



بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن با استفاده از منحنی‌های فرمان الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی مخزن سد کرج)

اسماعیل خدائی^{۱*} و محمد شهبازی بیلہ سوار^۲

۱- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه لرستان

۲- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه ارومیه

*نویسنده مسئول: esmailkhodaii@yahoo.com

خلاصه

بهره‌برداری از مخازن به دلیل عدم قطعیت جریان‌ات ورودی و پیچیدگی‌های سیستم‌های منابع آب همواره با مشکلاتی همراه بوده است. در این میان استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی در افزایش بهره‌وری عملکرد مخازن بعنوان یکی از پرکاربردترین روش‌ها، بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. تاکنون تکنیک‌های متفاوتی از جمله برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی، برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم‌های تکاملی برای بهبود ظرفیت بهره‌وری عملکرد مخازن مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک با جمعیت اولیه ۳۰۰ و درصد جهش ۲٪ و درصد ترکیب ۱۰۰٪ برای استخراج منحنی‌های فرمان مخزن سد کرج برای سه سال ورودی حداکثر، متوسط و حداقل استفاده شده و در ادامه با سیاست بهره‌برداری استاندارد و معیارهای اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری در سه سطح کارایی ۱۰۰٪، ۹۰٪ و ۸۰٪ مورد ارزیابی قرار گرفته که نتایج حاکی از عملکرد موفق الگوریتم ژنتیک در مقایسه با سیاست بهره‌برداری استاندارد در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد می‌باشد.

کلمات کلیدی: آسیب‌پذیری، الگوریتم ژنتیک، اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، سیاست بهره‌برداری استاندارد

مقدمه

روش‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن را در چهار گروه برنامه‌ریزی خطی (LP)، برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP)، برنامه‌ریزی پویا (DP) و الگوریتم‌های تکاملی (EA) می‌توان تقسیم‌بندی کرد. الگوریتم ژنتیک اولین الگوریتم از سری الگوریتم‌های تکاملی است که برای بهینه‌سازی مسائل مهندسی، اولین بار توسط جان هلند^۳ (۱۹۷۵) مورد استفاده قرار گرفت. ایسات و هال^۴ (۱۹۹۴) در یک سیستم چهار مخزنی از الگوریتم GA و برنامه‌ریزی پویا استفاده کردند و الگوریتم ژنتیک را به لحاظ محاسباتی بهتر گزارش کردند [۱]. الیویرا و لاکس^۵ (۱۹۹۷) از الگوریتم GA برای بهینه‌سازی منحنی-های فرمان یک سیستم چندمخزنی استفاده کردند و آن را تکنیکی عملی و توانمند در تخمین سیاست‌های بهره‌برداری

3 - John Holand

4 - Esat & Hall

5 - Oliveira & Loucks

عنوان کردند [۲]. واردلا و شریف^۱ (۱۹۹۹) [۳] و همچنین (۲۰۰۰) [۴] از الگوریتم ژنتیک برای سیستم چهار مخزنی استفاده و بیان کردند که این روش می‌تواند جواب‌های قابل قبولی ارائه دهد. چن^۲ (۲۰۰۳) از الگوریتم ژنتیک برای بدست آوردن منحنی‌های فرمان یک سیستم تک مخزنه استفاده کرد و آن را برای بهینه‌سازی سیستم‌های غیرخطی مؤثر ارزیابی کرد [۵]. چانگ و همکاران^۳ (۲۰۰۵) الگوریتم ژنتیک را در دو حالت مختلف کد حقیقی و باینری برای پیدا کردن منحنی فرمان ماهانه بهینه در یک سیستم تک سدی چندهدفه در تایوان به کار بردند. قاعده بهره‌برداری به کار رفته شامل سه منحنی ماهانه حد بالا، حد پایین و حد بحرانی بود و لذا ۳۶ متغیر تصمیم‌گیری داشت [۶]. ایشان همچنین در سال (۲۰۰۷) الگوریتم ژنتیک چندهدفه پویا^۴ را برای تهیه منحنی فرمان بهره‌برداری در یک سیستم تک مخزنه چندهدفه در تایوان به کار برد. آنها منحنی فرمان حد بالا را رقوم کنترل سیلاب قبلی بدست آمده فرض نمودند و برای بدست آوردن دو منحنی فرمان دیگر حد پایین و بحرانی، با تهیه یک شکل پیش‌فرض از منحنی فرمان بهره‌برداری متغیرهای تصمیم‌گیری را به ۲ مورد کاهش دادند که شامل ۴ متغیر حقیقی تعیین رقوم سطح آب و ۸ متغیر عدد صحیح برای مشخص کردن زمان بود؛ استفاده کردند. ممتحن و داریان (۲۰۰۷) در یک سیستم تک مخزنی ساده برای جستجوی مستقیم پارامترهای مربوط به سیاست بهره‌برداری بهینه مخزن از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. آنها برای تعریف سیاست بهره‌برداری چندین روش مختلف رابطه خطی، رابطه خطی قطعه‌ای، شبکه عصبی^۵ و قاعده فازی^۶ را به کار بردند تا ارتباط بین متغیرهای حالت (حجم مخزن و جریان ورودی) و متغیرهای تصمیم‌گیری (خروجی مخزن)، از طریق آنها برقرار شود. سپس برای بهینه‌سازی پارامترهای مربوط به آنها از الگوریتم ژنتیک بهره گرفتند و نتایج آن را با مدل برنامه‌ریزی پویای رگرسیون، برنامه‌ریزی پویا با شبکه عصبی و برنامه‌ریزی پویا با قاعده فازی مقایسه کردند [۷]. داریان و مرتضوی (۱۳۸۷) بهره‌برداری مخزن سد دز را با الگوریتم ژنتیک و الگوریتم مورچه برای یک دوره کوتاه مدت (یکساله) و بلند مدت مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که الگوریتم ژنتیک کارایی بهتری نسبت به الگوریتم مورچه و برنامه‌ریزی پویا در مسائل بهینه‌سازی دارد [۸]. هاشمی و همکاران (۲۰۰۸) برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن چندهدفه سد جیرفت از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. آنها در این تحقیق برای در نظر گرفتن عدم قطعیت جریان ورودی، از جریان‌های با احتمال ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد برای یک دوره ۱۲ ماهه استفاده کردند [۹]. داریان و ممتحن (۲۰۰۹) الگوریتم ژنتیک را در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه در مقیاس بزرگ به کار بردند. آنها برای تعیین ساختار و سیاست بهره‌برداری روابطی با ساختار خطی و خطی قطعه‌ای برای ارتباط بین متغیرهای حالت و تصمیم به کار بردند. سپس مقادیر بهینه پارامترها را مستقیماً بوسیله الگوریتم ژنتیک تعیین کردند [۱۰]. حسین و همکاران^۷ (۲۰۱۳) برای بهینه کردن خروجی مخزن سد کالانگ گیت^۸ در مالزی از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. منحنی فرمان خروجی را برای ۳ جریان ورودی ماکسیمم، میانگین و مینیوم بدست آورده و برای ۲۲ سال آمار تاریخی شبیه‌سازی کردند. آنها الگوریتم ژنتیک را یک روش مفید و آسان برای بهینه‌سازی منحنی فرمان خروجی از مخزن معرفی نمودند [۱۱].

1 - Wardlaw & Sharif

2 - Chen

3 - Chang et al

4- Macro-evolutionary Multiobjective Genetic Algorithms (MMGA)

5- Neural Network

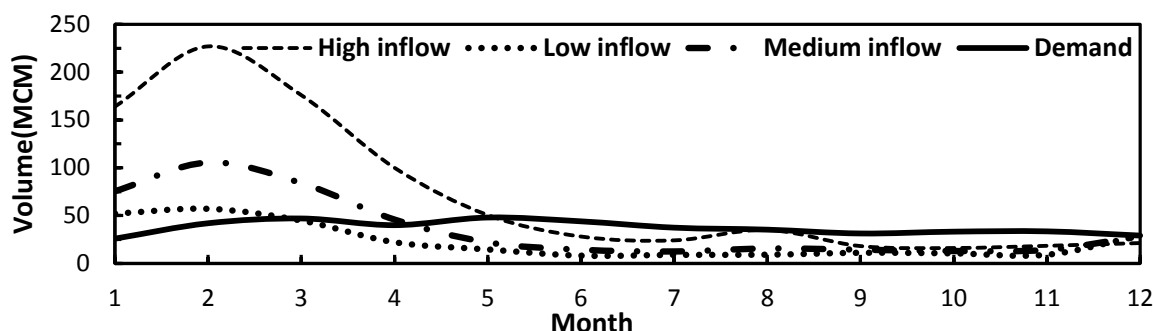
6- Fuzzy Rule Base

7 - Hossaina et al

8 - Klang Gate Dam

مخزن مورد مطالعه

مخزن سد کرج از نوع بتنی دو قوسی بوده و در ۲۳ کیلومتری شمال شهرستان کرج در محل تنگه واریان احداث گردیده است. این مخزن با حجم فعال ۱۸۷.۳ میلیون متر مکعب و حجم مرده ۷.۳ میلیون متر مکعب برای تأمین نیازهای شرب و کشاورزی احداث گردیده است. جریان متوسط سالانه ورودی به مخزن ۴۴۵.۲ میلیون متر مکعب می‌باشد. حوضه آبریز این سد به مساحت ۸۵۰ کیلومتر مربع و دارای ارتفاع متوسط ۲۹۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. نمودار جریان ورودی به سد کرج در سه سال پرآب، متوسط و کم آب در شکل (۱) مشاهده می‌گردد.



شکل (۱): جریان ورودی به مخزن سد کرج (میلیون متر مکعب)

در این تحقیق از آمار ورودی به مخزن، از سال آبی ۴۴-۴۵ تا سال ۷۲-۷۳ استفاده شده است. نیاز پایین دست مخزن به دو صورت نیاز شرب و نیاز کشاورزی بوده که بصورت نیاز کل در جدول (۱) نشان داده شده است. تبخیر خالص نیز بصورت تبخیر از سطح مخزن منهای بارش در سطح مخزن لحاظ گردیده است.

جدول ۱: آمار هیدرولوژیکی میانگین ماهانه مخزن سد کرج

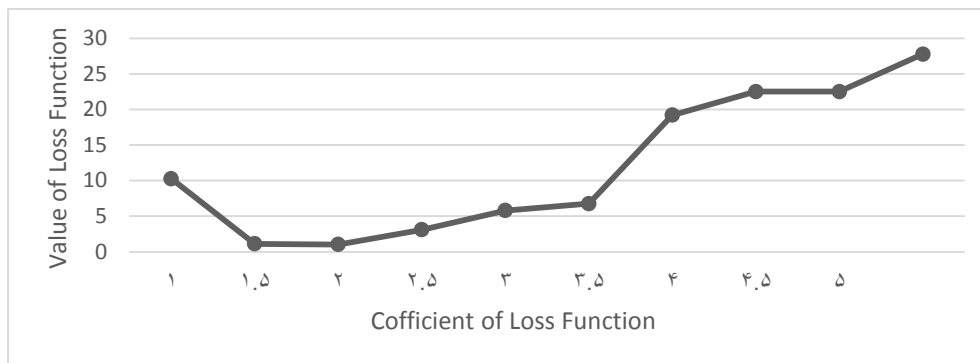
ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
جریان ورودی (MCM)	۷۵	۱۰۶	۸۴	۴۶	۲۲	۱۴	۱۳	۱۶	۱۴	۱۳	۱۴.۲	۲۸
نیاز کل (MCM)	۲۶	۴۲	۴۷	۴۰	۴۳	۴۱	۳۷	۳۵	۳۱	۳۳	۳۳.۵	۲۹
تبخیر خالص	-۶	۴۶	۱۵۷	۲۱۰.۸	۲۰۷.۳	۱۶۳.۵	۸۹	۱۲	-۳۱	-۳۲	-۳۶	-۴۱

تابع هدف

تابع هدف در این تحقیق بصورت کمینه سازی مجموع انحراف خروجی از نیاز لحاظ گردیده است.

$$LOSS = \sum_{t=1}^{12} \alpha (R_t - D_t)^2 \quad \begin{matrix} \text{If } R_t < D_t & \gg & \alpha = 2 \\ \text{If } R_t \geq D_t & \gg & \alpha = 1 \end{matrix} \quad (1)$$

در این رابطه R_t خروجی از مخزن در دوره t و D_t نیاز دوره می‌باشد. ضریب α با استفاده از آنالیز حساسیت حاصل گردید که در شکل (۲) نشان داده شده است. برای مقادیر α بیشتر از ۲، مقدار تابع خسارت افزایش پیدا کرده است.



شکل (۲): مقادیر تابع خسارت به ازای ضرایب مختلف α

رابطه (۱) محدود به روابط زیر می‌باشد.

$$S_{t+1} = S_t - R_t - EP_t + Q_t \quad (2)$$

$$\text{Dead volume}_t < S_t < \text{Normal volume}_t \quad (3)$$

$$R_{\min} < R_t \quad (4)$$

در روابط بالا S_t حجم مخزن در ابتدای دوره، S_{t+1} حجم مخزن در انتهای دوره، EP_t پارامتر تبخیر خالص در مخزن در دوره t ، Q_t ورودی مخزن در دوره t و $R_{\min}$ حداقل میزان آب رهاسازی از مخزن می‌باشد. پارامتر تبخیر خالص در مخزن بصورت رابطه (۵) محاسبه گردیده است.

$$EP_t = (E_t - P_t) \left(\frac{A_t + A_{t+1}}{2} \right) \quad (5)$$

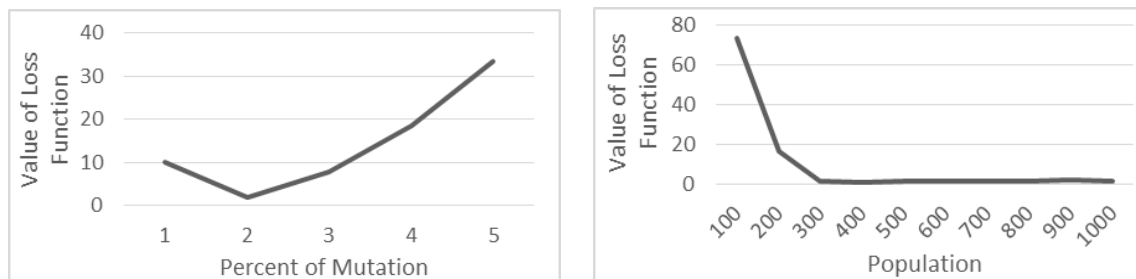
در این رابطه A_t سطح مخزن در ابتدای دوره، A_{t+1} سطح مخزن در انتهای دوره، E_t مقدار تبخیر ناخالص در دوره t و P_t میزان بارندگی در دوره t می‌باشد.

الگوریتم ژنتیک

ایده استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مسائل مهندسی، اولین بار توسط جان هلند (۱۹۷۵) در دانشگاه میشیگان مطرح شد. این ایده براساس انتقال خصوصیات موروثی توسط ژن‌ها^۱ بنیان گذاشته شده است. ژن‌ها بصورت سیستم دودویی (بیت‌های صفر و یک) در این تحقیق تعریف شده‌اند. در این الگوریتم دو اتفاق اساسی رخ می‌دهد اولین اتفاق ترکیب می‌باشد. در این عمل کروموزوم‌های والدین حول نقطه‌ای به نام تقاطع^۲ با هم تبادل ژن انجام می‌دهند. این عمل از شبیه شدن فرزندان به یک والد جلوگیری می‌کند و در عمل با نسبت زیادی اتفاق می‌افتد؛ به عبارتی احتمال اتفاق افتادن آن زیاد (نزدیک به ۱۰۰٪) می‌باشد. در این تحقیق عمل دورگه شدن در یک نقطه انجام شد و صد درصد کروموزوم‌های انتخابی در تولید نسل بعدی شرکت داشته‌اند. علاوه بر تبادل ژنی بین پدر و مادر، اتفاق دیگری می‌افتد که جهش ژنی یا موتاسیون^۳ نامیده می‌شود. جهش ژنی به این صورت است که برخی از ژن‌ها بصورت کاملاً تصادفی تغییر می‌کنند. عمل جهش ژنی بصورت تغییر ژن (بدین صورت که اگر یک باشد به صفر و بر عکس اگر صفر باشد به یک) انجام گرفت. هر چند تعداد اینگونه ژن‌ها بسیار کم است؛ اما وقوع این تغییر تصادفی به جهت جلوگیری از گرفتار شدن جستجوگر در یک نقطه بهینه محلی بسیار مهم است. درصد جهش معمولاً بین ۱ تا ۵ درصد لحاظ می‌گردد که در این

1- Gene
2- Crossover Point
3- Mutation

تحقیق همانطور که در شکل (۳) نیز مشخص است ۲ درصد لحاظ گردیده است. همچنین بعلا تغییرات ناچیز تابع هدف برای جمعیت اولیه بیشتر از ۳۰۰، این تعداد برای جمعیت اولیه انتخاب گردیده است.



شکل (۳): تغییرات مقدار تابع هدف با جمعیت و درصد جهش متفاوت

معیارهای ارزیابی

در این تحقیق از معیارهای اعتمادپذیری زمانی و کمی، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری استفاده شده است. اعتمادپذیری زمانی بصورت نسبت تعداد ماه‌های تأمین شده به کل ماه‌های دوره تعریف شده است. اعتمادپذیری کمی عبارت است از درصد تأمین نیاز که بصورت رابطه (۶) قابل بیان است.

$$\alpha = \frac{\sum_{t=1}^n R_t}{\sum_{t=1}^n D_t} \quad t=1,2,\dots,n \quad (6)$$

نرخ بازگشت یک سیستم از حالت شکست به حالت رضایت‌بخش را برگشت‌پذیری تعریف کرده‌اند. برگشت‌پذیری سیستم نیز بصورت رابطه (۷) قابل بیان است.

$$\gamma = \frac{\text{Prob}\{X_{t+1} \in S, X_t \in F\}}{\text{Prob}\{X_t \in F\}} \quad (7)$$

آسیب‌پذیری بصورت متوسط حداکثر کمبود برای ماه‌های سال تعریف شده است. اگر S_j را بعنوان حداکثر آسیب برای یک ماه در نظر بگیریم آسیب‌پذیری بصورت رابطه (۸) قابل تعریف خواهد بود.

$$\delta = \frac{\sum_{j=1}^{12} S_j}{12} \quad (8)$$

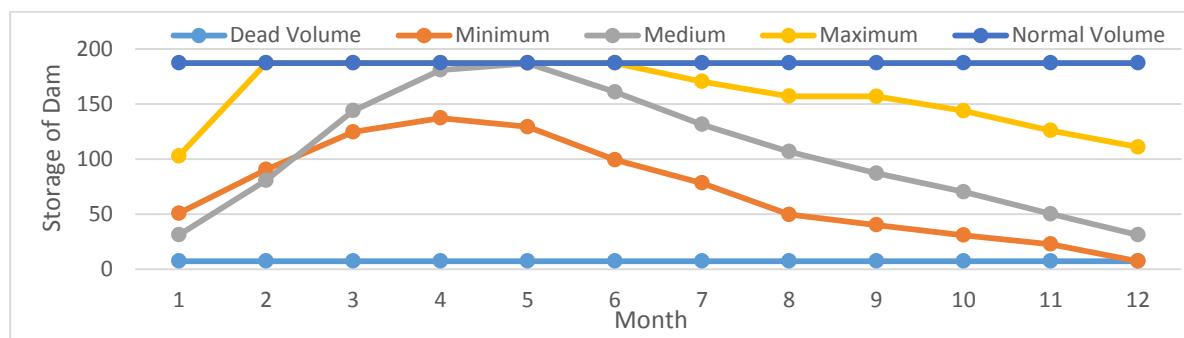
نتایج و بحث

سیاست SOP از اولین سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن است. بهره‌برداری از مخزن با این سیاست بدین صورت می‌باشد که اگر آب کافی جهت تأمین نیازها وجود داشته باشد؛ همه نیاز تأمین خواهد شد. در غیر اینصورت آب موجود جهت تأمین بخشی از نیازها رهاسازی گردیده و سطح مخزن در تراز حجم مرده قرار می‌گیرد. معیارهای کارایی سیستم برای شبیه‌سازی مخزن کرج با سیاست SOP بصورت جدول زیر ارائه گردیده است.

جدول (۲): معیارهای کارایی سیستم (سیاست SOP)

آسیب پذیری حداکثر	آسیب پذیری میانگین	برگشت پذیری	اعتمادپذیری کمی	اعتمادپذیری زمانی	آستانه کارایی
0.7861	0.4345	0.2533	0.9094	0.7845	1
0.7623	0.4087	0.2576	0.9192	0.8103	0.9
0.7326	0.3828	0.2373	0.9296	0.8305	0.8

در این تحقیق برای بهره‌برداری از مخزن با الگوریتم ژنتیک، منحنی فرمان بهره‌برداری برای سه سال حداکثر ورودی، متوسط و حداقل ورودی مطابق شکل (۴) استخراج گردید. در ادامه، بهره‌برداری با این منحنی‌ها برای ۲۹ سال آمار ورودی شبیه‌سازی گردید. همچنین در جدول (۳) معیارهای کارایی سیستم برای شبیه‌سازی انجام گرفته با الگوریتم ژنتیک ارائه گردیده است.

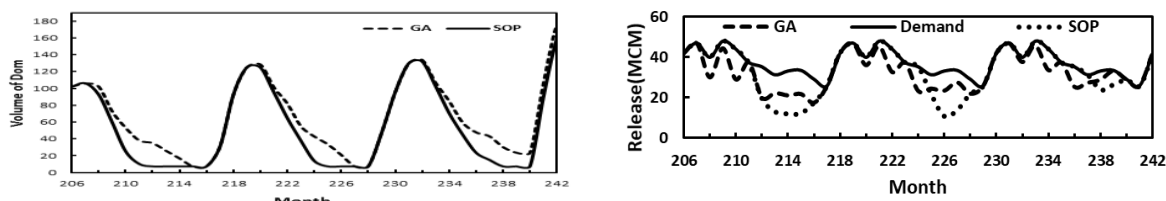


شکل (۴): منحنی‌های فرمان الگوریتم ژنتیک

جدول (۳): معیارهای کارایی سیستم (الگوریتم GA)

آستانه کارایی	اعتمادپذیری زمانی	اعتمادپذیری کمی	برگشت پذیری	آسیب پذیری میانگین	آسیب پذیری حداکثر
1	0.3994	0.9061	0.2105	0.4260	0.7652
0.9	0.7299	0.9324	0.4149	0.3741	0.7391
0.8	0.7989	0.96527	0.4858	0.3229	0.7064

الگوریتم ژنتیک با اعمال جیره‌بندی آب، در هنگام وقوع خشکسالی عملکرد بهتری ارائه می‌کند و از شدت خسارات وارده می‌کاهد. در ادامه حجم مخزن و نحوه خالی شدن مخزن در طول مدت وقوع پدیده خشکسالی بین سال‌های ۶۱ تا ۶۴ با سیاست SOP و منحنی‌های فرمان الگوریتم ژنتیک در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل مذکور بیانگر عملکرد بهتر الگوریتم ژنتیک می‌باشد.



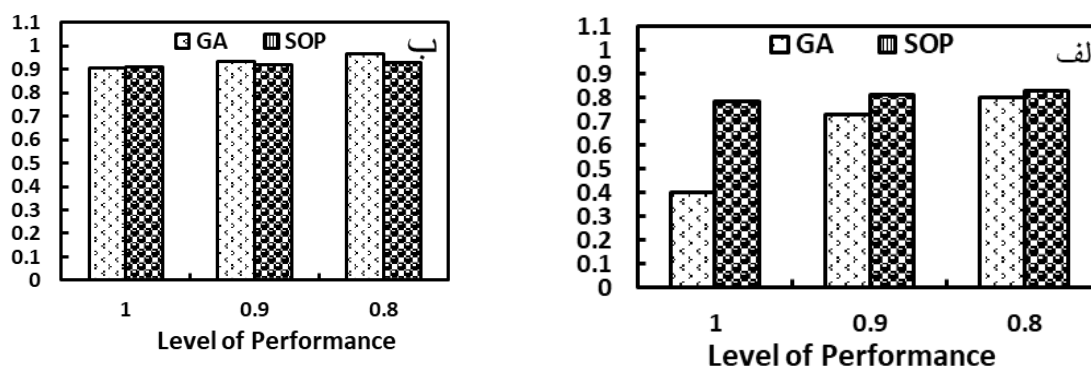
شکل (۵): رهاسازی و حجم مخزن در دوره خشکسالی (سال آبی ۶۱ تا ۶۴)

همانطور که در شکل (۵) نیز مشخص است الگوریتم ژنتیک در هنگام بروز پدیده خشکسالی حجم مخزن را با شیب ملایم‌تری تخلیه کرده و کمبود آب را بصورت مناسب‌تری بین واحدهای یک دوره اعمال می‌کند. در نتیجه بهره‌گیری از این الگوریتم از بوجود آمدن شکست‌های شدید جلوگیری می‌کند.

نتیجه‌گیری نهایی

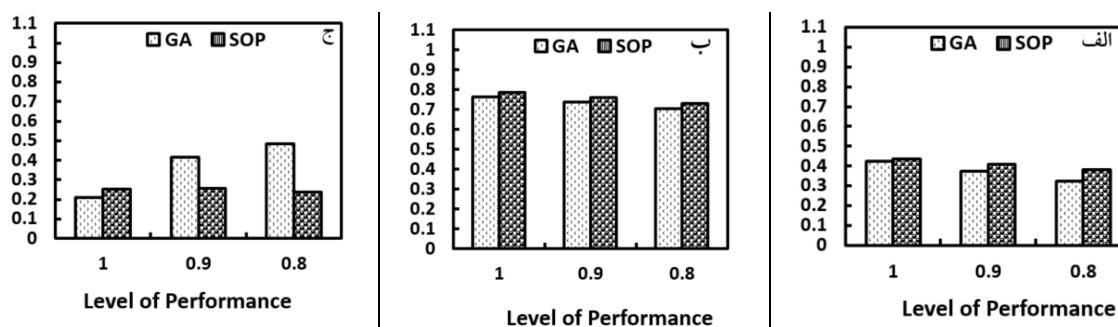
شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن برای ۲۹ سال آمار جریان ورودی به مخزن سد کرج، با استفاده از منحنی‌های فرمان بهره‌برداری و سیاست SOP انجام گردید.

با توجه به شکل (۶-الف) که برگشت‌پذیری را در سه آستانه کارایی متفاوت نشان می‌دهد. با کاهش آستانه کارایی، شیب افزایش اعتمادپذیری برای الگوریتم ژنتیک بیشتر است به طوری که در آستانه کارایی ۰/۸، اعتمادپذیری زمانی الگوریتم ژنتیک با سیاست SOP اختلاف کمی دارد. همانطوریکه در شکل (۶-ب) مشخص است اعتمادپذیری کمی الگوریتم ژنتیک و سیاست SOP در آستانه کارایی ۱ برابر و با کاهش آستانه کارایی، شیب افزایش اعتمادپذیری کمی الگوریتم ژنتیک تندتر بوده بطوریکه در آستانه کارایی ۰/۸، اعتمادپذیری کمی دو روش اختلاف چشمگیری دارند.



شکل (۶): نمودار اعتمادپذیری زمانی (الف) و اعتمادپذیری کمی (ب).

معیار آسیب‌پذیری میانگین و حداکثر الگوریتم ژنتیک با توجه به شکل (۷-الف و ب) در مقایسه با سیاست SOP در تمام سطوح کارایی، از مقدار کمتری برخوردار است که نشان از توزیع مناسب آب در دوره‌های زمانی مورد نظر دارد؛ بطوریکه در یک دوره خاص کمبود شدید اعمال نمی‌شود.



شکل (۷): آسیب‌پذیری میانگین (الف)، آسیب‌پذیری حداکثر (ب) و برگشت‌پذیری (ج)

برگشت‌پذیری سیستم یکی از معیارهای مؤثر در طراحی سیستم می‌باشد؛ بطوریکه برگشت‌پذیری کم، نشان از وجود مشکل در طراحی سیستم مورد نظر می‌باشد. همانطوریکه در شکل (۸) نشان داده شده است، برگشت‌پذیری الگوریتم



ژنتیک به ازای کاهش آستانه کارایی، افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد که نشان از موفقیت سیستم در بازگشت از شکست محتمل می‌باشد.

منابع

- 1) Esat, V., and Hall, M. J. (1994). "Water resources system optimization using genetic algorithm." *Hydroinformatics*, 94, 225-231.
- 2) Oliveira, R., and Loucks, D. P. (1997). "Operating rules for multi reservoir systems". *Water Resources Research*, 33(4), 839-852.
- 3) Wardlaw, R., and Sharif, M. (1999). "Evaluation of Genetic Algorithms for optimal reservoir system operation". *Journal of water Resources Planning and Management*, 125(1), 25-33.
- 4) Sharif, M., and Wardlaw, R. (2000). "Multireservoir systems optimization using genetic algorithms: Case study." *Computer Civil Engineering*, 14(4): 255-263.
- 5) Chen, L. (2003). "Real coded genetic algorithm optimization of long term reservoir operation." *J. of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 39(5), 1157-1165.
- 6) Chang, J.F., Chen, L., and Chang, C.L. (2005). "Optimizing reservoir operating rule curves by genetic algorithms." *Hydrological Processes*, 19: 2277-2289.
- 7) Momtahn, Sh., and Borhani Dariane. (2007). "Direct search approaches using genetic algorithms for optimization of water reservoir operating policies." *J. of Water Resources Planning and Management*, 133(3), 202-209.
- ۸) برهانی داریان، ع و مرتضوی نائینی، سید محمد. (۱۳۸۷). "مقایسه کاربرد روشهای کاوشی در بهره برداری بهینه از منابع آب". *مجله آب و فاضلاب*. شماره ۶۸.
- 9) M. S. Hasemi, G.A. Barani and H. Ebrahimi (2008). "Optimization Of Reservoir Operation by Genetic Algorithm Considering Inflow Probabilities". *J. Applied Sciences* 8(11):2173-2177.
- 10) Dariane, A.B., and Momtahn, Sh, (2009). "Optimization of multi-reservoir systems operation using modified direct search genetic algorithm. *Water Resources Planning and Management*, ASCE, 135(3):141-148.
- 11) Md. S. Hossaina, A. El-Shafiea. (2013). "Optimal Operation of Klang Gate Dam Using Genetic Algorithm: case study". *Jurnal Teknologi*. 65:2 (2013) 37-40.