

بهینه‌سازی سیاست بهره‌برداری از مخزن با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی (مطالعه موردی: سد مهاباد)

نازک روزگاری^{*}، یوسف حسن زاده^۲، محمد تقی ستاری

تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱/۱۹

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

۲. استاد گروه مهندسی آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

۳. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Nazak_Rouzegari@yahoo.com

چکیده

در این مطالعه، به منظور ارائه سیاست بهینه بهره‌برداری مخزن سد مهاباد، دو مدل بهره‌برداری بهینه با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی (حلال مینوس/گمز) و الگوریتم بهینه‌سازی حرارتی، نوشته شد. به دلیل فقدان داده‌های نیاز زیست‌محیطی، این داده‌ها با استفاده از روش تنانت محاسبه گردید. در هر یک از این مدل‌ها، تابع هدف به صورت کمینه‌سازی اختلاف آب موردنیاز کشاورزی در پایین‌دست سد و آب رهاسازی شده از سد در طول ۲۳ سال دوره آماری بهره‌برداری سد (۱۳۹۳-۱۳۷۰)، در نظر گرفته شد و کارآیی آن‌ها با استفاده از شاخص‌های بهره‌برداری مخزن مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر حاصل شده برای تابع هدف در هر دو مدل بهینه‌سازی و همچنین نتایج شاخص‌های عملکرد مخزن سد نشان داد، روش فراابتکاری شبیه‌سازی حرارتی با مقدار تابع هدف معادل ۲۲/۰۱، قابلیت اعتماد زمانی ۲۵٪، سرعت برگشت‌پذیری ۲۲/۲۲٪، آسیب‌پذیری ۴۱/۰۴٪ و شاخص پایداری ۰/۰۳۲، در مقایسه با برنامه‌ریزی غیرخطی با مقدار تابع هدف معادل ۸۸/۹۲، قابلیت اعتماد زمانی ۴۸/۱۸٪، سرعت برگشت‌پذیری ۳۲/۸۶٪، آسیب‌پذیری ۸۴/۲۷٪ و شاخص پایداری ۰/۰۲۴ نتایج نسبتاً بهینه‌تری ارائه داد. همچنین مشخص گردید که روش حرارتی نسبت به روش برنامه‌ریزی غیرخطی به زمان اجرای طولانی‌تری تا رسیدن به نقطه بهینه سراسری لازم داشت، ولی با محاسبه میزان کمبود ۱۶۳۲/۲۴ میلیون مترمکعب نسبت به روش برنامه‌ریزی غیرخطی که دارای مقدار کمبود ۳۳۵۱/۴ میلیون مترمکعب بود، میزان کمبودها را نسبت به روش برنامه‌ریزی غیرخطی (حلال مینوس/گمز) کاهش داده و عملکرد نسبتاً مناسب‌تری را ارائه داد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم حرارتی، برنامه‌ریزی غیرخطی، بهره‌برداری از مخزن، بهینه‌سازی، سد مهاباد

Optimization of Reservoir Operational Policy Using Simulated Annealing Algorithm (Case Study: Mahabad reservoir)

N Rouzegari^{*1}, Y Hassanzadeh², MT Sattari³

Received:2016.04.04

Accepted:2017.04.08

1.M.Sc. Dept. of Water Engin., Faculty of Civil., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

2.Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Civil., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

3.Assis. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding Author, Email: Nazak_Rouzegari@yahoo.com

Abstract

In this paper two models have been written and solved by two approaches: non-linear programming (GAMS/MINOS solver) and simulated annealing methods in order to optimize operational rules in Mahabad reservoir. Because of missing the required eco-system data, these required data were calculated using Tennant method. The objective function was defined to minimize the deference between the amounts of agriculture water demand and the released water from the reservoir during 23 years of flow data (1370-1393) and their performance were evaluated using the operational indexes. Obtained results of both optimization models showed that, the simulated annealing algorithm with objective function value of 22.01, reliability value of 25%, resiliency velocity value of 22.22%, vulnerability value of 41.04% and sustainability value of 0.032, gave relatively better results compared to the non-linear programming method with the objective function value of 88.92, reliability value of 48.18%, resiliency velocity value of 32.86%, vulnerability value of 84.27% and sustainability value of 0.024. Also, it was found that, simulated annealing algorithm took longer running time to achieve the global optimal point in comparison to non-linear programming. However, using simulated annealing algorithm estimated a lower water shortage of 1632.24 MCM compared to the non-linear programming which estimated water shortage of 3351.4 MCM. Simulated annealing algorithm decreased the shortage by distributing shortages in different months and estimated a better performance.

Keywords: Mahabad reservoir, Non-linear programming, Optimization, Reservoir operation, Simulated annealing algorithm

مقدمه

(۲۰۰۵) روش شبیه‌سازی حرارتی را برای استخراج سیاست بهره‌برداری مخزن سدی در تایلند به کار بردند و نتایج حاصل از آن را با نتایج حاصل از روش الگوریتم ژنتیک مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روش شبیه‌سازی حرارتی کارایی بهتری داشته و نتایج با کیفیت بهتر و در طول زمان محاسباتی کمتر نسبت به الگوریتم ژنتیک در اختیار قرار می‌دهد. خدابخشی و همکاران (۲۰۰۹)، روش

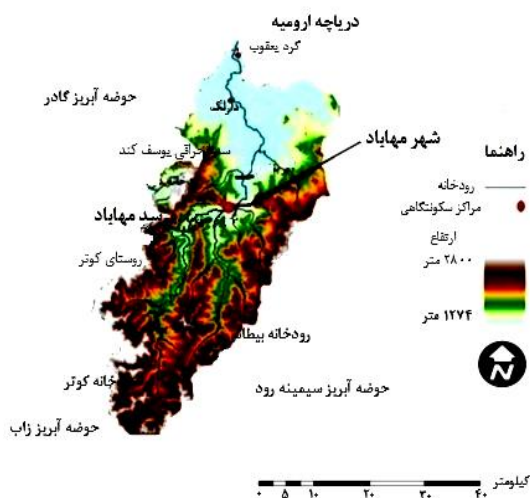
مسائل بهینه‌سازی منابع آب به لحاظ تنوع ضوابط تصمیم‌گیری و توابع هدف دارای پیچیدگی‌هایی است که بعضاً حل آن‌ها با روش بهینه‌سازی کلاسیک امکان‌پذیر نیست و یا مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار است. بنابراین استفاده از ابزارهای نوین و روش‌های جدید در حل مسائل امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد (صابرچناری و همکاران ۱۳۹۱). جانجیرا و همکاران

می‌رسد تاکنون در سد مهاباد هیچ تحقیقی در ارتباط با بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد با لحاظ نیازهای زیست‌محیطی صورت نگرفته است. بنابراین در این تحقیق، سیاست بهینه بهره‌برداری از مخزن سد مهاباد با دو روش الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی و برنامه‌ریزی غیرخطی (حلال مینوس/گمز) استخراج و نتایج حاصل از این روش‌ها با عملکرد فعلی و موجود در مخزن مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق از آمار و داده‌های ۲۳ ساله (۱۳۹۳-۱۳۷۰) سد مهاباد از سدهای حوضه دریاچه ارومیه در استان آذربایجان غربی (داده‌های ایستگاه هیدرومتری کوتر و بیطاس، واقع در بالادست سد مهاباد) استفاده شده است. این سد که در یک کیلومتری جنوب‌غربی شهر مهاباد واقع شده است، دارای موقعیت جغرافیائی به طول شرقی ۴۵ درجه و ۴۳ دقیقه و عرض شمالی، ۳۶ درجه و ۴۲ دقیقه جغرافیائی می‌باشد. این سد با ارتفاع از بستر ۴۵ متر، حجم بدنه سد ۱/۶۶ میلیون متر مکعب، حجم مخزن در تراز نرمال ۱۹۷/۸ میلیون متر مکعب، حجم مفید ۱۷۰/۳ میلیون متر مکعب و با طول تاج ۷۰۰ متر در حومه شهر مهاباد واقع شده است. حوضه سد مهاباد در شکل ۱ نشان داده شده است.



الگوریتم بهینه‌سازی حرارتی را برای مسئله بهره‌برداری بهینه مخزن سد دز به کار بردند و نتایج حاصل از آن را با نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان^۱ روش برنامه‌ریزی پویا و روش مودیس^۲ مورد مقایسه قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از این بود که روش بهینه‌سازی حرارتی در چنین مسائلی پیچیده و چند مخزنی و بزرگ مقیاس از دقت بالایی برخوردار است. کنگران و همکاران (۲۰۱۲) روش شبیه‌سازی حرارتی را به منظور بهینه‌سازی دو مخزن سد سیریندورن^۳ و آبولراتانا^۴ در تایید به کار بردند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که روش شبیه‌سازی حرارتی قادر است که منحنی فرمان مخزن سد را بهبود بخشد. برهانی داریان و شهیدی (۱۳۸۷)، کارآیی روش‌های شبیه‌سازی حرارتی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم مورچگان را در مسأله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز، مورد بررسی قرار دادند. مقایسه روش‌ها نشان داد که الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی، روش قدرتمندی نسبت به سایر روش‌ها است و در زمان کم‌تری به نتایج بهتری می‌رسد. رزاقی و همکاران (۱۳۹۲) نیز به منظور توسعه سیاست بهره‌برداری مخزن چندمنظوره سد نمود، روش مودیس را به کار بردند و آن را در دو حالت با و بدون جیره‌بندی اجرا کردند سپس شاخص‌های درصد تامین، اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و پایداری سیستم برای دو حالت محاسبه کردند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که با اعمال سیاست جیره‌بندی، شاخص‌های اعتمادپذیری و پایداری سیستم به ترتیب به میزان ۱۰ و ۷ درصد افزایش و شاخص‌های آسیب‌پذیری و سرعت برگشت‌پذیری ۱۸ و ۹ درصد کاهش می‌یابد که نشان از بهبود این شاخص‌ها در شرایط اعمال سیاست جیره‌بندی در سیستم دارد. سد مهاباد یکی از سدهای مهم واقع در حوضه دریاچه ارومیه است که بر روی رودخانه مهابادچای احداث شده است. با توجه به بررسی منابع صورت گرفته، به نظر

1. Ant colony optimization (ACO)
2. Modism
3. Sirindhorn
4. Ubolratana

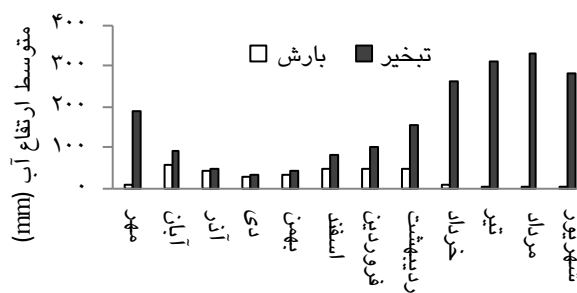
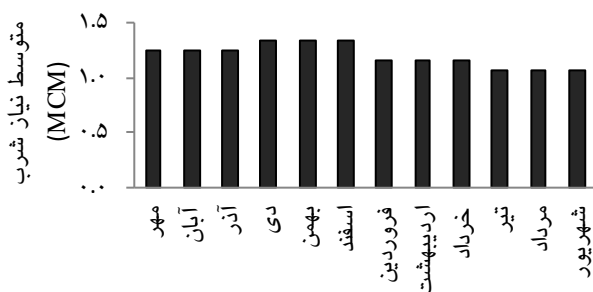
شکل ۱- حوضه آبریز مه‌آباد.

یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به شکل ۵ ملاحظه می‌شود که در ماه‌های سرد سال یعنی ماه‌های آذر، دی و بهمن به دلیل عدم فعالیت کشاورزی آب مورد نیاز برای این ماه‌ها برابر صفر در نظر گرفته شده است. سد انحرافی

دیگری در ۸ کیلومتری مه‌آباد در محلی به نام یوسف کندی جهت آبیاری اراضی ساخته شده است. سد مه‌آباد یک سد برق آبی بوده و تولید انرژی دارد.

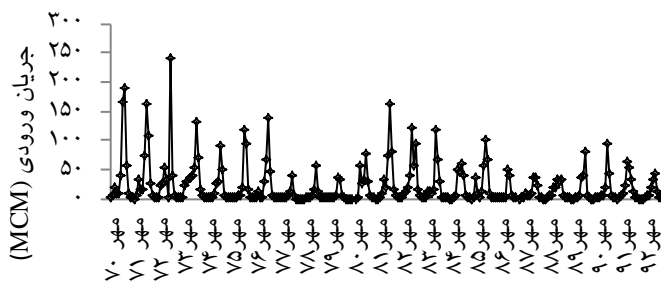
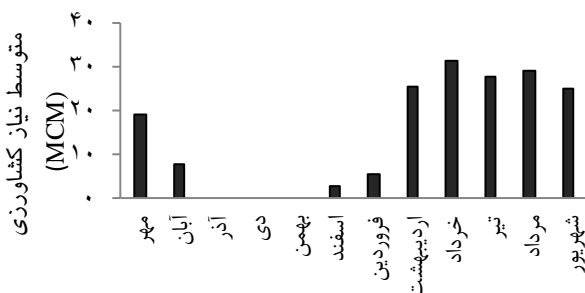
براساس گزارشات سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی می‌توان اظهار داشت که آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی در مسیر خود از توربین عبور کرده و منجر به تولید نیروی برق آبی و در نتیجه استفاده بهینه از آب می‌گردد. در نتیجه آب جداگانه‌ای برای تولید نیروی برقی در نظر گرفته نشده است.

متوسط نرخ بارش و تبخیر ماهانه از سطح مخزن و مقادیر ماهانه جریان ورودی به مخزن، آب مورد نیاز شرب، آب مورد نیاز کشاورزی در طول ۲۳ سال دوره آماری به ترتیب در شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ ارائه شده است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که در فصول گرم سال یعنی ماه‌های تیر، مرداد و شهریور بارش دارای کمترین مقدار و تبخیر دارای بیشترین مقدار در شکل ۳، نقاط اوج منحنی نشان‌دهنده بیشترین مقدار متوسط جریان ورودی به مخزن است که در فصل زمستان و اوایل فصل بهار اتفاق می‌افتد. با توجه به شکل ۴ و ۵ و طبق گزارش‌های سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی می‌توان دریافت که مجموع نیاز سالانه پایین‌دست سد مه‌آباد برای بخش کشاورزی معادل ۱۷۲/۹ میلیون مترمکعب و برای بخش شرب معادل ۱۴/۵ میلیون مترمکعب است که از مجموع داده‌های مهر تا شهریور ماه حاصل گشته و در طول ۲۳ سال آماری



شکل ۴- تقاضای آب شرب پایین‌دست سد مه‌آباد.

شکل ۲- متوسط بارش و تبخیر از سطح دریاچه مه‌آباد.



شکل ۳- جریان ورودی به مخزن سد مه‌آباد طی دوره آماری.

شکل ۵- تقاضای آب کشاورزی پایین‌دست سد مه‌آباد.

$$\exp(-\Delta f/KT) \quad \Delta f > 0 \quad [1]$$

در این رابطه، P : احتمال پذیرش نقطه‌ی بعدی، K : ثابت بولترمن، T : پارامتر کنترلی (دما)، Δf : تغییر در مقدار تابع هدف می‌باشد. به عبارت دیگر چنانچه $(\Delta f \leq 0)$ جواب X_i مورد پذیرش واقع می‌شود اما اگر $(\Delta f > 0)$ شرط زیر اعمال می‌گردد:

$$P = \exp(-\Delta f/KT) \quad [2]$$

چنانچه مقدار p از عددی تصادفی با توزیع یکنواخت (r) در بازه $(0, 1)$ بیشتر باشد جواب پذیرفته می‌شود. اما چنانچه $p < r$ باشد جواب X_i رد شده و جواب دیگری در همسایگی جواب اولیه انتخاب می‌گردد. یکی دیگر از پارامترهای مهم در تعیین کیفیت روش حرارتی تعداد نقاط جستجو شده در فضای جواب مسئله در هر دما است. به تعداد این جواب‌ها اصطلاحاً زنجیره مارکوف گفته می‌شود. ساده‌ترین پیشنهاد برای تعیین مقدار طول زنجیر مارکوف در روش حرارتی، انتخاب یک مقدار ثابت و مستقل از دمای اولیه است که باید در حد امکان به اندازه مسئله نزدیک باشد. بعد از تعداد معینی تکرار با توجه به ابعاد مسئله پارامتر کنترلی (دما) از طریق رابطه زیر تغییر می‌کند (کیرک پاتریک ۱۹۸۲):

$$T_{i+1} = \alpha T_i \quad [3]$$

که در آن α فاکتور کاهش دماست که مقدار آن به پیشنهاد کیرک پاتریک بین $(0.8 - 0.99)$ در نظر گرفته می‌شود (کیرک پاتریک و همکاران ۱۹۸۲). به دلیل حساسیت الگوریتم حرارتی نسبت به پارامترها با انجام تقریب‌های مقدماتی و سعی و خطا ترکیب مناسب پارامترها (دمای اولیه T_0 و طول زنجیره مارکوف n) برای اجرای نهایی الگوریتم تعیین شد (عمادی و همکاران ۱۳۹۱). پارامترهای مختلف الگوریتم حرارتی در جدول ۱ ارائه شده است.

محاسبه نیاز آب زیست‌محیطی با استفاده از روش هیدرولوژیکی تنانت^۵ یا مونتانا

در سال ۱۹۷۶، دونالد تنانت روشی برای تعیین جریان زیست‌محیطی مورد نیاز برای ماهی‌ها معروف به روش (مونتانا) معرفی کرد (تنانت ۱۹۷۶). در این روش، درصدهای مختلفی از متوسط جریان سالانه در نظر گرفته می‌شود (تارمه ۲۰۰۳). روش تنانت، از متوسط جریان سالانه برای دو ۶ ماهه سال که در آن بوم‌سازگان رودخانه در حد قابل‌قبولی حفظ شود، استفاده می‌کند (تنانت ۱۹۷۶). سطح قابل‌قبول از این روش، با توجه به نشریه استاندارد وزارت نیرو، معادل ۳۰ درصد دبی متوسط سالانه برای فروردین تا شهریور (به‌عنوان دوره پرآبی) و ۱۰ درصد دبی متوسط سالانه برای مهر تا اسفند (به‌عنوان دوره کم‌آبی) می‌باشد (بی‌نام ۱۳۸۸).

الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی

اساس این الگوریتم بر پایه شبیه‌سازی فرایند نورد^۵ می‌باشد. برای این‌که اجازه داده شود دما به آهستگی کاهش یابد، تغییرات غیربهبوددهنده تابع هدف با احتمال معینی انتخاب می‌شوند به‌طوری‌که وقتی مقدار هدف کاهش می‌یابد، این احتمال نیز تقلیل یابد. این مورد یکی از نقاط قوت رویکرد الگوریتم حرارتی است (آذر افزا و همکاران ۱۳۹۱). ابتدا در دمای معین و مشخص، با توجه به ابعاد مسئله در فضای جواب موجه، جواب اولیه انتخاب شده (X_0) و مقدار تابع هدف به ازای جواب اولیه محاسبه می‌شود $(f(X_0))$. در شعاع همسایگی معین، جواب دیگری به صورت تصادفی انتخاب شده (X_1) و مقدار تابع هدف به ازای جواب جدید نیز محاسبه می‌شود $(f(X_1))$ با توجه به این‌که برای کمینه‌سازی تابع هدف جستجو همیشه در جهت کمتر شدن مقدار تابع هدف صورت می‌گیرد، برای پذیرش جواب جدید از معیار پذیرش زیر استفاده می‌شود (کیرک پاتریک ۱۹۸۲):

$$P(\text{accept}) = \begin{cases} 1 & \Delta f \leq 0 \end{cases}$$

5. Tenant
6. Rolling

عمدتاً مبتنی بر روش‌های گرادیان می‌باشد. در این مقاله نیز از حلال مینوس استفاده گردیده است که برای هر دو مسئله خطی و غیرخطی کاربرد دارد (بروک و همکاران ۱۹۹۶). برای حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی به روش کلاسیک، کدی در این محیط نوشته شده و اجرا گردیده است. تابع هدف در این تحقیق در برگیرنده اختلاف مقدار جریان خروجی با نیاز پایین‌دست با توجه به برقراری معادله پیوستگی می‌باشد. پس از تنظیم این تابع، کمینه آن به صورت رابطه زیر محاسبه خواهد شد (خادمی و همکاران ۱۳۹۰):

$$\text{Minimize } F = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{12} ((DE_{i,t} - IR_{i,t}) / DE_{max})^2 \quad [4]$$

در این رابطه F مقدار تابع هدف، i شمارنده سال، N تعداد سال‌های آماری، t شمارنده ماه، $IR_{i,t}$ حجم برداشت یا رهاسازی آب کشاورزی از مخزن سد در ماه t از سال i ، $DE_{i,t}$ نیاز کشاورزی در ماه t از سال i ، DE_{max} بیشینه نیاز آبی ماهانه در کل طول دوره بهره‌برداری است (باتوجه به این که تقاضای ماهانه به صورت میانگین سالانه در نظر گرفته شده است، بنابراین مقدار DE_{max} مقداری است که دارای بیشترین مقدار از مهر تا شهریور ماه باشد). قیدها موجود برای مسئله بهره‌برداری مخزن سد به صورت روابط زیر تعریف می‌گردد (جنت‌رستمی و همکاران ۱۳۸۹):

$$ST_{t+1} = ST_t + QF_t + PP_t - EV_t - IR_t - DR_t - ECO_t - SPILL_t \quad [5]$$

$$A = A_0 + \alpha \times ST + \beta \times ST^2 \quad [6]$$

$$ST_t \leq K_D + K_A \quad [7]$$

$$EV_t = e_t \times (A_0 + \alpha \times ((ST_t + ST_{t+1})/2) + \beta \times ((ST_t + ST_{t+1})/2)^2) \quad [8]$$

$$PP_t = p_t \times (A_0 + \alpha \times ((ST_t + ST_{t+1})/2) + \beta \times ((ST_t + ST_{t+1})/2)^2) \quad [9]$$

$$ST_t \geq K_D \quad [10]$$

$$ST_t = K_D \quad [11]$$

$$IR_t \leq DE_t \quad [12]$$

قیود مربوط به حجم سرریز:

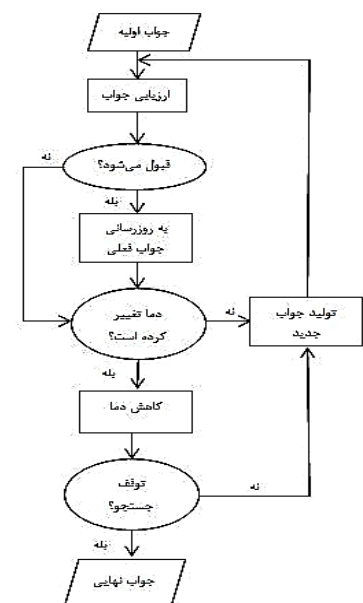
$$SPILL_t = \begin{cases} ST_{t+1} - S_{max} & \text{if } ST_{t+1} > S_{max} \\ 0 & \text{if } ST_{t+1} < S_{max} \end{cases} \quad [13]$$

تابع جریمه مربوط به حجم مخزن:

جدول ۱- پارامترهای الگوریتم حرارتی.

تابع به‌هنگام سازی دما	تابع سرد کردن (حرارتی)	دمای اولیه (T_0)	طول زنجیره مارکوف (n)
خطی نمایی لگاریتمی	بولتزن سریع	100	100

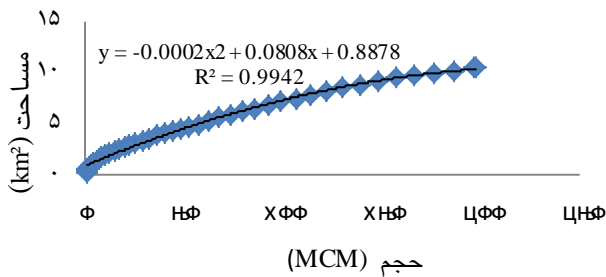
در این جدول T_0 دمای اولیه است که به‌عنوان پارامتر کنترلی الگوریتم بهینه‌سازی حرارتی عمل می‌نماید و n تعداد تکرار یا طول زنجیره مارکوف می‌باشد. براساس الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی یک برنامه‌ی کامپیوتری در محیط متلب جهت بهینه‌سازی تهیه شد و برنامه در شرایط مختلف اجرا گردید. در این پژوهش روند کار در این الگوریتم به صورت شکل ۶ می‌باشد.



شکل ۶- روند نامی الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی.

برنامه‌ریزی غیرخطی

برای حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی ارائه شده در این مقاله از محیط برنامه‌نویسی گمز^۷ و به‌منظور بهره‌برداری بهینه از سیستم مخزن سد مهاباد استفاده شده است. روش‌های حلی که در این محیط وجود دارد،



شکل ۷- نمودار سطح- حجم سد مهاباد.

شاخص‌های عملکرد مخزن

باتوجه به این‌که از دو روش متفاوت برای بهره‌برداری بهینه مخزن سد مورد نظر استفاده به عمل آمده است، در نتیجه با استفاده از شاخص‌های عملکرد مخزن این نتایج را می‌توان مورد ارزیابی قرار داد. در تحقیق حاضر پس از محاسبه این شاخص‌ها در هر دو روش، نتایج حاصل با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت (لاکس و بیک ۲۰۰۵).

$$\delta = 100(1-f/F) \quad [15]$$

$$\lambda = 100(f_s/f) \quad [16]$$

$$\eta = (\sum_{ief} R_i^* - \sum_{ief} R_i) / (\sum R_i^*) \quad [17]$$

$$\varphi = \delta \lambda (1-\eta) \quad [18]$$

که در این روابط، δ قابلیت اعتماد زمانی ($0 \leq \delta \leq 1$) بیانگر درصدی از زمان است که مخزن قادر به تامین آب مورد تقاضای مصرف کننده است، f : تعداد کل دوره‌های شکست، F تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری، λ سرعت برگشت پذیری (برای ارزیابی یک سیستم ذخیره در برگشت از حالت شکست به حالت بهره‌برداری نرمال، از این شاخص استفاده می‌شود)، f_s : تعداد سری دوره‌های شکست پیوسته، η : بزرگی شکست، بیانگر شدت کمبود در طی دوره شکست می‌باشد، R_i^* تقاضای مورد نظر در طول t امین دوره شکست، R_i مقدار آب رها شده از سیستم در طول t امین دوره شکست و φ قابلیت انعطاف‌پذیری می‌باشد (با توجه به عدم وجود رابطه‌ی همگرایی بین شاخص‌های عملکرد مخزن در برخی بررسی‌ها، لاکس شاخص پایداری را که ترکیبی از سه شاخص بود معرفی نمود. گزینه‌ای که بیشترین شاخص پایداری را داشته باشد به‌عنوان گزینه بهینه معرفی می‌شود).

$$Penalty_t = \begin{cases} ((ST_{t+1} - S_{min})/S_{min})^2 & \text{if } ST_{t+1} < S_{min} \\ 0 & \text{if } ST_{t+1} > S_{min} \end{cases} \quad [14]$$

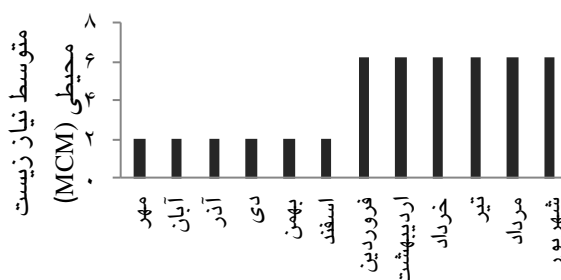
که در آن ST_{t+1} حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره‌ی QF_t $t+1$ حجم ذخیره‌ی مخزن در ابتدای دوره‌ی PP_t t حجم جریان ورودی به مخزن در دوره‌ی t حجم بارش بر سطح دریاچه در دوره t حجم تبخیر از سطح دریاچه در دوره t IR_t حجم برداشت یا رهاسازی آب کشاورزی در دوره‌ی t DR_t حجم رهاسازی آب مورد نیاز شهری، ECO_t حجم آب مورد نیاز زیست‌محیطی، $SPILL_t$ حجم سرریز در دوره‌ی t A_0 و α و β مقادیری هستند که از رسم نمودار سطح- حجم مخزن سد و برازش منحنی غیرخطی به‌صورت شکل ۷ به‌دست آمده‌اند و به‌ترتیب برابراند با $0/0808$ ، $0/8878$ و $0/0002$ و S_{min} و S_{max} به‌ترتیب کمینه حجم ذخیره مخزن معادل $25/26$ میلیون مترمکعب و بیشینه حجم ذخیره مخزن معادل $197/66$ میلیون مترمکعب می‌باشند. تابع جریمه نقاط شرط‌شکن را نیز نگه می‌دارد اما مقدار تابع هدف آن‌ها را کاهش می‌دهد تا شانس آن‌ها برای شرکت در تکرارهای بعدی کاهش یابد. این تابع علاوه بر افزایش کیفیت نقطه بهینه، زمان بهینه‌سازی مسئله را نیز به مقدار قابل‌توجهی کاهش داده و باعث می‌شود نقطه‌ی بهینه‌ای که الگوریتم بهینه‌ساز پیدا می‌کند در حدود محدودیت‌های مسئله باشد (لی و الشارکی ۲۰۰۸). K_A و K_D به‌ترتیب حجم مرده و حجم فعال سد، e_t و p_t به‌ترتیب مقادیر ارتفاع بارش و تبخیر در طول دوره t می‌باشند. سد مهاباد یک سد برق آبی بوده و تولید انرژی دارد، لازم به توضیح است که طی گزارشات سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی، آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی در مسیر خود ابتدا از توربین عبور کرده و پس از تولید نیروی برق آبی به سمت شبکه پایین‌دست انتقال می‌یابد و در نتیجه باعث استفاده بهینه از آب می‌گردد. به عبارتی، آب جداگانه‌ای برای تولید نیروی برقی در نظر گرفته نشده است.

۰/۰۳۲، در مقایسه با روش برنامه‌ریزی غیرخطی، دارای مقدار تابع هدف کمتر، میزان کمبود کمتر و شاخص پایداری بیشتر می‌باشد.

رزاقی و همکاران (۱۳۹۲) نیز در تحقیق خویش در خصوص مخزن سد نمرود، شاخص پایداری را برای دو روش به‌کار بردند و اظهار داشتند هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد نشان‌دهنده عملکرد بهتر روش می‌باشد. باتوجه به شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌گردد که روش حرارتی نسبت به روش برنامه‌ریزی غیرخطی توانسته تا حد قابل قبولی میزان کمبودها را کاهش و عملکرد مناسبی از خود نشان دهد. روش برنامه‌ریزی غیرخطی اگرچه در زمان کوتاه‌تری به جواب بهینه دست می‌یابد ولی با توجه به گیر افتادن در دام بهینه محلی مقدار تابع هدف را ۸۸/۹۲ برآورد می‌کند. این درحالیست که روش حرارتی اگرچه زمان طولانی‌تری برای همگراشدن می‌طلبد، اما تابع هدف را ۲۲/۰۱ محاسبه می‌نماید. به‌عبارت دیگر روش حرارتی چهار برابر بهتر از برنامه‌ریزی غیرخطی عمل کرده است. با مقایسه تمامی نتایج می‌توان به این نتیجه رسید که الگوریتم حرارتی در مقایسه با روش برنامه‌ریزی غیرخطی عملکرد بهتری در ارتباط با بهره‌برداری بهینه مخزن سد مهاباد داشته و می‌توان از این روش در جهت تدوین سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از مخزن سد استفاده نمود. نتایج تحقیقات تیگارواپو و سیمونویچ (۲۰۰۲) نیز به‌عنوان اولین کسانی که از روش شبیه‌سازی حرارتی در بهره‌برداری از مخزن استفاده نمودند، گویای این است که روش حرارتی در مقایسه با روش برنامه‌ریزی غیرخطی در بهره‌برداری از مخزن سد مقدار بهینه‌تری از تابع هدف را نتیجه داده است.

نتایج و بحث

شکل ۸ نمودار نیاز زیست‌محیطی حاصل از روش تنانت را نشان می‌دهد.



شکل ۸- تقاضای آب زیست‌محیطی پایین‌دست سد مهاباد.

جدول ۲ مقادیر تابع هدف در ۵ بار اجرای برنامه برای الگوریتم حرارتی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج مندرج در جدول ۲ ملاحظه می‌شود که الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی در حالت تابع لگاریتمی به‌هنگام‌سازی دما و همچنین تابع حرارتی بولتزن مقدار تابع هدف کمتر و معادل ۱۱/۲۳ ارائه می‌دهد. بدین جهت این پارامترها به‌عنوان بهترین گزینه برای اجرای نهایی مسئله در گام بعدی انتخاب شدند. با کاربرد الگوریتم حرارتی و باتوجه به شکل ۹ ملاحظه می‌گردد که بعد از ۱۱۰۰۰ تکرار مقدار تابع هدف برابر با ۲۲/۰۱ به‌دست آمده است. با توجه به این‌که در این تحقیق تابع هدف به صورت غیرخطی می‌باشد لذا روش برنامه‌ریزی غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته است. باتوجه به جدول ۳ می‌توان دریافت که مقدار تابع هدف در روش حرارتی کمتر از روش برنامه‌ریزی غیرخطی به‌دست آمده است. همچنین مشاهده می‌شود که روش حرارتی با مقدار تابع هدف ۲۲/۰۱ و شاخص پایداری

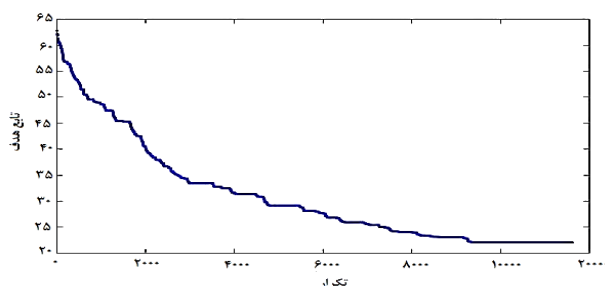
جدول ۲- مقادیر تابع هدف در ۵ بار اجرای برنامه برای الگوریتم حرارتی.

	تابع حرارتی	تعداد اجرا				
		۱	۲	۳	۴	۵
تابع به‌هنگام‌سازی دما	سریع	۲۳/۳۳	۲۱/۷۵	۲۴/۳۷	۲۴/۷۶	۲۱/۴۱
	بولتزن	۱۷/۳۸	۱۵/۲۶	۱۸/۶۶	۱۷/۱۷	۱۵/۷۴
لگاریتمی	سریع	۲۱/۶۰	۲۲/۶۹	۱۹/۶۹	۲۱/۷۹	۲۱/۱۱
	بولتزن	۱۳/۰۷	۱۱/۲۳	۱۲/۶۵	۱۲/۸۶	۱۱/۸۸

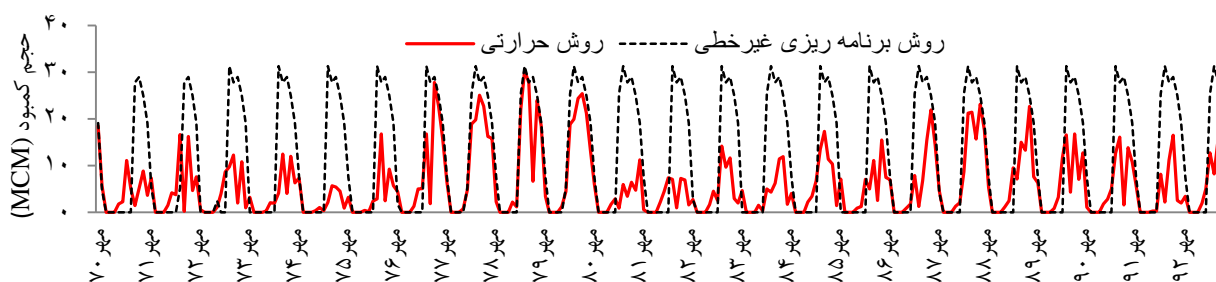
خطی	سریع	۱۸/۲	۱۹/۱۴	۱۹/۵۹	۱۵/۸۴	۱۶/۲۴
	بولتزمان	۱۷/۱۲	۱۷/۵۴	۱۷/۲۶	۱۹/۲۳	۱۷/۸۷

جدول ۳- مقدار تابع هدف و شاخص‌های عملکرد حاصل از اجرای دو روش.

روش	تابع هدف (MCM)	کمبود (MCM)	قابلیت اعتماد زمانی (%) δ	سرعت برگشت پذیری (%) λ	آسیب پذیری (%) η	پایداری (%) ϕ
برنامه ریزی غیرخطی	۸۸/۹۲	۳۳۵۱/۴	۴۸/۱۸	۳۲/۸۶	۸۴/۲۷	۰/۰۲۴
شیبه سازی حرارتی	۲۲/۰۱	۱۶۳۲/۲۴	۲۵	۲۲/۲۲	۴۱/۰۴	۰/۰۳۲



شکل ۹- روند تغییرات مقدار تابع هدف در مقابل تعداد تکرار در الگوریتم حرارتی.



شکل ۱۰- مقایسه حجم کمبود حاصل از روش الگوریتم حرارتی و روش برنامه ریزی غیرخطی.

می‌افتد. اشکال ۱۱ و ۱۲ به ترتیب مقادیر محاسباتی و مشاهداتی آب رهاسازی مخزن سد مهاباد و مقادیر محاسباتی و مشاهداتی حجم ذخیره مخزن سد مهاباد را به کمک روش‌های بهینه‌سازی حرارتی و روش برنامه‌ریزی غیرخطی نشان می‌دهند. باتوجه به شکل ۱۱ ملاحظه می‌گردد که مقدار بهینه آب رهاسازی توسط دو روش الگوریتم حرارتی و برنامه‌ریزی غیرخطی در طول ۲۷۶ ماه دوره آماری در هیچ دوره زمانی از بیشترین مقدار آب مورد تقاضا در پایین دست سد که حدوداً ۳۱ میلیون مترمکعب می‌باشد، تجاوز نمی‌کند. در حالی که آب رهاسازی شده توسط متصدی سد در برخی ماه‌ها به بیش از این مقدار رسیده است که گواهِ بر عدم مدیریت و بهره‌برداری

اگرچه تضمینی در یافتن بهینه سراسری برای الگوریتم‌های فراکاوشی و از جمله الگوریتم حرارتی وجود ندارد، اما مزیت اساسی الگوریتم حرارتی استفاده از جواب‌های بدتر با احتمال مشخص و سپس حرکت به سمت جواب بهینه سراسری و گریختن از دام بهینه محلی است. اما حلال‌های برنامه‌ریزی غیرخطی در توابع پیچیده و یا نسبتاً پیچیده عمدتاً به دلیل استفاده از روش‌های کلاسیک در دام نقاط بهینه محلی گیر می‌افتند. قهرمان و سپاه‌خواه (۱۳۸۴) به این نتیجه رسیدند که با وجود این‌که روش برنامه‌ریزی غیرخطی توانایی مدل کردن روابط غیرخطی را دارا می‌باشد، اما در برخی مسائل قادر به دستیابی به بهینه مطلق نیست و در بهینه محلی به دام

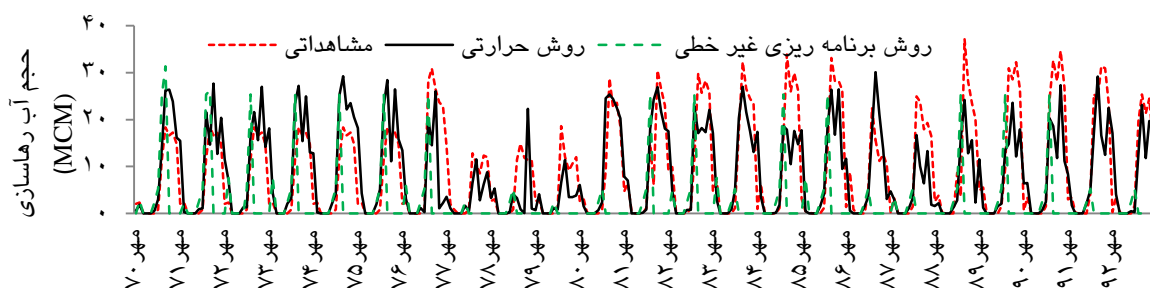
است که در همین سالها به دلیل عدم توسعه اراضی کشاورزی فاریاب، تقاضای آب کشاورزی نیز در پایین دست کم بوده و از این روی آب کمتری برای مرتفع نمودن نیازهای پایین دست از مخزن رها شده است. همچنین شکل ۱۲ نشان می دهد بعد از سال ۸۳ به علت وجود دوره های کم آبی (شکل ۳) و افزایش سطح زیرکشت در سال های اخیر که باعث افزایش تقاضای کشاورزی شده، متصدی سد مجبور شده جهت تامین نیازهای پایین دست حجم بیشتری از آب را رهاسازی نماید.

با توجه به این که هدف اساسی مدل بهینه سازی استفاده شده در این تحقیق کمینه سازی شدت کمبودها بوده است، لذا مدل بهینه سازی با توزیع کمبودها سعی نموده مقادیر کمبودها را به کمترین مقدار ممکن برساند. از این روی تفاوت اساسی در میزان آب ذخیره شده و رهاسازی شده بین روش های بهینه سازی و مشاهداتی اتفاق افتاده است.

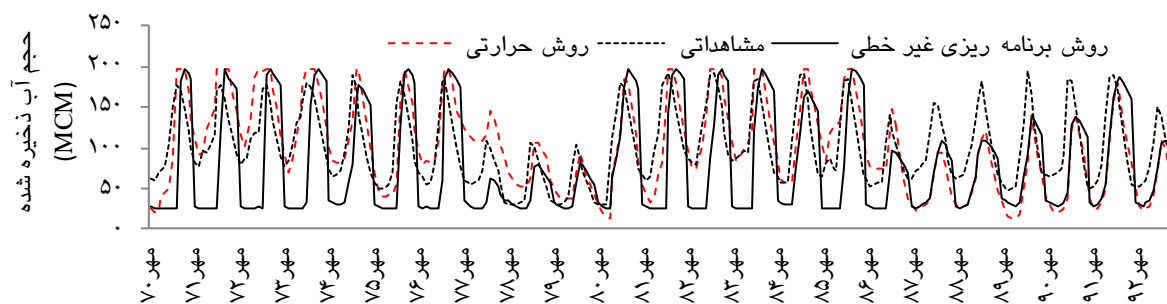
صحیح می باشد. با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می شود که تغییرات حجم ذخیره مخزن در طول ۲۳ سال دوره آماری بین حداکثر حجم ذخیره مخزن (۱۹۵/۷۶ میلیون مترمکعب) و حداقل حجم ذخیره مخزن (۲۵/۲۶ میلیون مترمکعب) قرار دارد. در حالت کلی نمودار حجم آب رهاسازی شده (سیاست بهره برداری) نشان می دهد که روش های بهینه به کار گرفته شده در این تحقیق عملکرد مناسبتری نسبت به سیاست بهره برداری تاریخی مشاهداتی داشته و آب مورد نیاز بخش کشاورزی را طوری تامین می کند که در حالت کلی کمبود در سیستم به کمترین مقدار

رسیده و در عین حال نیاز شرب و زیست محیطی نیز تامین گردد.

با توجه به شکل ۱۲ به نظر می رسد در بین سال های ۷۰ لغایت ۷۶ به علت وجود دوره های پرآبی (شکل ۳)، مدیریت سد جهت پرهیز از سرریز شدن مخزن سد اقدام به ذخیره سازی بیشتری نموده است. این درحالی



شکل ۱۱- مقایسه حجم آب رهاسازی حاصل از روش های برنامه ریزی غیرخطی، حرارتی و مشاهداتی مخزن سد.



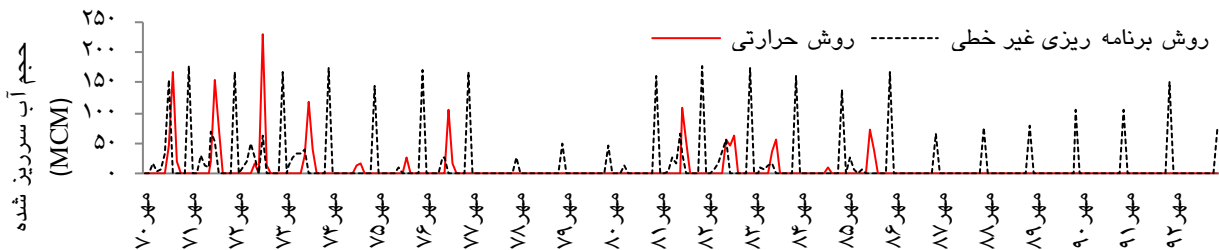
شکل ۱۲- مقایسه حجم آب ذخیره شده حاصل از روش های برنامه ریزی غیرخطی، حرارتی و مشاهداتی مخزن سد.

که مقدار آب سرریز شده حاصل از روش برنامه ریزی غیرخطی بیشتر از مقدار حاصل شده از روش حرارتی می باشد که این موضوع نشان دهنده این است که با

شکل ۱۳ حجم کل آب سرریز شده در هر سال از مخزن سد مهاباد را به کمک دو روش حرارتی و برنامه ریزی غیرخطی نشان می دهد. ملاحظه می گردد

بهینه‌سازی حرارتی در مسائل پیچیده و بزرگ‌مقیاس از دقت بالایی برخوردار بوده و نتایج بهینه‌تری ارائه می‌دهد.

استفاده از روش حرارتی و تخصیص بهینه آب، از هدر رفتن آب جلوگیری شده است. نتایج تحقیقات خدابخشی و همکاران (۲۰۰۹)، نیز حاکی از این است که روش



شکل ۱۳- حجم آب سرریز شده حاصل از روش‌های برنامه‌ریزی غیر خطی و روش حرارتی.

زمان اجرای برنامه نیز خواهد شد. با مقایسه نتایج مشخص گردید که الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی در مقایسه با روش برنامه‌ریزی غیرخطی عملکرد بهتری در ارتباط با بهره‌برداری بهینه مخزن سد مهاباد داشته است و می‌توان از این روش در جهت تدوین سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از مخزن سد استفاده نمود و آب مورد نیاز کشاورزی پایین‌دست را با توجه به نتایج حاصل از این روش تامین نمود. اگرچه نمی‌توان ادعا کرد که روش‌های فراکوشی قادر به یافتن بهینه مطلق هستند و همگرایی آن‌ها در صورتی اثبات می‌شود که تعداد تکرارها به بی‌نهایت میل کند، اما در بسیاری از مسائل از جمله مسئله بهره‌برداری همیشه یافتن بهینه مطلق مدنظر نیست، بلکه هدف اصلی یافتن پاسخی رضایت‌بخش با صرف زمان و هزینه‌های محاسباتی معقول است (برهانی داریان و شهیدی ۱۳۸۷). با توجه به یافته‌های این تحقیق و به طور کلی می‌توان دریافت:

- روش برنامه‌ریزی غیرخطی در چنین مسائل پیچیده و بزرگ مقیاس از دستیابی به نقاط بهینه‌ی سراسری بازمانده و در نقاط بهینه موضعی به دام می‌افتد.
- روش فراابتکاری شبیه‌سازی حرارتی با توجه به تعداد تکرار زیاد، زمان طولانی‌تری جهت یافتن نقطه بهینه نسبت به روش برنامه‌ریزی غیرخطی می‌طلبد.
- نقطه‌ی بهینه‌ی حاصل از روش شبیه‌سازی حرارتی، نقطه‌ی بهینه‌ی مطلق نبوده و الگوریتم بهینه‌سازی حرارتی همانند سایر روش‌های فراابتکاری نسبت به

نتیجه‌گیری کلی: براساس تحقیقات میدانی به‌نظر می‌رسد، شیوه بهره‌برداری فعلی سد مهاباد تابعی از مقدار و وضعیت جریان در ماه‌ها و فصل‌های مختلف سال بوده و منحنی فرمان خاص و مدونی مبتنی بر روش‌های بهینه‌سازی در این سد مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. در این مطالعه بر اساس خصوصیات حاکم بر مسئله، نوع داده‌های در دسترس، نوع نیازها و از جمله نیاز زیست‌محیطی، تعداد متغیرها، اهداف بهره‌برداری، تعداد و نوع قیود حاکم، تابعی با هدف کمینه کردن اختلاف نیاز کل کشاورزی با حجم آب رهاسازی شده تعریف گردید. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مشاهده گردید که روش برنامه‌ریزی غیرخطی از دستیابی به نقاط بهینه‌ی سراسری بازمانده و در نقاط بهینه‌ی موضعی به دام می‌افتد. این در حالی است که اجرای روش فراکوشی شبیه‌سازی حرارتی با توجه به تعداد تکرار زیاد، زمان طولانی‌تری جهت یافتن نقطه بهینه نسبت به روش برنامه‌ریزی غیرخطی می‌طلبد. الگوریتم بهینه‌سازی حرارتی همانند سایر روش‌های فراکوشی نسبت به تغییر پارامترهای مورد استفاده و پارامترهای ورودی اولیه حساس است. در این تحقیق نیز مشاهده گردید که گرچه روش شبیه‌سازی حرارتی توانست جواب بهینه‌تری نسبت به روش برنامه‌ریزی غیرخطی ارائه دهد ولی نقطه‌ی بهینه‌ی حاصل، نقطه‌ی بهینه‌ی مطلق نبوده و برای دستیابی به این نقطه باید پارامترهای مورد نیاز روش شبیه‌سازی حرارتی درست انتخاب شوند که در این صورت منجر به کاهش

پایین دست سد و به کارگیری شیوه‌های نوین آبیاری در میزان آب رها شده با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی. - مقایسه برنامه‌ی بهره‌برداری به دست آمده با شیوه‌های جدید از جمله الگوریتم فراابتکاری چرخه آب و غیره. - توسعه‌ی یک مدل بهینه‌سازی بر مبنای الگوریتم حرارتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های جریان‌های ورودی به مخزن و نیازها. - ارائه مدل بهره‌برداری بهینه با در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم بر میزان آب رها شده، عدم قطعیت‌های جریان رودخانه، نیازهای کشاورزی، شرب، برقابی و زیست‌محیطی.

پارامترهای ورودی اولیه حساس است. لذا باید صحت‌سنجی شده و ترکیب مناسب پارامترها انتخاب شود تا منجر با ایجاد جواب‌های بهینه‌تر و زمان اجرای محاسبات کمتر گردد. با توجه به این‌که الگوریتم‌های فراابتکاری در دو دهه‌ی اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، برای کاربرد بیشتر این الگوریتم‌ها از جمله الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی در زمینه آب پیشنهاداتی به شرح زیر ارائه می‌شود: - بررسی تاثیر استفاده از الگوی کشت مناسب با در نظر گرفتن محصولات کشاورزی کم‌مصرف در

منابع مورد استفاده

- Azarafza H, Rezaei H, Behmanesh J and Besharat S, 2012. Results comparison of employing PSO, GA and SA algorithms in optimizing reservoir operation (case study: Shaharchai Dam, Urmia, Iran). *Journal of Water and Soil* 26(5): 1101-1108. (In Farsi)
- Brooke A, Kendrick D and Mearaus A, 1996. "GAMS, A User Guide" GAMS Development Corporation. Washington, DC.
- Darlane AB and Shahidi L, 2008. Optimization of reservoir operation using simulated annealing and other heuristic methods. *International Journal of Engineering Science Iran University of Science and Technology* 19(8): 31-40. (In Farsi)
- Emadi A, Khademi M, Mohseni Movahed SA and Nouri MR, 2012. Comparative of simulated annealing (SA) optimization algorithm, yield model and standard operation policy in reservoir operation (Case study: Doroodzan Dam). *Journal of Iran Water Research* 6(10): 80-94. (In Farsi)
- Ghahraman B and Sepaskhah AR, 2005. Reservoirs operation management. *Journal of Iran Water Resources Research* 1(2): 114-128. (In Farsi)
- JanatRostami S, Kholghi M and Bozorg Haddad O, 2010. Management of reservoir operation system using improved harmony search algorithm. *Journal of Water and Soil Science- University of Tabriz* 20(3): 61-71. (In Farsi)
- Janejira T, Ichiro K, Masayuki I and Yoshinobu K, 2005. Optimization of a multiple reservoir system using a simulated annealing-A case study in the Mae Klong system, Thailand. *Journal of Paddy and Water Environment* 3(3): 137-147.
- Kangrang A, Chaiyapoom W and Homwuttivong S, 2012. An application of simulated annealing algorithm with reservoir simulation model to improve reservoir rule curves. *Journal of Science and Technology MSU* 31(5): 578-584.
- Khademi M, Emadi AR and Mohseni Movahed SA, 2011. Reservoir operation optimization using simulated annealing algorithm and application of asymptote method in its validation. *Journal of Watershed Management Research* 2(3):80-94. (In Farsi)
- Khodabakhshi F, Ghirian AR and Khakzad N, 2009. Applying simulated annealing for optimal operation of multi-reservoir systems. *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 2 (1): 80-87.
- Kirkpatrick S, Gelatt CD and Vecchi MP, 1982. Optimization by simulated annealing. *Journal of Science*, 220: 671-680.

- Lee KY and Elsharkwi MA, 2008. Modern Heuristic Optimization Technique. John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey.
- Loucks DP and Van Beek E, 2005. Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).
- Nameless, 2009. Draft of guidance for determining the minimum water requirements for aquatic ecosystems. Pp 113, Ministry of Energy, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Razaghi P, Babazadeh H and Shourian M, 2014. Development of multi-purpose reservoir operation hedging rule in water resources shortage conditions using MODSIM8.1. Journal of Soil and Water Resources Conservation 3(2):11-23. (In Farsi)
- Saber Chenari K, Abghari H and Erfanian M, 2012. Management of water released from reservoir dams using particle swarm optimization algorithm. Pp. 59-67, 8th National Conference on Watershed Engineering Science, University of Lorestan, Lorestan, Iran. (In Farsi)
- Tharme, RE, 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. Journal of River Research and Applications 19(5): 397-441.
- Teegavarapu RSV and Simonovic SP, 2002. Optimal operation of reservoir systems using simulated annealing. Journal Water Resources Management 16(5):401-428.
- Tennant, DL, 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Journal of Fisheries 1(4): 6-10.