

رسوب زدایی بالاتر و تأمین بهتر نیازهای پایین دست، ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: رسوب زدایی از مخازن سدها، بهینه‌سازی بهره‌برداری، الگوریتم ژنتیک با طول کروموزوم متغیر، فلاشینگ و سد سفیدرود.

مقدمه

ورود رسوبات به دریاچه سدها در طول سال‌های متمادی و رسوب‌گذاری در داخل مخازن آنها پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر است. با کاهش حجم ذخیره‌ی مخزن سدها، برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سد و تخصیص آب برای موارد گوناگون نظیر کشاورزی، صنعت و شرب دچار مشکل می‌شود. یکی از راه‌های افزایش عمر مفید سدها به خصوص در زمان بهره‌برداری، انجام عملیات فلاشینگ است. در استفاده از این روش، محدودیت‌های محیط‌زیستی، ملاحظات ایمنی سد، ایجاد تغییر در بستر رودخانه، کاهش تولید انرژی و تأثیر منفی بر تأسیسات جانبی و انتقال آب باید مورد توجه قرار گیرد.

تخلیه ناقص^۶ و یا تخلیه کامل^۷ مخزن در زمان‌های مناسب از نظر جریان‌های ورودی و نیازهای پایین دست، به منظور تخلیه‌ی رسوبات ته نشین شده در مخزن سد به عملیات فلاشینگ معروف است. راندمان عملیات فلاشینگ در رسوب‌زدایی مخزن به عامل‌های گوناگونی از جمله شیب مخزن، ظرفیت و موقعیت تخلیه‌کننده‌ها، ویژگی‌های رسوبات ورودی، دامنه‌ی تغییرات تراز آب مخزن و روند این تغییرات در طول عملیات، درجه‌ی تحکیم رسوبات نهشته شده در مخزن، میزان جریان‌های ورودی و خروجی و طول زمان عملیات وابسته است.

معیارهای پیشنهاد شده برای فلاشینگ موفق سدها تا پیش از سال ۱۹۹۶ اکثراً کیفی بودند و یا این که برای برخی از سدها که عملیات فلاشینگ در آنها موفقیت آمیز بوده است نتایج قابل قبولی نمی‌دادند (پیت و تامسون [۱۸]، آناندال [۷]، محمود [۱۶] و اسلاف [۲۰]). در سال ۱۹۹۶، موسسه‌ی پژوهشی والینگفورد [۸] در یک گزارش جامع به ارائه‌ی معیارهایی برای ارزیابی موفقیت عملیات فلاشینگ اشاره نمود. در این گزارش، شش معیار نسبت تعادل رسوب (SBR^۸)، نسبت ظرفیت دراز مدت مخزن

بهینه‌سازی خروج رسوبات سدها در عملیات فلاشینگ با استفاده از مدل بهره‌برداری از مخزن (مطالعه‌ی موردی سد سفیدرود)

سیدسعید اشرف واقفی^۱، بنفشه زهرایی^۲، بهرام ملک محمدی^۳ و محمدعلی بنی‌هاشمی^۴

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۸۸/۲/۱۰

چکیده

بهینه‌سازی بهره‌برداری از سدهای مخزنی تاکنون بیشتر با تأکید بر اهداف تأمین نیازهای آبی و انرژی، مهار سیلاب و بهبود شرایط زیست محیطی صورت گرفته و در این توابع هدف به مسئله‌ی خروج رسوبات ورودی توجهی نشده است. بیشتر مطالعاتی که برای رسوب‌زدایی از مخازن سدها انجام می‌شود، فاقد ارتباط مناسب با مدل‌های بهره‌برداری از مخزن سد هستند که این امر منجر به ناهماهنگی بین تصمیم‌های مرتبط با رسوب‌زدایی و سایر اهداف بهره‌برداری می‌شود. در این مقاله با دیدگاه نوین، یک مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد ارائه شده که در آن دو تابع هدف تأمین نیاز پایین دست و خروج رسوبات از مخزن سد، استفاده شده است. به منظور تدوین تابع هدف خروج رسوبات از مخزن، از روش برنامه‌ریزی عملیات فلاشینگ استفاده شده است. با وزن دادن به دو تابع هدف تأمین نیاز و خروج رسوبات، عملکرد مدل بهینه‌سازی در سناریوهای گوناگون بررسی شده است. برای حل مدل بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک با طول کروموزوم متغیر (VLGA^۵) استفاده شده است. در مطالعه‌ی موردی سد سفیدرود، عملکرد مدل بهینه‌سازی با نتایج واقعی بهره‌برداری از این مخزن در یک دوره‌ی پنج ساله مقایسه و راهکارهای اجرایی مناسب برای دست‌یابی به راندمان

۱ نویسنده مسئول و دانشجوی دکترای مهندسی آب دانشگاه صنعتی امیرکبیر svaghefi@aut.ac.ir

۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

۳ دانش‌آموخته دکترای دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

۴ استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

5- Variable chromosome Length Genetic Algorithm (VLGA)

6- Partial Drawdown

7- Complete Drawdown

9- Sediment Balance Ratio

($LTCR^1$)، نسبت مقدار کاهش تراز آب حین فلاشینگ (DDR^2)، نسبت عرض کانال فلاشینگ (FWR^3)، نسبت تعادل رسوب برای افت کامل تراز آب (SBRd) و نسبت عرض بالایی (TWR^4) توسط اتکنیسون [۸] معرفی شدند. کاواشیما و همکاران [۱۴] یک مدل کاربردی به نام RESCON^۵ در رابطه با نگهداری مخازن سدها ارائه دادند. آنها در این مدل از شش معیار مؤسسه‌ی والینگفورد در قسمت فلاشینگ سد استفاده نمودند. مدل آنها با توجه به مسائل اقتصادی، به ارائه‌ی راهکاری برای احیای حجم مفید مخازن می‌پردازد.

در پژوهش‌های پیشین، ترکیب توابع هدف گوناگون برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌های انجام شده توسط استدینجر و همکاران [۲۱]، موهن و رایبور [۱۷]، بالتر و فوتانه [۹]، چن و همکاران [۱۱] و شی‌یوای و همکاران [۱۹] 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 پژوهش‌های گذشته در زمینه‌ی رسوب‌زدایی مخازن سدها نشان می‌دهد که در انجام عملیات رسوب‌زدایی بهینه‌سازی مقادیر خروجی از مخزن با در نظر گرفتن سایر اهداف بهره‌برداری از مخزن مورد توجه قرار نگرفته است. همچنین مرور پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن نشان می‌دهد، ترکیب هدف خروج رسوبات از مخزن سد در کنار سایر اهداف بهره‌برداری تاکنون در مدل‌های بهینه‌سازی مورد توجه قرار نگرفته است. در سدهایی با حجم زیاد رسوبات ورودی، باید افزون بر برآورده شدن اهداف بهره‌برداری از مخازن نظیر تأمین نیاز آبی پایین دست، مسئله‌ی تخلیه‌ی رسوبات و احیاء حجم مفید مخزن نیز به میزان قابل توجهی برآورده شود.

در این پژوهش، در تدوین مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن، تابع هدف خروج رسوبات از مخزن سد در کنار تابع 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 ژنتیک با طول کروموزوم متغیر (VLGA) استفاده شده است. ساختار مدل بهینه‌سازی و نحوه فرموله نمودن توابع هدف و محدودیت‌ها در بخش بعدی مقاله مورد بحث قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

بهینه‌سازی در واقع تعیین مقادیر بهینه‌ی متغیرهای تصمیم برای کمینه یا بیشینه کردن تابع هدف است. در سال‌های اخیر

الگوریتم‌های فراکاوشی با پیشرفتی سریع در مسایل پیچیده و مشکل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از آن جمله می‌توان به الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده^۶ (SA)، الگوریتم ژنتیک^۷ (GA)، جستجوی ممنوعه^۸ (TS) و بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها^۹ (ACO) اشاره نمود. الگوریتم ژنتیک که بر پایه‌ی تئوری تکامل داروین استوار است نخستین بار توسط هلند [۱۲] مطرح شد. پژوهشگران زیادی با توسعه‌ی این روش به نتایج قابل قبولی برای مدیریت و بهره‌برداری مؤثر از مخازن سدها رسیده‌اند (برای مثال واردلو و شریف [۲۲] و چانگ و همکاران [۱۰]).

مدل الگوریتم ژنتیک با طول کروموزوم متغیر (VLGA) به عنوان ویرایشی نوین از الگوریتم ژنتیک کلاسیک توسط کراچیان و کارآموز [۱۵] پیشنهاد و برای سامانه‌ی تک مخزنی مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل VLGA، بهینه‌سازی برای دوره‌ی برنامه‌ریزی به تعداد سال‌های مورد نظر، به مسئله‌ی بهینه‌سازی کوچک‌تر تبدیل شده و از پاسخ‌های بهینه‌ی محاسبه شده در هر مرحله به عنوان پاسخ اولیه برای دوره‌ی برنامه‌ریزی طولانی‌تر استفاده می‌شود. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که روش الگوریتم ژنتیک با طول کروموزوم متغیر روشی قدرتمند و دارای سرعت هم‌گرایی بیشتر نسبت به روش الگوریتم ژنتیک کلاسیک می‌باشد. زهرایی و همکاران [۲۳] با بسط مدل VLGA برای مخازن سری، با دیدگاه سازگار شونده، دو مدل جدید VLGA-I و VLGA-II ارائه نمودند که در این مدل‌ها با انتخاب پاسخ اولیه بر اساس نتایج بهینه‌سازی سال‌های قبل، سرعت هم‌گرایی مدل در رسیدن به پاسخ بهینه افزایش یافته است. در مدل VLGA، مسئله‌ی بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن از یک مسئله‌ی یک‌ساله آغاز و پس از محاسبه‌ی پاسخ‌های بهینه برای سال نخست، با فرض این که نتایج در سال دوم نیز باید تقریباً مشابه نتایج بهینه‌ی سال نخست باشد، پاسخ‌های اولیه مسئله‌ی بهینه‌سازی دوساله با تکرار نتایج به دست آمده برای سال نخست در نظر گرفته می‌شود. مدل الگوریتم ژنتیک در این مرحله، یک مسئله‌ی دوساله را با یک پاسخ اولیه‌ی مناسب بهینه‌سازی می‌کند. از سال سوم بهینه‌سازی تا آخر دوره‌ی بهینه‌سازی میانگین مقدار نتایج بهینه‌ی دو سال پیش به عنوان مقدار اولیه‌ی مدل بهینه‌سازی در آن سال در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، طول کروموزوم به تدریج افزایش می‌یابد تا سرانجام مسئله‌ی اصلی با پاسخ‌های اولیه مناسب حل شود.

متغیرهای تصمیم که در مدل الگوریتم ژنتیک در غالب ژن‌ها نمایش داده می‌شوند، میزان خروجی ماهانه است. تعداد ژن‌ها در هر سال بهینه‌سازی از حاصل ضرب سال‌های بهینه‌سازی (y) در عدد ۱۲ (تعداد ماه‌های سال) به دست می‌آید. قیود مدل بهینه‌سازی

6- Simulated Annealing

7- Genetic Algorithm

8- Tabu Search

9- Ants Colony Organization

1- Long Term Capacity Ratio

2- Draw Down Ratio

3- Flushing Width Ratio

4- Top Width Ratio

5- Reservoir Conservation

نسبت خروجی به نیاز در هر ماه در نظر گرفته می شود. ساختار این تابع هدف دارای سه بخش است که در رابطه (۶) آورده شده است.

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

در تابع هدف دوم، فرض می شود خسارت ناشی از عدم خروج رسوبات از مخزن (Loss_y²) تابعی از نسبت خروجی سالانه ی رسوب از مخزن به بیشترین رسوب خروجی سالانه ی واقعی صورت گرفته در طول دوره ی بهینه سازی می باشد. این تابع هزینه محدب و نمایی است و در رابطه ی (۷) تعریف شده است.

$$Loss_y^2 = \begin{cases} 1580000 \times e^{\left(\frac{V_y}{V_{max}} - 1 \right)} & \frac{V_y}{V_{max}} \leq 1 \\ 0 & \frac{V_y}{V_{max}} > 1 \end{cases} \quad (7)$$

که در این رابطه، بیشترین بار رسوب خروجی سالانه از مخزن طی عملیات فلاشینگ می باشد. این مقدار براساس آمار تاریخی رسوب خروجی طی این عملیات و یا قضاوت کارشناسی در مورد بیشترین مقدار محتمل رسوب خروجی از شرایط ایده آل انجام عملیات فلاشینگ قابل محاسبه است. برای محاسبه ی از رابطه ی پیشنهادی به وسیله ی موسسه ی والینگفورد به صورت زیر استفاده شده است:

$$V = \psi \frac{Q_f S^{1.2}}{W^{0.6}} \quad (8)$$

در رابطه ی بالا، Q_f دبی فلاشینگ می باشد که با توجه به زمان مناسب برای عملیات فلاشینگ برای هر سد، قابل محاسبه است. S شیب طولی مخزن در طول دوره ی فلاشینگ می باشد و از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$S = \frac{EL_{max} - EL_{min}}{L} \quad (9)$$

در این رابطه: EL_{min}: کمترین ارتفاع بستر، EL_{max}: بیشترین رقم جریان و L: طول مخزن می باشد. برای تعیین پارامتر ψ، از جدول (۱) استفاده می شود [۸]. در رابطه ی (۸)، W عرض جریان در عملیات فلاشینگ می باشد که از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$W = \min\{W_{res}, W_f\} \quad (10)$$

$$W_{res} = W_{bot} + 2 \times SS_{res} (EL_f - EL_{min}) \quad (11)$$

$$W_f = 12.8 * Q_f^{0.5} \quad (12)$$

شامل معادله های پیوستگی مخزن، بیشینه و کمینه ی حجم مخزن و مقادیر مجاز خروجی از مخزن می باشد. در تمام مراحل بهینه سازی بهره برداری از مخزن، باید موازنه ی جرمی بین مقادیر ورودی و خروجی و حجم ذخیره ی مخزن برقرار باشد و حجم ذخیره باید بین مقادیر کمینه و بیشینه ی آن باشد:

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

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

$$S(\min) \leq S_{m,y} \leq S(\max) \quad m=1, \dots, 12 \quad y=1, \dots, Y \quad (3)$$

در این روابط 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(max) و S(min): کمینه و بیشینه ی حجم ذخیره ی مخزن می باشند.

میزان خروجی بهینه سازی شده در هر دوره باید بین مقادیر کمینه و بیشینه ی آن باشد. شرایط مرزی تعریف شده برای خروجی، با استفاده از منحنی حجم- خروجی مخزن^۱ میان یابی می شود. بر اساس حجم ذخیره در هر دوره و میان یابی خروجی مربوط به حجم مورد نظر، مقدار خروجی مجاز مخزن بدست می آید.

$$0 \leq R_{m,y} \leq R(\max) \quad m=1, \dots, 12 \quad y=1, \dots, Y \quad (4)$$

در این رابطه، R(max) بیشینه ی خروجی مجاز از مخزن که با توجه به ظرفیت دریچه ها و سرریزها، از منحنی های خروجی بر حسب حجم ذخیره و یا بلندای آب در مخزن به دست می آید.

تابع هدف مدل بهینه سازی در این پژوهش متشکل از دو بخش یکی مربوط به تأمین نیاز پایین دست و دیگری برای خروج رسوبات مخزن، در نظر گرفته شده است. مطابق با رابطه ی زیر، هدف هر دو بخش تابع، کمینه سازی خسارت ناشی از خروجی نامناسب از مخزن در طول دوره ی بهینه سازی می باشد.

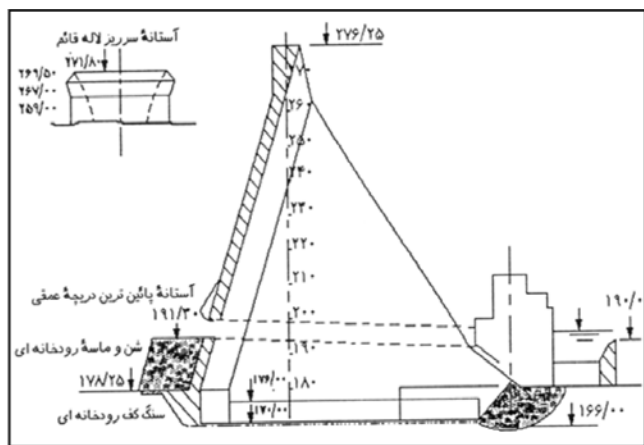
$$\text{Minimize } Z = W_d \times \left(\sum_{y=1}^Y \sum_{m=1}^{12} Loss_{m,y}^1 (R_{m,y}, D_{m,y}) \right) + \quad (5)$$

$$W_s \times \left(\sum_{y=1}^Y Loss_y^2 (V_y) \right)$$

در این رابطه Loss_{m,y}¹: خسارت ناشی از عدم تأمین نیاز در ماه m از سال بهینه سازی y، Loss_y²: خسارت ناشی از عدم خروج رسوبات در سال بهینه سازی 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}: مقدار نیاز پایین دست در ماه m از سال y می باشد.

در محاسبه ی خسارت ناشی از عدم تأمین نیاز (Loss_{m,y}¹)، تابع هدف نسبی ارائه شده به وسیله ی کارآموز و واسیلیادیس [۱۳] 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

1- Rating-Curve



شکل ۱- مقطع سد سفیدرود [۱]

این سد یک حلقه‌ی مهم در زنجیره‌ی اقتصادی استان گیلان است که با مسئله‌ی رسوب گذاری بسیار زیاد رو به رو است. میانگین سالیانه‌ی رسوبات ورودی به مخزن سد ۴۶ میلیون تن که حدود ۳۸ میلیون تن از شاخه‌ی قزل اوزن و ۷/۹ میلیون تن از شاخه‌ی شاهرود وارد مخزن می‌شود. توزیع ماهانه‌ی آب و رسوبات وارد به مخزن نشان می‌دهد که بیش از ۵۰ درصد جریان‌های ورودی تنها در ماه‌های فروردین و اردیبهشت وارد مخزن می‌شوند و بیش از ۶۰ درصد رسوبات وارد شده به مخزن در ماه‌های یاد شده بوده است [۳ و ۲].

به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد سفیدرود، بر اساس شکل (۳) از سری زمانی ورودی ماهانه به مخزن و نیازهای آبی پایین دست در یک دوره‌ی ۵ ساله (از سال آبی ۸۰-۷۹ تا ۸۵-۸۴) استفاده شده است. بر اساس شکل (۴) میانگین نیاز پایین دست برای سال‌های آبی (۸۶-۸۵) و (۸۵-۸۴) در مدل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول (۲) داده‌های ورودی برای محاسبه‌ی مقدار رسوب خروجی از مخزن سد ارائه شده است (داده‌ها مربوط به عملیات فلاشینگ در سال ۱۳۶۷ می‌باشد).

اجرای مدل و تحلیل نتایج

در مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک انتخاب صحیح پارامترها تأثیری به سزا در عملکرد و اجرای بهتر مدل دارد. اندازه‌ی جمعیت اولیه که تأثیر به سزایی در همگرایی سریع تر به سمت پاسخ بهینه دارد، در این پژوهش برابر ۲۲۰۰ در نظر گرفته شده است. برای تعیین بهینه‌ی تعداد افراد جامعه، از مقادیر احتمال توزیع برابر ۰/۴ و عملگر توزیع از نوع یکنواخت استفاده شده است. همچنین انتخاب کروموزوم‌های برتر به منظور تولید نسل جدید بر اساس روش تورنمنت^۱ انجام گرفته است. با استفاده از اندازه‌ی جمعیت اولیه ۲۲۰۰، احتمال توزیع نیز بهینه گردید و مقدار بهینه‌ی احتمال توزیع ۰/۴۵ به دست آمد.

در این روابط: W_{bot} : عرض کف مخزن سد، SS_{res} : شیب جداره‌ی مخزن، EL_f : رقوم جریان در سرریز در حین فلاشینگ، W_{res} : عرض مخزن سد درست در بالادست آن و در تراز آب هنگام عملیات فلاشینگ، W_f : عرض کانال ایجاد شده در اثر عملیات فلاشینگ، Q_f : دبی فلاشینگ می‌باشد.

در این پژوهش مکانیزم انتقال رسوب مد نظر نبوده است که البته در پژوهش‌های آتی امکان این که این مورد در تابع هدف لحاظ شود، وجود دارد. برای این منظور مطالعه‌ی مرجع ۶ به خوانندگان توصیه می‌شود [۶].

جدول ۱- تعیین پارامتر ψ [۸]

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 (کم تر از $50 \text{ m}^3/\text{s}$)

مطالعه‌ی موردی: سد سفیدرود

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

در شکل (۲) نمودار تغییرات حجم مخزن در تراز نرمال در طول دوره‌ی بهره‌برداری از آن ارائه شده است. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، حجم اولیه‌ی مخزن ۱۷۶۰ میلیون مترمکعب می‌باشد که پس از ۱۸ سال بهره‌برداری 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 بسیار اندک بوده است. این تغییرات نشان دهنده‌ی این است که در دوره‌های اولیه فلاشینگ، این عملیات تأثیر به سزایی در احیاء مخزن داشته است، اما در سال‌های بعد تقریباً رسوبات سالیانه ورودی، خارج شده است.

الگوریتم ژنتیک، کروموزم‌هایی که خروجی‌های بالاتری را برای عملیات فلاشینگ در سه ماه آذر، دی و فروردین در نظر بگیرند، احتمال بقای بیشتری در نسل‌های متوالی خواهند داشت. علت آن که ضرایب ماه‌ها متفاوت در نظر گرفته شده است آنست که به علت ورودی‌های بیش‌تر در سه ماه آذر، دی و فروردین استفاده از حجم بالای ورودی در تخلیه‌ی رسوبات موجب کارآمدی بیش‌تر عملیات فلاشینگ می‌شود. به دلیل آن که از ماه اردیبهشت تا انتهای شهریور در پایین دست به آب با کیفیت قابل قبول جهت کشاورزی نیاز است، لذا در مدل بهینه‌سازی، محدودیت برای انجام عملیات فلاشینگ در این ماه‌ها اختصاص داده شده است.

در تابع هدف مدل بهینه‌سازی (رابطه‌ی ۵) مطابق با جدول (۳)، پنج سناریو متفاوت با تغییر ضرایب توابع هدف نیاز و رسوب (W_s و W_d) تعریف شدند و مدل بهینه‌سازی برای این پنج سناریو اجرا و نتایج آن در این جدول ارائه شده است. مقدار رسوبات خروجی و درصد مواقعی که ۷۰، ۱۰۰ و ۵۰ درصد نیازها تأمین شده‌اند به عنوان معیارهای ارزیابی نتایج مورد استفاده قرار

در تابع هدف مدل بهینه‌سازی برای محاسبه‌ی بار رسوبات خروجی با استفاده از داده‌های جدول (۲) محاسبات مورد نیاز انجام می‌شود. به دلیل ریزدانه بودن رسوبات موجود در مخزن سفیدرود مقدار Q_f برابر ۱۶۰۰ در نظر گرفته شده است. سایر محاسبات بر اساس روابط ۹ تا ۱۲ انجام شده است.

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

با توجه به میزان اثربخشی ماه‌های گوناگون در موفقیت عملیات فلاشینگ، ضرایبی مطابق راهکار موسسه‌ی 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

جدول ۲- داده‌های ورودی برای محاسبه‌ی مقدار رسوب خروجی در طول عملیات فلاشینگ در سد سفیدرود [۱]

عنوان پارامتر	علامت اختصاری	مقدار ورودی
ظرفیت ذخیره‌ی اصلی مخزن (میلیون متر مکعب)	C_0^1	۱۷۶۰
طول مخزن (متر)	L^2	۲۵۰۰۰
تراز سطح آب (متر)	C_{max}^3	۸۲
کمینه‌ی ارتفاع بستر (متر)	C_{min}^4	۰
شیب جداره‌ی مخزن	SS_{res}^5	۱:۲/۸۳-۱:۳/۳۷
میانگین جریان ورودی سالیانه (میلیون متر مکعب)	M_{in}^6	۵۰۰۰
میانگین جریان رسوبی ورودی سالیانه (میلیون تن)	M_{in}^7	۵۰
نوع رسوب	Type	ماسه، سیلت و رس
عرض کف مخزن (متر)	W_{bot}^8	۵۰۰
دبی فلاشینگ (متر مکعب بر ثانیه)	Q_f^9	۱۰۰
طول دوره‌ی فلاشینگ (روز)	T_f^{10}	۱۲۰
شیب جداره‌ی کانال فلاشینگ	SS_s^{11}	۱:۱
ارتفاع سطح آب سد در طول فلاشینگ (متر)	EL_f^{12}	۲۵

7- Sediment Annual Input

8- Bottom Width

9- Flushing Discharge

10- Time of Flushing

11- Flushing Channel Side Slope

12- Flushing Elevation

1- Original Capacity

2- Length

3- Maximum Elevation

4- Minimum Elevation

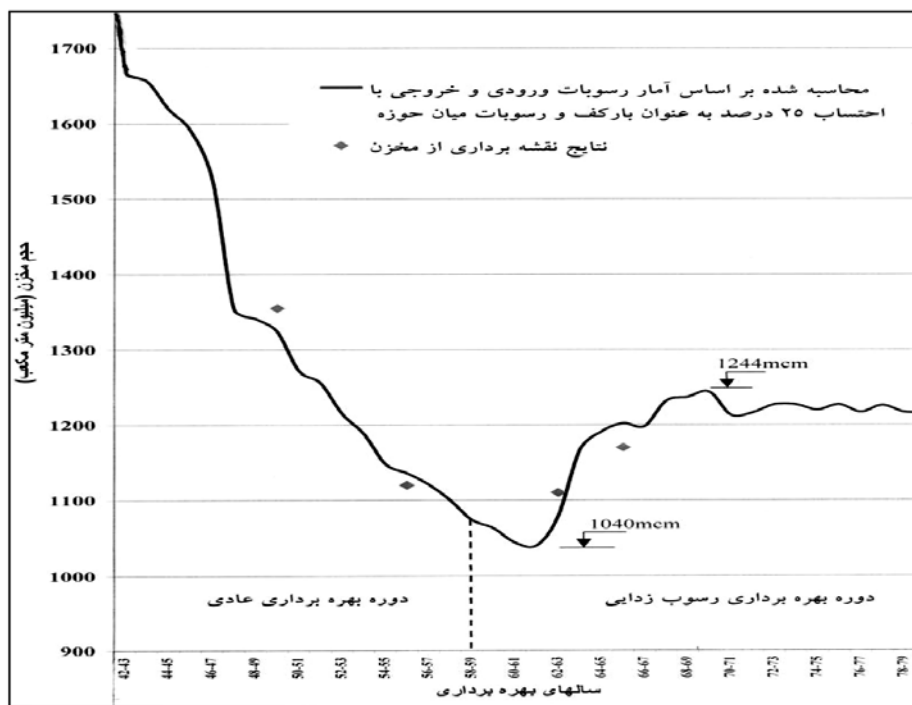
5- Reservoir Side Slope

6- Annual Input Water Volume

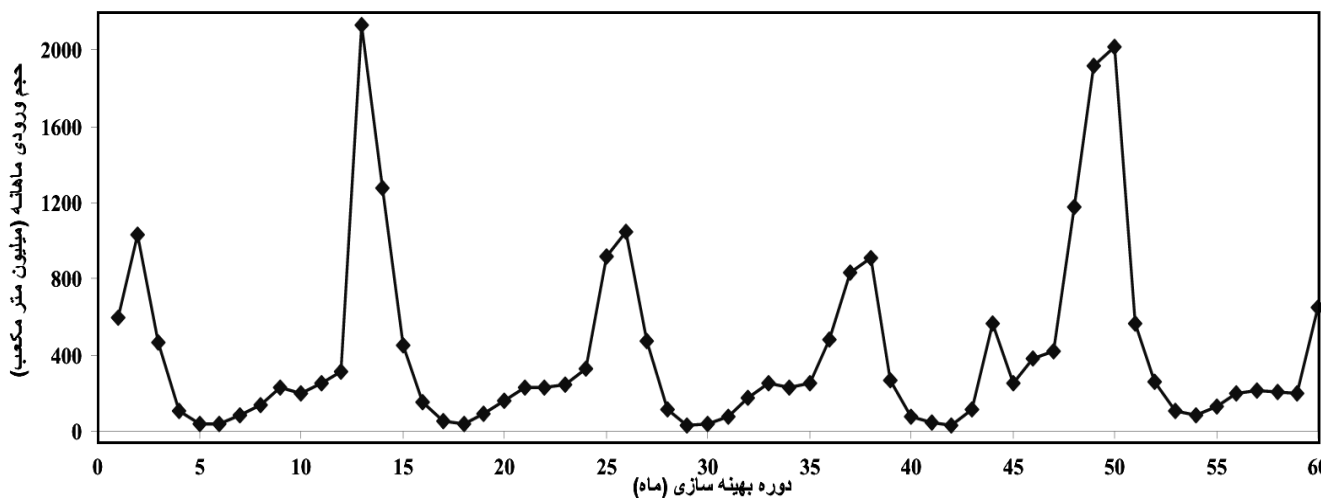
نیاز بخش کشاورزی است، می باشد. همان گونه که انتظار می رود نسبت به سناریوی نخست رسوبات کمتری قابل تخلیه می باشند، اما مشاهده می شود در ۸۴٪ مواقع ۱۰۰٪ نیازها تأمین شده اند. در رابطه با سناریوی سوم ($W_s=0.5$ و $W_d=0.5$) که هر دو هدف تخلیه بیشترین مقدار رسوبات و تأمین نیاز پایین دست همراه با هم و با ضرایب یکسان در نظر گرفته شده اند، نتایج با دو سناریو قبل تطابق دارند بدین صورت که در این سناریو نسبت به سناریوی نخست که هدف اصلی آن خروج رسوبات بود، رسوب کمتری قابل تخلیه شده در حالی که تأمین نیازها بهتر صورت گرفته است. در این جا در ۷۲٪ مواقع، ۱۰۰٪ نیازها تأمین شده اند.

گرفته اند. مقادیر این معیارها برای ۵ سناریوی در نظر گرفته شده در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین در این جدول مقادیر برآورد شده این معیارها بر اساس آمار تاریخی بهره برداری از مخزن ارائه شده که قابل مقایسه با نتایج مدل است.

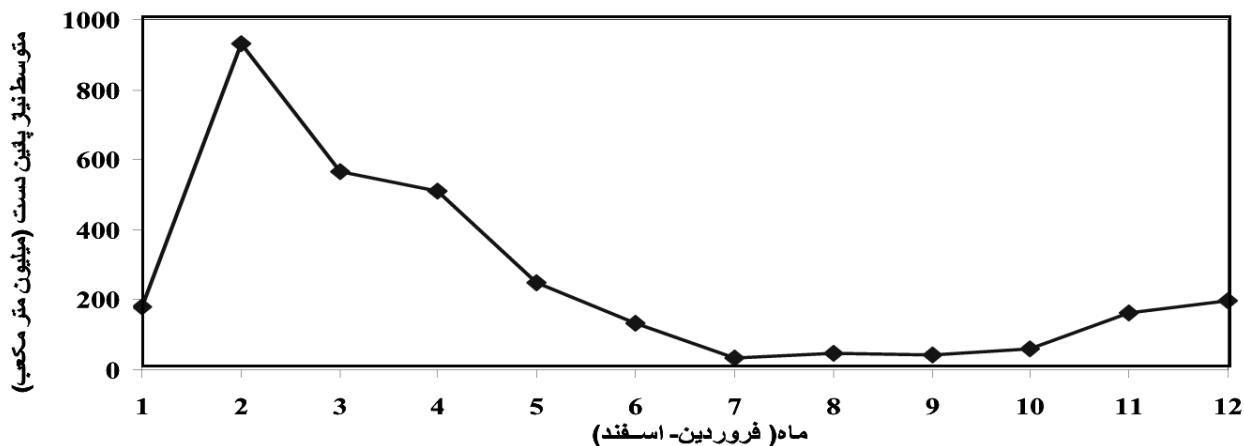
در مورد سناریوی نخست ($W_s=0.8$ و $W_d=0.2$) که هدف غالب در آن خروج بیشترین مقدار رسوبات می باشد، نتایج به دست آمده حاکی از آن است که میزان شایان توجهی از رسوبات با خروجی های این سناریو قابل تخلیه هستند. در این سناریو در ۶۹٪ مواقع، ۱۰۰٪ نیازها تأمین می شوند. در سناریو دوم ($W_d=0.8$ و $W_s=0.2$)، هدف غالب تأمین نیاز پایین دست که اهم آن آب مورد



شکل ۲- نمودار تغییرات حجم مخزن سفید رود در طول دوره ی بهره برداری [۴]



شکل ۳- سری زمانی دبی ماهانه ی ورودی به سد سفیدرود در این پژوهش [۵]



شکل ۴ - میانگین نیاز پایین دست برای سال های آبی (۸۵-۸۶) و (۸۴-۸۵) [۵]

بیش تر سناریوها بهبود نشان داده است. بهترین سناریوهایی که امکان این مقایسه را فراهم می کند، سناریوهای نخست و سوم هستند. بررسی نتایج در جدول (۳) نشان می دهد که درصد تأمین نیاز براساس سه معیار انتخاب شده در سناریوهای نخست و سوم بسیار نزدیک به مقادیر محاسبه شده براساس آمار تاریخی بهره برداری هستند در حالی که میزان رسوبات خروجی در این دو سناریو به ترتیب ۴/۴ و ۳/۳ برابر رسوبات تخلیه شده براساس آمار بهره برداری از سد می باشد.

به طور خلاصه نتایج نشان می دهد با توجه به میزان ورودی سالانه به سد و با در نظر گرفتن سال های خشکسالی و پر آبی، با اتخاذ سناریوی مناسب به عنوان سیاست بهره برداری، می توان توازن مناسبی بین اهداف تأمین نیاز پایین دست و احیاء حجم مخزن سفیدرود ایجاد کرد. در صورتی که تأمین نیازها در حد وضعیت بهره برداری تاریخی از مخزن مدنظر باشد، سناریوی سوم که امکان تخلیه ی حجم شایان توجهی از رسوبات را ضمن بهبود اطمینان پذیری تأمین نیازها در حد محدود فراهم می کند، مناسب ترین گزینه است.

در شکل (۵) مقادیر سری زمانی خروجی واقعی سد در ۵ سال بهینه سازی و نتایج مدل بهینه سازی در سناریوهای گوناگون ارائه شده است. با مقایسه ی نتایج مدل بهینه سازی با بهره برداری واقعی از سد، می توان مشاهده نمود که عملکرد سد سفیدرود در این دوره ی ۵ ساله مانند کل دوران بهره برداری تنها بر اساس تجربه ی دست اندرکاران سد سفیدرود بوده و با مدل بهینه سازی تطابقی ندارد. در بهره برداری از سد، برای خروج رسوبات از سیلاب های فروردین ماه استفاده نشده است. کمبود آب به وسیله ی خروجی های واقعی در اردیبهشت ماه بیش از کمبود آب به وسیله ی خروجی های سناریوها در این ماه است. روی هم رفته، نتایج به دست آمده از این پژوهش نشانگر کارایی مدل بهینه سازی توسعه داده شده در مدیریت بهره برداری از سد سفیدرود برای ایجاد بالانسی میان اهداف تأمین نیاز و خارج کردن رسوبات از مخزن بوده است.

سناریوی چهارم ($W_s=1$ و $W_d=0$) وزن تابع خسارت رسوب برابر یک و وزن تابع خسارت نیاز برابر صفر در نظر گرفته شده است. در این سناریو، هیچ گونه خسارتی برای نیاز در نظر گرفته نشده است. این بدان معنا است که نیاز پایین دست در میزان خروجی سد تأثیر گذار نبوده و تنها عامل مهم و تأثیر گذار خروج رسوبات بیشتر از مخزن سد می باشد.

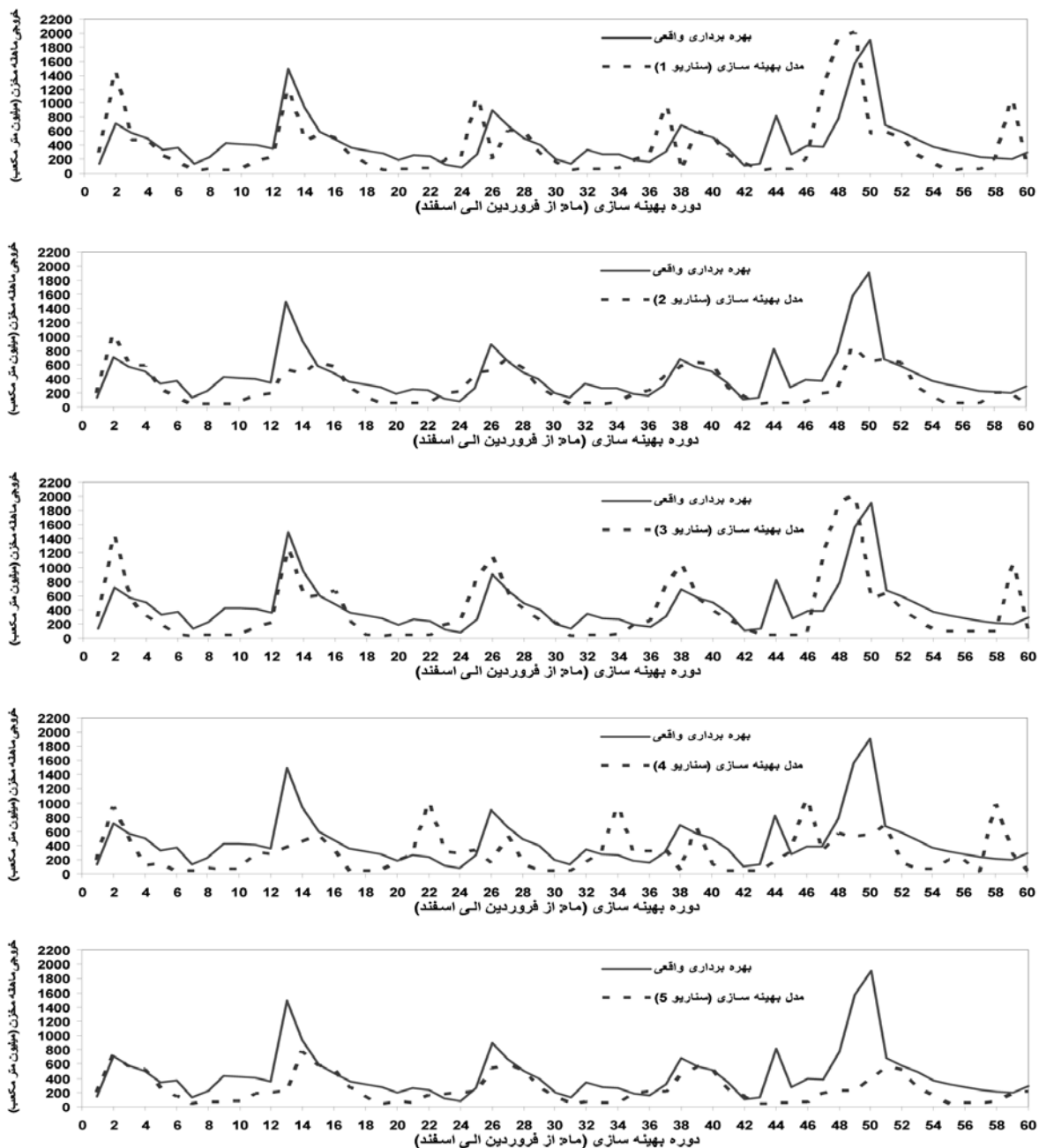
البته، همان گونه که اشاره شد، با توجه به نیاز شدید پایین دست به آبیاری در شش ماه آغازین هر سال، زمان عملیات فلاشینگ در شش ماه دوم سال یعنی از مهرماه تا فروردین ماه سال بعد در نظر گرفته می شود. در این سناریو تنها در ۵۹٪ مواقع ۱۰۰٪ نیازها تأمین می شوند، اما در مقابل میزان بار رسوب خروجی نسبت به بقیه سناریوها افزایش داشته است.

در سناریو پنجم ($W_s=0$ و $W_d=1$) تنها تأمین نیازها مد نظر بوده است و وزن تابع هدف رسوب صفر در نظر گرفته شده است. در این سناریو خروج رسوبات از مخزن سد عامل تعیین کننده ای برای دبی خروجی مخزن نخواهد بود و مانند قبل تجاوز نکردن از حجم بیشینه ی مخزن نیز ملاکی برای خروج آب می باشد. در این سناریو، ۱۰۰٪ نیازها در ۹۰٪ مواقع تأمین شده اند که نتیجه ی قابل قبولی برای این سناریو است، اما در مورد میزان رسوب قابل خروج می توان گفت با خروجی های این سناریو تنها رسوبات سالیانه ی ورودی به مخزن قابل تخلیه اند و رسوبات نهشته شده در مخزن تخلیه نمی شوند. به بیان دیگر می توان گفت میزان احیاء حجم مخزن سد بسیار ناچیز است.

روند تغییرات جدول نشان می دهد، با افزایش وزن تابع خسارت رسوب از درصد مواقع تأمین نیازها کاسته می شود و در مقابل مقدار رسوب قابل تخلیه به میزان شایان توجهی افزایش می یابد. مقایسه ی نتایج ۵ سناریوی مدل با مقادیر بهره برداری واقعی از مخزن نشان می دهد که به جز در سناریوی پنجم، در سایر سناریوها، میزان رسوبات خروجی بر اساس بهره برداری بهینه بیش تر از بهره برداری واقعی از سد بوده است. همچنین، اطمینان پذیری تأمین نیازها نیز در

جدول ۳- نتایج ۵ سناریوی گوناگون مدل بهینه سازی بهره برداری و داده های بهره برداری واقعی از مخزن سد سفیدرود

بهره برداری واقعی	سناریوی ۵ $W_s=0$ $W_d=1$	سناریوی ۴ $W_s=1$ $W_d=0$	سناریوی ۳ $W_s=0.5$ $W_d=0.5$	سناریوی ۲ $W_s=0.2$ $W_d=0.8$	سناریوی ۱ $W_s=0.8$ $W_d=0.2$	شاخص های بررسی عملکرد سناریوها در تامین نیازهای آبی و تخلیه ی رسوبات
۶/۱۱۰	۵/۳۱۱	۴۰/۱۱۲	۲۰/۰۱۹	۹/۳۰۶	۲۷/۰۲۸	میزان رسوب خروجی در واحد زمان (ton/sec)
۷۰	۹۰/۰	۵۹/۲	۷۲	۸۴/۴	۶۹/۲	درصد مواقع برآورده شدن ۱۰۰٪ نیازها
۸۳/۲	۹۳/۷	۷۰/۱	۸۵/۲	۹۲/۲	۷۹/۶	درصد مواقع برآورده شدن ۷۰٪ نیازها
۸۵/۳	۹۵/۱	۷۰/۴	۸۹/۵	۹۳/۹	۸۳/۶	درصد مواقع برآورده شدن ۵۰٪ نیازها



شکل ۵- مقایسه ی نتایج مدل بهینه سازی در سناریوهای گوناگون با مقادیر بهره برداری واقعی از مخزن سد سفیدرود

Flushing Sediment from Reservoir. TDR Project R5839, Wallingford Ltd.

9. 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.

10. Chang, F.J., Chen, L. and Chang, L.C. 2004. Optimization the Reservoir Operating Rule Curves by Genetic Algorithm. Hydrological Processes, Vol. 19, PP. 2277-2289.

11. 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.

12. Holland, J.H. 1975. Adaptation in natural and artificial systems" University of Michigan Press, Ann Arbor, Mich.

13. 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.

14. Kawashima, S., Butler, T.J., Annandale, G.W. and Shah, F. 2003. Reservoir Conservation: RESCON Model and User Manual". USA, 2003.

15. Kerachian, R. and Karamouz, M. 2006. Optimal Reservoir Operation considering the Water Quality Issues: A Stochastic Conflict Resolution Approach." Water Resources Research, W 12401, Vol. 42, doi: 10.1029/2005WR004575, 1-17.

16. Mahmood, K. 1987. Reservoir sedimentation: impact, extent and mitigation, Technical paper No. 71, World Bank, Washington DC.

17. Mohan, S. and Raipure, M. 1992. Multi-objective Analysis of Multi-reservoir System, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 118, No. 4, PP. 356-370.

18. Pitt, J. D. and Thompson, G. 1984. The impact of sediment on reservoir life", Proc. Conf. on challenges in African Hydrology and Water

خلاصه و نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل بهینه سازی الگوریتم ژنتیک با طول کروموزوم متغیر که سرعت همگرایی آن در رسیدن به پاسخ بهینه از الگوریتم ژنتیک معمولی بیش تر است، خروجی های سد سفیدرود برای یک دوره ی پنج ساله با تأکید بر فلاشینگ مخزن بهینه شدند و نتایج به دست آمده با نیاز پایین دست و خروجی های واقعی سد مقایسه شدند. مقایسه ی نتایج به دست آمده از مدل بهینه سازی و بهره برداری واقعی سد نشان دهنده ی اختلاف زیاد این دو می باشد. این مطلب بیانگر آن است که عملکرد سد سفیدرود از ابتدا تاکنون بیش تر بر اساس تجربیات مسئولان سد بوده است و کم تر سعی در استفاده از روش های نوین صورت گرفته است.

بررسی های انجام شده نشان دهنده ی عدم استفاده ی مفید از سیلاب های فروردین ماه برای خروج رسوبات بوده است. نتایج مدل بهینه سازی نشان می دهد که امکان افزایش راندمان عملیات فلاشینگ و تأمین نیازهای آبی پایین دست سد سفیدرود وجود دارد. مقایسه ی نتایج سناریوهای گوناگون در این پژوهش نشان می دهد که از آنجا که بحث خروج رسوبات ورودی به مخزن سد سفیدرود قابل چشم پوشی نمی باشد، سناریوهای دوم و سوم که ضریب تابع هدف رسوب در آنها به ترتیب $0/2$ و $0/5$ بوده است می توانند در تدوین سیاست های بهره برداری از این سد مورد استفاده قرار گیرند. هر چند که در شرایط ویژه، هر کدام از پنج سناریوی پیشنهادی قابل بهره برداری هستند.

منابع

1. شرکت سهامی آب منطقه ای گیلان. ۱۳۶۷. گزارش عملیات رسوب زدایی سد سفیدرود، امور سدها.
2. شرکت سهامی آب منطقه ای گیلان. ۱۳۸۵. گزارش عملیات رسوب زدایی سد سفیدرود، امور سدها.
3. شرکت آب منطقه ای گیلان، "گزارشات کمیته رسوب سد سفیدرود"، ایران، ۱۳۵۹-۱۳۸۶.
4. موسسه تحقیقات آب، "رسوب زدایی مخزن سد سفیدرود" ۱۳۵۹، ۱۳۶۰، ۱۳۶۷، ۱۳۸۳.
5. وزارت نیرو کمیته ملی سدهای بزرگ ایران. ۱۳۸۳. بررسی فنی عملیات شاس در سفیدرود.
6. اسماعیلی، ک. شفاعی بجستان، م. و کاشفی پور م. ۱۳۸۳. بررسی آزمایشگاهی عوامل موثر بر انتقال رسوب در شرایط سیلاب طغیانی، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری، سال اول، شماره ۲، ۱-۳.
7. Annandale, G.W. 1987. Reservoir sedimentation. Developments in Water Science, Title 29. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands.
8. Atkinson, E. 1996. The Feasibility of

Models for Reservoir Operation Optimization. Water Resources Research, Vol. 20, No. 11, PP. 1499-1505.

22. Wardlaw, R. and Sharif, M. 1999. Evaluation of Genetic Algorithms for Optimal Reservoir System Operation, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 125, No. 1, PP. 25-33.

23. Zahraie, B., Kerachian, R. and Malekmohammadi, B. 2008. Reservoir Operation Optimization Using Adaptive Varying Chromosome Length Genetic Algorithm. Water International, IWRA, Vol. 33, No. 3, PP. 380-391.

Resources. Int. Association of Hydrology Scs. Publication No. 144.

19. 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, PP. 39-54.

20. 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.

21. Stedinger, J.R., Sule, B.F. and Loucks, D.P. 1984. Stochastic Dynamic Programming

*Abstract***Flushing Sediment Removal Optimization Using Reservoir Operation Model: Sefid-Rud Case Study**S.S. Ashraf Vaghefi¹, B. Zahraie², B. Malek Mohammadi³ and M.A. Bani Hashemi⁴

Operation optimization of the reservoirs has been mostly carried out based on general objectives, including water demand supplies, power generation, flood management, and environmental constraints. In most of the previously developed models, sediment removal from reservoirs has not been included. Flushing is one of the most important and common ways of retrieving the lost volume of reservoirs due to sedimentation. Despite its adverse effects on the environment of downstream rivers, this method has received lots of attention by engineers and researchers in the past. One of the main drawbacks of the previous studies in the field of reservoir operation optimization has been lack of modeling tools for considering the relation between sediment removal and other objectives of reservoir operation. In this paper, a new approach has been developed for monthly reservoir operation optimization. For this purpose, a model has been formulated to minimize the total deficit in supplying demands and to maximize the total volume of sediment removed from the reservoir. The objective function for sediment outflow has been developed using the flushing method. The optimization model has been formulated using Varying chromosome Length Genetic Algorithm (VLGA). The efficiency of the model has been tested in the case study of Sefidrud Reservoir in North of Iran. The results of the optimization model for a 5-year period have been compared with the historical records of the operation of the reservoir. The results of the case study have been summarized in the form of practical operating rules for flushing and operation management.

Keywords: *Sediment Removal, Operation Optimization Model, Variable chromosome Length Genetic Algorithm (VLGA), Flushing and Sefidrud Reservoir.*

1- PhD Candidate, faculty of Civil Engineering, University of Amir Kabir, Tehran, Iran, svaghefi@aut.ac.ir

2- Associate Professor, school of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, bzahraie@ut.ac.ir

3- PhD, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, malekb@ut.ac.ir

4- Assistant Professor, school of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, banihash@ut.ac.ir