

## مقایسه الگوریتم بهینه‌سازی بازپخت (SA)، مدل آبدهی و سیاست بهره‌برداری استاندارد در بهره‌برداری از مخزن (مطالعه موردی: سد مخزنی درودزن)

علیرضا عمادی<sup>۱\*</sup>، معصومه خادمی<sup>۲</sup>، سید اسدالله محسنی موحد<sup>۳</sup> و محمد رضا نوری امامزاده ئی<sup>۴</sup>

### چکیده

یکی از موضوعات مهم در مدیریت منابع آب، بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن است. در این پژوهش بهره‌برداری از مخزن سد درودزن با روش بهینه‌سازی SA، مدل آبدهی و سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) اجرا شد. برای هر یک از این روش‌ها مدل کامپیوتری با استفاده از زبان فرترن تهیه شد. متغیرهای تصمیم در روش SA، میزان برداشت آب در ماه‌های مختلف است. تابع هدف، کمبود آب مورد نیاز است که در شکل کمینه‌سازی بررسی شد. مدل آبدهی به صورتی تعریف شد که علاوه بر تأمین آب شرب و صنعت، مخزن قادر به تأمین آب کشاورزی با قابلیت اعتماد حداقل ۸۰ درصد باشد. نتایج نشان داد هر سه روش نیازهای شرب و صنعت را به صورت کامل تأمین می‌کنند. کارایی روش SA و مدل آبدهی در بخش تأمین نیاز کشاورزی نسبت به سیاست بهره‌برداری استاندارد بهتر است. همچنین مدل آبدهی نسبت به روش SA و سیاست بهره‌برداری استاندارد مقدار آب بیشتری را برای مصارف کشاورزی در اختیار مصرف‌کننده‌ها قرار می‌دهد. روش SA و مدل آبدهی کمبود آب را به ترتیب به مقدار ۳۳/۷۴ و ۸۳/۸۶ درصد کاهش می‌دهند. بنابراین در این روش‌ها مدل آبدهی بهترین کارایی را دارد و روش بهینه‌سازی SA و سیاست بهره‌برداری استاندارد به ترتیب در جایگاه‌های بعدی هستند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم بهینه‌سازی SA، بهره‌برداری از مخزن، سد درودزن و مدل آبدهی

**ارجاع:** عمادی ع. خادمی م. محسنی موحد س.ا. و نوری امامزاده ئی م. ۱۳۹۰. مقایسه الگوریتم بهینه‌سازی بازپخت (SA)، مدل آبدهی و سیاست بهره‌برداری استاندارد در بهره‌برداری از مخزن (مطالعه موردی: سد مخزنی درودزن). مجله پژوهش آب ایران.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه اراک

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

\* نویسنده مسئول: [Emadia355@yahoo.com](mailto:Emadia355@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۳/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۷/۰۹

## مقدمه

در بهره‌برداری از سدهای مخزنی با توجه به مشخص بودن حجم آب مخزن، ورودی‌های مخزن و میزان تقاضای آب، سیاست بهره‌برداری مناسب از مخزن تعیین می‌شود. یکی از راه‌های مشخص شدن عملکرد مخزن استفاده از روش‌های شبیه‌سازی است که از آن جمله می‌توان به سیاست بهره‌برداری استاندارد<sup>۱</sup> (SOP) اشاره کرد. در این راهبرد، برداشت از مخزن فقط براساس نیاز هر دوره صورت می‌گیرد. اگر آب کافی برای رفع نیاز موجود نباشد، مخزن خالی شده و اگر آب بیش از نیاز موجود باشد، مخزن پر شده و سپس سرریز خواهد کرد. در سیاست بهره‌برداری استاندارد تعداد ماه‌های کمبود محدود است ولی کمبودهای ایجاد شده بسیار شدید است و اگر سیستم واقعاً با آن مواجه شود زیان‌های جبران ناپذیری در پی خواهد داشت (عمادی و همکاران، ۱۳۸۸). این مدل فاقد آینده‌نگری لازم برای مدیریت کارا در بهره‌برداری از مخازن می‌باشد (لاکس، ۱۹۸۱). برای کاهش کمبودها روش‌های مختلف بهره‌برداری از مخزن مورد استفاده قرار گرفته است. در پژوهشی با استفاده از روش‌های فازی و شبیه‌سازی آنیلینگ<sup>۲</sup> (SA) و با هدف کمینه نمودن مجموع مربعات کمبود برداشت آب، قوانین بهره‌برداری سد دز استخراج شد. در الگوریتم SA با کاهش دمای آهسته‌تر و توقف در دمای پایین‌تر نتایج بهتری حاصل خواهد شد (شهیدی و برهانی داریان، ۱۳۸۶). در پژوهش دیگری منحنی فرمان یک سیستم چند مخزنی با استفاده از مدل‌های آبدهی<sup>۳</sup>، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تعیین شد و از بین این مدل‌ها مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی به عنوان بهترین مدل برای تخمین میزان آبدهی سیستم‌های چند مخزنی انتخاب شد (دندی و همکاران، ۱۹۹۷). در کاربرد مدل آبدهی برای یک سیستم چند مخزنی در شرایط تک هدفی و چند هدفی، نتایج نشان داد که این مدل نسبت به مدل شبیه‌سازی ابزار نمایشی بهتری در تولید خروجی‌ها است و این مدل در سیستم چند مخزنی و چند هدفی با توجه به کمبود مجاز در آبدهی سالانه قادر است، آبدهی قابل

قبولی را از پیش تعیین کند (داهه و سریواستاوا، ۲۰۰۲). ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش SA در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از مخزن در روش فازی استفاده شده است (چیو و همکاران، ۲۰۰۷). با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک بهبود یافته و SA، بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم سه مخزنی سدی در رودخانه و وجیانگ چین اجرا شد، نتایج نشان داد که 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 یابد و به نقطه بهینه سراسری همگرا شود (لی و وی، ۲۰۰۸). در مطالعه موردی سد چند مخزنی دز طی دو دوره کوتاه و بلند مدت، از یک طرف مقایسه‌ی الگوریتم SA، ژنتیک، مورچگان و روش برنامه‌ریزی پویا و از طرف دیگر مقایسه‌ی مدل‌های SA و MODSIM، نشان داده که در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنی خصوصاً در سیستم‌های بزرگ با تابع هدف پیچیده غیر خطی مدل SA در مدت زمان کوتاه‌تر پاسخگوی بهتری خواهد بود (خدا بخشی و همکاران، ۲۰۰۹). الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی SA و ژنتیک در مقایسه با الگوریتم SA، ژنتیک و روش برنامه‌ریزی پویا سریعتر می‌تواند به بهینه سراسری همگرا شود. این الگوریتم پیشنهادی قابلیت بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن را دارد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰). هدف از این پژوهش بررسی قابلیت الگوریتم بهینه‌سازی SA، مدل آبدهی و روش SOP در بهره‌برداری از مخزن سد درودزن است.

## مواد و روش‌ها

### الگوریتم شبیه‌سازی SOP

تعیین حجم ذخیره مخزن در هر دوره بر اساس دبی ورودی به مخزن، برداشت آب و تلفات آب، شبیه‌سازی مخزن گفته می‌شود. شبیه‌سازی مخزن بر اساس معادله پیوستگی که به صورت معادله ۱ است بیان می‌شود (لاکس، ۱۹۸۱).

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

که در آن:  $S_{t+1}$  حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره  $t+1$ ؛  $S_t$  حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره  $t$ ؛  $Q_t$  حجم جریان ورودی به مخزن در دوره  $t$ ؛  $P_t$  حجم بارش

1 - Standard Operation Policy (SOP)

2 - Simulated Annealing (SA)

3 - Yield Model

دمای اولیه؛  $B$  فاکتور کاهش دما؛  $\Delta X$  طول گام تصادفی  $(\Delta X = \text{Random}/K_{div})$  که در آن  $\text{Random}$  گزینه تصادفی و  $K_{div}$  عددی است که گزینه تصادفی به نسبت آن کوچک می‌شود؛  $EBS$  پارامتر مربوط به شرط تعادل؛  $Epoch$  طول دوره؛  $I_t$  حداکثر تعداد تکرارها در هر دما برای رسیدن به شرط تعادل و  $T_r$  دمای نهایی (شرط توقف). بطور کلی مراحل مختلف روش  $SA$  به صورت زیر می‌باشد (محسنی موحد، ۱۳۸۳):

۱- فراخوانی پارامترهای روش  $SA$ :  $(T_0, B, \Delta X, EBS, Tf, It, Epoch)$

۲- ایجاد نمونه اولیه: ایجاد نمونه‌ی تصادفی  $S$  در فضای امکان پذیر با توجه به قیدهای مسأله و بدست آوردن مقدار تابع هدف  $FF(S)$  به ازای این نقاط.

۳- ایجاد نمونه ثانویه: ایجاد نمونه‌ی تصادفی  $S'$  در فضای امکان پذیر با توجه به قیدهای مسأله و به دست آوردن مقدار تابع هدف  $FF(S')$  به ازای این نقاط.

۴- بررسی تغییرات تابع هدف:  $D = FF(S') - FF(S)$

طی این گام اگر در مقدار تابع هدف به ازای نمونه‌ی تصادفی  $S'$  نسبت  $S$  کاهش مشاهده شد ( $D \leq 0$ )، این انتقال رو به پایین را به عنوان جواب بهتر پذیرفته و  $S'$  جایگزین  $S$  می‌شود. در غیر این صورت ( $D > 0$ )، یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید ( $R(0-1)$ ) و احتمال  $P(D) = \exp(-D/T_r)$  محاسبه می‌شود. (فرض اولیه: پارامتر دما  $(T_r)$  برابر با دمای اولیه ( $T_0$ ) است.) اگر  $P(D) > R(0-1)$  (۱ شد، برای رهایی از دام نقاط بهینه محلی و همگرایی به سوی بهینه سراسری این انتقال رو به بالا نیز پذیرفته شده و  $S'$  جایگزین  $S$  می‌شود، در غیر این صورت مجدداً به گام ۳ ارجاع می‌شود.

۵- تکرار گام‌های ۳ و ۴ به تعداد طول دوره ( $Epoch$ )

۶- بررسی شرط تعادل: (در این پژوهش از شرط تعادل ویلهلم و وارد (۱۹۸۷) استفاده شده است. شرط تعادل ویلهلم و وارد بصورت معادله ۲ تعریف می‌شود.

$$|(F_e - F_g)/F_g| \leq EBS \quad (2)$$

که در آن:  $F_e$  میانگین تابع هدف در طی آخرین دوره در هر دما؛  $F_g$  میانگین تابع هدف در طی تمام دوره‌های پیشین در همان دما و  $EBS$  مقدار ثابت کوچک و مثبت

بر سطح دریاچه در دوره  $t$ ؛  $R_t$  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  $t$  است. معادله ۱ مبنای همه شبیه‌سازی‌ها است 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 بر اساس آن انجام می‌شود، سیاست بهره‌برداری استاندارد است که گاهی اوقات منحنی بهره‌برداری  $S$  نیز نامیده می‌شود (مس و همکاران، ۱۹۶۲). در بهره‌برداری از مخزن بر اساس الگوریتم  $SOP$  ابتدا میزان سرریز صفر و میزان برداشت آب برابر با مقدار نیاز فرض می‌شود و سپس صحت این فرضیات کنترل و مقادیر واقعی آنها 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 کمبود<sup>۱</sup> رخ داده است. طبق این سیاست بهره‌برداری هنگامیکه مخزن نتواند نیاز را به طور کامل تامین کند درصدی از آن تامین می‌شود. در این پژوهش بر اساس مبانی حاکم بر سیاست بهره‌برداری استاندارد، مدل کامپیوتری با استفاده از زبان فرترن تهیه شد.

#### الگوریتم بهینه‌سازی SA

الگوریتم  $SA$  یک روش بهینه‌سازی عددی با ساختار تصادفی هوشمند است که بر مبنای مکانیک آماری و قیاس با فرآیند فیزیکی آنیلینگ به عنوان یک فرآیند فیزیکی در صنعت شبیه‌سازی شده است (کرک پاتریک و همکاران، ۱۹۸۳؛ زگردی و همکاران، ۱۹۹۵). ایده اصلی که روش بهینه‌سازی  $SA$  بر مبنای آن پایه‌گذاری شده، اولین بار توسط متروپولیس و همکاران مطرح شد (کرک پاتریک و همکاران، ۱۹۸۳). کرک پاتریک و همکاران (۱۹۸۳) و متعاقباً سرنی (۱۹۸۵) دریافتند که می‌توان از این ایده برای مسایل بهینه‌سازی ترکیبی سود جست و بر این اساس روش  $SA$  را پایه‌گذاری کردند. مهمترین پارامترها و معیارهایی که قبل از کاربرد روش  $SA$  برای مسأله مورد نظر باید بررسی و تنظیم شود عبارتند از:  $T_0$

شبیه‌سازی- بهینه‌سازی استفاده شده است. بدین منظور مدل شبیه‌سازی SOP به صورت یک زیر برنامه برای مدل بهینه‌سازی SA تعریف شده و مدل ترکیبی SOP-SA را تشکیل داده است. در طی اجرای بهینه‌سازی در برنامه‌ی SA هر جا به مقدار تابع هدف نیاز باشد، زیر برنامه‌ی SOP فراخوانی می‌شود. این مدل ترکیبی برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن توسعه یافته است.

#### مدل آبدهی

آبدهی مطمئن به جریانی اطلاق می‌شود که در دوره‌های آینده با اعتبار نسبتاً زیاد (با احتمالی برابر یا بزرگتر از مقدار تعیین شده) برای تأمین نیازها از مخزن قابل رهاسازی باشد. آبدهی فقط در صورتی صد درصد قابل اعتماد است که در سال‌های آینده بهره‌برداری از مخزن، دوره‌هایی بحرانی‌تر از دوره‌های کم آبی که در آمار گذشته وجود داشته و آبدهی بر اساس آن تعیین شده به وجود نیاید. در مدل آبدهی روابط بهره‌برداری از مخزن به دو صورت حجم ذخیره برونسالی و درونسالی وجود دارد (شریفی و شهیدی‌پور، ۱۳۸۰).

#### حجم ذخیره برونسالی

حجم ذخیره برونسالی به حجم آبی اطلاق می‌شود که در انتهای هر سال در مخزن سد ذخیره می‌شود. معادله پیوستگی حجم ذخیره برونسالی به صورت سالانه با معادله ۴ بیان می‌شود (شریفی و شهیدی‌پور، ۱۳۸۰؛ داه و سربواستاوا، ۲۰۰۲).

$$S_{y+1} = S_y + Q_y - Y_p - \alpha_{S,Y} Y_S - E_y - Spill_y \quad (4)$$

که در آن:  $S_{y+1}$  حجم ذخیره مخزن در ابتدای سال  $y+1$ ؛  $S_y$  حجم ذخیره مخزن در ابتدای سال  $y$ ؛  $Q_y$  حجم جریان ورودی به مخزن در سال  $y$ ؛  $Y_p$  آبدهی یا نیاز قطعی سالانه با احتمال  $p$ ؛  $\alpha_{S,Y}$  ضریب آبدهی یا نیاز ثانویه سالانه با احتمال  $p$ ؛  $Y_S$  آبدهی یا نیاز ثانویه سالانه با احتمال  $p$ ؛  $E_y$  حجم تلفات تبخیر در سال  $y$  و  $Spill_y$  سرریز سالانه در سال  $y$  می‌باشد. نیاز قطعی مقدار آب مورد نیازی است که رهاسازی آن در صورت وجود آب به میزان کافی در مخزن ضروری است. در این پژوهش تأمین صد درصد نیاز شرب و صنعت و ۸۰ درصد

کنترل کننده شرط تعادل است که توسط کاربر انتخاب می‌شود و مقدار بهینه آن طی آزمایش‌های اولیه بدست می‌آید.

اگر طی آن شرط تعادل برقرار شد گام ۷ اجرا می‌شود. در غیر این صورت حداکثر تعداد تکرارها در هر دما برای رسیدن به شرط تعادل ( $I_t$ ) باید بررسی شود. اگر تعداد دفعات تکرار گام‌های ۳ و ۴ به  $I_t$  رسید گام ۷ اجرا خواهد شد و در غیر این صورت به گام ۳ برگشت داده خواهد شد.

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 شده و در غیر این صورت باید پارامتر دما به میزان  $T_{t+1} = B \times T_t$  کاسته شد و به گام ۳ برگشت کرد.

#### تابع هدف، قیدها و متغیرهای تصمیم

در یک روش بهینه‌سازی مقادیر کلیه متغیرهای تصمیم برای کمینه یا بیشینه نمودن تابع هدف با اعمال یکسری قیدها و محدودیت‌ها، محاسبه می‌شود. در این پژوهش تابع هدف به صورت معادله ۳ است.

$$Min FF = \sum_{y=1}^N \sum_{t=1}^{12} ((R_{y,t} - TD_{y,t}) / D_{max})^2 \quad (3)$$

که در آن:  $FF$  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، شهری و صنعتی) در ماه  $t$  از سال  $y$  و  $D_{max}$  حداکثر نیاز آبی ماهانه در طول دوره بهره‌برداری هستند. مقادیر رهاسازی از مخزن سد در ماه‌های مختلف سال به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. مهمترین قید اصلی موجود در یک مسأله بهره‌برداری از مخزن سد، معادله ۱ است. 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 کرد.

#### مدل ترکیبی SOP-SA

با توجه به عدم وجود معادله‌ی صریح بین تابع هدف و متغیرهای تصمیم، در این پژوهش از یک مدل ترکیبی

$S_t$  حجم ذخیره مخزن در ابتدای ماه  $t$ ؛  $\beta_t$  کسری از حجم جریان ورودی به مخزن در ماه  $t$  در خشک‌ترین سال و  $e_t$  حجم تلفات تبخیر در ماه  $t$  می‌باشد. خشک‌ترین سال در آمار گذشته، سالی است که جریان ورودی به مخزن در آن سال کمتر و بحرانی‌تر از سایر سال‌ها باشد. پارامترهای  $\beta_t$  و  $e_t$  به ترتیب با معادلات ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند.

$$\beta_t = \frac{Q_t}{\sum_{i=1}^{12} Q_i} \quad (6)$$

که در آن:  $Q_t$  حجم جریان ورودی به مخزن در ماه  $t$  در خشک‌ترین سال.

$$e_t = \gamma_t E_0 + \left( \frac{S_t + S_{t+1}}{2} \right) \gamma_t E \quad (7)$$

$\gamma_t$  کسری از حجم تلفات تبخیر در ماه  $t$ ؛  $E_0$  ثابت حجم تلفات تبخیر سالانه و  $E$  نرخ متوسط حجم تلفات تبخیر سالانه در واحد حجم ذخیره‌ی فعال مخزن.

#### سد مخزنی درودزن

سد مخزنی درودزن در شمال غربی شهر شیراز احداث شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی این سد را نشان می‌دهد.

نیاز کشاورزی به عنوان نیاز قطعی در نظر گرفته شده و تأمین ۲۰ درصد باقی‌مانده نیاز کشاورزی به عنوان نیاز ثانویه در نظر گرفته شده است. برای جلوگیری از مواجه شدن سیستم با کمبودهای شدید در ماه‌های آینده بهره‌برداری، در صورت عدم آب کافی با توجه به خصوصیات مدل آبدهی بخشی از آن تأمین می‌شود. برای سال‌های شکست  $\alpha_{s,y} = 0$  و سال‌های موفقیت  $\alpha_{s,y} = 1$  انتخاب می‌شود. سال شکست سالی است که مجموع نیازهای ماهانه در آن سال بیشتر از جریان ورودی به مخزن در همان سال باشد، در غیر این صورت آن سال سال موفقیت محسوب می‌شود.

#### حجم ذخیره درونسالی

حجم ذخیره درونسالی به حجم آبی اطلاق می‌شود که در انتهای هر ماه در مخزن سد ذخیره می‌شود. پیوستگی حجم ذخیره درونسالی در هر ماه  $t$  با معادله ۵ بیان می‌شود.

$$S_{t+1} = S_t + \beta_t \left( \sum_{s=1}^{12} (Y_p + \alpha_{s,y} Y_s) + \sum_{i=1}^{12} e_i \right) - (Y_p + \alpha_{s,y} Y_s) - e_t \quad (5)$$

که در آن:  $S_{t+1}$  حجم ذخیره مخزن در ابتدای ماه  $t+1$ ؛



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی سد مخزنی درودزن.

جدول ۱- مشخصات هندسی مخزن سد درودزن.

۱۶۸۳/۵	تراز تاج (m. a. s. l.)
۱۶۷۶/۵	تراز نرمال (m. a. s. l.)
۱۶۲۳/۵	تراز بستر (m. a. s. l.)
۹۹۳	حجم مخزن در تراز نرمال (MCM)
۱۳۳	حجم مخزن در تراز حداقل (MCM)

m. a. s. l. متر از سطح دریا

متوسط دبی ورودی درازمدت سالانه به مخزن آن ۳۰/۸۶ مترمکعب بر ثانیه و آبدهی حداقل و حداکثر آن به ترتیب ۶/۰۲ و ۲۱۸/۰۳ متر مکعب بر ثانیه 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. در این پژوهش سری زمانی ۲۸ ساله جریان ورودی به مخزن سد مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۲- توزیع نیاز ماهانه پایین دست سد درودزن (MCM).

ماه مصرف	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

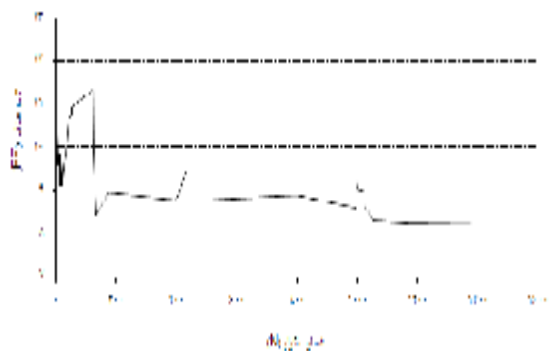
## نتایج و بحث

بدلیل حساسیت الگوریتم SA نسبت به پارامترها، با انجام تقریب‌های مقدماتی ترکیب مناسب پارامترها برای اجرای نهایی الگوریتم تعیین شد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر این است که از میان پارامترهای یاد شده بیشترین میزان حساسیت الگوریتم SA مربوط به پارامتر  $K_{div}$  است.

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

نام تابع	$T_0$	$T_f$	B	Epoch	$I_t$	EBS	$K_{div}$
FF	۳۰۰۰	۱	۰/۷	۱۰	۶۰	۰/۰۱	۱۰

کند همچنین قادر به تامین آب کشاورزی با قابلیت اعتماد حداقل ۸۰ درصد باشد. مقدار تابع هدف در مدل‌های SOP و آبدهی به ترتیب برابر با ۱۲/۳۹ و ۲/۰۰ بدست آمد.



شکل ۲- تغییرات تابع هدف در برابر شماره تکرارها در تکرارهای پذیرفته شده

در جدول ۴ متوسط سالانه تامین آب بر اساس مدل‌های SOP، SOP-SA و آبدهی با مقدار نیاز واقعی آن مقایسه شده است.

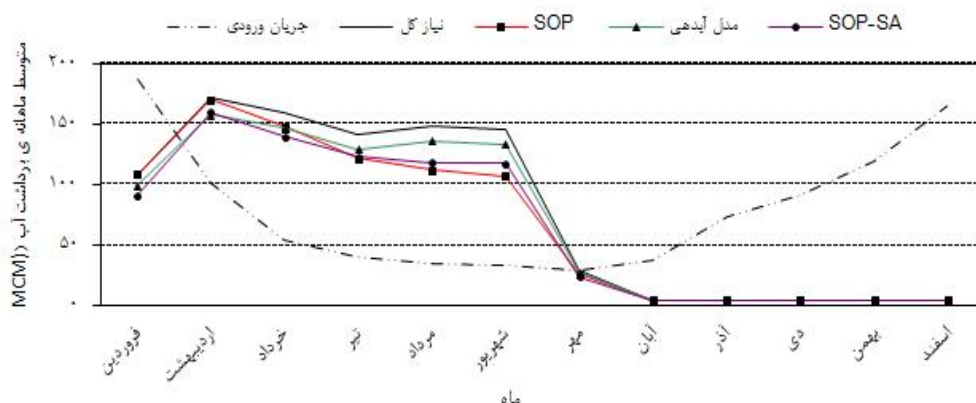
شکل ۲ تغییرات تابع هدف در برابر شماره تکرارها را در تکرارهای پذیرفته شده در الگوریتم SA نشان می‌دهد. مقدار تابع هدف در حالت بهینه در الگوریتم SA برابر با ۸/۲۱ می‌باشد. در این پژوهش مدل آبدهی طوری تعریف شده که بتواند صد درصد مصارف شرب و صنعتی را تأمین



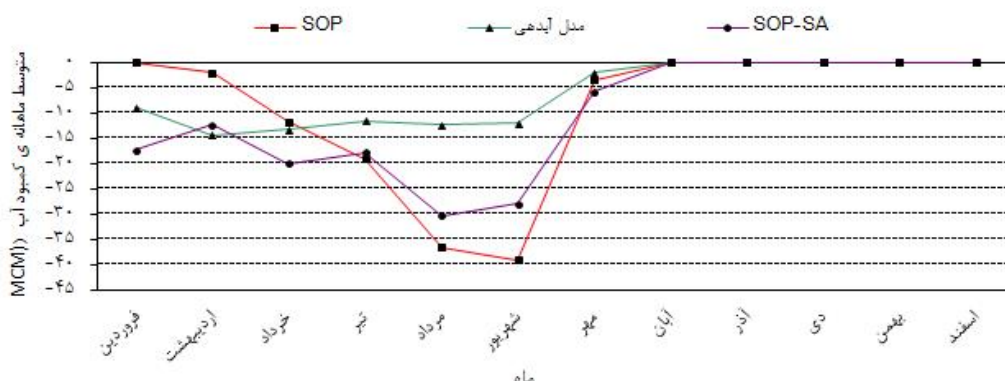
جدول ۴- متوسط سالانه تامین آب (MCM).

مقدار نیاز واقعی	۹۲۱/۹۳
مدل SOP	۸۰۹/۷۵
مدل SOP-SA	۷۸۹/۶۲
مدل آبدهی	۸۴۶/۹۰

نتایج حاکی از آن است که در مدل‌های مورد بحث، مدل آبدهی بهترین کارایی را دارد و مدل‌های SOP-SA و SOP به ترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار دارند. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب متوسط ماهانه برداشت و کمبود آب در مدل‌های SOP، SOP-SA و آبدهی را نشان می‌دهند.



شکل ۳- جریان ورودی به مخزن، نیاز واقعی و متوسط ماهانه برداشت آب در سه مدل.



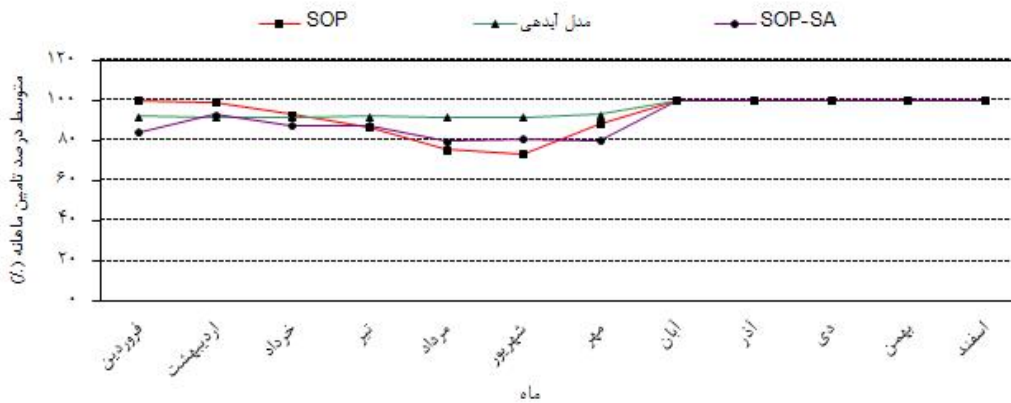
شکل ۴- متوسط ماهانه کمبود آب در سه مدل.

کمتری نسبت به مدل SOP داشته، ولی با توزیع کمبودها در ماه‌های مختلف عملکرد بهتری دارد. متوسط سالانه برداشت آب از مخزن در مدل آبدهی ۶/۷۶ درصد نسبت به مدل SOP-SA بیشتر می‌باشد. همچنین متوسط سالانه کمبود ۴۳/۳۲ درصد نسبت به مدل SOP-SA کمتر است. این امر به دلیل تفاوت بین ساختار دو مدل SOP-SA و آبدهی می‌باشد و دلیل بر ضعف مدل SA در یافتن جواب بهینه سراسری نیست. الگوریتم SA با قابلیت جستجوی تصادفی، بهترین گزینه را برای رسیدن به حداقل میزان کمبود آب با در

در این شکل‌ها دیده می‌شود شدت کمبودها در مدل SOP نسبت به دو مدل دیگر بیشتر است. این مسأله به دلیل شرایط برداشت آب در این مدل است که در صورت وجود آب کافی صد در صد نیاز پایین دست را تأمین می‌کند. بنابراین در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور کمبودهای بسیار شدیدی ایجاد می‌شود. مدل SOP-SA با رهاسازی کمتر در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد شدت کمبودها را در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور نسبت به مدل SOP کاهش داده است. با وجود اینکه مدل SOP-SA متوسط سالانه برداشت آب

خروجی‌ها را تعیین می‌کند. شکل ۵ درصد تأمین ماهانه که نسبت تعداد سال‌های تأمین در هر ماه به کل سال‌ها می‌باشد، را در هر سه مدل نشان می‌دهد.

نظر گرفتن قیدها انتخاب می‌کند. ولی مدل آبدهی با ساختاری متفاوت، ضمن مشروط کردن تأمین نیازهای ثانویه به جریان ورودی با استفاده از پارامتر  $\alpha_{s,y}$  میزان



شکل ۵- متوسط درصد تأمین ماهانه در سه مدل.

درصد می‌باشد این در حالی است که مقدار متناظر در مدل SOP-SA به ۹۰/۹۴ درصد می‌رسد. تعداد ماه‌های با درصد تأمین ماهانه بسیار کم (کمتر از ۵۰ درصد) در مدل‌های SOP و SOP-SA به ترتیب ۲۲ و ۱۰ می‌باشد. در مدل آبدهی متوسط درصد تأمین ماهانه ۹۵/۲۲ درصد تعیین شده و با توجه به نوع سیاست بهره‌برداری درصد تأمین ماهانه کمتر از ۸۰ درصد نخواهد بود.

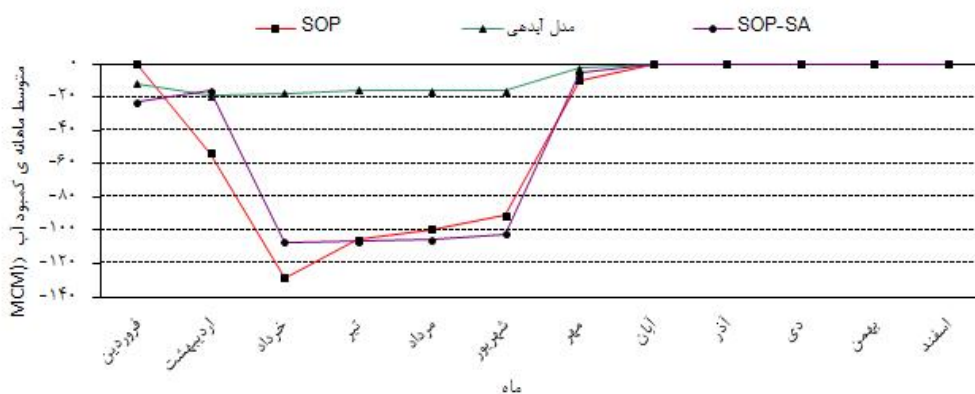
شکل‌های ۶ و ۷ متوسط کمبودها را به ترتیب در سومین و هشتمین سال از دوره آماری که سال‌های نسبتاً خشک می‌باشند نشان می‌دهند.

در مباحث مربوط به بهره‌برداری از مخزن، کاهش ۲۰٪ در تأمین آب بخش کشاورزی ناشی از کمبود آب به علت عدم ورود آب کافی به مخزن سد است. بنابراین در صورت وجود آب کافی در مخزن سد، بدین صورت نیست که آب در اختیار گیاه قرار نگیرد بلکه صد در صد نیاز کشاورزی تأمین می‌شود. به عبارت دیگر این کمبودی است که ناچار سیستم با آن مواجه می‌شود و مدل آبدهی با مدیریت این کمبود سعی در توزیع یکنواخت آن دارد. به همین دلیل در مدل آبدهی تغییرات متوسط درصد تأمین ماهانه در ماه‌های مختلف کم می‌باشد. در مدل SOP متوسط درصد تأمین ماهانه ۹۲/۸۵



شکل ۶- متوسط ماهانه کمبود آب در سه مدل در بازه زمانی ۱۳۵۵-۱۳۵۶.





شکل ۷- متوسط ماهانه کمبود آب در سه مدل در بازه زمانی ۱۳۶۰-۱۳۶۱.

درصد تأمین ماهانه برابر با ۸۰ درصد بدست آمد. بنابراین از نظر کاهش کمبودها و جلوگیری از ایجاد کمبودهای شدید که به صورت تابع هدف در این پژوهش تعریف شده به ترتیب مدل‌های آبدی، SOP-SA و SOP در اولویت قرار می‌گیرند.

#### منابع

- ۱- شریفی م. ب. و شهیدی پور س. م. م. ۱۳۸۰. تحلیل سیستم‌های منابع آب. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۷۵ ص.
- ۲- شهیدی ل. و برهانی داریان ع. ۱۳۸۶. بررسی کاربرد مدل‌سازی فازی و الگوریتم شبیه‌سازی آنیلینگ در بهره‌برداری بهینه از منابع آب. هفتمین کنفرانس سیستم‌های فازی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۷-۹ شهریور.
- ۳- عمادی ع. قادری ک. محسنی موحد ا. سلیمانی ع. و داوود مقامی د. ۱۳۸۸. بررسی اعتمادپذیری تأمین آب توسط سدهای مخزنی با استفاده از روش بهره‌برداری استاندارد. اولین کنفرانس ملی مدیریت زیرساختها، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ۷-۵ آبان ماه.
- ۴- محسنی موحد ا. ۱۳۸۳. تهیه مدل ریاضی بهینه‌سازی عملکرد هیدرولیکی کانال‌های آبیاری با استفاده از روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده (SA) و تعیین ارزش نسبی شاخص‌های ارزیابی. رساله دکتری در رشته آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس.

میزان کمبودها بر اساس مدل‌های SOP، SOP-SA و آبدی در سومین سال به ترتیب برابر با ۴۸۸/۴۸، ۴۳۴/۸۹ و ۲۱۸/۶۰ و در هشتمین سال به ترتیب برابر با ۴۶۶/۹۳، ۹۷/۸۹ و ۹۹/۹۵ میلیون متر مکعب است. بیشترین میزان کمبود آب در این دو بازه زمانی در ماه‌های خرداد تا شهریور رخ داده است. مدل SOP-SA توانسته به میزان قابل قبولی این کمبود را جبران کند. بنابراین آزمون انجام گرفته نتایج قبلی را تأیید می‌کند و قابلیت مدل SOP-SA را برای دوره‌های خشک نشان می‌دهد. ولی همان طور که مشاهده می‌شود مدل آبدی توانسته شدت کمبودها را به میزان قابل توجهی کاهش داده و شدت کمبودها را در ماه‌های فروردین تا شهریور به طور یکنواخت پخش کند. با وجود اینکه هر دو مدل آبدی و SOP-SA در مقایسه با مدل SOP این قابلیت را داشته‌اند که از بروز کمبودهای شدید در سال‌های بحرانی جلوگیری کنند، مدل آبدی از قابلیت بیشتری در رسیدن به این هدف برخوردار بوده است.

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش بهره‌برداری از مخزن سد مخزنی درودزن با استفاده از مدل‌های SOP، SOP-SA و آبدی مورد بررسی قرار گرفت. بر مبنای نتایج حاصل از تحقیق حاضر متوسط سالانه تأمین آب توسط مدل‌های SOP، SOP-SA و آبدی به ترتیب ۸۰۹/۷۵، ۷۸۹/۶۲ و ۸۴۶/۹۰ میلیون متر مکعب برآورد شد. تعداد ماه‌های با درصد تأمین ماهانه بسیار کم (کمتر از ۵۰ درصد) در مدل‌های SOP و SOP-SA به ترتیب ۲۲ و ۱۰ می‌باشد. در مدل آبدی کمترین

- analysis. 1st Ed. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New York.
- 11- Khodabakhshi F. Ghirian A. R. and Khakzad N. 2009. Applying simulated annealing for optimal operation of multi-reservoir systems. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2(1): 80-87.
  - 12- Kirkpatrick S. Gelatt C. D. Jr. and Vecchi M. P. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*. 220: 671-680.
  - 13- Mass A. Hufschmidt M. M. Dorfman R. Thomas Jr. H. A. Marglin S. A. and Fair G. M. 1962. Design of water-resource systems. Harvard University Press. Cambridge. Mass.
  - 14- Wilhelm M. R. and Ward T. L. 1987. Solving quadratic assignment problem by simulated annealing. *IIE Transactions*. 107-119.
  - 15- Zegordi S. H. Itoh K. and Enkawa T. 1995. A knowledgeable simulated annealing scheme for the early/tardy flow shop scheduling problem. *International Journal of Production Research*. 33: 1449-1466.
  - 16- Zhang Y-y. Huang Q. Gao F. and Sun X-y. 2010. Optimal reservoir operation using a hybrid Simulated annealing algorithm-genetic algorithm. *Water Resources & Environ*. 454-458.
  - 5- Cereny V. 1985. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 45: 41-51.
  - 6- Chiu Yu-C. Chang Li-C. and Chang Fi-J. 2007. Using a hybrid genetic algorithm-simulated annealing algorithm for fuzzy programming of reservoir operation. *Water Resources and Environmental Engineering*. 21: 3162-3172.
  - 7- Dahe P. D. and Srivastava D. K. 2002. Multi reservoir multiyield model with allowable deficit in annual yield. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128(6): 406-414.
  - 8- Dandy G. C. Connarty M. C. and Loucks D. P. 1997. Comparison of methods for yield assessment of multiple reservoir systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(6): 350-358.
  - 9- Li X-G. and Wei X. 2008. An improved genetic algorithm-simulated annealing hybrid algorithm for the optimization of multiple reservoirs. *Journal of Water Resource Manage*. 22: 1031-1049.
  - 10- Loucks D. P. Stedinger J. R. and Haith D. A. 1981. *Water resources system planning and*