان، ۱۳۶۷ و ۱۳۸۵)



شکل (۲): نمودار تغییرات حجم مخزن سفیدرود در طول دوره بهره برداری (شرکت سهامی آب منطقه ای گیلان)

به منظور بهینه سازی بهره برداری از سد سفیدرود، مطابق شکل (۳) از سری زمانی ورودی ماهانه به مخزن و نیازهای آبی پایین دست در یک دوره ۵ ساله (از سال آبی

1. Simulated Annealing
2. Genetic Algorithm

هر امپراطوری نیز برای افزایش قدرت خود باید مستعمرات خود را گسترش دهد. با گذشت زمان، مستعمرات از لحاظ قدرت تا جایی به امپراطوری‌ها نزدیک خواهند شد که نوعی هم‌گرایی پدید می‌آید. با توجه به پدیدار شدن هم‌گرایی مستعمرات به کشور امپریالیست، حد نهایی رقابت استعماری زمانی است که یک امپراطوری واحد وجود داشته باشد. در ادامه، بخش‌های مختلف الگوریتم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شکل‌دهی امپراطوری اولیه

در بهینه‌سازی، هدف یافتن یک جواب بهینه بر حسب متغیرهای مسئله است. یک آرایه از متغیرهای مسئله را که باید بهینه شوند، ایجاد می‌کنیم. در الگوریتم ژنتیک، این آرایه کروموزوم^۶ نامیده می‌شود. در اینجا نیز آرایه مورد نظر، یک کشور نامیده می‌شود. در یک مسئله بهینه‌سازی N_{var} بعدی، یک کشور یک آرایه $1 \times N_{var}$ است. این آرایه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Country} = [P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N_{var}}] \quad (1)$$

مقادیر متغیرها در یک کشور، به صورت اعداد اعشاری نمایش داده می‌شود.

هزینه یک کشور با ارزیابی تابع f در متغیرهای

$$[P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N_{var}}] \text{ یافته می‌شود. بنابراین:}$$

$$\text{Cost}_i = f(\text{country}_i) = f(P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N_{var}}) \quad (2)$$

برای شروع الگوریتم، تعداد $N_{country}$ کشور اولیه را ایجاد می‌کنیم. N_{imp} تا، از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) را به عنوان امپریالیست انتخاب کنیم. باقیمانده N_{col} تا، از کشورها، مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هر کدام به یک امپراطوری تعلق دارد. برای تقسیم مستعمرات اولیه بین

6. chromosome

جستجوی ممنوعه^۱ (TS) و بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها^۲ (ACO) اشاره کرد.

الگوریتم رقابت استعماری که بر پایه رشد و تکامل امپراطوری‌ها بنا شده است، اولین بار توسط آتاش‌پز^۳ (۲۰۰۸) مطرح شد. این الگوریتم همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی شروع می‌گردد که هر کدام از آنها یک «کشور» نامیده می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت (معادل نخبه‌ها در الگوریتم ژنتیک) به عنوان امپریالیست^۴ انتخاب می‌شوند. باقیمانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره^۵ در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران به میزان قدرتشان، این مستعمرات را با یک روند ویژه (در ادامه خواهد آمد) به سمت خود می‌کشند. قدرت تام هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل‌دهنده آن؛ یعنی کشور امپریالیست (به عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور امپریالیست، به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن مدل شده است. با شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آنها شروع می‌شود. هر امپراطوری که در رقابت استعماری، عملکرد موفق‌تری نداشته باشد و نتواند بر قدرت خود افزوده یا از کاهش نفوذ خود جلوگیری کند، از صحنه رقابت استعماری حذف خواهد شد. بنابراین، بقای یک امپراطوری به میزان قدرتی که در جذب مستعمرات امپراطوری‌های رقیب و به سیطره در آوردن آنها دارد، وابسته است. در نتیجه، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراطوری‌های بزرگتر افزوده شده و امپراطوری‌های ضعیف‌تر، حذف خواهد شد.

1. Tabu Search
2. Ants Colony Organization
3. Atashpaz 2008
4. Imperialist
5. Colony

جابه‌جایی موقعیت مستعمره و امپریالیست

کشورهای استعمارگر برای افزایش نفوذ خود، ایجاد عمران در مستعمره‌ها را شروع می‌کنند. این بخش از فرایند استعمار در الگوریتم بهینه‌سازی به‌صورت حرکت مستعمرات به سمت کشور امپریالیست مدل شده است. (در قسمت دوم شکل ۴ این فرایند آمده است.) کشور مستعمره (Colony) به اندازه x واحد در جهت خط واصل مستعمره به استعمارگر (Imperialist) حرکت کرده و به موقعیت جدید (New Position of Colony) کشیده می‌شود. در این شکل، فاصله میان استعمارگر و مستعمره با d نشان داده شده است. x نیز عددی تصادفی با توزیع یکنواخت (یا هر توزیع مناسب دیگر) است؛ یعنی برای x داریم:

$$x \sim U(0, \beta \times d) \quad (6)$$

که در آن β عددی بزرگتر از یک و نزدیک به ۲ می‌باشد. یک انتخاب مناسب می‌تواند $\beta=2$ باشد. وجود ضریب $\beta > 1$ باعث می‌شود تا کشور مستعمره در حین حرکت به سمت کشور استعمارگر، از جهت‌های مختلف به آن نزدیک شود.

در حرکت مستعمرات به سمت استعمارگر، نیز مقدار کمی زاویه تصادفی به جهت حرکت مستعمره اضافه می‌کنیم. به‌این‌منظور، این بار به‌جای حرکت به اندازه x به سمت کشور استعمارگر و در جهت بردار واصل مستعمره به استعمارگر به همان میزان ولی با انحراف θ در مسیر به حرکت خود ادامه می‌دهیم. θ را به‌صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت درنظر می‌گیریم. هر توزیع دلخواه و متناسب دیگر نیز می‌تواند استفاده شود؛ پس:

$$\theta \sim U(-\gamma, \gamma) \quad (7)$$

در این رابطه، γ پارامتری دلخواه است که افزایش آن باعث افزایش جستجوی اطراف امپریالیست شده و کاهش آن نیز باعث می‌شود تا مستعمرات تا حد ممکن نزدیک به بردار واصل مستعمره به استعمارگر حرکت کنند. با درنظر

امپریالیست‌ها، به هر امپریالیست تعدادی از مستعمرات متناسب با قدرت آن را می‌دهیم. برای انجام این کار با داشتن هزینه همه امپریالیست‌ها، هزینه نرمالیزه آنها را به‌صورت زیر درنظر می‌گیریم:

$$C_n = c_n - \max\{c_i\} \quad (3)$$

C_n : هزینه امپریالیست n ام؛

$\max\{c_i\}$: بیشترین هزینه میان امپریالیست‌ها؛

C_n : هزینه نرمالیزه شده این امپریالیست.

هر امپریالیستی که دارای هزینه بیشتری باشد (امپریالیست ضعیف‌تر) دارای هزینه نرمالیزه کمتری خواهد بود. با داشتن هزینه نرمالیزه، قدرت نسبی نرمالیزه هر امپریالیست، به‌صورت زیر محاسبه شده و بر مبنای آن، کشورهای مستعمره بین امپریالیست‌ها تقسیم می‌شوند:

$$P_n = \left| \frac{c_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} c_i} \right| \quad (4)$$

از نگاه دیگر، قدرت نرمالیزه شده یک امپریالیست، نسبت مستعمراتی است که توسط آن امپریالیست اداره می‌شود. بنابراین تعداد اولیه مستعمرات یک امپریالیست برابر خواهد بود با:

$$N \cdot C_n = \text{round}\{p_n \cdot N_{col}\} \quad (5)$$

$N \cdot C_n$: تعداد اولیه مستعمرات یک امپراطوری؛

N_{col} : تعداد کل کشورهای مستعمره موجود در

جمعیت کشورهای اولیه؛

Round: تابعی است که نزدیک‌ترین عدد صحیح به یک

عدد اعشاری را می‌دهد.

با درنظرگرفتن $N \cdot C$ برای هر امپراطوری به این تعداد، از کشورهای مستعمره اولیه به‌صورت تصادفی انتخاب کرده و به امپریالیست n ام می‌دهیم. با داشتن حالت اولیه تمام امپراطوری‌ها، الگوریتم رقابت استعماری شروع می‌شود. روند تکامل در یک حلقه قرار دارد که تا برآورده شدن یک شرط توقف، ادامه می‌یابد.

گرفتن واحد رادیان برای γ عددی نزدیک به $\pi/4$ در بیشتر کاربردها انتخابی مناسب بوده است.

قدرت کل یک امپراطوری

قدرت یک امپراطوری برابر است با قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن. به این ترتیب برای هزینه کل یک امپراطوری داریم:

(۸)

$$T.C_n = \text{Cost}(\text{imperialist}_n) + \varepsilon \text{mean}\{\text{Cost}(\text{colonies of empire}_n)\}$$

که در آن:

$T.C_n$: هزینه کل امپراطوری n ام؛

ε : عددی مثبت در نظر گرفته شده بین صفر و یک و نزدیک به صفر.

کوچک در نظر گرفتن ε باعث می‌شود که هزینه کل یک امپراطوری تقریباً با هزینه حکومت مرکزی آن کشور امپریالیست برابر شود و افزایش ε نیز باعث افزایش تاثیر میزان هزینه مستعمرات یک امپراطوری در تعیین هزینه کل آن می‌شود. در حالت نوعی $\varepsilon = 0.1$ در بیشتر پیاده‌سازی، به جواب‌های مطلوبی منجر شده است.

رقابت استعماری

هر امپراطوری اگر علاوه بر اینکه نتواند قدرت خود بیفزاید، قدرت رقابت خود را نیز از دست دهد، در جریان رقابت‌های امپریالیستی حذف خواهد شد. فرایند حذف به مرور و تدریجی رخ می‌دهد؛ به این صورت که با گذشت زمان، امپراطوری‌های ضعیف مستعمرات خود را از دست می‌دهند و امپراطوری‌های قوی‌تر، این مستعمرات را تصاحب کرده و بر قدرت خویش می‌افزایند. برای مدل‌سازی این واقعیت فرض می‌شود که امپراطوری در حال حذف، ضعیف‌ترین امپراطوری موجود است.

به این ترتیب در تکرار الگوریتم، یک یا چند مستعمره ضعیف‌تر از ضعیف‌ترین امپراطوری انتخاب می‌شود و بین تمامی امپراطوری‌ها برای تصاحب آنها رقابتی ایجاد می‌گردد. مستعمرات مذکور، لزوماً توسط قوی‌ترین امپراطوری تصاحب نخواهند شد؛ بلکه امپراطوری‌های قوی‌تر احتمال تصاحب بیشتری دارند. برای مدل‌سازی رقابت میان امپراطوری‌ها برای تصاحب این مستعمرات ابتدا احتمال تصاحب هر امپراطوری (متناسب با قدرت آن امپراطوری) با در نظر گرفتن هزینه کل امپراطوری به صورت زیر محاسبه می‌شود. در ابتدا با توجه به هزینه کل امپراطوری، هزینه کل نرمالیزه شده آن مطابق زیر تعیین می‌گردد:

$$N.T.C_n = T.C_n - \max_i\{T.C_i\} \quad (۹)$$

$T.C_n$: هزینه کل امپراطوری n ام؛

$N.T.C_n$: هزینه کل نرمالیزه شده امپراطوری.

امپراطوری با $T.C_n$ کمتر $N.T.C_n$ بیشتری خواهد داشت. در حقیقت $T.C_n$ معادل هزینه کل یک امپراطوری و $N.T.C_n$ معادل قدرت کل آن است. امپراطوری با کمترین هزینه دارای بیشترین قدرت است. با داشتن هزینه کل نرمالیزه شده احتمال (قدرت) تصاحب مستعمره، رقابت توسط هر امپراطوری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{p_n} = \frac{N.T.C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.C_i} \quad (۱۰)$$

با معلوم بودن احتمال تصاحب هر امپراطوری، برای اینکه مستعمرات مذکور به صورت تصادفی ولی با احتمال وابسته به احتمال تصاحب هر امپراطوری، بین امپراطوری‌ها تقسیم شود، بردار P از روی مقادیر احتمال فوق به صورت زیر تشکیل می‌گردد:

$$P = [P_{p_1}, P_{p_2}, P_{p_3}, \dots, P_{p_{N_{imp}}}] \quad (۱۱)$$

سپس بردار تصادفی R ، هم بعد با بردار P ایجاد می‌شود. آرایه‌های این بردار، اعدادی تصادفی با توزیع

یکنواخت در بازه [۰ و ۱] می باشد.

$$R = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N_{imp}}] \quad (12)$$

سپس بردار D به صورت زیر تشکیل می شود:

$$(13)$$

$$D = P - R = [D_1, D_2, D_3, \dots, D_{N_{imp}}] = \left[\begin{matrix} P_{P_1} - r_1, & P_{P_2} - r_2, & P_{P_3} - r_3, & \dots, & P_{P_{N_{imp}}} - r_{N_{imp}} \end{matrix} \right]$$

با داشتن بردار D مستعمرات به امپراطوری ای داده خواهد شد که اندیس مربوط به آن در بردار D بزرگتر از بقیه باشد. امپراطوری ای که بیشترین احتمال تصاحب را داشته باشد با احتمال بیشتری اندیس مربوط به آن در بردار D بیشترین مقدار را خواهد داشت. با تصاحب مستعمره توسط یکی از امپراطوری ها، عملیات این مرحله از الگوریتم به پایان می رسد.

سقوط امپراطوری ضعیف

همان گونه که بیان شد در جریان رقابت های امپریالیستی، خواه ناخواه امپراطوری های ضعیف به تدریج سقوط کرده و امپراطوری های قوی تر مستعمرات آنها را تصاحب می کنند. برای سقوط یک امپراطوری شروط متفاوتی را می توان در نظر گرفت؛ در الگوریتم پیشنهادی، یک امپراطوری زمانی حذف شده تلقی می شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد.

هم گرایی

الگوریتم مورد نظر تا برآورده شدن یک شرط هم گرایی و یا تا اتمام تعداد کل تکرارها ادامه می یابد. پس از مدتی همه امپراطوری ها سقوط کرده و تنها یک امپراطوری باقی خواهد ماند و کشورها تحت کنترل این امپراطوری واحد قرار خواهند گرفت. در این دنیای ایدآل همه مستعمرات توسط یک امپراطوری واحد اداره می شوند و موقعیتها و هزینه های آنها برابر با موقعیت و هزینه کشور امپریالیست

است. در این شرایط تفاوتی میان مستعمرات وجود ندارد. این عدم تفاوت میان آنها و کشور امپریالیست را می توان به خوبی دید. در چنین موقعیتی رقابت امپریالیستی به پایان رسیده و الگوریتم متوقف می شود.

در جدول (۱) شبه کد مربوط به الگوریتم رقابت استعماری آورده شده است. شکل (۵) شمای کلی الگوریتم رقابت استعماری را نشان می دهد. (Hosseini Nasab, E 2010)

جدول (۱): شبه کد مربوط به الگوریتم رقابت استعماری

۱	چند نقطه تصادفی روی تابع انتخاب کرده و امپراطوری های اولیه را تشکیل بده!
۲	مستعمرات را به سمت کشور امپریالیست حرکت بده (سیاست همسان سازی)!
۳	اگر مستعمره ای در یک امپراطوری، وجود داشته باشد که هزینه ای کمتر از امپریالیست داشته باشد، جای مستعمره و امپریالیست را با هم عوض کن!
۴	هزینه کل یک امپراطوری را حساب کن (با در نظر گرفتن هزینه امپریالیست و مستعمراتشان)!
۵	یک مستعمره از ضعیف ترین امپراطوری انتخاب کرده و آن را به امپراطوری ای که بیشترین احتمال تصاحب را دارد، بده!
۶	امپراطوری های ضعیف را حذف کن!
۷	اگر تنها یک امپراطوری باقی مانده باشد، توقف کن و گرنه به ۲ برو!

(۱۴)

$$S_{m+1,y} = S_{m,y} + I_{m,y} - R_{m,y}; \quad m = 1,2, \dots, 11 \quad y = 1,2, \dots, Y$$

(۱۵)

$$S_{1,y+1} = S_{12,y} + I_{12,y} - R_{12,y}; \quad y = 1,2, \dots, Y$$

(۱۶)

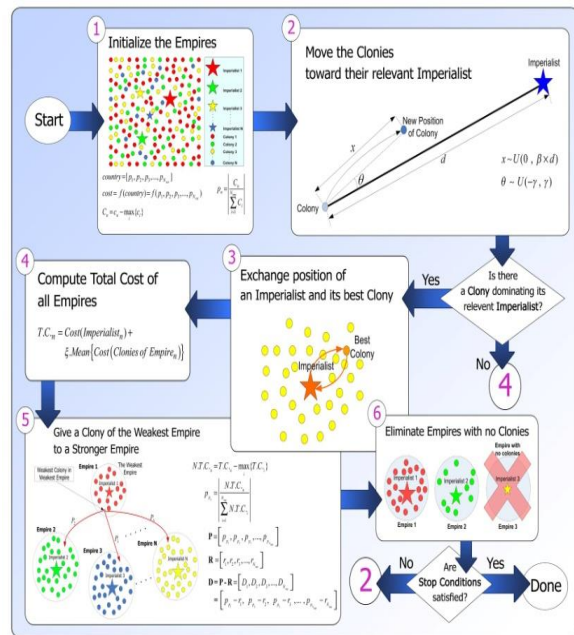
$$S_{\min} \leq S_{m,y} \leq S_{\max}; \quad m = 1,2, \dots, 12 \quad y = 1,2, \dots, Y$$

$R_{m,y}$: خروجی از مخزن در ماه m در سال y ؛

$S_{m,y}$: حجم مخزن در ابتدای ماه m در سال y ؛

$I_{m,y}$: ورودی به مخزن در ماه m در سال y ؛

S_{\min} و S_{\max} : حداقل و حداکثر حجم ذخیره مخزن.



شکل (۵): شمای کلی الگوریتم رقابت استعماری

میزان جریان خروجی در هر دوره باید بین مقادیر حداقل و حداکثر آن باشد. شرایط مرزی تعریف شده برای جریان‌های خروجی با استفاده از منحنی حجم - خروجی مخزن^۱ میان‌یابی می‌شود. بر اساس حجم ذخیره در هر دوره و میان‌یابی خروجی مربوط به حجم موردنظر، مقدار خروجی مجاز مخزن به دست می‌آید.

(۱۷)

$$0 \leq R_{m,y} \leq R_{\max}; \quad m = 1,2, \dots, 11 \quad y = 1,2, \dots, Y$$

در این رابطه R_{\max} حداکثر جریان خروجی مجاز از مخزن است که با توجه به ظرفیت دریچه‌ها و سرریزها از منحنی‌های خروجی بر حسب حجم ذخیره و یا بلندای آب در مخزن نتیجه‌گیری می‌شود.

تابع هدف مدل بهینه‌سازی در این تحقیق متشکل از دو بخش است. بخش اول مربوط به تأمین نیاز پایین دست و بخش دوم برای خروج رسوبات مخزن در نظر گرفته شده است. طبق رابطه زیر، هدف هر دو بخش از تابع، حداقل‌سازی خسارت ناشی از انحراف جریان خروجی از مقادیر مطلوب در طول دوره بهره‌برداری است.

ب. مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن با اهداف

رسوب‌زدایی و تأمین نیاز آبی

در الگوریتم ICA متغیرهای تصمیم عبارت از میزان جریان‌های خروجی ماهانه از مخزن است. بنابراین تعداد کشورها از حاصل ضرب تعداد سال‌های بهره‌برداری y در عدد ۱۲ (تعداد ماه‌های سال) به دست می‌آید. با توجه به ۵ سال بهره‌برداری، تعداد متغیرهای تصمیم برابر ۶۰ متغیر است. قیود مدل بهینه‌سازی، شامل معادلات پیوستگی جریان در مخزن، حداکثر و حداقل حجم مخزن و مقادیر مجاز خروجی از مخزن می‌باشد. در تمام مراحل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن، موازنه جرمی بین مقادیر ورودی و خروجی و حجم ذخیره مخزن باید برقرار باشد و حجم ذخیره نیز باید بین مقادیر حداقل و حداکثر آن باشد:

1. Rating-Curve

(۱۸) این تابع هزینه محدب و نمایی است که در رابطه (۲۰) تعریف شده است.

$$Loss_y^2 = \begin{cases} 1580000 \times \left(e^{\left(\frac{V_y}{V_{max}} \right)} - e^{-1} \right) & \frac{V_y}{V_{max}} \leq 1 \\ 0 & \frac{V_y}{V_{max}} > 1 \end{cases} \quad (20)$$

که در این رابطه V_{max} حداکثر بار رسوب خروجی سالانه از مخزن طی عملیات فلاشینگ است. براساس آمار تاریخی، این مقدار رسوب خروجی، طی این عملیات و یا قضاوت کارشناسی در مورد حداکثر مقدار احتمال داده شده رسوب خروجی از شرایط ایدال، انجام عملیات فلاشینگ قابل محاسبه است. برای محاسبه V از رابطه پیشنهادی توسط موسسه والینگفورد به صورت زیر استفاده شده است:

$$V_y = \Psi \frac{Q_f^{1.6} S^{1.2}}{w^{0.6}} \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 \quad (21)$$

در رابطه بالا، Q_f دبی فلاشینگ است که با توجه به زمان مناسب برای عملیات فلاشینگ برای هر سد قابل محاسبه است.

S شیب طولی مخزن در طول دوره فلاشینگ است، که از رابطه زیر به دست می آید:

$$S = \Psi \frac{EL_{max} - EL_{min}}{L} \quad (22)$$

EL_{min} : حداقل ارتفاع بستر؛

EL_{max} : حداکثر رقوم جریان؛

L : طول مخزن.

برای تعیین پارامتر Ψ از جدول (۲) استفاده می شود. در رابطه (۲۱) W : عرض جریان در عملیات فلاشینگ است که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$W = \min\{W_{res}, W_f\} \quad (23)$$

$$W_{res} = W_{bot} + 2 \times SS_{res}(El_f - El_{min}) \quad (24)$$

$$W_f = 12.8 \times Q_f^{0.5} \quad (25)$$

$$\text{Minimize } Z = W_d \times \left(\sum_{y=1}^Y \sum_{m=1}^{12} Loss_{m,y}^1(R_{m,y}, D_{m,y}) \right) + W_s \times \left(\sum_{y=1}^Y Loss_y^2(V_y) \right)$$

در این رابطه:

$Loss_{m,y}^1$: خسارت ناشی از عدم تأمین نیاز در ماه m

از سال بهینه سازی y ؛

$Loss_y^2$: خسارت ناشی از رسوبات در سال y ؛

W_d : وزن هدف تأمین نیاز؛

W_s : وزن هدف خروج رسوبات؛

V_y : بار رسوب خروجی در طی عملیات فلاشینگ در

سال y .

$D_{m,y}$: نیاز پایین دست در ماه m از سال y .

در محاسبه خسارت ناشی از عدم تأمین نیاز ($Loss_{m,y}^1$) تابع هدف نسبی ارائه شده توسط کاراماز و واسیلیادیس^۱

(۱۹۹۲) استفاده شده است. در این تابع فرض می شود که خسارت ناشی از رهاسازی آب از سیستم، تنها تابعی از خروجی است که به صورت نسبت خروجی به نیاز در هر ماه در نظر گرفته می شود. ساختار این تابع هدف دارای سه بخش است که در رابطه (۱۹) آورده شده است:

$$Loss_{m,y}^1 = \begin{cases} 1.58 \times 10^6 \left(e^{\left(\frac{R_{m,y}}{0.8D_{m,y}} \right)} - e^{-1} \right) & \frac{R_{m,y}}{D_{m,y}} < 0.8 \\ 0 & 0.8 \leq \frac{R_{m,y}}{D_{m,y}} \leq 1.2 \\ 3.88 \times 10^5 \left(e^{\left(\frac{R_{m,y}}{1.2D_{m,y}} \right)} - e^{-1} \right) & \frac{R_{m,y}}{D_{m,y}} > 1.2 \end{cases} \quad (19)$$

در تابع هدف دوم، فرض می شود که خسارت ناشی از

عدم خروج رسوبات از مخزن ($Loss_y^2$) تابعی از نسبت خروجی سالانه رسوب از مخزن، به حداکثر رسوب خروجی سالانه واقعی صورت گرفته در طول دوره بهره برداری است.

نتایج

در مدل بهینه‌سازی الگوریتم رقابت استعماری، انتخاب صحیح پارامترها تأثیر بسزایی در عملکرد و اجرای بهتر مدل دارد. جدول (۳) مقادیر پارامترهای انتخاب شده در این تحقیق را بیان می‌کند. در تابع هدف مدل بهینه‌سازی، برای محاسبه بار رسوبات خروجی با استفاده از اطلاعات جدول (۲) محاسبات مورد نیاز انجام می‌شود. به‌علت ریزدانه بودن رسوبات موجود در مخزن سفیدرود مقدار Ψ برابر ۱۶۰۰ در نظر گرفته شده است.

جدول (۳): پارامترهای ICA

مقدار	آیتم
۲۰۰	تعداد کشورها
۸	تعداد امپراطوری‌ها
۵۰۰	تعداد تکرار
۲	ضریب جذب β
۰/۵	زاویه جذب γ

در خصوص سد سفیدرود برای محاسبه دبی فلاشینگ (Q_f) در مدل بهینه‌سازی با توجه به زمان مناسب برای عملیات فلاشینگ، Q_f توسط دبی ماه‌های مهر، آبان، آذر، دی، بهمن، اسفند و فروردین (عملیات فلاشینگ در این ماه‌ها امکان‌پذیر است) محاسبه شده است.

با توجه به میزان اثربخشی ماه‌های مختلف در موفقیت عملیات فلاشینگ، ضرایبی مطابق دستورالعمل موسسه والینگفورد در نظر گرفته شده است. این ضرایب در مورد سد سفیدرود برای ماه‌های مهر و اسفند برابر یک، برای ماه‌های آبان و بهمن برابر دو و برای سه ماه آذر، دی و فروردین برابر سه در نظر گرفته شد.

با توجه به ضرایب در نظر گرفته شده در مدل بهینه‌سازی، امپراطوری‌هایی که جریان‌های خروجی بیشتری را برای عملیات فلاشینگ در سه ماه آذر، دی و

W_{bot} : عرض کف مخزن سد؛

DS_{res} : شیب جداره مخزن؛

El_f : رقوم جریان در سرریز در حین فلاشینگ؛

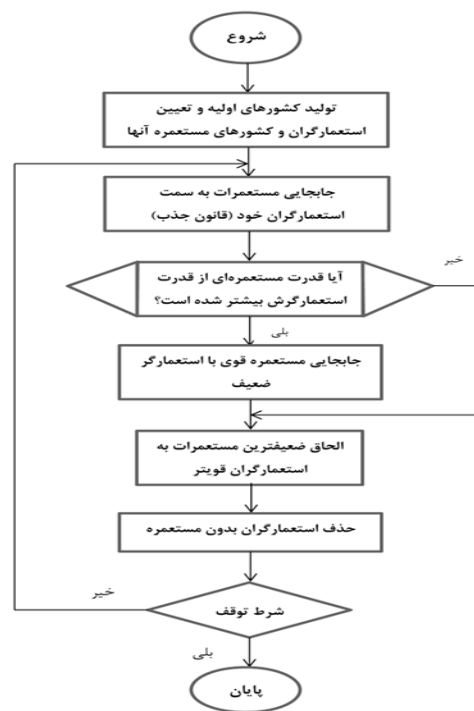
W_{res} : عرض مخزن سد است که دقیقاً در بالادست آن

و در تراز آب هنگام عملیات فلاشینگ؛

W_f : عرض کانال ایجاد شده در اثر عملیات فلاشینگ؛

Q_f : دبی فلاشینگ.

در شکل (۶) روش حل مسئله آورده شده است.



شکل (۶): الگوریتم حل مسئله

جدول (۲): تعیین مقدار Ψ

مقدار Ψ	شرایط موجود
۱۶۰۰	برای رسوبات ریز دانه
۶۵۰	$D_{50} < 0.1 \text{ m}$
۳۰۰	$D_{50} < 0.1 \text{ mm}$
۱۸۰	اگر دبی شاس کم باشد (کمتر از $50 \text{ m}^3/\text{s}$)

علی‌رغم آن مشاهده می‌شود که در ۸۵٪ مواقع ۱۰۰٪ نیازها تأمین گردیده است. در سناریوی سوم ($W_d = 0.5$ و $W_s = 0.5$) که در آن هر دو هدف (تخلیه بیشترین مقدار رسوبات و تأمین نیاز پایین دست) توأمأ و با ضرایب یکسان در نظر گرفته شده است، نتایج با دو سناریوی قبل تطابق دارد. در این سناریو نسبت به سناریوی اول که هدف اصلی آن خروج رسوبات بود، در حالی که شرایط تأمین نیازها بهتر است، رسوب کمتری تخلیه شده است. در این سناریو در ۷۵٪ مواقع ۱۰۰٪ نیازها تأمین گردیده است.

سناریوی چهارم ($W_d = 0$ و $W_s = 1$) وزن تابع خسارت رسوب برابر یک و وزن تابع خسارت نیاز برابر صفر در نظر گرفته شده است. در این سناریو، هیچ خسارتی برای نیاز لحاظ نشده است؛ یعنی نیاز پایین دست در میزان خروجی سد تأثیرگذار نبوده و تنها عامل مهم و تأثیرگذار، خروج رسوبات بیشتر از مخزن سد است.

البته همان‌طور که اشاره شد با توجه به نیاز شدید پایین دست به آبیاری در شش ماه آغازین هر سال، زمان عملیات فلاشینگ در شش ماه دوم سال؛ یعنی از مهرماه تا فروردین ماه سال بعد در نظر گرفته می‌شود. در این سناریو، تنها در ۶۳٪ مواقع ۱۰۰٪ نیازها تأمین می‌شود. در مقابل، میزان بار رسوب خروجی نسبت به دیگر سناریوها افزایش داشته است. در سناریوی ($W_d = 1$ و $W_s = 0$) تنها تأمین نیازها مد نظر بوده است؛ یعنی وزن تابع هدف رسوب، صفر در نظر گرفته شده است. در این سناریو، خروج رسوبات از مخزن سد، عامل تعیین کننده‌ای برای دبی خروجی مخزن نخواهد بود و مانند قبل عدم تجاوز از حجم حداکثر مخزن نیز ملاکی برای خروج آب است. در این سناریو، ۱۰۰٪ نیازها در ۸۸٪ مواقع تأمین شده است که نتیجه قابل قبولی برای این سناریو می‌باشد. اما در مورد میزان رسوب قابل خروج می‌توان گفت با جریان‌های خروجی این سناریو، تنها رسوبات سالیانه ورودی به مخزن، قابل تخلیه است ولی

فروردین در نظر بگیرند، احتمال بقای بیشتری در تکرارهای متوالی خواهند داشت. علت اینکه ضرایب ماه‌ها متفاوت در نظر گرفته شده است این است که به دلیل ورودی‌های بیشتر در سه ماه آذر، دی و فروردین استفاده از حجم بالای ورودی در تخلیه رسوبات، موجب کارآمدی بیشتر عملیات فلاشینگ می‌شود. از آنجا که از ماه اردیبهشت تا انتهای شهریور در پایین دست به آبی با کیفیت قابل قبول جهت کشاورزی نیاز است؛ لذا در مدل بهینه‌سازی برای انجام عملیات فلاشینگ در این ماه‌ها محدودیت در نظر گرفته شده است.

در تابع هدف مدل بهینه‌سازی (رابطه ۱۹) پنج سناریوی متفاوت با تغییر ضرایب توابع هدف نیاز و رسوب (W_s و W_d) مطابق با جدول (۴) تعریف شد که مدل بهینه‌سازی برای این پنج سناریو اجرا شده و نتایج آن در این جدول ارائه گردیده است. مقدار رسوبات خروجی و درصد مواقعی که ۱۰۰، ۷۰ و ۵۰ درصد از نیازها تأمین شده است، به‌عنوان معیارهای ارزیابی نتایج، مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر این معیارها برای ۵ سناریوی در نظر گرفته شده در جدول (۴) ارائه شده است. لازم به ذکر است که در این جدول، مقادیر برآورد شده این معیارها بر اساس آمار تاریخی بهره‌برداری از مخزن، ارائه گردیده است.

در مورد سناریوی اول ($W_s = 0.8$ و $W_d = 0.2$) - که هدف غالب در آن، خروج بیشترین مقدار رسوبات می‌باشد - نتایج حاکی از آن است که میزان قابل توجهی از رسوبات با جریان‌های خروجی‌های این سناریو قابل تخلیه است. در این سناریو در ۷۲٪ مواقع، ۱۰۰٪ نیازها تأمین می‌شود. در سناریوی دوم ($W_d = 0$ و $W_s = 0.8$) هدف غالب، تأمین نیاز پایین دست است که اهم آن آب مورد نیاز بخش کشاورزی است. همان‌طور که انتظار می‌رفت در این سناریو نسبت به سناریوی اول رسوبات کمتری قابل تخلیه است.

رسوبات نهشته‌شده در مخزن تخلیه نمی‌شوند؛ به عبارتی میزان احیای حجم مخزن سد بسیار ناچیز است. روند تغییرات جدول نشان می‌دهد که با افزایش وزن تابع خسارت رسوب از درصد مواقع تأمین نیازها کاسته می‌شود و در مقابل، مقدار رسوب قابل تخلیه به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

مقایسه نتایج پنج سناریوی مدل با شرایط بهره‌برداری واقعی از مخزن، نشان می‌دهد که به جز سناریوی پنجم در سایر سناریوها میزان رسوبات خروجی براساس بهره‌برداری بهینه، بیشتر از مقدار آن در بهره‌برداری تاریخی از سد بوده است. همچنین، اطمینان‌پذیری تأمین نیازها نیز در اکثر سناریوها در مقایسه با شرایط بهره‌برداری تاریخی بهبود یافته است. بهترین سناریوهایی که امکان این مقایسه را فراهم می‌کند، سناریوهای اول و سوم است. نتایج موجود در جدول (۴) نشان می‌دهد که درصد

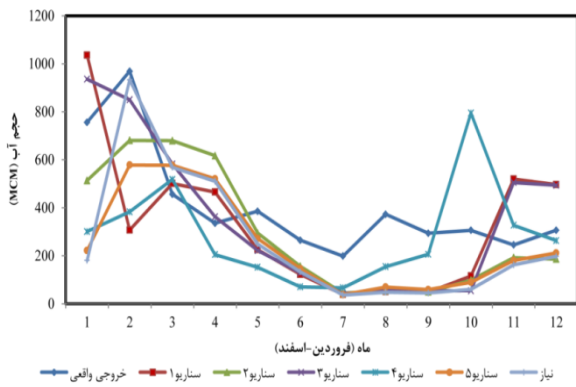
تأمین نیاز براساس سه معیار انتخاب شده در سناریوهای اول و سوم بسیار نزدیک به مقادیر محاسبه‌شده براساس آمار تاریخی بهره‌برداری است، درحالی که میزان رسوبات خروجی در این دو سناریو به ترتیب ۴/۸ و ۳/۰۱ برابر رسوبات تخلیه‌شده براساس آمار بهره‌برداری تاریخی از سد است. به‌طور خلاصه، نتایج نشان می‌دهد که با توجه به

میزان ورودی سالانه به سد و با در نظر گرفتن سال‌های خشک‌سالی و پرآبی، با اتخاذ سناریوی مناسب به عنوان سیاست بهره‌برداری، می‌توان توازن مناسبی بین اهداف تأمین نیاز پایین‌دست و احیای حجم مخزن سفیدرود ایجاد کرد. در صورتی که تأمین نیازها در حد وضعیت بهره‌برداری تاریخی از مخزن مدنظر باشد، سناریوی سوم که امکان تخلیه حجم قابل توجهی از رسوبات را ضمن بهبود اطمینان‌پذیری تأمین نیازها در حد محدود فراهم می‌کند، مناسب‌ترین گزینه است.

جدول (۴): نتایج پنج سناریوی مختلف مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری و اطلاعات بهره‌برداری واقعی

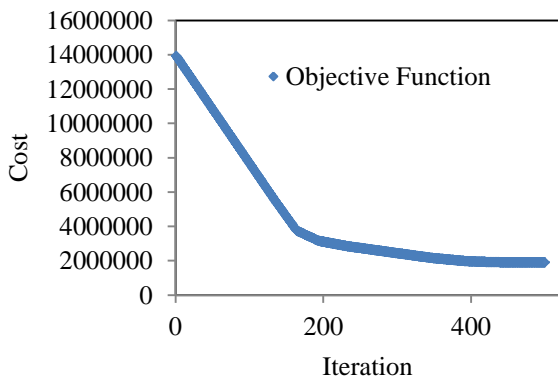
از مخزن سد سفیدرود

بهره‌برداری واقعی	سناریو ۵	سناریو ۴	سناریو ۳	سناریو ۲	سناریو ۱	شاخص‌های بررسی عملکرد سناریوها در تأمین نیازهای آبی و تخلیه رسوبات
	$W_s = 0$ $W_d = 1$	$W_s = 1$ $W_d = 0$	$W_s = 0.5$ $W_d = 0.5$	$W_s = 0.2$ $W_d = 0.8$	$W_s = 0.8$ $W_d = 0.2$	
۶/۱۱	۵/۱۲	۳۸/۱۵	۱۸/۴	۱۰/۲	۲۹/۳۷	میزان رسوب خروجی در واحد زمان (ton/sec)
۷۰	۸۸	۶۳	۷۵	۸۵	۷۲	اعتمادپذیری زمانی در سطح تأمین ۱۰۰٪ نیازها
۸۳	۹۲/۷	۷۲	۸۳	۹۳	۸۳	اعتمادپذیری زمانی در سطح تأمین ۷۰٪ نیازها
۸۵	۹۸	۷۸	۹۲	۹۷	۹۲	اعتمادپذیری زمانی در سطح تأمین ۵۰٪ نیازها



شکل (۸): مقایسه منحنی‌های فرمان تحت سناریوهای مختلف با مقادیر متوسط نیاز و خروجی‌های واقعی

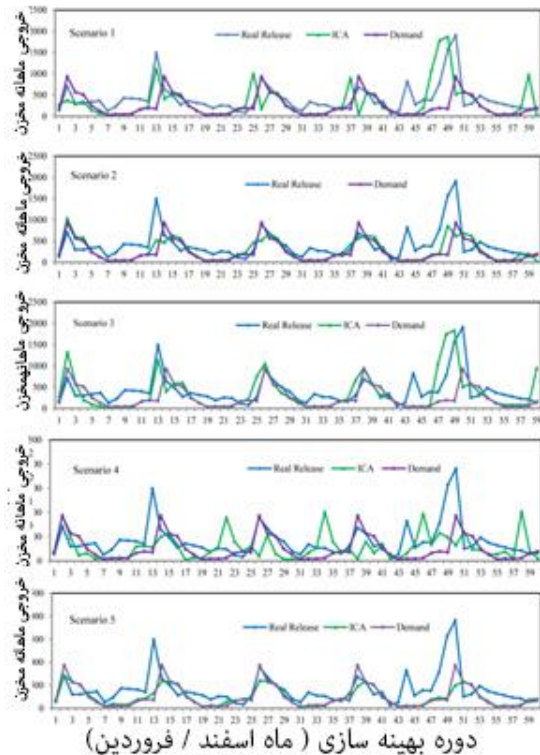
در شکل (۸) منحنی‌های فرمان مطلوب در سناریوهای مختلف با مقادیر متوسط نیاز و خروجی‌های واقعی مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سیاست فعلی بهره‌برداری (خروجی واقعی) در ماه‌های مرداد و آذر، مقدار خروجی به مراتب بیشتر از مقدار نیاز بوده است که این مسئله در سناریوهای مورد بررسی این تحقیق دیده نمی‌شود. روند هم‌گرایی جواب‌ها و تغییرات تابع هدف در فرایند حل مسئله بهینه‌سازی در شکل (۹) آورده شده است.



شکل (۹): روند تغییرات تابع هدف در طول بهینه‌سازی

جمع‌بندی

در این تحقیق، مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد سفیدرود با اهداف تأمین نیاز آبی و رسوب‌زدایی در قالب یک مدل غیرخطی چندهدفه فرمول‌بندی شد. این مدل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی رقابت



شکل (۷): مقایسه نتایج مدل بهینه‌سازی در سناریوهای مختلف با شرایط بهره‌برداری تاریخی از مخزن سد سفیدرود

در شکل (۷) مقادیر سری زمانی جریان خروجی تاریخی از سد در پنج سال، تحت بررسی و نتایج مدل بهینه‌سازی در سناریوهای مختلف ارائه شده است. مشاهده می‌شود که عملکرد سد سفیدرود در این دوره پنج ساله با نتایج مدل بهینه‌سازی اختلاف بسیار زیادی دارد. به‌طور خاص در شرایط بهره‌برداری تاریخی از سد از سیلاب‌های فروردین‌ماه برای خروج رسوبات استفاده موثر نشده است. کمبود آب به‌واسطه جریان‌های خروجی واقعی در اردیبهشت‌ماه، بیش از کمبود آب در نتایج سناریوهای مختلف در این ماه است. به‌طور کلی نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق، نشانگر کارایی مدل بهینه‌سازی توسعه‌داده‌شده در مدیریت بهره‌برداری از سد سفیدرود برای ایجاد تعادل میان اهداف تأمین نیاز آبی و خارج کردن رسوبات از مخزن است.

حل وزنی مورد استفاده در این تحقیق شوند.

مراجع

۱. شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان (۱۳۶۷) «گزارش عملیات رسوب‌زدایی سد سفیدرود»، امور سدها.
۲. شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان (۱۳۸۵) «گزارش عملیات رسوب‌زدایی سد سفیدرود»، امور سدها.
۳. شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، «گزارشات کمیته رسوب سد سفیدرود»، ایران، ۱۳۵۹-۱۳۸۶.
4. Annandale G. W. (1987) *Reservoir sedimentation. Developments in Water Science, Title 29.* Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands.
5. Atashpaz-Gargari. E., Hashemzadeh. F., Rajabioun. R. and Lucas. C., (2008). Colonial Competitive Algorithm, a novel approach for PID controller design in MIMO distillation column process. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, Vol. 1 No. 3, 2008, pp. 337-355.
6. Atkinson, E. (1996) The Feasibility of Flushing Sediment from Reservoir. TDR Project R5839, Wallingford Ltd.
7. Baltar, M., and Fontane, G., (2006). A Multiobjective Particle Swarm Optimization Model for Reservoir Operation and Planning. *International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, Montreal, Canada.
8. Chen, L., McPhee, J., Yeh, W., and Hon, M. (2006) A Diversified Multiobjective GA for Optimizing Reservoir Rule Curves. *Advances in Water Resources*, Vol. 30, No. 5, PP. 1082-1093.
9. Hosseini Nasab. E., Khezri. M., Khodamoradi. M. S. Atashpaz Gargari. E., (2010). *An application of Imperialist Competitive Algorithm to Simulation of Energy Demand Based on Economic Indicators:*

استعماری حل گردید و جریان‌های خروجی از سد برای یک دوره پنج‌ساله با تأکید بر فلاشینگ مخزن، ضمن مقایسه با نیاز پایین دست و خروجی‌های واقعی تاریخی تعیین شد. مقایسه نتایج حاصل از مدل بهینه‌سازی و بهره‌برداری تاریخی نشان‌دهنده اختلاف قابل ملاحظه آنها و به عبارتی پتانسیل اصلاح و بهبود شرایط بهره‌برداری تاریخی است. بررسی‌های انجام شده نشان‌دهنده عدم استفاده مفید از سیلاب‌های فروردین‌ماه برای خروج رسوبات بوده است. نتایج مدل بهینه‌سازی گویای این است که امکان افزایش راندمان عملیات فلاشینگ و تأمین نیازهای آبی پایین دست سد سفیدرود وجود دارد. مقایسه نتایج سناریوهای مختلف در این تحقیق نیز بیانگر این است که با در نظر گرفتن این مسئله که بحث خروج رسوبات ورودی به مخزن سد سفیدرود قابل چشم پوشی نیست، هر چند که در شرایط محیطی و اقلیمی خاص، نتایج هر کدام از پنج سناریو قابل استفاده است، لذا سناریوهای دوم و سوم، با ضرایب تابع هدف رسوب به ترتیب برابر با ۰/۲ و ۰/۵ می‌توانند در تدوین سیاست‌های بهره‌برداری از این سد بیشتر مورد توجه قرار گیرند.

مقایسه منحنی‌های فرمان مطلوب در سناریوهای مختلف با مقادیر متوسط نیاز و خروجی‌های واقعی، نشان می‌دهد که در سیاست فعلی بهره‌برداری (خروجی واقعی) در ماه‌های مرداد تا آذر مقدار خروجی از سد به مراتب بیشتر از مقدار نیاز پایین دست بوده است که این امر در پنج سناریوی مورد بررسی دیده نمی‌شود. لذا بهره‌برداری از سد با در نظر گرفتن این موارد باید اصلاح شود.

به منظور افزایش دقت در حل مسئله، پیشنهاد می‌شود با مطالعه دقیق در زمینه میزان خسارات برجامانده از عملیات رسوب‌زدایی برآوردی دقیق از این خسارات صورت پذیرد و در تابع هدف اعمال شود. به علاوه، روش‌های دیگر حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند جایگزین روش

- challenges in African Hydrology and Water Resources*. Int. Association of Hydrology Scs. Publication No. 144.
15. Shi-Yui, L., Al-Fayyaz, T., and Kim Sai, L. (2004) *Application of Evolutionary Algorithm in Reservoir Operation*. Journal of the Institution of Engineers, Singapore, Vol. 44, No. 1, P.: 39-54.
 16. Sloff C. J. (1991), *Reservoir sedimentation: a literature survey*. *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, Report No. 91-2. Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands.
 17. Stedinger, J.R., Sule, B.F., and Loucks, D.P. (1984), *Stochastic Dynamic Programming Models for Reservoir Operation Optimization*. *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 11, PP. 1499-1505.
 - Evidence from Iran, *European Journal of Scientific Research*., Vol.43 No.4, pp. 495-506
 10. Karamouz, M., and Vasiliadis, H. (1992) *A Bayesian Stochastic Optimization of Reservoir Operation Using Uncertain Forecast*. *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 5, PP. 1221-1232.
 11. Kawashima, S., Butler, T. J., Annandale, G. W., Shah, F. (2003) *Reservoir Conservation: RESCON Model and User Manual*. USA, 2003.
 12. Mahmood K. (1987) *Reservoir sedimentation: impact, extent and mitigation*, *Technical paper No. 71*, World Bank, Washington DC.
 13. Mohan, S., Raipure, M. (1992). *Multi-objective Analysis of Multi-reservoir System*, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 118, No. 4, P. 356-370.
 14. Pitt J. D. and Thompson (1984), *The impact of sediment on reservoir life*, *Proc. Conf. on*