دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

بهره برداری بهینه از مخزن با استفاده از الگوریتم شبیه سازی بازپخت و کاربرد روش مجانب در صحت سنجی آن

م. خادمی[۱]، ع. ر. عمادی[۲] و س. ا. محسنی موحد[۳]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲- استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری نویسنده مسوول: emadia355@yahoo.com
۳- استادیار دانشگاه اراک

چکیده

بهره‌برداری از مخزن از جمله مسائل بهینه‌سازی در علوم مهندسی آب می‌باشد که تاکنون توسط انواع روش‌های بهینه‌سازی شناخته شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش پس از شبیه‌سازی کردن مخزن سد براساس سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) در راستای بهره‌برداری از مخزن از الگوریتم شبیه سازی باز پخت (SA) به عنوان یک روش عددی با ساختار تصادفی هوشمند استفاده شده است. الگوریتم SA نسبت به پارامترهای ورودی حساس بوده، لذا حساسیت سنجی شده و ترکیب مناسب پارامترها انتخاب شد. به منظور صحت سنجی الگوریتم ترکیبی SOP-SA از روش مجانب استفاده شد که نتایج حاکی از کارایی الگوریتم در یافتن بهینه سراسری می‌باشد. الگوریتم ترکیبی SOP-SA با هدف کمینه‌سازی کمبود سالانه با اعمال قیدهایی چون محدود بودن حجم ذخیره و برداشت برای سد مخزنی درودزن اجرا شد. پس از اجرای الگوریتم، حجم ذخیره و برداشت از مخزن این سد در طول دوره‌ی بهره‌برداری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که الگوریتم ترکیبی SOP-SA با توزیع کمبودها در ماه‌های مختلف، شدت کمبودها در دوره‌های خشکسالی را نسبت به الگوریتم SOP کاهش داده است. علاوه بر این تعداد ماه‌هایی که درصد تامین ماهانه بسیار کم (کمتر از ۵۰ درصد) دارند را از ۲۲ ماه در الگوریتم SOP به ۱۰ ماه کاهش داده است.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری از مخزن، الگوریتم شبیه سازی باز پخت، سیاست بهره‌برداری استاندارد، روش مجانب، بهینه‌سازی

مقدمه

یکی از اهداف در بهره‌برداری از احداث سدهای مخزنی، نزدیک کردن منحنی جریان‌های کنترل شده با منحنی نیاز می‌باشد. دست یافتن به این هدف به گونه‌ای که مناسب‌ترین عملکرد در مجموعه‌ی سیستم حاصل شود، هدف بهره‌برداری بهینه خواهد بود. در بهره‌برداری از مخازن عموماً از روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی استفاده می‌شود. روش‌های شبیه‌سازی شامل قوانینی

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]

هستند که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را بیان می‌کنند. در یک پژوهش سیاست بهره‌برداری استاندارد[1] (SOP) و مدل‌های فراکاوشی برنامه‌ریزی پویا، الگوریتم مورچگان و الگوریتم ژنتیک با هدف حداقل‌سازی کمبود آب سد دز مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری در یافتن جواب بهینه و منحنی‌های فرمان داشت (۱). در صورت کمتر بودن حجم آب مخزن از حجم مرده سد، مخزن توانایی تامین کل نیاز را ندارد و به اصطلاح گویند کمبود[2] رخ داده است. در سیاست بهره‌برداری استاندارد تعداد ماه‌های کمبود کم می‌باشد ولی کمبودهای ایجاد شده بسیار شدید می‌باشد که اگر سیستم واقعا با آن مواجه شود زیان‌های جبران ناپذیری ایجاد می‌شد (۸). بهینه سازی میزان رهاسازی از مخزن سد کارون چهار با استفاده از دو روش بهینه‌سازی و شبیه‌سازی برنامه‌ریزی غیرخطی و سیاست بهره‌برداری استاندارد انجام شد. نتایج نشان داد کمبودها در روش بهره‌برداری استاندارد دارای شدت بیشتری نسبت به برنامه‌ریزی غیرخطی می‌باشند (۲۰). روش بهینه‌سازی[3] SA از نظر سادگی و توانایی برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی ترکیبی و بهینه‌سازی توابع چند هدفی و پیچیده مورد توجه پژوهشگران رشته‌های مختلف از جمله رشته‌های مرتبط با مهندسی آب قرار گرفته است. شهیدی و برهانی داریان قوانین بهره‌برداری سد چند مخزنی دز را با استفاده از روش‌های فازی و SA با هدف کمینه کردن مجموع مربعات کمبود برداشت آب استخراج نمودند. نتایج نشان داد در الگوریتم SA با کاهش دمای آهسته‌تر و توقف در دمای پایین‌تر نتایج بدست آمده بهتر خواهد شد (۲۱). برهانی داریان و شهیدی از الگوریتم شبیه‌سازی باز پخت، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم مورچه به عنوان روش‌های کاوشی و از روش برنامه‌ریزی پویا به عنوان یک روش حل و معیاری برای سنجش این روش‌ها جهت بررسی بهره‌برداری بهینه از مخازن استفاده نمودند. مقایسه این روش‌ها نشان داده که الگوریتم شبیه‌سازی باز پخت در بهره‌برداری بهینه در دوره کوتاه مدت یک ساله و بلند مدت ۴۲ ساله از سد چند مخزنی دز روش قدرتمندتری نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد زیرا این روش در مدت زمان کمتر به نتایج بهتری خواهد رسید (۲). در مطالعه موردی که خدابخشی و همکاران روی سد چند مخزنی دز طی دو دوره کوتاه مدت و بلند مدت انجام دادند، از یک طرف مقایسه بین الگوریتم شبیه‌سازی باز پخت، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم مورچه و روش برنامه‌ریزی پویا و از طرف دیگر مقایسه بین مدل‌های SA و MODSIM نشان داده که در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنی خصوصا در سیستم‌های بزرگ با تابع هدف پیچیده غیر خطی مدل SA در مدت زمان کوتاهتر بهتر می‌تواند پاسخگو باشد (۱۱). با استفاده از این روش مدل ریاضی بهینه‌سازی عملکرد هیدرولیکی کانال‌های آبیاری تهیه شده و ارزش نسبی شاخص‌های ارزیابی تعیین گردیده است (۱۷). همچنین از این روش در تعیین توزیع بهینه آب در کانال‌های آبیاری

1- Standard Operation Policy (SOP) 2- Deficit 3- Simulated Annealing (SA)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]

استفاده شده است (۱۸ و ۱۹). با استفاده از روش SA بهینه‌سازی مدیریت آب‌های زیرزمینی و طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب شهری انجام شده است (۶ و ۷). الگوریتم ژنتیک در ترکیب با روش SA در برنامه‌ریزی فازی بهره‌برداری از مخزن به کار برده شده است (۴). با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک بهبود یافته و SA، بهینه‌سازی بهره‌برداری سیستم سه مخزنی سدی در رودخانه‌ی ووجیانگ چین انجام شد. الگوریتم ترکیبی این قابلیت را دارد که در مدت زمان کمتری نسبت به الگوریتم ژنتیک بهبود یافته و SA از دام نقاط بهینه محلی رهایی پیدا کند و به نقطه بهینه سراسری همگرا شود (۱۳). مطالعه انجام شده روی سد ده مخزنی در تایلند با هدف به حداقل رساندن کمبود آب آبیاری طی یک دوره ۳ ساله نشان داده که الگوریتم شبیه‌سازی باز پخت نسبت به الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری داشته و این الگوریتم روش مناسبی برای بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های بزرگ و پیچیده خواهد بود (۲۲). الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی باز پخت- ژنتیک در مقایسه با الگوریتم شبیه‌سازی باز پخت، الگوریتم ژنتیک و روش برنامه‌ریزی پویا سریعتر می‌تواند به بهینه سراسری همگرا شود. این الگوریتم پیشنهادی قابلیت بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن را دارد (۲۵). هدف از این پژوهش کاربرد روش SA در تعیین مدیریت بهینه بهره‌برداری از مخزن و بررسی کارایی آن در تعیین نقطه بهینه سراسری با استفاده از روش مجانب می‌باشد.

مواد و روش ها

الگوریتم شبیه‌سازی SOP

تعیین حجم ذخیره مخزن در هر دوره براساس دبی ورودی به مخزن، برداشت آب و تلفات آب، شبیه‌سازی مخزن گفته می‌شود. شبیه‌سازی مخزن براساس رابطه پیوستگی که بصورت رابطه ۱ می‌باشد بیان می‌گردد (۱۴).

$$S_{t+1} = S_t + Q_t + P_t - R_t - Ev_t - Spill_t \quad (۱)$$

که در این رابطه، S_t: حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره‌ی t، S_{t+1}: حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره‌ی $t+1$، Q_t: حجم جریان ورودی به مخزن در دوره‌ی t، P_t: حجم بارش بر سطح دریاچه در دوره‌ی t، R_t: حجم برداشت یا رهاسازی از مخزن سد در دوره t، Ev_t: حجم تبخیر از سطح دریاچه در دوره t و $Spill_t$: حجم سرریز در دوره t، رابطه ۱ مبنای همه شبیه‌سازی‌ها می‌باشد ولی عاملی که شبیه‌سازی‌ها را از یکدیگر متمایز می‌کند و باعث بوجود آمدن سیاست‌های مختلف بهره‌برداری می‌شود، مقدار و زمان برداشت آب، R_t می‌باشد. یکی از حالاتی که شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن براساس آن انجام می‌شود، سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) می‌باشد که گاهی اوقات منحنی بهره‌برداری (S) نیز نامیده می‌شود (۱۵). در بهره‌برداری از مخزن براساس الگوریتم SOP ابتدا میزان سرریز صفر و میزان برداشت آب برابر با مقدار نیاز فرض می‌شود و سپس صحت این فرضیات

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]

کنترل و مقادیر واقعی آن محاسبه می‌شود. اگر حجم آب درون مخزن از حجم نرمال بیشتر باشد سرریز انجام می‌شود. اگر حجم آب مخزن از حجم مرده کمتر باشد مخزن توانایی تامین کل نیاز را ندارد و به اصطلاح گویند کمبود رخ داده است. طبق این سیاست بهره‌برداری هنگامی که مخزن نتواند نیاز را به طور کامل تامین کند درصدی از آن تامین می‌شود. در این پژوهش براساس الگوریتم SOP یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن تهیه شده است که این فرآیند را شبیه‌سازی و محاسبه می‌نماید.

الگوریتم شبیه‌سازی باز پخت (SA)

الگوریتم SA یک روش بهینه‌سازی عددی با ساختار تصادفی هوشمند است که بر مبنای مکانیک آماری و قیاس با فرآیند فیزیکی انتقال حرارت به عنوان یک فرآیند فیزیکی در صنعت شبیه‌سازی شده است (۱۲ و ۲۴). با توجه به شباهت آن به فرآیند فیزیکی حرارت فلزات و سرد کردن آرام آنها به این اسم نامیده شده است. ایده اصلی که روش بهینه‌سازی SA بر مبنای آن پایه‌گذاری شده است، اولین بار توسط متروپولیس و همکاران (۱۶) مطرح شد. کرک پاتریک و همکاران دریافتند که می‌توان از این ایده برای مسایل بهینه‌سازی ترکیبی سود جست و بر این اساس روش SA را پایه گذاری نمودند (۳ و ۱۲). مهمترین پارامترها و معیارهایی که قبل از کاربرد روش SA برای مسئله مورد نظر بایستی بررسی و تنظیم شوند عبارتند از: T0: دمای اولیه، B: فاکتور کاهش دما، ΔX: طول گام تصادفی ($\Delta X=Random/K_{div}$) که در آن Random گزینه تصادفی و K_{div} عددی است که گزینه تصادفی به نسبت آن کوچک می‌شود، EBS: پارامتر مربوط به شرط تعادل، Epoch: طول دوره، It: حداکثر تعداد تکرارها در هر دما جهت رسیدن به شرط تعادل و Tf: دمای نهایی (شرط توقف). بطور کلی مراحل مختلف روش SA به صورت زیر می‌باشد (۱۷):

۱- فراخوانی پارامترهای روش SA:

(T0، B، ΔX، EBS، Epoch، It و Tf)

۲- ایجاد نمونه اولیه: ایجاد نمونه تصادفی S در فضای امکان‌پذیر با توجه به قیدهای مسئله و بدست آوردن مقدار تابع هدف FF(S) به ازای این نقاط.

۳- ایجاد نمونه ثانویه: ایجاد نمونه تصادفی 'S در فضای امکان‌پذیر با توجه به قیدهای مسئله و بدست آوردن مقدار تابع هدف FF('S) به ازای این نقاط.

۴- بررسی تغییرات تابع هدف:

$$D=FF(S')-FF(S)$$

اگر به ازای تغییر نمونه تصادفی S به 'S در مقدار تابع هدف کاهش مشاهده شد ($D\leq 0$)، این انتقال رو به پایین به عنوان جواب بهتر پذیرفته شده و 'S جایگزین S می‌شود. در غیر اینصورت ($D>0$)، یک عدد تصادفی یکنواخت بین صفر و یک تولید (R(0-1)) و احتمال $P(D)=\exp(-D/Tr)$ محاسبه می‌شود. (فرض اولیه: پارامتر دما (Tr) برابر با دمای اولیه (T0) است.) اگر $P(D) > R(0-1)$ شد، این انتقال رو به بالا نیز جهت رهایی از دام نقاط بهینه محلی و همگرایی به سوی بهینه سراسری پذیرفته

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]

شده و 'S جایگزین S می‌شود. در غیر اینصورت بازگشت به گام ۳.

۵- تکرار گام های ۳ و ۴ را به تعداد طول دوره (Epoch).

۶- بررسی شرط تعادل: (در این پژوهش از شرط تعادل ویلهلم و وارد استفاده شده است (۲۳)).

شرط تعادل بصورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\left|(Fe - Fg)/Fg\right| \le EBS \qquad (۲)$$

که در این رابطه، Fe: میانگین تابع هدف در طی آخرین دوره در هر دما، Fg: میانگین تابع هدف در طی تمام دوره‌های پیشین در همان دما و EBS: مقدار ثابت کوچک و مثبت کنترل کننده شرط تعادل است که توسط کاربر انتخاب می‌شود و مقدار بهینه آن طی آزمایشات اولیه بدست می‌آید.

اگر شرط تعادل برقرار شد گام ۷ اجرا می‌شود. در غیر اینصورت حداکثر تعداد تکرارها در هر دما جهت رسیدن به شرط تعادل (It) بررسی می‌شود. اگر تعداد دفعات تکرار گام‌های ۳ و ۴ به It رسید گام ۷ اجرا می‌شود. در غیر اینصورت بازگشت به گام ۳.

۷- بررسی شرط توقف: (در این پژوهش رسیدن به دمای نهایی به عنوان شرط توقف در نظر گرفته شده است). اگر شرط توقف برقرار شد، جواب بدست آمده به عنوان جواب بهینه (E) پذیرفته می‌شود. در غیر اینصورت کاهش پارامتر دما به میزان Tr+1=B×Tr و بازگشت به گام ۳.

در این پژوهش براساس الگوریتم SA یک برنامه‌ی کامپیوتری به زبان فرترن جهت بهینه‌سازی تهیه شده است. الگوریتم تهیه شده با الگوریتم SOP ترکیب شده و الگوریتم ترکیبی SOP-SA توسعه یافته است.

تابع هدف، قیدها و متغیرهای تصمیم

در یک روش بهینه‌سازی مقادیر کلیه متغیرهای تصمیم به منظور کمینه‌سازی یا بیشینه‌سازی تابع هدف با اعمال یکسری قیدها و محدودیت‌ها، محاسبه می‌گردد. در این پژوهش تابع هدف بصورت رابطه ۳ می‌باشد که کمینه‌سازی آن مدنظر می‌باشد.

$$FF = \sum_{y=1}^{N}\sum_{t=1}^{12}((R_{y,t} - TD_{y,t})/D_{\max})^2 \qquad (۳)$$

که در این رابطه، FF: مقدار تابع هدف، y: شمارنده سال، N: تعداد سال‌های آماری، t: شمارنده ماه، $R_{y,t}$: حجم برداشت یا رهاسازی از مخزن سد در ماه t از سال y، $TD_{y,t}$: نیاز کل (مجموع نیاز کشاورزی و شهری و صنعتی) در ماه t از سال y و D_{max}: حداکثر نیاز آبی ماهانه در طول دوره‌ی بهره‌برداری. مقادیر رهاسازی از مخزن سد در ماه‌های مختلف سال به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. مهمترین قید اصلی موجود در یک مسئله بهره‌برداری از مخزن سد، رابطه ۱ می‌باشد. از جمله قیدهای اصلی دیگر می‌توان به حد پایین و حد بالا برای هر یک از متغیرهای تصمیم گیری شامل حداقل و حداکثر مجاز حجم مخزن و حداقل و حداکثر مجاز رهاسازی مخزن جهت انتخاب تصادفی اشاره نمود.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]

سد مخزنی درودزن

به منظور نشان دادن کارایی مدل های تهیه شده، این مدل‌ها برای سد مخزنی درودزن به کار برده شده است. این سد در شمال غربی شهر شیراز احداث شده است. متوسط دبی ورودی درازمدت سالانه به مخزن ۳۰/۸۶ مترمکعب بر ثانیه و آبدهی حداقل و حداکثر آن به ترتیب ۶/۰۲ و ۲۱۸/۰۳ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است. در جداول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات هندسی مخزن و توزیع نیاز ماهانه پایین دست سد به تفکیک شرب، کشاورزی و صنعت ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی مخزن سد درودزن (۹)

تراز تاج (متر از سطح دریا)	۱۶۸۳/۵
تراز نرمال (متر از سطح دریا)	۱۶۷۶/۵
تراز بستر (متر از سطح دریا)	۱۶۲۳/۵
حجم مخزن در تراز نرمال (میلیون مترمکعب)	۹۹۳/۰
حجم مخزن در تراز حداقل (میلیون مترمکعب)	۱۳۳/۰

جدول ۲- توزیع نیاز ماهانه پایین دست سد درودزن (میلیون متر مکعب) (۹)

	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	سالانه
کشاورزی	۱۰۴/۰۴	۱۶۷/۹۱	۱۵۵/۳۲	۱۳۶/۳۰	۱۴۴/۳۴	۱۴۱/۴۰	۲۵/۳۲	-	-	-	-	-	۸۷۴/۶۰
شهری و صنعتی	۴/۰۲	۴/۰۲	۴/۰۲	۴/۰۲	۴/۰۲	۴/۰۲	۳/۸۹	۳/۸۹	۳/۸۹	۳/۸۹	۳/۸۹	۳/۷۶	۴۷/۳۳
مجموع	۱۰۸/۰۶	۱۷۱/۹۳	۱۵۹/۳۴	۱۴۰/۳۲	۱۴۸/۳۶	۱۴۵/۴۲	۲۹/۲۱	۳/۸۹	۳/۸۹	۳/۸۹	۳/۸۹	۳/۷۶	۹۲۱/۹۳

نتایج و بحث

الگوریتم SA علی رغم قابلیت و دقتی که دارد نسبت به پارامترهای ورودی حساس است و باید در اجراهای اولیه قبل از اجرای نهایی مقدار مناسب این پارامترها تعیین گردد که مستلزم صرف وقت نسبتا زیادی است ولی می‌تواند در اجرای نهایی الگوریتم منجر به تکرارهای کمتر و زمان محاسباتی معقول و در عین حال جواب‌های با کیفیت خوب و قابل قبول شود (۱۷). پس از انجام آزمون حساسیت، ترکیب مناسب پارامترها برای اجرای نهایی الگوریتم تعیین شد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. در این پژوهش بیشترین میزان حساسیت الگوریتم SA روی پارامتر K_{div} می‌باشد.

جدول ۳- پارامترهای کنترلی مناسب جهت همگرایی به نقطه‌ی بهینه سراسری در تابع هدف مورد استفاده

نام تابع	T0	Tf	B	Epoch	It	EBS	Kdiv
FF	۳۰۰۰	۱	۰/۷	۱۰	۶۰	۰/۰۱	۱۰

الگوریتم SA قابلیت خروج از دام نقاط بهینه محلی و حرکت به سوی بهینه سراسری را دارد و به لحاظ تئوری ثابت شده است که الگوریتم SA با احتمال یک به سمت بهینه

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]

سراسری همگرایی دارد و هرگاه زمان اجرای الگوریتم و یا تعداد تکرارها به سمت بی نهایت میل کند، الگوریتم صد در صد بصورت مجانبی به سمت بهینه سراسری همگرا خواهد شد (۵ و ۱۰). از این خاصیت روشی به نام روش مجانب جهت برآورد بهینه سراسری و مقایسه‌ی جواب‌های حاصله با آن پیشنهاد شده است (۱۷). گام‌های استفاده از روش مجانب عبارتند از:

۱- در ابتدا باید با افزایش دمای اولیه و کاهش دمای نهایی در پارامترهای تنظیم شده، مدل اجرا شود. به این ترتیب تعداد تکرارها افزایش می یابد و میدان وسیعی از انتقال‌های رو به پایین ایجاد می‌شود.

۲- در این مرحله باید مقادیر بهبود یافته‌ی تابع هدف (انتقال‌های رو به پایین) در ازای تعداد تکرارهای پذیرفته شده در دامنه‌ی انتخابی به عنوان متغیر مستقل و شماره تکرارهای پذیرفته شده به ازای آن به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شود.

۳- گام‌های ۱ و ۲ تا جایی باید تکرار شوند که بین متغیر مستقل و وابسته در رابطه ۴، ضریب همبستگی مناسب به وجود آید. در این پژوهش برای ایجاد همبستگی از نرم‌افزار Table Curve استفاده شده است.

$$\frac{1}{N} = a + b \times (FF) \qquad (۴)$$

در این رابطه، N: تعداد تکرارهای پذیرفته شده تا رسیدن به مقدار تابع هدف و FF: تابع هدف می‌باشد.

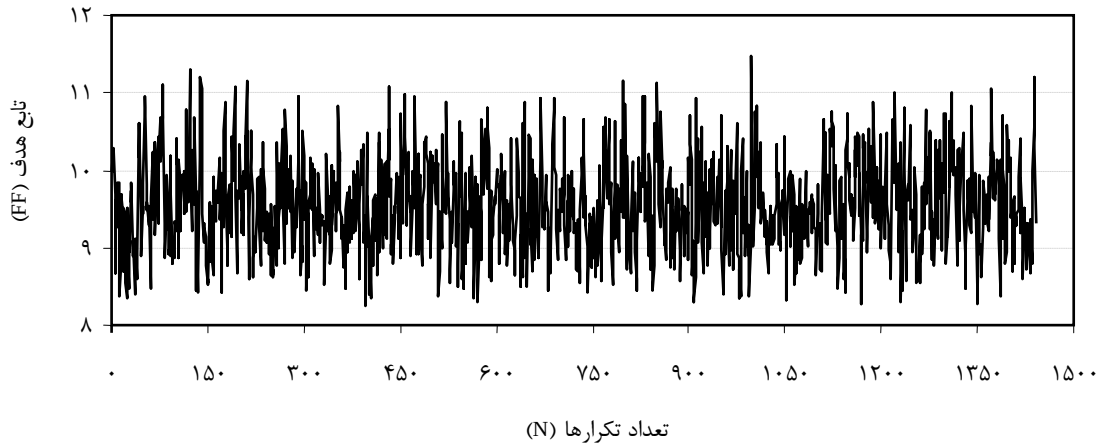
۴- با رسیدن به ضریب همبستگی مناسب و مورد قبول، مقادیر ضرایب ثابت a و b مربوط به رابطه ۴ از نرم‌افزار مورد استفاده جهت رگرسیون استخراج می‌شوند. اگر N به سمت بی نهایت میل کند، مقدار $1/N$ به سمت صفر میل و رابطه ۴ بصورت رابطه ۵ تبدیل می‌شود. بنابراین مقدار تابع هدف با استفاده از رابطه ۶ قابل محاسبه است.

$$N \to \infty : 0 = a + b \times (FF) \qquad (۵)$$

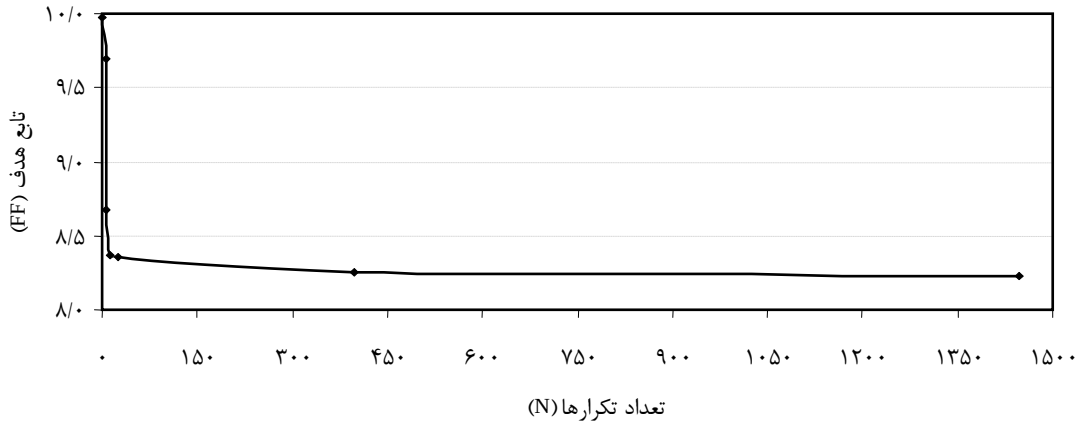
$$FF = -\frac{a}{b} \qquad (۶)$$

۵- در این مرحله باید کیفیت جواب‌های حاصله در مقایسه با مقدار تخمینی بهینه سراسری مورد ارزیابی قرار گیرد. لازم به ذکر است که اگر کیفیت جواب‌های حاصله در مقایسه با مقدار تخمینی بهینه سراسری بهتر باشد حاکی از آن است که روش تخمینی به خوبی انجام نشده و یا مخدوش است که در این حالت بایستی از روش‌های دیگری جهت ارزیابی جواب‌های حاصله استفاده شود. برای اطمینان می‌توان با افزایش بیشتر دمای اولیه و کاهش بیشتر دمای نهایی مجددا الگوریتم را به اجرا درآورد. اشکال ۱ و ۲ به ترتیب تغییرات تابع هدف به ازای کل انتقال‌ها و انتقال‌های رو به پایین در اجرای نهایی مدل SOP-SA با استفاده از پارامترهای جدول ۳ را نشان می‌دهند.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]



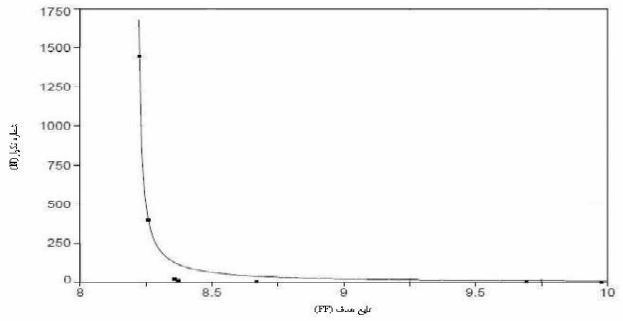
شکل ۱- تغییرات تابع هدف به ازای کل انتقال‌ها.



شکل ۲- تغییرات تابع هدف به ازای انتقال‌های رو به پایین.

در شکل ۳ با استفاده از برنامه Table Curve مقادیر بهبود یافته‌ی تابع هدف (انتقال‌های رو به پایین) در برابر شماره تکرارهای پذیرفته شده مدل شده و منحنی $y^{-1}=a+bx$ ترسیم گردیده که در جدول ۴ مقادیر a، b و r^2 در اجرای نهایی الگوریتم SOP-SA ارائه شده است. در اجرای نهایی الگوریتم SOP-SA، مقدار تابع هدف ۸/۲۲۴ بدست آمده است. به کمک روش مجانب مشاهده شده است که تابع هدف با ضریب همبستگی مناسب ۹۹٪ به سمت نقطه‌ی بهینه سراسری ۸/۲۱۱ میل می‌کند. با توجه به نزدیک بودن مقادیر تابع هدف بدست آمده مدل و روش مجانب می‌توان گفت که مدل تهیه شده قابلیت یافتن نقطه‌ی بهینه سراسری را دارد و جواب بدست آمده صحیح می‌باشد. مقدار تابع هدف براساس سیاست بهره‌برداری استاندارد ۱۲/۳۹۵ بدست آمده است. الگوریتم SOP-SA توانسته تابع هدف را به میزان ۳۳/۱ درصد نسبت به الگوریتم SOP کاهش دهد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]



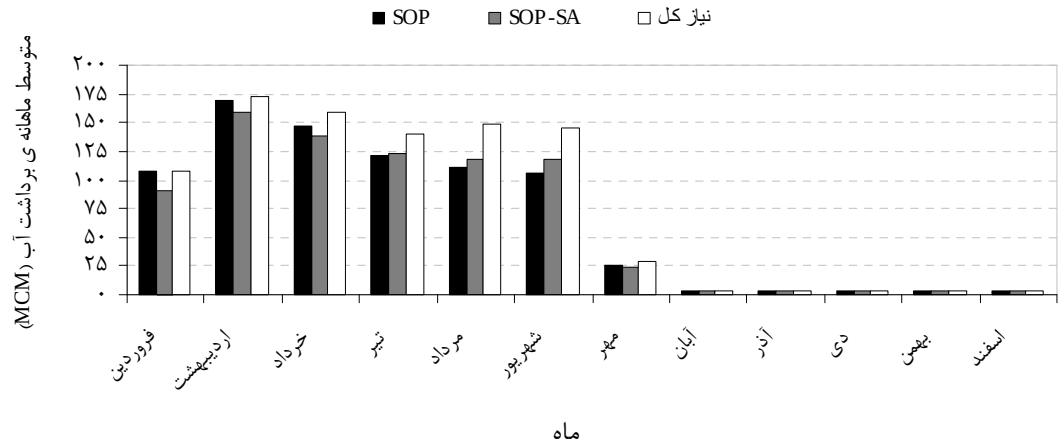
شکل ۳- منحنی $y^{-1}=a+bx$.

جدول ۴- مقادیر a، b و r^2.

r^2	b	a
۰/۹۸۷۱۵۱۶۶۳	۰/۰۵۳۸۲۸۳۹۴	-۰/۴۴۱۹۹۳۶۴

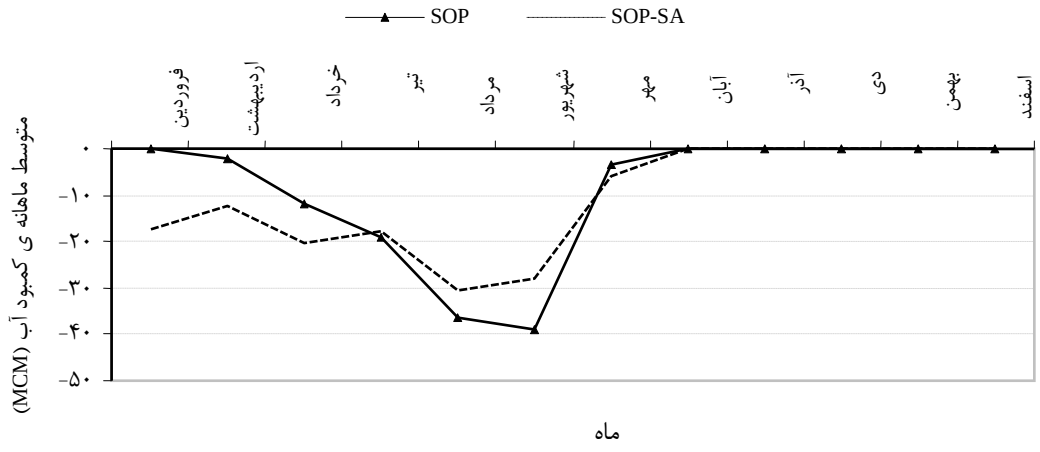
به شرط وجود جریان ورودی کافی، مخزن سد مورد مطالعه توانایی تنظیم سالانه ۹۲۱/۸۶ میلیون متر مکعب آب را جهت تامین کل نیاز سالانه‌ی پایین دست دارد. نتایج حاصل از اجرای مدل‌ها نشان می‌دهد که در طول دوره آماری ۲۸ ساله براساس دو مدل SOP و SOP-SA مخزن قادر است به طور متوسط به ترتیب ۸۰۹/۷۵ و ۷۸۹/۶۲ میلیون مترمکعب در سال آب برای تامین نیاز پایین دست تنظیم کند. همان طور که مشاهده می‌شود متوسط سالانه برداشت آب از مخزن در مدل SOP-SA به میزان ۲/۴۹ درصد کمتر و متوسط سالانه کمبود آب در این مدل به میزان ۱۵/۲۲ درصد بیشتر از مدل SOP می‌باشد. اشکال ۴ و ۵ به ترتیب متوسط ماهانه برداشت و کمبود آب را در دو مدل نشان می‌دهند. با توجه به اشکال ۴ و ۵، متوسط ماهانه‌ی برداشت آب در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد در مدل SOP بیشتر از مدل SOP-SA می‌باشد. این مسئله در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور کاملا برعکس است. چنین چیزی بیانگر این مسئله است که مدل SOP-SA با ذخیره‌سازی آب در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد مقدار بیشتری از نیاز را در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور تامین می‌کند. با استفاده از سیاست بهره‌برداری SOP-SA با برداشت کمتر آب در این ماه‌ها، آب بیشتری در مخزن ذخیره می‌شود که این امر توزیع کمبودها را در این ماه‌ها یکنواخت و شدت کمبودها را در ماه‌های بحرانی کاهش می‌دهد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]



شکل ۴- متوسط ماهانه‌ی برداشت آب در مدل SOP و SOP-SA و نیاز واقعی پایین دست.

در جدول ۵ متوسط درصد تامین ماهانه در مدل SOP و SOP-SA ارائه شده است. متوسط درصد تامین ماهانه، نسبت تعداد سال‌های تامین به کل سال‌ها در هر ماه می‌باشد. در مدل SOP متوسط درصد تامین ماهانه ۹۲/۸۵ درصد می‌باشد که مقدار آن در مدل SOP-SA به ۹۰/۹۴ درصد می‌رسد. براساس سیاست بهره‌برداری SOP-SA در طول دوره‌ی آماری این سد (۳۳۶ ماه) تعداد ماه‌هایی که درصد تامین ماهانه بسیار کم (کمتر از ۵۰ درصد) است از ۲۲ ماه در مدل SOP به ۱۰ ماه کاهش می‌یابد.



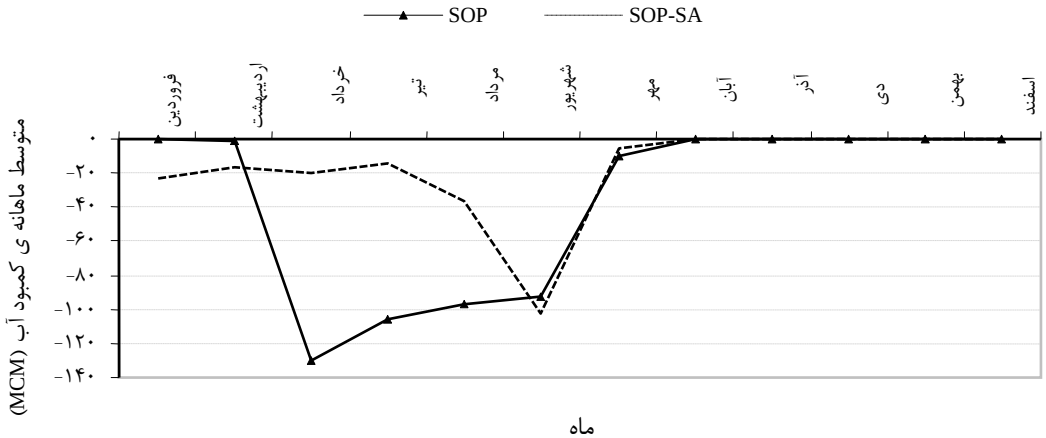
شکل ۵- متوسط ماهانه‌ی کمبود آب در مدل SOP و SOP-SA.

جدول ۵- متوسط درصد تامین ماهانه در مدل SOP و SOP-SA

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
SOP	۱۰۰/۰۰	۹۸/۷۸	۹۲/۶۲	۸۶/۴۰	۷۵/۳۳	۷۳/۱۳	۸۷/۹۴	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
SOP-SA	۸۳/۸۷	۹۲/۸۰	۸۷/۳۶	۸۷/۲۰	۷۹/۵۲	۸۰/۶۹	۷۹/۸۲	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰

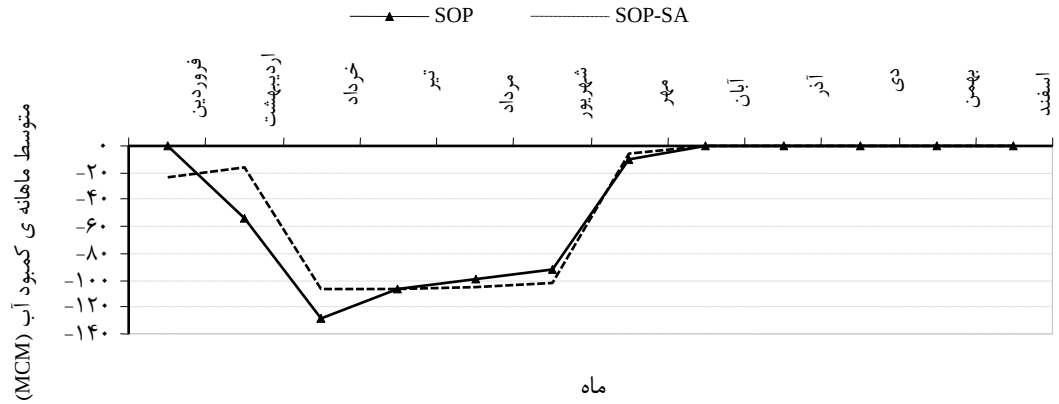
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]

از آنجایی که در مدل SOP هدف تامین صد درصد نیاز ماهانه می‌باشد، براساس این سیاست بهره‌برداری در دوره‌های کم آبی در سری زمانی جریان ورودی به مخزن با برداشت کامل آب موجود، مخزن از آب خالی می‌شود و با پایین نگه داشته شدن سطح آب، تبخیر از سطح مخزن نسبت به مدل SOP-SA کاهش می‌یابد. براساس مدل SOP-SA به طور متوسط سالانه ۶۴/۱۰ میلیون مترمکعب تبخیر از سطح مخزن خواهیم داشت که به میزان ۸/۳۳ درصد بیشتر از مدل SOP می‌باشد. از آنجایی که مدل SOP همواره سعی دارد صد در صد نیاز را تامین کند میزان اعتمادپذیری به آن ۲/۴۹ درصد بیشتر از مدل SOP-SA است و به همان نسبت میزان آسیب‌پذیری این مدل نیز ۲۲/۸۹ درصد بیشتر خواهد بود. به منظور ارزیابی کارایی مدل SOP-SA، دو سال نسبتا خشک یعنی سال‌های سوم و هشتم از ۲۸ سال دوره آماری مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی متوسط ماهانه‌ی برداشت آب بدست آمده از دو مدل SOP و SOP-SA با میزان ماهانه برداشت آب در طول دوره آماری دراز مدت برای این دو سال آزمون شده و میزان کمبود آب در این دو سال با استفاده از دو مدل SOP و SOP-SA محاسبه شده است. براساس مدل SOP در سال‌های سوم و هشتم به ترتیب ۴۳۴/۸۹ و ۴۸۸/۴۸ میلیون مترمکعب و براساس مدل SOP-SA به ترتیب ۲۱۸/۶۰ و ۴۶۶/۹۳ میلیون متر مکعب کمبود آب وجود خواهد داشت. میزان کمبود آب در مدل SOP-SA در سال‌های سوم و هشتم به ترتیب ۴۹/۷۴ و ۴/۴۱ درصد کمتر از سیاست بهره‌برداری استاندارد می‌باشد. با توجه به اشکال ۶ و ۷ مشاهده می‌شود بیشترین میزان کمبود آب در این سال‌ها در ماه خرداد رخ داده است که مدل SOP-SA توانسته به میزان قابل قبولی این کمبود را جبران کند. بنابراین آزمون انجام گرفته نتایج قبلی را تایید می‌کند و قابلیت مدل SOP-SA را برای دوره‌های خشک و استخراج مقدار بهینه برداشت آب از مخزن نشان می‌دهد.



شکل ۶- متوسط ماهانه کمبود آب در مدل SOP و SOP-SA در سومین سال آماری.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]



شکل ۷- متوسط ماهانه کمبود آب در مدل SOP و SOP-SA در هشتمین سال آماری.

در این پژوهش با استفاده از دو مدل تهیه شده SOP و SOP-SA بهره‌برداری از سد مخزنی درودزن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده مدل SOP-SA برای بهره‌برداری از مخزن پیشنهاد شده است. این مدل میزان کمبود اعمال شده به یک نیاز مشخص را به حداقل می‌رساند و از ایجاد کمبودهای شدید در سال‌های خشک جلوگیری می‌کند. بنابراین الگوریتم SA قابلیت تعیین بهره‌برداری بهینه از مخزن را دارا می‌باشد. براساس این مدل همواره به صورت ماهانه به میزان مطلوبی آب در مخزن ذخیره می‌شود و بهره‌برداری در هر دوره‌ی زمانی با میزان قابل قبولی کمبود آب مواجه می‌شود. این مدل بدون هیچ تغییری می‌تواند برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن هر سدی مورد استفاده قرار گیرد. الگوریتم SA با استفاده از روش مجانب صحت سنجی شد و می‌توان گفت این روش یک روش مناسب و کارا برای این منظور می‌باشد.

منابع

1. Borhani Darian, A. and M. Mortazavi Naeeni. 2008. Comparsion of application research methods at optimum operation of water resources. Journal of Water and Soil. 68: 57-66. (In Persian)
2. Borhani Darian, A. and L. Shahidi. 2008. Optimization of reservoir operation using simulated. International Publication of Engineering Sciences. Elm-o-snate Iran University. 19(8): 31-40. (In Persian)
3. Cereny, V. 1985. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm. Journal of Optimization Theory and Applications. 45: 41-51.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]

4. Chiu, Yu.C., Li.C. Chang and Fi.J. Chang. 2007. Using a hybrid genetic Algorithm-simulated annealing algorithm for fuzzy programming of reservoir operation. Water Resources and Environmental Engineering. 21: 3162-3172.
5. Connolly, D.T. 1990. An improved annealing scheme for the QAP. European Journal of Operational Research. 46: 43-100.
6. Cunha, M.DA.C. 1999. On solving aquifer management problems with simulated annealing algorithms. Journal of Water Resources Planning and Management. 13: 153-169.
7. Cunha, M.DA.C. and J. Sousa. 1999. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach. Journal of Water Resources Planning and Management. 125: 215-221.
8. Emadi, A., K. Qaderi, S.A. Mohseni Movahed, A. Soleymani and D. Davood Maghami. 2009. Study of reliability water-Supply per reservoir dams by standard operation method. 1St National Conference on Engineering and Management of InfraStructures. Tehran University. 27-29 Oct. 8 pp. (In Persian)
9. Iran Water Resources Management Organization. 2001. Estimation of total sediment load and its distribution in dam reservoirs. Management and Planning Organization Publication. 221: 36 pp. (In Persian)
10. Johnson, D.S., C.R. Aragon, L.A. McGeoh and C. Schevon. 1989. Optimization by simulated annealing: an experimental evaluation. Part I. Operations Research. 37: 865-892.
11. Khodabakhshi, F., A.R. Ghirian and N. Khakzad. 2009. Applying simulated annealing for optimal operation of multi-reservoir systems. Journal of Engineering and Applied Sciences. 2(1): 80-87.
12. Kirkpatrick, S., C.D.Jr. Gelatt and M.P. Vecchi. 1983. Optimization by simulated annealing. Science. 220: 671-680.
13. Li, X.G. and X. Wei. 2008. An improved genetic algorithm-simulated annealing hybrid algorithm for the optimization of multiple reservoirs. Journal of Water Resource Manage. 22: 1031-1049.
14. Loucks, D.P., J.R. Stedinger and D.A. Haith. 1981. Water resources system planning and analysis. 1st Ed. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New York. 559 pp.
15- Mass, A., M.M. Hufschmidt, R. Dorfman, Jr. H.A. Thomas, S.A. Marglin and G.M. Fair. 1962. Design of water-resource systems. Harvard University Press. Cambridge. Mass. Science Magazine. 136(3512): 250-251.
16. Metropolise, N., A. Rosenbluth, A. Teller and E. Teller. 1953. Equation of state calculations by fast computing machines. Journal of Chemical Physics. 21: 1087-1092.
17. Mohseni Movahed, S.A. 2004. Preparation of mathematic model hydrolic work optimization of irrigation channels by simulated annealing method and appointment of relative value assess indexes. Ph.D Thesis in Irrigation. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modarres University. 274 pp. (In Persian)
18. Monem, M.J. and R. Namdarian. 2005. Application of simulated annealing (SA) techniques for optimal water distribution in irrigation cannals. Irrigation and Drainage. 54: 365-373.
19. Namdarian, R. 2000. Preparation of water distribution program at irrigation channels by simulated annealing method. M.Sc Thesis in Irrigation Structures. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modarres University. 104 pp. (In Persian)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]

20. Rasoolzade Gharibdoosti, S. and A. Bozorg Haddad. 2009. Study of Efficiency reservoirs yield variations on probability distribute optimum output. 1st National Conference on Engineering and Management of InfraStructures. Tehran University. 27-29 Oct. 8 pp. (In Persian)
21. Shahidi, L. and A. Borhani Darian. 2007. Study of application fuuzy moddeling and simulated annealing algorithm at optimum operation of water resources. 7th Congres of fuuzy Systems. Mashhad University. 29-31 August. 5 pp. (In Persian)
22. Tospornsampan, J., I. Kita, M. Ishii and Y. Kitamura. 2005. Optimization of a multiple reservoir system using a simulated annealing-A case study in the Mae Klong system, Thailand. Paddy and Water Environment. 3(3): 137-147.
23. Wilhelm, M.R. and T.L. Ward. 1987. Solving quadratic assignment problem by simulated annealing. IIE Transactions. 107-119.
24. Zegordi, S.H., K. Itoh and T. Enkawa. 1995. A knowledgeable simulated annealing scheme for the early/tardy flow shop scheduling problem. International Journal of Production Research. 33: 1449-1466.
25. Zhang, Y.Y., Q. Huang, F. Gao and X.Y. Sun. 2010. Optimal reservoir operation using a hybrid Simulated annealing algorithm-genetic algorithm. Water Resources and Environ. 454-458.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]

Reservoir Operation Optimization Using Simulated Annealing Algorithm and Application of Asymptote Method in its Validation

M. Khademi[1], A.R. Emadi[2] and S.A. Mohseni Movahed[3]

1- Former M.Sc. Student, Sari Agriculture and Natural Resources University
2- Assistant Professor, Sari Agriculture and Natural Resources University (Corresponding author: emadia355@yahoo.com)
3- Assistant Professor, University of Arak

Abstract

Reservoir optimum operation is one of the optimization issues in water resources engineering which has been evaluated by varios known optimization methods, yet. In this study firstly reservoir simulation was done based on standard operation policy (SOP). Then simulated annealing algorithm (SA) has been used as a numerical optimization method with inteligent random structure for optimal reservoir operation. Because of SA algorithm sensivity in input paratmeters, therefore sensivity analysis were done and appropriate combination of that parameters was selected. In order to validation of SOP-SA combined algorithm, asymptote method was applied. Results indicated capability of algorithm on global optimal finding. The SOP-SA combined algorithm was run with objective of annual deficit minimization with constraint and limitations such as reservoir storage and release volume for Doroodzan dam. After algorithm run, reservoir storage and dam release in operation period were studied. Results of Research shown that SOP-SA combined algorithm reduced deficit intensity in drought priod by distribution of deficit in different mounths. In addition, the number of months with a very low monthly supply probability percentage (less than 50 percent); 22 months in the SOP algorithm, were reduced to 10 months.

Keywords: Reservoir Operation, Simulated Annealing Algorithm, Standard Operation Policy, Asymptote Method, Optimization

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-12]