



دانشگاه گمرک تهران و منابع آب

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و ششم، شماره دوم، ۱۳۹۸
۲۳۹-۲۵۰

<http://jwsc.gau.ac.ir>
DOI: 10.22069/jwsc.2019.14894.2997

ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی GA و PSO در بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه، مطالعه موردی: سدهای حوضه گرگان‌رود

جواد پیاده کوهسار^۱، حامد مازندرانی‌زاده^۲ و سید محمدکاظم صدر^۳

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)،
^۲استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، ^۳استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه اگزتر انگلستان
تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲

چکیده

سابقه و هدف: بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های منابع آب و تدوین قوانین و سیاست‌های مناسب بهره‌برداری از مخازن در سال‌های اخیر مورد توجه کارشناسان منابع آب قرار گرفته و پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی آن‌ها انجام شده است. هر چند در این زمینه پیشرفت‌های زیادی به لحاظ استراتژی‌های حل مسأله و ابزارهای محاسباتی به وجود آمده است، اما مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم چندمخزنه به دلیل تأثیرات بهره‌برداری مخازن بالادست بر ورودی‌های مخازن پایین‌دست، از پیچیدگی‌های زیادی برخوردار است. روش‌های بهینه‌سازی معمول به دلیل قیدهای زیاد، فضای ناپیوسته و ماهیت غیرخطی مسائل مدیریت منابع آب، ابزار مناسبی برای حل این‌گونه مسائل نیستند، به همین دلیل الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش عملکرد الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات در حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چندمخزنه شامل سدهای بوستان و گلستان واقع در حوضه آبریز گرگان رود مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. بررسی آمار جریان ورودی به مخزن دو سد در سال آبی ۹۴-۹۳ نشان می‌دهد که ورودی سالانه به سدهای بوستان و گلستان به ترتیب ۱۷٪ و ۶۰٪ کاهش یافته است. تابع هدف این پژوهش شامل کمینه‌سازی مجموع میزان اختلاف تقاضای کشاورزی و محیط‌زیستی با میزان رهاسازی‌شده از مخازن در طی دوره‌های بهره‌برداری در نظر گرفته شده است. الگوریتم ژنتیک عبارت از یک جستجوی چندجانبه موازی و هدایت‌شده بر اساس نظریه تکامل است. عملگرهای الگوریتم GA شامل انتخاب، پیوند و جهش است که به ترتیب از آن‌ها استفاده شده تا نسل بعد به وجود آید. در الگوریتم بهینه‌سازی PSO بر مبنای حرکت جمعی پرندگان و ماهی‌ها، تعدادی ذره در فضای جستجو پخش شده و مقدار تابع هدف، متناسب با موقعیت هر ذره محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات فعلی محل ذرات و بهترین محل که قبلاً در آن بوده‌اند موقعیت جدید ذرات محاسبه می‌شود.

* مسئول مکاتبه: mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir

یافته‌ها: بهترین جواب الگوریتم PSO برای تابع هدف در نظر گرفته شده، در طی ۱۰ بار اجرا ۹۰۹/۹۵ و بدترین جواب برابر ۹۳۰/۵۳ به دست آمد، در حالی که بهترین پاسخ الگوریتم GA در طی ۱۰ بار اجرا ۹۳۱/۱۷ و بدترین آن ۹۵۷/۳۲ بوده است. مقایسه میانگین جواب‌ها نیز حکایت از برتری ۳ درصدی جواب‌های الگوریتم PSO نسبت به GA دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان می‌دهد الگوریتم PSO از عملکرد بهتری در مقایسه با GA برخوردار است، به نحوی که مقایسه نتایج نشان می‌دهد الگوریتم بهینه‌سازی PSO با اعتمادپذیری ۴۹/۳۸ درصد از عملکرد مناسب‌تری در استخراج منحنی فرمان بهره‌برداری از سیستم چندمخزنه بوستان-گلستان ارائه نموده است.

واژه‌های کلیدی: اعتمادپذیری، الگوریتم‌های فرا ابتکاری، خشکسالی، مدیریت منابع آب

مقدمه

در سال‌های اخیر عواملی مانند افزایش جمعیت، تغییر اقلیم، صنعتی شدن، تنوع نیازها و ... دست به دست یکدیگر باعث ایجاد کمبود در تامین منابع آب شده است. به نحوی که حتی ساخت مخازن به‌عنوان یکی از شیوه‌های ساده‌ای مدیریت منابع آب، به تنهایی جواب‌گوی تامین نیازها نیست و باید نسبت به توسعه روش‌های بهینه بهره‌برداری اقدام نمود. در این میان بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه به دلیل اثرات مخازن بالادست بر مخازن پایین‌دست از پیچیدگی بیشتری برخوردار است (۱۰).

الگوریتم ژنتیک^۱ (GA) که نخستین بار توسط گولدبرگ (۱۹۸۹) معرفی شد تاکنون مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است (۴). این الگوریتم برای بهینه‌سازی پارامترهای طراحی زهکش شامل عمق، قطر و فاصله زهکش‌های زیرزمینی با هدف حداقل نمودن هزینه توسط زادش‌پرگو و همکاران (۲۰۱۵) استفاده شد (۱۶). بررسی کلبعلی و همکاران (۲۰۱۶) بر روی برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری از سد وشمگیر به‌منظور تعیین الگوی

کشت و مقدار آب تخصیصی به هر بخش با استفاده از روش برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای نشان می‌دهد آب مورد نیاز بخش‌های آبی‌پروری و زیست‌محیطی قابل تامین است و امکان تامین کامل آب مورد نیاز بخش کشاورزی وجود ندارد (۷). نتایج بررسی نوروزی و همکاران (۲۰۱۱) در بهره‌برداری بهینه از سیستم چندمخزنه سدهای گلستان و وشمگیر با استفاده از الگوریتم GA نشان از کارایی و عملکرد مناسب مدل بهینه‌سازی GA دارد (۱۵). بررسی مقدم و همکاران (۲۰۱۶) در مقایسه ۳ مدل بهینه‌سازی شامل الگوریتم GA، الگوریتم ازدحام ذرات^۲ (PSO) و الگوریتم جدید هیبریدی HGAPSO در بهره‌برداری از مخزن سد دز با هدف تامین آب، نشان از برتری مدل هیبریدی جدید دارد (۱۳). نتایج پژوهش حسینی موعاری و بنی‌حیب (۲۰۱۴) به‌منظور مقایسه الگوریتم کرم شب‌تاب با الگوریتم GA و الگوریتم PSO در تعیین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از مخزن بازفت، در یک بازه ۱۲۰ ماهه مربوط به سال‌های آبی ۶۶-۶۵ تا ۷۵-۷۴ بیانگر عملکرد بهتر کرم شب‌تاب نسبت به دو روش دیگر بود (۵). احمدیان‌فر و ادیب (۲۰۱۶)، از ترکیب الگوریتم PSO

روش‌های GA و PSO در بهره‌برداری بهینه از سیستم چندمخزنه سدهای گلستان و بوستان واقع در حوضه آبریز گرگان‌رود با استفاده از شاخص اعتمادپذیری در شرایط تغییر اقلیم است. در این مطالعه ضمن بررسی دقت نتایج به‌دست آمده حاصل از هر روش به مقایسه سرعت و تعداد دفعات محاسبه تابع هدف به‌عنوان شاخصی از زمان حل مسأله پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

در این بخش در ابتدا به تشریح مطالعه موردی شامل اطلاعات سدهای مخزنی بوستان و گلستان پرداخته شده است، در ادامه مدل بهینه‌سازی پیشنهادی و همچنین شاخص اعتمادپذیری ارائه شده است. در نهایت مدل‌های بهینه‌سازی GA و PSO تشریح شده‌اند.

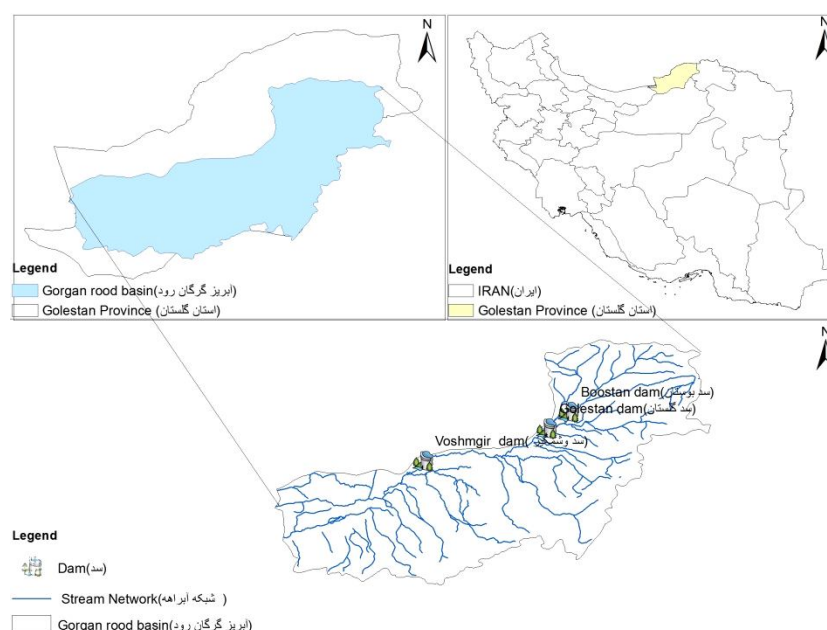
مطالعه موردی: شکل ۱ جانمایی قرارگیری دو مخزن بوستان و گلستان واقع در استان گلستان را نمایش می‌دهد.

سد مخزنی بوستان: سد بوستان در شهرستان کلاله در شمال‌غربی شهر کلاله بر روی آبراهه اصلی حوضه آبریز گرگان‌رود، رودخانه تمر، احداث گردیده است. ظرفیت ذخیره مخزن این سد ۵۰ میلیون مترمکعب است که حدود ۴۱ میلیون مترمکعب آن برای تنظیم آب در نظر گرفته شده است. مقادیر ورودی و تبخیر از سطح مخزن بوستان برای سال آبی ۹۳-۹۴ بر اساس گزارش سالانه سازمان آب منطقه‌ای و همچنین نیاز کشاورزی و محیط‌زیست این مخزن بر اساس دستورالعمل سال ۱۳۸۹ وزارت نیرو در جدول ۱ آمده است (۶). همان‌گونه که از این جدول مشخص است مجموع ورودی به مخزن در سال آبی ۹۳-۹۴ از جمع نیازهای مصوب کم‌تر است و در حدود ۱۷٪ کمبود مشاهده می‌شود.

و GA برای بهینه‌سازی انرژی برقایی سد در استفاده نمودند، به‌گونه‌ای که از مزایای الگوریتم PSO و GA به‌طور هم‌زمان استفاده شد (۱). نتایج این روش ترکیبی نشان داد که الگوریتم حاصل باعث افزایش انعطاف‌پذیری و بهبود توانایی الگوریتم PSO جهت ایجاد جمعیت تصادفی با سرعت همگرایی بالا می‌شود. نتایج به‌کارگیری الگوریتم PSO برای کاهش هزینه ایجاد سیستم توزیع آب توسط مقدم و همکاران (۲۰۱۳) نشان می‌دهد این الگوریتم از عملکرد بهتری در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها برخوردار است (۱۲). نتایج استفاده از الگوریتم GA برای حل یک مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری چهارمخزنه با هدف حداکثرسازی سود ناشی از تولید برق با در نظر گرفتن همه قیده‌های مربوط به ذخیره و رهاسازی از مخزن توسط اسیت و هال (۱۹۹۴) نشان داد که الگوریتم GA از پتانسیل بالایی برای حل مسائل بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آب برخوردار است (۳). معینی (۲۰۱۶)، به بررسی عملکرد چهار الگوریتم بهینه‌سازی مورچه در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چهار و ده مخزنه پرداخت. نتایج نشان داد الگوریتم سیستم مورچه پیشینه- کمینه جواب‌های مناسب‌تری نسبت به سایر روش‌ها ارائه داده است (۱۱).

بررسی منابع نشان می‌دهد مقایسه روش‌های بهینه‌سازی تدریجی^۱ (EOT) مانند GA و PSO، بیش‌تر بر روی سیستم‌های تک‌مخزنه انجام شده است، در حالی‌که چنین سیستم‌هایی با تکنیک‌های ریاضی بر پایه مشتق قابل‌حل هستند. بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنه که به دلیل ماهیت غیرمحدب آن‌ها توسط روش‌های معمول قابل‌حل نیستند، مطالعه موردی مناسبی برای سنجش عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی هستند. هدف از این پژوهش بررسی و مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری

1- Evolutionary Optimization Techniques



شکل ۱- محل قرارگیری مخازن.

Figure 1. Reservoirs location.

جدول ۱- اطلاعات جریان ورودی، تبخیر، نیاز کشاورزی و نیاز محیط زیست مخزن بوستان (میلیون مترمکعب در سال).

Table 1. Inflow, evaporation, agriculture demand, environment demand of Bostan dam (Mcm³/Year).

جمع	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	
Sum	Sep.	Aug.	Jul.	Jun.	May	Apr.	March	Feb.	Jan.	Dec.	Nov.	Oct.	
29.9	6	0.9	0.6	0.9	2	7.6	4.9	2.24	1.25	1.9	1	0.7	جریان ورودی Input
2.38	0.14	0.42	0.52	0.62	0.3	0.12	0.07	0.05	0.04	0.02	0.03	0.05	تبخیر Evaporation
23.7	4.6	4.4	3.9	2	4.5	1.5	0.8	0	0	0	2	0	نیاز کشاورزی Agriculture
10.27	0.53	1.02	0.33	0.98	2.4	3.11	0.47	0.32	0.28	0.29	0.3	0.24	نیاز محیط‌زیست Environment
36.35	5.27	5.84	4.75	3.6	7.2	4.63	1.34	0.37	0.32	0.31	2.33	0.29	جمع نیاز Sum

میلیون مترمکعب کاهش یافت. مقادیر ورودی و تبخیر از سطح مخزن گلستان برای سال آبی ۹۳-۹۴ بر اساس گزارش سالانه سازمان آب منطقه‌ای و نیاز کشاورزی، نیاز محیط‌زیست و همچنین حقابه سد وشمگیر از این مخزن بر اساس دستورالعمل سال ۱۳۸۹ وزارت نیرو در جدول ۲ ارائه شده است (۶). همان‌گونه که از این جدول مشخص است مجموع

سد مخزنی گلستان: سد گلستان در شهرستان گنبدکاووس در حدود ۱۲ کیلومتری شمال‌شرقی شهر گنبد بر روی آبراهه اصلی حوضه آبریز گرگان‌رود احداث گردیده است. ظرفیت مخزن سد در ابتدای بهره‌برداری حدود ۸۶ میلیون مترمکعب بوده که با توجه به نقش مهم ذخیره‌سازی سد گلستان در مهار سیلاب سال ۱۳۸۰، حجم ذخیره سد از ۸۶ به ۵۰

ورودی به مخزن در سال آبی ۹۳-۹۴ از جمع نیازهای مصوب بسیار کم تر است به گونه ای که در مقابل ۱۴۰ میلیون مترمکعب نیاز آبی مصوب وزارت نیرو، فقط ۵۵ میلیون مترمکعب ورودی وجود دارد، به عبارت دیگر در حدود ۶۰٪ کمبود مشاهده می شود.

جدول ۲- اطلاعات جریان ورودی، تبخیر، نیاز کشاورزی و نیاز محیط زیست مخزن گلستان (میلیون مترمکعب در سال).

Table 2. Inflow, evaporation, agriculture demand, environment demand of Golestan dam (Mcm³/Year).

جمع	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	
Sum	Sep.	Aug.	Jul.	Jun.	May	Apr.	March	Feb.	Jan.	Dec.	Nov.	Oct.	
54.58	3.8	1.1	2.9	0.8	1.8	21.4	10.8	4.4	2.9	2.8	1.3	0.84	جریان ورودی Input
6.03	0.48	0.97	1.12	1.39	0.74	0.33	0.27	0.19	0.19	0.08	0.09	0.18	تبخیر Evaporation
66.3	6.4	14	13.3	7.8	11	4.5	3.8	0	0	0	6.5	0	نیاز کشاورزی Agriculture
42	1.2	2.3	1.6	4.7	10.1	14.6	2.4	1.4	1.1	1	0.9	0.7	نیاز محیط زیست Environment
25	0	0	12.5	12.5	0	0	0	0	0	0	0	0	نیاز وشمگیر Voshmgir
139.33	8.08	17.27	28.52	26.39	21.84	19.43	6.47	1.59	1.29	1.08	7.49	0.25	جمع نیاز Sum

$$S_{i,t+1} = S_{i,t} + I_{i,t} + ER_{i-1,t} - R_{i,t} - E_{i,t}, \text{ if } i = 2 \quad (3)$$

$$S_{i,\min} \leq S_{i,t} \leq S_{i,\max}, \forall i \quad (4)$$

$$R_{i,\min} \leq R_{i,t} \leq R_{i,\max}, \forall i \quad (5)$$

$$S_{i,1} = S_{i,\max}, \forall i \quad (6)$$

$$S_{i,13} = S_{i,\max}, \forall i \quad (7)$$

$$i = 1, \text{ Boostan Reservoir} \quad (8)$$

$$i = 2, \text{ Golestan Reservoir} \quad (9)$$

$$\text{All Var.} \geq 0 \quad (10)$$

که در آنها، $AR_{i,t}$ و $AD_{i,t}$ به ترتیب مقدار آب رهاسازی شده برای تامین نیاز کشاورزی و مقدار نیاز کشاورزی از مخزن i در دوره زمانی t (میلیون

مدل بهینه سازی پیشنهادی: هر مدل بهینه سازی شامل تابع هدف، قیدها و متغیر تصمیم و حالت است که بر اساس نوع مسأله تعریف می شوند. در چنین مسائل مهندسی منابع آب، متغیر تصمیم می تواند میزان آب رهاسازی شده از مخزن و یا حجم ذخیره مخزن در هر دوره زمانی در نظر گرفته شود (۱۰). در این پژوهش میزان آب رهاسازی شده از مخازن به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. تابع هدف شامل کمینه سازی مجموع میزان اختلاف نیاز کشاورزی، محیط زیست و سد وشمگیر با میزان رهاسازی شده از مخازن در طی دوره بهره برداری است.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^{12} [(AR_{i,t} - AD_{i,t})^2 + (ER_{i,t} - ED_{i,t})^2 + (VR_{i,t} - VD_{i,t})^2] \quad (1)$$

Subject to :

$$S_{i,t+1} = S_{i,t} + I_{i,t} - R_{i,t} - E_{i,t}, \text{ if } i = 1 \quad (2)$$

الگوریتم GA: الگوریتم ژنتیک عبارت از یک جستجوی چندجانبه موازی و هدایت‌شده بر اساس نظریه تکامل است که با شبیه‌سازی فرآیندهای بقای عضو برتر در علم زیست‌شناسی، اقدام به یافتن بهترین پاسخ یک مسأله می‌نماید. عملگرهای الگوریتم GA شامل انتخاب، پیوند و جهش است که به ترتیب از آن‌ها استفاده شده تا نسل بعد به وجود آید. عملگر انتخاب، کروموزوم‌های قوی‌تر را به نسل‌های بعدی انتقال می‌دهد. عملگرهای پیوند و جهش با ترکیب و تغییر کروموزوم‌ها به تولید کروموزوم‌های جدید و جست‌وجو در فضای مسأله برای رسیدن به جواب‌های بهتر کمک می‌کند (۱۴).

الگوریتم PSO: روش بهینه‌سازی PSO در سال ۱۹۹۵، توسط راسل ابرهارت و جیمز کندی معرفی گردید (۲). این روش از عملکرد دسته‌جمعی گروه‌های حیوانات مانند پرندگان و ماهی‌ها اقتباس شده است. در این الگوریتم تعدادی ذره در فضای جستجو پخش شده‌اند. مقدار تابع هدف برای هر ذره، متناسب با موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی ذره و بهترین محلی که قبلاً در آن بوده و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی برای حرکت ذره محاسبه می‌شود. پس از انجام حرکت همه ذرات یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا آن‌که ذرات همگرا شده و جواب نهایی به دست آید. سرعت و مکان جدید ذره به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۱۲ تا ۱۴ قابل محاسبه است:

$$v^i[t+1] = w[t]v^i[t] + c_1 \text{rand}_1(x^{i, \text{pbest}}[t] - x^i[t]) + c_2 \text{rand}_2(x^{\text{gbest}}[t] - x^i[t]) \quad (12)$$

مترمکعب)، $ER_{i,t}$ و $ED_{i,t}$ به ترتیب مقدار آب ره‌اشده برای تامین نیاز زیست‌محیطی و حداقل نیاز زیست‌محیطی از مخزن i در دوره زمانی t (میلیون مترمکعب)، $VR_{i,t}$ و $VD_{i,t}$ به ترتیب مقدار آب ره‌اشده برای تامین نیاز سد و شمشگیر و مقدار نیاز مخزن و شمشگیر از مخزن i در دوره زمانی t (میلیون مترمکعب) است. $S_{i,t}$ مقدار ذخیره مخزن i در دوره زمانی t ، $I_{i,t}$ ورودی به مخزن i در دوره زمانی t ، $R_{i,t}$ خروجی از مخزن i در دوره زمانی t و $E_{i,t}$ تبخیر از سطح مخزن i در دوره زمانی t (میلیون مترمکعب) است. قیدهای ۲ و ۳ به ترتیب رابطه پیوستگی در مخزن بوستان و گلستان را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که از رابطه ۳ مشخص است به‌منظور اعمال اثر بهره‌برداری مخزن بوستان بر مخزن گلستان، مقدار آب ره‌اسازی‌شده برای تامین نیاز زیست‌محیطی از سد بوستان، به‌عنوان ورودی سد گلستان در نظر گرفته شده است. دو قید ۶ و ۷ نشان می‌دهد که حجم مخزن‌ها در ابتدا و انتهای دوره برابر و بیشینه مقدار در نظر گرفته شده است، دلیل این موضوع این است که در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از مخزن سدها، شرایط ابتدا و انتهای دوره یکسان در نظر گرفته می‌شود، به‌عبارت دیگر برنامه‌ریزی منجر به تخلیه کامل منابع نشود.

شاخص اعتمادپذیری در بهره‌برداری از مخازن: شاخص اعتمادپذیری عبارت است از نسبت مجموع آب تامین‌شده به مجموع نیازها در طی دوره بهره‌برداری. شاخص اعتمادپذیری کمی به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (۹):

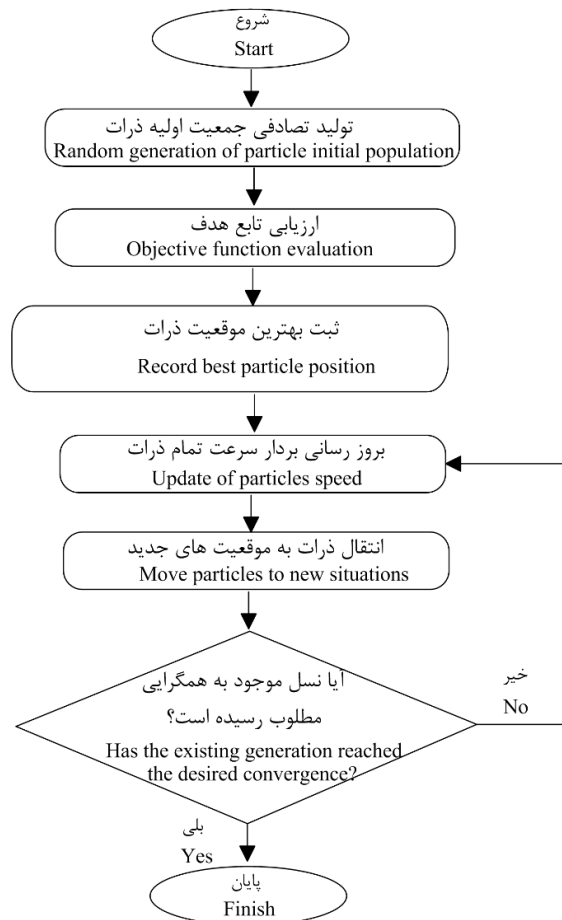
$$\alpha = \frac{\sum_{t=1}^{12} (AR_{i,t} + ER_{i,t} + VR_{i,t})}{\sum_{t=1}^{12} (AD_{i,t} + ED_{i,t} + VD_{i,t})} \quad (11)$$

افزایش t ، کاهش می‌یابد. کاهش $w[t]$ باعث کاهش سرعت حرکت به سمت فضاهاى جدید خواهد شد، به این ترتیب در ابتدای اجرای مدل که مقدار $w[t]$ زیاد است به ذرات اجازه داده می‌شود که همه فضا جستجو شود و به تدریج با پیشرفت مراحل، از حرکت‌های سریع کاسته شده و در عوض اطراف نقاط به دست آمده جستجو شود (۸). $rand_1$ و $rand_2$ اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک، c_1 و c_2 به ترتیب ضریب یادگیری شخصی و ضریب یادگیری جمعی است که بین صفر و دو قرار دارند (۲). شکل ۲ الگوریتم PSO را نمایش می‌دهد.

$$w[t] = w_{\min} + \frac{w_{\max} - w_{\min}}{t} \quad (13)$$

$$x^i[t+1] = x^i[t] + v^i[t+1] \quad (14)$$

که در آنها، $v^i[t]$ و $x^i[t]$ به ترتیب نشان‌دهنده سرعت و موقعیت ذره i در زمان t ، $x^{i, pbest}[t]$ و $x^{gbest}[t]$ به ترتیب بهترین موقعیت شخصی و بهترین موقعیت جمعی، $w[t]$ عبارت از ضریب اینرسی در مرحله t است که w_{\min} معمولاً برابر 0.4 و w_{\max} برابر 0.9 است. بر اساس رابطه ۲، مقدار $w[t]$ به تدریج در طی انجام مراحل بهینه‌سازی و با

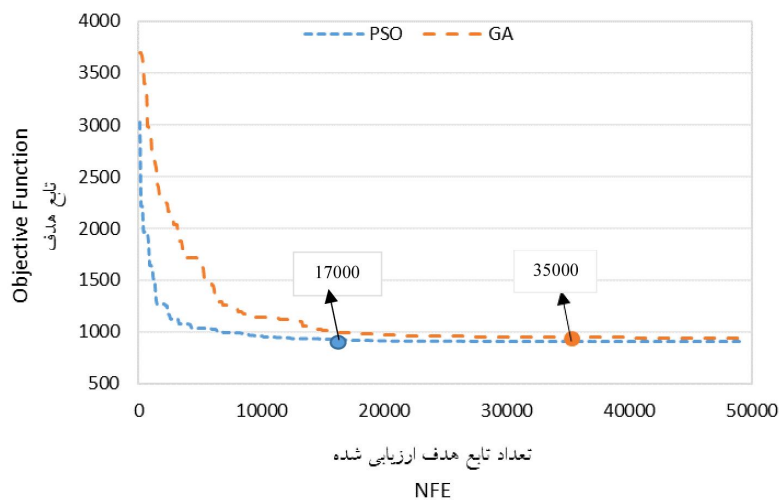


شکل ۲- الگوریتم PSO.
Figure 2. PSO Algorithm.

نتایج و بحث

در این پژوهش پارامترهای الگوریتم GA شامل تعداد جمعیت، تعداد تکرار، احتمال پیوند و احتمال جهش به ترتیب برابر ۱۰۰، ۵۰، ۰/۹ و ۰/۲ در نظر گرفته شدند. همچنین پارامترهای الگوریتم PSO شامل c_1 ، c_2 و w به ترتیب مقادیر ۱/۴۹ و ۱/۴۹ و ۰/۷۲ با اندازه جمعیت ۱۰۰ و ۵۰ تکرار در نظر گرفته شده است. هر دو الگوریتم در محیط نرم‌افزار MATLAB R2014.a برنامه‌نویسی شدند. شکل

(۳) نحوه عملکرد الگوریتم‌ها و بهبود تابع هدف را در طی تعداد ۵۰،۰۰۰ بار ارزیابی تابع هدف^۱ (NFE) نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود الگوریتم PSO از عملکرد مناسب‌تر و سرعت همگرایی بیشتری در مقایسه با الگوریتم GA برخوردار است و نمودار تابع هدف PSO در طی تمام تکرارها پایین‌تر از نمودار GA قرار دارد.



شکل ۳- مقایسه عملکرد الگوریتم‌های GA و PSO.

Figure 3. Comparison of GA and PSO algorithms performance.

درصد نسبت به جواب‌های مشابه حاصل از GA برتری دارد. همچنین مقایسه میانگین جواب‌ها نیز بیانگر برتری ۳ درصدی جواب‌های الگوریتم PSO نسبت به GA دارد. نکته با اهمیت دیگر، مقدار کم انحراف معیار روش PSO در مقایسه با روش GA است که نشان از پراکندگی کم جواب‌های PSO نسبت به GA دارد، به عبارت دیگر، در ۱۰ بار اجرای PSO اغلب جواب‌ها در نزدیکی جواب بهینه به دست آمده‌اند، در حالی که در ۱۰ بار اجرای روش GA جواب‌ها فاصله بیشتری تا جواب بهینه دارند.

جدول ۳ مقادیر حداکثر، حداقل، متوسط و انحراف معیار مقدار تابع هدف بهینه محاسبه شده توسط الگوریتم‌های PSO و GA را به ازای ۱۰ بار اجرا نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود الگوریتم PSO از عملکرد بهتری در مقایسه با GA برخوردار است، به نحوی که بهترین جواب به دست آمده برای تابع هدف (رابطه ۱)، از الگوریتم PSO در طی ۱۰ بار اجرا ۹۰۹/۹۵ و بدترین جواب برابر ۹۳۰/۵۳ است، در حالی که بهترین پاسخ الگوریتم GA در طی ۱۰ بار اجرا ۹۳۱/۱۷ و بدترین آن ۹۵۷/۳۲ بوده است، به عبارت دیگر بهترین جواب PSO در حدود ۲/۲ درصد و بدترین جواب PSO نیز در حدود ۲/۷

1- Number of Function Evaluation

جدول ۳- مقادیر میانگین، حداکثر و حداقل تابع هدف برای ۱۰ بار اجرای برنامه با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی.

Table 3. The average, maximum and minimum values of the objective function for 10 times the implementation of the program using the proposed algorithms.

روش	ماکزیمم	متوسط	مینیمم	انحراف معیار	تکرار	تعداد اجرای الگوریتم
Method	Max	Average	Min	Standard Deviation	Iteration	The number of algorithms run
PSO	930.53	917.14	909.95	6.58	50	10
GA	957.32	941.38	931.17	10.27	50	10

۵۷/۵۳ درصد، عملکرد بهتری در تأمین نیازهای کشاورزی و محیط‌زیستی مخزن بوستان داشته است. همچنین در مورد مخزن گلستان نیز الگوریتم PSO با اعتمادپذیری ۴۷/۳۰ درصد عملکرد بهتری در تأمین نیازهای مخزن گلستان دارد.

جدول ۴ به بررسی اعتمادپذیری به دست آمده از روش‌های GA و PSO اختصاص دارد. الگوریتم GA با اعتمادپذیری ۵۶/۶۱ درصد، نیازهای کشاورزی و محیط‌زیست مخزن بوستان را تأمین نموده در حالی که الگوریتم PSO با اعتمادپذیری

جدول ۴- اعتمادپذیری به دست آمده از الگوریتم‌های GA و PSO (درصد).

Table 4. Reliability of GA and PSO algorithms (percentages).

GA	PSO	مخزن Reservoir
56.61	57.53	بوستان Boostan
46.35	47.30	گلستان Golestan
48.43	49.38	بوستان و گلستان Boostan and Golestan

همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد، فلسفه الگوریتم GA بر مبنای امکان تولید و تکثیر بیشتر برای اعضا با برازش بهتر است، به نحوی که در فرآیند پیوند، اعضای با برازش بهتر از امکان بیشتر برای ازدواج برخوردار هستند. در الگوریتم PSO حرکت به سمت جواب نهایی و بهبود جواب‌ها با استفاده از دو پارامتر بهترین تجربه عضو $(x^i, pbest)$ و بهترین تجربه جمع $(x^g, gbest)$ رخ می‌دهد، به عبارت دیگر در هر تکرار، سعی در کاهش فاصله اعضا با بهترین تجربه شخصی آن‌ها و همچنین کاهش فاصله با بهترین تجربه جمعی می‌شود. بنابراین مفهومی که روش PSO بر آن بنا نهاده شده است منجر به همگرایی سریع‌تر نسبت به مدل GA شده

تحلیل نتایج نشان می‌دهد هر چند که نتایج هر دو روش GA و PSO تقریباً یکسان است، ولی حجم کم‌تر عملیات در الگوریتم PSO نسبت به الگوریتم GA، باعث توانمندی و افزایش سرعت همگرایی این روش شده است. به نحوی که در الگوریتم GA به ازای هر عضو در هر مرحله سه عمل انتخاب، پیوند و جهش باید بررسی و در صورت لزوم اعمال گردد. در حالی که در روش PSO تنها به محاسبه بهترین تجربه فردی و جمعی و در نهایت بروزرسانی موقعیت ذره پرداخته می‌شود. این موضوع باعث شده که الگوریتم PSO پس از ۱۷۰۰۰ بار ارزیابی تابع هدف و الگوریتم GA پس از ۳۵۰۰۰ بار ارزیابی تابع هدف به جواب‌های تقریباً یکسان دست پیدا نمایند.

مقایسه نتایج دو الگوریتم GA و PSO نشان می‌دهد الگوریتم PSO از سرعت همگرایی بیش‌تری برخوردار است، به‌نحوی که الگوریتم PSO با ۱۷۰۰۰ بار ارزیابی تابع هدف و الگوریتم GA با ۳۵۰۰۰ بار ارزیابی تابع هدف به نتیجه مطلوب رسیده است. همچنین کم‌ترین، بیش‌ترین، میانگین و انحراف معیار نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای هر یک از الگوریتم‌ها نشان از برتری روش PSO دارد، به‌نحوی که نه‌تنها جواب‌های به‌دست آمده از روش PSO در حدود ۳ درصد بهتر از جواب‌های روش GA است، بلکه از پراکندگی کم‌تری نیز برخوردار هستند، به‌عبارت دیگر نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرا همگی حول و حوش بهترین جواب هستند. همچنین نتایج نشان می‌دهد الگوریتم بهینه‌سازی PSO با اعتمادپذیری ۴۹/۳۸ درصد از عملکرد مناسب‌تری در استخراج منحنی فرمان بهره‌برداری از سیستم چندمخزنه بوستان- گلستان در مقایسه با GA برخوردار است. با توجه به ماهیت غیرقطعی جریان ورودی به مخزن پیشنهاد می‌شود در ادامه این کار به بهینه‌سازی بهره‌برداری با رویکرد فازی پرداخته شود. همچنین در پژوهش مستقل دیگری به بررسی عملکرد الگوریتم‌های GA و PSO در دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی پرداخته شود.

است. همچنین وظیفه جستجوی فضا در روش GA بر عهده عملکرد جهش است در حالی که جستجوی فضا در روش PSO با استفاده از پارامتر ضریب اینرسی (w) انجام می‌شود. استفاده از پارامتر w باعث جستجوی بهتر فضا خواهد شد، به‌نحوی که بر اساس رابطه ۱۳، در مراحل ابتدایی الگوریتم، مقدار w زیاد است و به‌تدریج کاهش می‌یابد. این موضوع باعث جستجوی بهتر فضا در اجرای الگوریتم PSO خواهد شد، در حالی که در الگوریتم GA، پارامتر جهش در سراسر مراحل، عددی ثابت و یکسان است. یکسان بودن پارامتر جهش در سراسر اجرای الگوریتم GA، باعث کندی و هدفمندی کم‌تر نسبت الگوریتم PSO شده است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بروز پدیده تغییر اقلیم و کاهش نزولات جوی ضرورت بهره‌برداری بهینه از مخزن سدها را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این بین بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چندمخزنه به لحاظ پیچیدگی و اثرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش مقایسه بهره‌برداری بهینه از مخزن سدهای بوستان و گلستان در حوضه آبریز گرگان‌رود استان گلستان برای سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ با استفاده از الگوریتم‌های GA و PSO در شرایط تغییر اقلیم مورد توجه قرار گرفته است.

منابع

- Ahmadianfar, A., and Adib, A. 2016. Optimizing hydropower dams operation using hybrid of PSO and GA (Case study: Dez Dam). *Irrigation Science & Engineering*, 38: 3. 63-71. (In Persian)
- Eberchart, R., and Kennedy, J. 1995. Particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Neural Networks Perth, Australia*. Pp: 1942-1947.
- Esat, V., and Hall, M.J. 1994. Water resources system optimization using genetic algorithms. *Proc. 1st Int. Conf. on Hydroinformatics, Balkema, Rotterdam, Netherlands*. Pp: 225-231.
- Goldberg, D. 1989. Genetic algorithms in search optimization and machine learning. Addison-Wesley Longman Publishing Company. Boston. 403p.
- Hosseini-Moghari, S.M., and Banihabib M.E. 2014. Optimizing operation of reservoir for agricultural water supply using firefly algorithm. *J. Water Soil Resour. Cons.* 3: 4. 17-31. (In Persian)

6. Iran Water Resources Management Co. 2012. Annual report on the status of dams operating in different months. (In Persian)
7. Kalbali, E., Sabuhi Sabuni M., and Ahmadpur Borazjani, M. 2016. Strategies of Voshmgir dam water allocation using two-stage stochastic programming. *J. Water Soil*, 30: 6. 1832-1847. (In Persian)
8. Karimi, M., Ahrar Yazdi, B.N., and Ahrar Yazdi, B.D. 2017. Examining the performance of two pso and g-algorithms in optimizing the CGAM issue. *Mechanical Engineering Sharif*, 33: 1. 129-136.
9. Kjeldsen, T.R., and Rosbjerg, D. 2004. Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems. *Hydrol. Sci. J.* 49: 757-767.
10. Moeini, R., and Afshar, M.H. 2009. Application of an ant colony optimization algorithm for optimal operation of reservoirs: A comparative study of three proposed formulations. *J. Sci. Iran*. 16: 4. 273-285.
11. Moeini, R. 2016. Performance evaluation of the ant Colony optimization algorithm for the optimal operation of a multi-reservoir system: comparing four algorithms. *Iran-Water Resources Research*, 11: 2. 29-46. (In Persian)
12. Moghadam, A., Alizadeh A., Farid, A., Ziaei, A.N., and Fallah, D. 2013. The application of improved particle swarm optimization algorithm in design of water distribution systems. *Iran. J. Irrig. Drain.* 7: 3. 389-401. (In Persian)
13. Moghaddam, A., Montaseri, M., and Rezaei, H. 2016. The Application of GA, SMPSO and HGAPSO in optimal reservoirs operation. *J. Water Soil*. 30: 4. 1102-1113.
14. Momtahan, S., and Borhani Darian, A.R. 2006. Genetic algorithm (GA) method for optimization of multi-reservoir systems operation. *J. Water Wastewater*. 29: 2. 11-20.
15. Norozi, B., Barani, Gh.A., Meftah Halghi, M., and Dehghani, A. 2011. A multi-reservoir system operation optimization using multi population genetic algorithms (Case study: Golestan and Voshmgir reservoirs). *J. Water Soil Cons.* 18: 2. 43-61. (In Persian)
16. Zadesh Pargo, R., Mazandarani Zadeh H., and Daneshkar Araste, P. 2015. Subsurface Drainage System Design to Minimize Construction Costs with Steady-State Consideration. *Water Research in Agriculture*, 29: 1. 117-128. (In Persian)

Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(2), 2019*<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.14894.2997

Evaluation of GA and PSO optimization algorithms in operation of multi-reservoir systems, case study: Gorgan-Rood basin dams

J. Piadeh Koohsar¹, *H. Mazandaranizadeh² and S.M.K. Sadr³

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University,

²Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University,

³Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Exeter

Received: 04.09.2018; Accepted: 01.22.2019

Abstract

Background and Objectives: Optimal utilization of water resources systems and appropriate formulation rules and policies for the exploitation of reservoirs have been considered by water resource experts in recent years and extensive research has been carried out. Although much progress has been made in terms of problem-solving strategies and computational tools, the problem of optimizing the operation of a multi-reservoir systems due to the effect of upstream storage capacities on downstream inputs, is so complicated. Routine optimization methods due to high constraints, discontinuous space and non-linear nature of water resource management issues are not a good tool for solving such problems. For this reason, the metaheuristic optimization algorithms have been considered by researchers.

Materials and Methods: In this research, the performance of the GA and PSO in solving the problem of optimizing the operation of a multi-reservoir system including Bostan and Golestan dams located in Gorgan-Rood watershed has been studied and compared. The survey of the input to the two dam reservoirs in the year 2014-2015 shows that due to the climate change, the annual input to the Bostan and Golestan dams has decreased by 17% and 60%, respectively. Genetic algorithm is a parallel and guided search based on the theory of evolution. The operators of the GA algorithm include selection, crossover and mutation that are used to make up the next generation, respectively. In PSO optimization algorithm, based on the birds and fishes movements, a number of particles are propagated in the search space and the value of the objective function is calculated in proportion to the position of each particle. Then the new particle position is calculated using the combination of current particle locations and the best place previously used.

Results: The best answer of the PSO algorithm during the 10 runs is 909.95 and the worst is equal to 930.53, while the best answer of the GA algorithm during the 10 runs is 931.17 and the worst was 957.32. The comparison of the mean of the answers also show that the PSO algorithm has a 3% advantage over GA.

Conclusion: The PSO algorithm has a better performance than GA, so that the PSO algorithm with a reliability of 49.38% has a better performance than the GA algorithm with a reliability of 48.44%.

Keywords: Drought, Meta-heuristic, Reliability, Water resources management

* Corresponding Author; Email: mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir