

بررسی قابلیت الگوریتم بهینه‌سازی ملخ در بهره‌برداری بهینه از مخازن آب سطحی با رعایت قیودات اطمینان‌پذیری

فریبرز معصومی^{۱*}، نگین سلیمی^۲، نگین ظفری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۸/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۲۰

چکیده

استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های مخازن آب سطحی در سال‌های اخیر گسترش زیادی پیدا کرده است. دلیل این امر را می‌توان در تنوع و تعداد قیودات بهره‌برداری از این سیستم‌ها، تعداد زیاد متغیرهای تصمیم مساله و نیز تعدد اهداف بهره‌برداری از این مخازن دانست. در این پژوهش، قابلیت الگوریتم بهینه‌سازی ملخ به عنوان یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی جدید در مساله بهره‌برداری از سد‌های مخزنی مورد بررسی قرار گرفته است. سد مخزنی دز به عنوان مطالعه موردی در این تحقیق انتخاب شده و بهره‌برداری از این سد در دو حالت بهره‌برداری برای مصارف کشاورزی، بهره‌برداری برق‌آبی مورد بررسی قرار گرفته است. گام زمانی بهره‌برداری در این تحقیق، ماهانه و طول دوره‌های بهره‌برداری نیز ۵ ساله، ۱۰ ساله، ۲۰ ساله و ۴۰ ساله انتخاب شده است. علاوه بر قیودات متداول در مدل‌های بهره‌برداری از مخزن، رعایت قیودات اطمینان‌پذیری زمانی، اطمینان‌پذیری حجمی و نیز تامین حداقل درصدی از نیاز ماهانه در ماه‌های دارای کمبود، جزء قیودات مدل‌های بهره‌برداری در این تحقیق هستند. نتایج این تحقیق نشان داد که در گزینه‌های مختلف، الگوریتم بهینه‌ساز ملخ توانسته جواب بهینه را حدوداً بین ۰/۵ الی ۱۲ درصد بهبود بخشد. البته با افزایش تعداد متغیرهای تصمیم، کارایی این الگوریتم نسبت به الگوریتم ژنتیک کمتر می‌شد. در ارتباط با پایداری جوابها نیز، اغلب موارد الگوریتم بهینه‌ساز جواب بهتری بدست می‌داد. در مورد بحث زمان اجرا، همگرایی الگوریتم ملخ در حدود ۲۰ الی ۵۰ درصد سریع‌تر نسبت به الگوریتم ژنتیک اتفاق می‌افتاد. در مجموع مطالعه حاضر، کارایی مناسب این الگوریتم را در حل مساله بهره‌برداری از مخزن نشان داد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌ساز ملخ، الگوریتم ژنتیک، بهره‌برداری برق‌آبی، تامین آب کشاورزی، سد دز

مقدمه

استفاده از این مدل‌ها در حل مساله بهره‌برداری از مخازن وجود دارد که دلیل آن را می‌توان در تمایل پژوهشگران به کاهش خطا در محاسبات دانست (Wurbs 1993, Yeh 1985, Labadie 2004)، اما مشکلات محاسباتی استفاده از این مدل‌ها همچون حجم محاسباتی بالا، تمایل به استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی در حل مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن را بیش‌تر می‌سازد (زینلی و همکاران، ۱۳۹۴). هرچند الهام گرفتن از طبیعت در مسائل بهینه‌سازی از دهه ۱۹۶۰ میلادی مورد توجه قرار گرفته است، لکن الگوریتم ژنتیک به عنوان پرطرفدارترین و قدیمی‌ترین الگوریتم بهینه‌ساز فراکاوشی^۴ توسط هالند ارائه شد (Holland, 1975). از اولین کاربردهای الگوریتم ژنتیک در مدیریت مخازن می‌توان به تحقیق منتشر شده توسط ایسات و هال اشاره کرد که برای حل یک مساله بهره‌برداری از سیستم‌های چهارمخزنه تیپ از این الگوریتم استفاده کردند (Esat and Hall., 1994). آنها در این تحقیق نتیجه الگوریتم ژنتیک را با نتایج مدل برنامه‌ریزی پویا مقایسه کردند و برتری

امروزه افزایش جمعیت انسان‌ها و به تبع آن افزایش نیاز به آب سالم، کافی و در دسترس برای مصارف گوناگون شرب، صنعت و کشاورزی لزوم بهره‌برداری بهینه از مخازن آب‌های سطحی را بیش از پیش ضروری می‌سازد. وجود اهداف مختلف و در بعضی موارد متضاد در بهره‌برداری از این سیستم‌ها و وجود قیودات متعدد و پیچیده و غیرخطی در بهره‌برداری از آنها از یک طرف و تعدد متغیرهای تصمیم (مجهولات) مساله از طرف دیگر، استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی و برنامه‌ریزی پویا را در حل این مسائل سخت و چالش‌برانگیز می‌کند. هرچند گزارشات متعددی در زمینه

- ۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی
 - ۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی
 - ۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران، گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی
- *- نویسنده مسئول: (Email: f_masoumi@uma.ac.ir)

الگوریتم ژنتیک را گزارش نمودند. سپس می‌توان تحقیق الیویرا و لاکس را نام برد که برای استخراج منحنی‌های فرمان بهره‌برداری از مخازن از این الگوریتم استفاده نمودند (Oliviera and Loucks, 1997). تحقیق آنها نیز قابلیت الگوریتم ژنتیک را در استخراج منحنی‌های فرمان بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنه نشان داد. از دیگر تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان تحقیق انجام شده توسط ممتحن و داریان را نام برد (Momtahan and Dariane, 2007). در این تحقیق فرم‌های مختلف فرمان بهره‌برداری از مخزن همچون منحنی‌های خطی دستورالعمل‌های فازی و غیره در قالب یک مدل بهینه‌ساز با الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شدند و نتایج نیز با روش‌های مختلف همچون روش برنامه‌ریزی پویا مقایسه گردید که حاکی از کارایی بالای الگوریتم ژنتیک بود. در تحقیق انجام شده توسط نیکلوف و همکاران مروری بسیار جامع و خوب بر کاربردهای الگوریتم ژنتیک در مساله بهره‌برداری از مخازن آب سطحی انجام شده است (Nicklow et al. 2010). یکی دیگر از الگوریتم‌هایی که در سال‌های اخیر در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها بسیار مورد استفاده قرار گرفته الگوریتم هوش تجمعی ذرات (PSO) می‌باشد. این الگوریتم که توسط شی و ابرهات ابداع شده است کاربردهای متعدد و متنوعی در مدیریت بهره‌برداری از مخازن آب سطحی داشته (Shi and Eberhart, 1998) که از جمله می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط کومار و ریدی اشاره کرد که این الگوریتم را برای تعیین سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره بهادرا واقع در هند به کار بردند (Kumar and Reddy 2007). تحقیق انجام شده توسط استادرحیمی و همکاران که الگوریتم PSO را به حالت چند دسته‌ای توسعه داده‌اند نشان می‌دهد که این الگوریتم پتانسیل خوبی در حل بهینه‌سازی مقید با تعداد متغیرهای تصمیم زیاد دارد (Ostadrahimi et al. 2012). این امر در تحقیقات دیگر همچون افشار و معصومی و نیز افشار و همکاران که تعداد متغیرهای تصمیم قابل توجه بود نیز نمایان شد (Afshar and Masoumi, 2016, Afshar et al., 2018). هرچند لازم به ذکر است که هرگز نمی‌توان با قطعیت برتری یا عدم برتری یک الگوریتم بهینه‌ساز فراکوشی خاص را در حل دسته خاصی از مسائل ریاضیاتی یا مهندسی بیان کرد. الگوریتم جامعه مورچگان نیز از جمله الگوریتم‌هایی است که در سال‌های اخیر استفاده از آن گسترش زیادی یافته است. هرچند در سال‌های اخیر از این الگوریتم در حل مسائل با متغیرهای پیوسته نیز استفاده می‌شود اما برتری نسبی این الگوریتم در حل مسائل گسسته هست (Afshar et al. 2015c). از مهم‌ترین کاربردهای الگوریتم جامعه مورچگان در حل مسائل بهره‌برداری از مخزن با متغیرهای تصمیم گسسته می‌توان تحقیق انجام شده توسط افشار و همکاران (Afshar et al. 2009) و با متغیرهای تصمیم پیوسته تحقیق انجام شده توسط مدگار و همکاران

(Madadgar et al. 2009) را نام برد. از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان در حل مساله بهینه بهره‌برداری از مخزن می‌توان به دیگر تحقیق انجام شده توسط افشار و همکاران اشاره کرد (Afshar et al. 2015b). تحقیقات متعددی نیز در زمینه مقایسه کارکرد این الگوریتم‌ها انجام شده که از جمله آن می‌توان به تحقیق کانگرانگ و لوخام و نیز تحقیق داریان و نائینی اشاره کرد که در زمینه مقایسه الگوریتم جامعه مورچگان با الگوریتم ژنتیک هستند (Kangrang and Lokham 2013, Dariane and Naieini 2008). یکی دیگر از الگوریتم‌های جدید فراکوشی بهینه‌سازی، الگوریتم رقابت استعماری^۱ است که در این الگوریتم برای بهینه‌سازی، به جای بهره‌گیری از یک پدیده طبیعی، از یک پدیده اجتماعی - انسانی الهام گرفته شده است. محققان بسیاری در رابطه با کاربرد الگوریتم رقابت استعماری در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد پرداخته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به تحقیق انجام شده توسط افشار و همکاران اشاره کرد (Afshar et al. 2015a). در این تحقیق، محققان به تدوین منحنی فرمان بهره‌برداری برای سد دز برای دو حالت بهره‌برداری ساده و بهره‌برداری برقایی با الگوریتم رقابت استعماری پرداخته و نتیجه را با الگوریتم جامعه مورچگان مقایسه کرده بودند. زینعلی و همکاران نیز مساله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد درودزن را با استفاده از الگوریتم‌های رقابت استعماری و جامعه مورچگان مورد بررسی قرار دادند (زینلی و همکاران، ۱۳۹۴). الگوریتم کرم شب‌تاب نیز یکی دیگر از الگوریتم‌های فراکوشی جدیدی است که در سال‌های اخیر معرفی شده است. این الگوریتم با مدل‌سازی رفتار مجموعه‌ای از کرم‌های شب‌تاب^۲ و تخصیص مقداری مرتبط با برازندگی مکان هر کرم شب‌تاب به عنوان مدلی برای میزان رنگدانه‌های شب‌تاب و به روز کردن مکان کرم‌ها در تکرارهای متوالی الگوریتم به جستجوی جواب بهینه مسئله می‌پردازد. گروهی نژاد و همکاران برتری این الگوریتم را نسبت به الگوریتم ژنتیک در حل مساله بهره‌برداری سیستم تک مخزنه با هدف تامین آب برای آبیاری و نیز بهره‌برداری با هدف تولید برقایی هم از بعد سرعت همگرایی و هم از نظر واریانس جواب‌ها نشان دادند (GarousiNejad et al. 2016).

از دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی که در حل مساله بهره‌برداری از مخزن مورد استفاده قرار گرفته‌اند می‌توان به الگوریتم ازدحام گربه^۳ که توسط چو و تسای ارائه شد (Chu and Tsai. 2007) و توسط بهرامی و همکاران در بهره‌برداری از مخزن مورد استفاده قرار گرفته (Bahrami et al. 2017)، الگوریتم فراابتکاری چرخه آب^۴، ارائه شده

- 1- Imperialist Competitive Algorithm
- 2- Firefly
- 3- Cat Swarm
- 4- Water cycle algorithm

تقسیم می‌کند. در اکتشاف، عامل‌های جستجو به حرکت ناگهانی تشویق می‌گردند، در حالی که در طول بهره‌برداری تمایل دارند تا به صورت محلی حرکت کنند. این دو عملکرد و نیز جستجوی هدف توسط ملخ‌ها به طور غریزی انجام می‌گیرد. الگوریتم پیشنهادی از لحاظ ریاضیاتی رفتار گروه‌های ملخ در طبیعت را برای حل مسائل بهینه‌سازی مدل‌سازی می‌کند (Saremi et al., 2017). فرم کلی مدل ریاضیاتی که برای شبیه‌سازی رفتار دسته‌جمعی ملخ‌ها استفاده می‌شود به صورت رابطه (۱) می‌باشد:

$$X_i = S_i + G_i + A_i \quad (1)$$

که در آن X_i موقعیت ملخ i ام، S_i تعامل اجتماعی بین ملخ‌ها، G_i نیروی جاذبه در ملخ i ام و A_i جریان باد می‌باشد. برای نشان دادن رفتار تصادفی ملخ‌ها، رابطه (۱) با اضافه شدن فاکتورهای تصادفی به صورت رابطه (۲) درمی‌آید:

$$X_i = r_1 S_i + r_2 G_i + r_3 A_i \quad (2)$$

که در آن r_1 ، r_2 و r_3 اعداد تصادفی در بازه $[0, 1]$ هستند و S_i از طریق رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$S_i = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N s(d_{ij}) \hat{d}_{ij} \quad (3)$$

که d_{ij} فاصله‌ی بین i و j زمین ملخ است و از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$d_{ij} = |x_j - x_i| \quad (4)$$

\hat{d}_{ij} یک بردار واحد از i مین ملخ تا j مین ملخ می‌باشد و از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\hat{d}_{ij} = \frac{x_j - x_i}{d_{ij}} \quad (5)$$

همچنین s تابعی برای تعریف نمودن قدرت نیروی اجتماعی برای جاذبه و یا دافعه بین ملخ‌ها می‌باشد (رابطه ۶):

$$s(r) = f e^{-\frac{r}{L}} - e^{-r} \quad (6)$$

که در آن f نشان‌دهنده شدت جاذبه و L مقیاس طولی جاذبه می‌باشد. همانطور که گفته شد، حرکت ملخ‌ها همواره تحت تاثیر عامل جاذبه و دافعه بینشان نیز قرار دارد که این عامل با S نشان داده می‌شود. شکل ۱، فرم شماتیک نواحی و نیروی جاذبه و دافعه را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، در یک بازه‌ای مثلا $[0, a]$ عمل دفع و در فاصله $[a, b]$ عمل جذب اتفاق می‌افتد. زمانی که ملخ در فاصله a واحدی ملخ دیگر است نه عمل جذب و نه عمل دفع اتفاق می‌افتد به این ناحیه، ناحیه راحتی یا فاصله آسایش گفته می‌شود. در نتیجه تغییرات f و L در معادله‌ی $s(r)$ باعث ایجاد رفتارهای اجتماعی متفاوت در ملخ‌های مصنوعی و تغییر در نتایج می‌گردد.

توسط اسکندر و همکاران (Eskandar et al., 2012) که توسط اکبری فرد و همکاران در بهره‌برداری از سدها استفاده شده (اکبری فرد و همکاران، ۱۳۹۶) و الگوریتم جستجوی کلاغ^۱ که توسط عسکرزاده (Askarzade., 2016) ارائه شد و توسط وزیری و همکاران در بهره‌برداری از مخزن سدها مورد استفاده قرار گرفته اشاره کرد (وزیری و همکاران، ۱۳۹۷).

همانطور که مشاهده می‌شود تاکنون الگوریتم‌های فراکاوشی متعددی جهت حل مساله بهره‌برداری بهینه از مخازن آب سطحی تدوین و آزمایش شده‌اند. اما هر الگوریتمی به تناسب دارای مشکلاتی از قبیل زمان اجرا، عدم پایداری جواب‌ها و یا عدم همگرایی می‌باشد. به این دلیل و نیز به دلیل ضرورت مساله بهره‌برداری بهینه از مخازن آب سطحی، تلاش برای بهبود عملکرد الگوریتم‌های موجود و نیز بررسی و آزمایش قابلیت الگوریتم‌های جدید در حل مساله مورد بررسی، از ضروریات می‌باشد. تحقیق حاضر پاسخی به این نیاز ذکر شده است. در این تحقیق برای اولین بار جهت حل مساله بهینه‌سازی آب خروجی از مخزن برای اهداف مختلف بهره‌برداری برای تامین نیاز کشاورزی و نیز بهره‌برداری برق‌آبی، از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ‌ها استفاده شده است. الگوریتم ملخ (GOA^۲) یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی بهینه‌سازی است که توسط صارمی و همکاران ارائه شده است (Saremi et al. 2017). در ادامه مقاله حاضر، ابتدا الگوریتم بهینه‌سازی ملخ‌ها توضیح داده می‌شود. سپس فرمولاسیون مدل بهینه بهره‌برداری از مخزن در دو حالت تامین نیاز پایین دست و بهره‌برداری برق‌آبی آورده می‌شود و در ادامه بعد از معرفی سد دز، نتایج مدل بهره‌برداری از الگوریتم پیشنهادی بررسی و با نتایج الگوریتم ژنتیک مقایسه خواهد شد. این مقایسه هم از بابت دقت و پایداری جواب‌ها و هم از بابت تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به جواب بهینه خواهد بود. در انتها نیز جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کلی خواهد آمد.

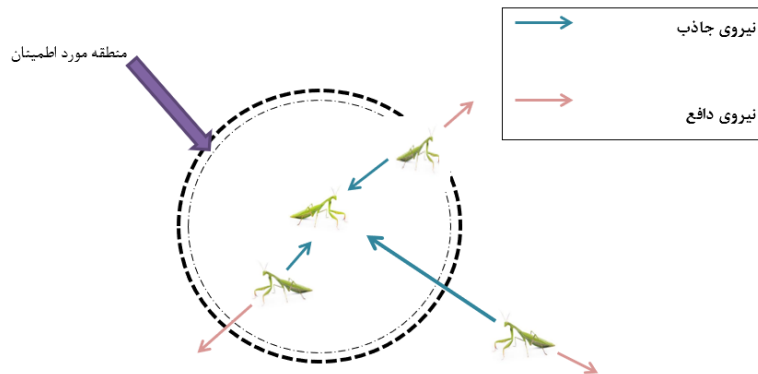
مواد و روش‌ها

معرفی الگوریتم بهینه‌سازی ملخ

ملخ‌ها نوعی از حشرات می‌باشند که به علت آسیب رساندن به محصولات کشاورزی به عنوان آفت در نظر گرفته می‌شوند. این حشرات به عنوان یکی از بزرگترین دسته‌های موجودات گروهی مطرح می‌شوند. ویژگی اصلی دسته‌های ملخ، حرکات آرام و گام‌های کوچک و در مقابل حرکات طولانی و ناگهانی می‌باشد. الگوریتم بهینه‌سازی ملخ فرآیند جستجو را به دو بخش اکتشاف و بهره‌برداری

1- Crow

2- Grasshopper Optimization Algorithm(GOA)



شکل ۱- نیروی جاذب، نیروی دافع و منطقه اطمینان در الگوریتم ملخ

برای کوچکتر کردن ناحیه آسایش، ناحیه دافعه و ناحیه جاذبه می‌باشد. همچنین N تعداد ملخ‌ها را مشخص می‌کند. اولین C در رابطه (۱۰) بسیار شبیه به وزن w در PSO می‌باشد که باعث تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری در اطراف تابع هدف است و جست و جو در اطراف تابع هدف را افزایش می‌دهد. دومین C باعث کاهش نواحی جاذبه، دافعه و یا ناحیه راحت می‌شود. این ضریب کاهش مطابقت با رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$c = c_{max} - l \frac{c_{max} - c_{min}}{L} \quad (11)$$

که در این رابطه، C_{min} و C_{max} مقدار بیشینه و کمینه، l شماره تکرار کنونی و L تعدد تکرار را نشان می‌دهد. در شکل ۲، شبه کد مربوط به الگوریتم بهینه‌ساز ملخ آورده شده است. برای آشنایی بیشتر با این الگوریتم به Saremi et al., 2017 مراجعه شود.

مدل بهره‌برداری بهینه از مخزن

همانطور که در قسمت‌های قبلی بیان شد، توابع هدف مدل‌های بهینه‌سازی مورد مطالعه در این تحقیق عبارتند از بهینه‌سازی تخصیص آب برای تامین نیاز آبی پایین‌دست (در این جا نیاز کشاورزی) و بهینه‌سازی تولید انرژی برقی. از این رو متغیرهای تصمیم یا مجهولات در این مساله، مقدار آب قابل تخصیص از مخزن در هر ماه، یا حجم آب در مخزن در انتهای ماه خواهد بود. لازم به ذکر است که لحاظ کردن هر کدام از متغیرهای تصمیم ذکر شده، تفاوتی در جواب نهایی مساله مورد مطالعه نخواهد داشت. تابع هدف مساله در حالت بهره‌برداری ساده از مخزن (برای رفع نیاز آبی

پایین‌دست) به صورت رابطه (۱۲) خواهد بود:

$$\text{Minimize } f = \sum_{i=1}^M \left(1 - \frac{R(i)}{D(i)}\right)^2 \quad (12)$$

در رابطه (۷) نیروی جاذبه روی هر ملخ آورده شده است:

$$G_i = -ge_g \quad (7)$$

در این رابطه g ثابت گرانشی و e_g یک بردار واحد به سمت زمین است. رابطه (۸) نیز تاثیر نیروی باد بر ملخ i را نشان می‌دهد:

$$A_i = ue_{gw} \quad (8)$$

که در این رابطه u یک رانش ثابت و e_w نیز یک بردار واحد در جهت باد است. ملخ‌های نوزاد هیچ بالی ندارند و بنابراین حرکت آنها شدیداً مرتبط با جهت باد است (رابطه ۹):

$$X_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N s(|x_j - x_i|) \frac{x_j - x_i}{d_{ij}} - ge_g + ue_w \quad (9)$$

با این حال، این مدل ریاضی نمی‌تواند به طور مستقیم برای حل مساله بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. زیرا که جمعیت ملخ‌ها به سرعت به منطقه آسایش می‌رسند و ازدحام (دسته جمعیت) به یک نقطه مشخص همگرا نمی‌شود. بنابراین لازم است که حدود بالا و پایین و نیز ضرایبی برای ایجاد تعادل حرکت بین نواحی آسایش، جاذبه و دافعه تعریف شود. برای حل این مشکل، نسخه اصلاح شده این معادله به شرح زیر ارائه شده است:

از این رو رابطه X_i به صورت رابطه (۱۰) تبدیل می‌شود:

$$x_i^d = C \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N C \frac{ub_d - lb_d}{2} s(|x_j^d - x_i^d|) \frac{x_j^d - x_i^d}{d_{ij}} \right) + T_d \quad (10)$$

که در آن ub_d و lb_d به ترتیب کران بالا و پایین در d امین فاصله، T_d بهترین راه‌حل کشف شده تاکنون و C ضریب کاهش

به مقادیر X_i در جمعیت، مقدار اولیه اختیاری اختصاص دهید ($i=1,2,\dots,n$)
 C_{min} ، C_{max} و L (ماکزیمم تعداد تکرار) را مشخص کنید
 مقدار تابع برازندگی را برای هر دسته از جوابها در جمعیت تعیین کنید
 T را به عنوان بهترین جواب کشف شده لحاظ کنید
 تا زمانی که L کوچکتر از L هست موارد زیر را انجام دهید:
 C را با استفاده از رابطه شماره (۱۱) به روزرسانی نمایید
 برای هر دسته از جمعیت
 فاصله بین ملخ‌ها را در بازه [۱۰۴] نرمال نمایید
 موقعیت هر دسته از جوابها را با معادله شماره (۱۰) به روزرسانی نمایید
 دسته جواب را اگر بیرون از محدوده قرار گرفت به درون محدوده برگردانید
 پایان عملیات برای هر دسته جواب
 T را به روزرسانی نمایید
 $l = l + 1$
 پایان عملیات دسته جمعیت‌ها
 تعیین مقدار T نهائی

شکل ۲- شبه کد الگوریتم بهینه‌ساز ملخ

$$P(i) = \min\left(\frac{gnR(i)}{PF}\right) \times \left(\frac{h(i)}{1000}\right), PC \quad (14)$$

در این رابطه، g عبارتست از شتاب گرانشی زمین، η عبارتست از راندمان تولید انرژی برقی، PF عبارتست از ضریب نیروگاه و $h(i)$ عبارتست از ارتفاع موثر آب در مخزن در ماه i ام که از رابطه (۱۵) و (۱۶) بدست می‌آید:

$$h(i) = \left(\frac{H(i) + H(i+1)}{2}\right) - TWL \quad (15)$$

$$H(i) = a + b \times s(i) + c \times s^2(i) + d \times s^3(i) \quad (16)$$

که در این روابط، $H(i)$ عبارت است از ارتفاع آب در ماه i ام، TWL عبارتست از ارتفاع پایین نیروگاه، $s(i)$ عبارتست از حجم آب در سد در ماه i ام و a ، b ، c و d ضرایب معادله تبدیل حجم به ارتفاع هستند. سایر محدودیت‌ها که برای اهداف یاد شده مشترکند به قرار روابط (۱۷) الی (۲۱) تعریف می‌شوند:

$$s(i+1) = s(i) + I(i) - E(i) - R(i) - RE(i) \quad \forall i=1,2,\dots,M \quad (17)$$

$$R_{min} \leq R(i) \leq R_{max} \quad \forall i=1,2,\dots,M \quad (18)$$

$$S_{min} \leq s(i) \leq S_{max} \quad \forall i=1,2,\dots,M \quad (19)$$

$$Area(i) = a' \times \left(\frac{s(i+1)+s(i)}{2}\right) + b' \quad \forall i=1,2,\dots,M \quad (20)$$

$$E(i) = he(i) \times \left(\frac{Area(i)+Area(i+1)}{2}\right) \quad \forall i=1,2,\dots,M \quad (21)$$

در این روابط $I(i)$ ورودی آب به مخزن در ماه i ام، $E(i)$ تبخیر آب از مخزن ماه i ام، $he(i)$ تبخیر از سطح آزاد آب در ماه i ام برحسب mm ، S_{max} برابر با حداکثر حجم مخزن، S_{min} برابر با حجم مرده یا غیرفعال مخزن، $Area(i)$ مساحت سطح آب در مخزن

در این رابطه، f عبارتست از تابع هدف مساله، M تعداد ماه‌ها، $D(i)$ نیاز آبی در پایین دست سد در ماه i ام و $R(i)$ برابر با مقدار آب تخصیصی به نیاز پایین دست مخزن در ماه i ام می‌باشد. مساله‌ای که در اینجا باید به آن توجه کرد این است که هر چند عمده مصرف آب سد مورد مطالعه در این تحقیق، برای تامین نیاز کشاورزی پایین دست سد هست اما تعریف تابع هدف برای لحاظ کردن سود ناشی از تخصیص آب برای کشاورزی مستلزم اطلاعات و جزئیات بسیار زیادی از محل مصرف همچون الگوی کشت، رطوبت خاک، دمای هوا و غیره در طول دوره بهره‌برداری می‌باشد. در اینجا هدف اصلی بررسی کارایی یک الگوریتم جدید (الگوریتم ملخ) و مقایسه آن با یک الگوریتم شناخته شده (الگوریتم ژنتیک) می‌باشد و تابع هدف انتخابی نیز در جهت حداقل کردن اختلاف بین نیاز ماهانه و رهاسازی آب ماهانه است. بدین جهت تابع هدف به صورت رابطه (۱۲) تعریف شده است. این تابع هدف قبلاً نیز در تحقیقات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است (Afshar et al., 2009 & Afshar et al., 2015 & Garousi-Nejad et al., 2016) لازم به ذکر است که در ماه‌هایی که مقدار $R(i)$ از $D(i)$ بیش‌تر باشد (سد سرریز نماید)، مقدار $\left(1 - \frac{R(i)}{D(i)}\right)$ برابر با صفر انتخاب می‌شود. برای تابع هدف تولید انرژی برقی، فرمولاسیون ریاضیاتی هدف به صورت زیر خواهد بود:

$$Minimize f = \sum_{i=1}^M \left(1 - \frac{P(i)}{PC}\right)^2 \quad (13)$$

که در این رابطه، $P(i)$ عبارتست از انرژی برق تولیدی در ماه i ام بر حسب مگاوات و PC نیز عبارتست از کل توان ماهانه تولید انرژی برقی در نیروگاه. مقدار P از رابطه (۱۴) و به فرم زیر بدست می‌آید:

(۳۰) در رابطه ۳۱، پارامتر ω_i وزن مربوط به تابع جریمه i ام می باشد. N تعداد قیود می باشد.

$$\text{Minimize: } f + G \quad \forall i=1,2,\dots,M \quad (30)$$

$$G = \sum_{i=1}^N \omega_i \times \text{Penalt}_i \quad \forall \text{Penalt}_i \geq 0 \quad (31)$$

به عنوان مثال برای دو قید اطمینان پذیری زمانی و حجمی، رابطه توابع جریمه به صورت روابط ۳۲ و ۳۳ خواهد بود:

$$\text{Penalt}_1 = \left(\frac{\sum_{i=1}^M Z_i}{M} - \alpha \right)^2 \quad (32)$$

$$\text{Penalt}_1 = \left(\frac{\sum_{i=1}^M (R(i)-D(i))}{\sum_{i=1}^M (D(i))} - \beta \right)^2 \quad (33)$$

بدیهی است که الگوریتم بهینه ساز تلاش خواهد کرد که مجموع تابع هدف اصلی به علاوه جریمه ها را حداقل نماید. ضریب تابع جریمه همواره در خلاف رشد مطلوب تابع هدف انتخاب می گردد. یعنی اگر تابع هدف از نوع حداکثرسازی باشد، ضریب تابع جریمه همواره منفی و اگر تابع هدف از نوع حداقل سازی باشد ضریب تابع جریمه از نوع مثبت خواهد بود. در هر دو حالت یاد شده، مقدار بهینه برای تابع انتخابی در زمانی حاصل خواهد شد که مقدار تابع جریمه برابر با صفر باشد. یعنی هیچ گونه تخلف از قیود وجود نداشته باشد. شکل ۳ فلوجارت نحوه لحاظ کردن تابع جریمه را در محاسبات نشان می دهد. بدیهی است که یکی از شروط همگرایی در این الگوریتم (علاوه بر شروط متداول دیگر)، صفر بودن مقدار تابع جریمه محاسباتی خواهد بود.

معرفی مطالعه موردی

همانطور که گفته شد سد دز به عنوان مطالعه موردی در این تحقیق انتخاب شده است. این سد که یکی از بزرگترین سدهای بتنی دو قوسی ایران است در استان خوزستان واقع شده و علاوه بر تنظیم آب برای مصارف پایین دست، وظیفه تولید انرژی برق را نیز در مواقع لزوم بر عهده دارد. حداکثر حجم مخزن این سد ۳۳۴۰ میلیون متر مکعب و حجم مرده مخزن آن ۸۳۰ میلیون متر مکعب است. همچنین حداکثر ظرفیت رهاسازی ماهانه از این سد ۱۰۰۰ میلیون متر مکعب و مجموع ظرفیت نیروگاهی آن ۵۲۰ مگاوات است. بررسی آماری و مطالعات هیدرولوژی سد دز نشان می دهد که در ۵۰ درصد ماهها، آورد رودخانه در محل سد کم تر از ۳۸۵ میلیون متر مکعب و نیاز آبی آن بالای ۵۱۶ میلیون متر مکعب است. در ۱۰ درصد ماهها جریان بیش از ۱۰۵۷ میلیون متر مکعب و مصرف زیر ۸۱۸ میلیون متر مکعب است. این امر بیانگر این است که صرفاً با تکیه بر آورد رودخانه و بدون لحاظ کردن نقش سد نمی توان در این منطقه به تامین مناسب نیازهای آبی پرداخت.

در ماه i ام، $R(i)$ حجم آب خروجی از مخزن برای تامین نیازهای آبی پایین دست یا تولید برق در ماه i ام می باشد. R_{min} و R_{max} نیز به ترتیب برابر با حداقل و حداکثر آب خروجی از مخزن می باشد. مقدار حداقل آب خروجی در اینجا برابر با صفر و مقدار حداکثر برابر با ظرفیت پذیرش سیلاب در رودخانه پایین دست است. $RE(i)$ برابر با آب تخصیصی به نیاز محیط زیستی رودخانه پایین دست در ماه i ام می باشد. البته در مساله بهره برداری برقی، همپوشانی مقدار آب زیست محیطی با آب خروجی از نیروگاه نیز کنترل می شود. سایر متغیرها در سطرهای قبلی تعریف شده اند. همانطور که گفته شد در این مطالعه برای بهره برداری از مخازن، قیودات اطمینان پذیری استفاده شده است. اطمینان پذیری زمانی عبارت است از تعداد دوره های زمانی که نیاز آبی آنها تامین شده است به تعداد کل دوره های زمانی. رابطه اطمینان پذیری زمانی برای تامین نیاز کشاورزی به صورت روابط ۲۲ و ۲۳ خواهد بود:

$$Z_i = \begin{cases} 1 & \text{if demand is fully satisfied} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i=1,2,\dots,M \quad (22)$$

$$\text{Rel} = \frac{\sum_{i=1}^M Z_i}{M} \geq \alpha \quad (23)$$

مقدار α بسته به نوع مصرف آب (شرب، صنعت، کشاورزی، محیط زیست) متفاوت است. همچنین در مصرف آب برای کشاورزی نیز، بسته به نوع محصولات زیر کشت، α مقادیر مختلفی را می تواند اتخاذ کند. در مورد تولید انرژی برقی نیز می توان مقدار اطمینان پذیری زمانی را به صورت روابط (۲۴) و (۲۵) تعریف کرد:

$$Z'_i = \begin{cases} 1 & \text{if } P(i) \geq PC \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i=1,2,\dots,M \quad (24)$$

$$\text{Rel}' = \frac{\sum_{i=1}^M Z'_i}{M} \geq \alpha' \quad (25)$$

همچنین شاخص اطمینان پذیری حجمی را برای هر دو حالت بهره برداری برای تامین نیاز کشاورزی و نیز بهره برداری برقی، می توان به ترتیب به صورت روابط (۲۶) و (۲۷) تعریف نمود:

$$\frac{\sum_{i=1}^M (R(i)-D(i))}{\sum_{i=1}^M (D(i))} \leq \beta \quad \forall i=1,2,\dots,M \quad (26)$$

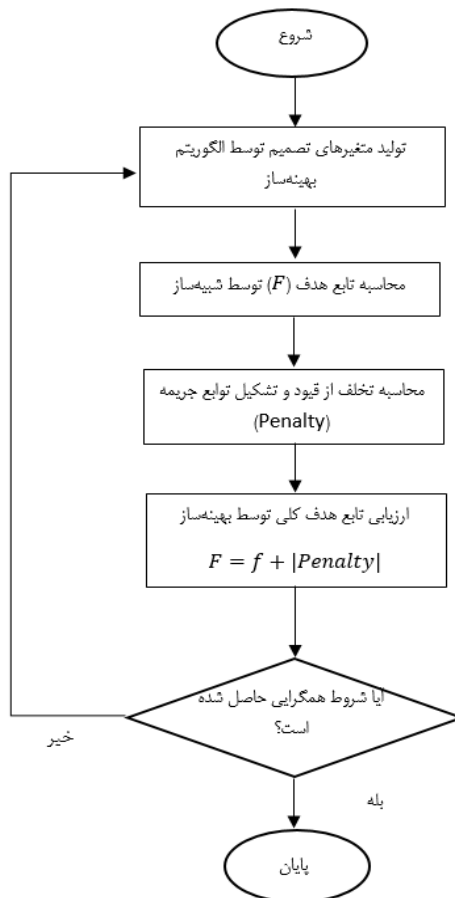
$$\frac{\sum_{i=1}^M (P(i)-PC)}{\sum_{i=1}^M (PC)} \leq \beta' \quad \forall i=1,2,\dots,M \quad (27)$$

همچنین در ماههایی که تامین نیاز به طور کامل اتفاق نمی افتد، باید یک حداقل مقداری برای تامین نیازها تعریف نمود که در روابط (۲۸) و (۲۹) آمده است:

$$R(i) \geq \gamma \times D(i) \quad \forall i=1,2,\dots,M \quad (28)$$

$$P(i) \geq \gamma' \times PC \quad \forall i=1,2,\dots,M \quad (29)$$

لازم به ذکر است که در زمان حل مساله و نوشتن کدها، برای تخطی از هر کدام از قیودا یک تابع جریمه (پنالتی) تعریف و توابع جریمه با ضرایب مناسب با تابع هدف اصلی جمع می شوند (رابطه



شکل ۳- فلوچارت نحوه لحاظ کردن تابع جریمه در الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی

نتایج و بحث

است آزموده شود. بدین منظور در این تحقیق از مساله حداکثرسازی تابع سینوسی نامقید استفاده شده است. در رابطه (۳۴) تابع هدف و محدوده‌های مجاز متغیرهای تصمیم ارائه شده‌اند:

$$\begin{aligned} \text{Max } f(x_1, x_2) &= 21.5 + x_1 \sin(4\pi x_1) \\ &+ x_2 \sin(20\pi x_2) \end{aligned} \quad (34)$$

$-3.0 \leq x_1 \leq 12.1$ $4.1 \leq x_2 \leq 5.8$
این تابع دارای دو متغیر تصمیم x_1 و x_2 می‌باشد. در جدول ۱، نتایج اجرای کدهای کامپیوتری الگوریتم‌های مورد بررسی آمده است.

همانطور که در قسمت‌های قبلی بیان شد، هدف اصلی از این تحقیق مقایسه کارایی الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (GOA) در بهینه‌کردن مدیریت بهره‌برداری از مخزن و مقایسه کارایی این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک (GA) می‌باشد. در گام اول لازم است که صحت عملکرد کدهای کامپیوتری نوشته شده برای الگوریتم‌های مختلف نسبت به یک مساله مشخص که جواب آن از قبل مشخص

جدول ۱- نتایج اجرای کدهای کامپیوتری الگوریتم‌های مختلف برای حل مساله حداکثرسازی تابع سینوسی نامقید

الگوریتم	تعداد ارزیابی تابع هدف	X1	X2	F(x1,x2)
GOA	۵۰۰۰۰	۱۱/۶۱۹	۵/۷۱۲	۳۸/۸۰۱
GA	۵۰۰۰۰	۱۱/۶۳۱	۵/۷۳۵	۳۸/۸۲۲

حکایت از صحت کدهای کامپیوتری تدوین شده دارد. لازم به ذکر است که در این تحقیق تمامی کدها در محیط برنامه‌نویسی Matlab R2017a نوشته شده‌اند.

همانطور که از نتایج مشخص است، دو کد کامپیوتری تدوین شده برای این تحقیق با دو الگوریتم GA و GOA توانستند با تعداد ارزیابی تابع کم‌تر به جواب بهینه مساله ریاضیاتی دست یابند که

آبی پایین دست سد، الگوریتم GOA در دوره ۶۰ ماهه به میزان ۳۹ درصد، در دوره ۱۲۰ ماهه به میزان ۳ درصد، دوره ۲۴۰ ماهه به میزان ۱۴ درصد انحراف کمتری نسبت به الگوریتم GA داشته است. در دوره ۴۸۰ ماهه، الگوریتم GA به میزان ۰/۴ درصد، انحراف معیار کمتری نسبت به GOA داشت و از این نظر دارای پایداری بهتری بود.

در جدول ۳ نتایج تابع هدف تامین انرژی برقآبی توسط دو الگوریتم GOA و نیز الگوریتم GA آمده است. همانطور که در این جدول نیز مشاهده می شود، الگوریتم GOA برای مساله با ۶۰ متغیر تصمیم، توانسته با نصف تعداد فراخوانی تابع هدف الگوریتم GA جواب را به میزان حدود ۲ درصد نسبت به آن بهبود دهد. وقتی که دوره شبیه سازی ۱۰ ساله می شود (تعداد متغیرهای تصمیم برابر با ۱۲۰) میزان بهبود جواب GOA نسبت به GA، ۲/۲ درصد به ازای ۵۰ درصد تعداد فراخوانی کمتر است. در مورد دوره شبیه سازی ۲۰ ساله (تعداد متغیرهای تصمیم برابر با ۲۴۰)، GOA با نصف تعداد فراخوانی نسبت به GA، به جوابی بهتر به میزان ۰/۸ درصد و در مورد دوره شبیه سازی ۴۰ ساله (تعداد ۴۸۰ متغیر تصمیم) نیز، GOA به ازای ۳۳ درصد تعداد ارزیابی تابع هدف کم تر به ۰/۸ درصد جواب بهتر رسیده است. بدین وسیله در اینجا نیز ضمن این که جواب های هر دو الگوریتم تقریباً نزدیک به هم می باشد، الگوریتم GOA توانسته به میزان اندکی به جواب های بهتری دست پیدا کند. در این مساله برقآبی هم همانند مساله تامین نیاز، با افزایش تعداد متغیرهای تصمیم، برتری GOA نسبت به GA کم رنگ تر می شود.

در مورد شاخص پایداری جواب ها در مساله بهینه سازی تولید انرژی برقآبی، الگوریتم GOA در دوره ۲۴۰ ماهه به میزان ۰/۱ درصد و دوره ۴۸۰ ماهه به میزان ۰/۸ درصد انحراف معیار کمتری نسبت به الگوریتم GA داشته است. در دوره ۶۰ و ۱۲۰ ماهه، الگوریتم GA به میزان ۱ درصد و نیز ۴ درصد انحراف معیار کمتری نسبت به GOA داشت و از این نظر می توان گفت که پایدارتر بود. در شکل شماره ۴، میانگین بهبود تابع هدف تولید شده توسط الگوریتم ملخ نسبت به الگوریتم زنتیک و در شکل ۵، بهبود بهترین تابع هدف تولید شده توسط الگوریتم ملخ نسبت به بهترین تابع هدف تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک برای مساله تامین نیاز پائین دست و در اشکال ۶ و ۷، همین فاکتورها برای مساله برقآبی با هم دیگر مقایسه گشته اند. همانطور که از اشکال ۴ الی ۷ مشخص است هر چند عملکرد دو الگوریتم GOA و GA در رسیدن به جواب های بهینه تقریباً نزدیک به هم می باشد، GOA توانسته در تمامی موارد، به مقدار اندکی به جواب های بهتری دست پیدا کند. این در حالی است که در تمامی سناریوها، GOA با تعداد فراخوانی کم تر (بین ۳۳ الی ۵۵ درصد کم تر) موفق به رسیدن به این جواب بهتر شده است. نتیجه ای که از این بحث گرفته می شود این است که از نظر دقت جواب ها، الگوریتم

همانطور که در بخش های قبلی نیز بیان شد در این تحقیق برای دو هدف بهره برداری ساده و بهره برداری برقآبی و برای دوره های ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰ و ۴۸۰ ماهه مدل های تدوینی بهینه سازی اجرا گردیده است. بدیهی است که در دوره های مختلف مورد اشاره، به دلیل عدم تغییر الگو و سطح زیرکشت، نیاز آبی ثابت می ماند اما آورد رودخانه در محل سد، از سالی به سال دیگر و از ماهی به ماه دیگر متفاوت است. برای تعیین نیاز زیست محیطی رودخانه پائین دست سد از روش تنانت که درصدی از میانگین ماهانه جریان بلندمدت رودخانه را به عنوان نیاز زیست محیطی رودخانه در نظر می گرد و محدوده قابل قبول آن استفاده شده است (Tennant, 1976). در محدوده قابل قبول روش تنانت، برای ماه های تر ۱۰ درصد متوسط جریان ماهانه درازمدت و برای ماه های خشک ۳۰ درصد متوسط جریان ماهانه درازمدت به عنوان نیاز زیست محیطی جریان محسوب می شود.

در جدول ۲، نتایج تابع هدف تامین نیاز آبی پائین دست توسط الگوریتم GOA و نیز الگوریتم GA آورده شده است. نکته قابل ذکر این است که در همه مدل ها و همه اجراها سعی شده است که با انجام سعی و خطاهای متعدد، بهترین ترکیب جمعیت، تعداد تکرار و ضرایب تنظیمی الگوریتم ها بدست آمده و اعمال شود. در این مطالعه مقدار α و β برابر ۰/۸ و γ برابر ۰/۵ می باشد. همچنین مقدار α' و β' برابر ۰/۷ و γ' برابر ۰/۲۵ می باشد. همانطور که از این جدول مشخص است، الگوریتم GOA برای دوره بهره برداری ۵ ساله که شامل ۶۰ متغیر تصمیم (مجهول مساله) است توانسته با تعداد ۵۰۰۰۰ فراخوانی^۱ تابع هدف (تعداد جمعیت ضربدر تعداد تکرار) جواب را به میزان ۱۲ درصد نسبت به الگوریتم GA که تعداد فراخوانی تابع هدف آن ۱۰۰۰۰۰ می باشد بهبود بخشد. این بدان معنی است که GOA با نصف تعداد ارزیابی ها به جوابی بهتر از GA رسیده است. وقتی که تعداد متغیرهای تصمیم به ۱۲۰ می رسد (دوره شبیه سازی ۱۰ ساله) میزان بهبود جواب GOA نسبت به GA، ۰/۳ درصد به ازای ۵۰ درصد تعداد فراخوانی کم تر است. در مورد دوره شبیه سازی ۲۰ ساله (تعداد متغیرهای تصمیم برابر با ۲۴۰)، GOA با نصف تعداد فراخوانی نسبت به GA، دارای جواب بهتر به میزان ۳ درصد و در مورد دوره شبیه سازی ۴۰ ساله با تعداد ۴۸۰ متغیر تصمیم، GOA به ازای ۳۳ درصد تعداد ارزیابی تابع هدف کم تر به ۱/۵ درصد جواب بهتر رسیده است. بدین وسیله ضمن این که جواب های هر دو الگوریتم تقریباً نزدیک به هم می باشد، الگوریتم GOA توانسته به میزان اندکی به جواب های بهتری دست پیدا کند. البته در مساله با تعداد متغیرهای کم، این الگوریتم جواب های بهتری را نسبت به مساله با تعداد متغیرهای زیاد، نسبت به GA بدست داده است.

در مورد پایداری جواب ها در مساله بهینه سازی تخصیص به نیاز

1- Function Evaluation

بهبتری داشته است. در مورد تعداد مورد نیاز برای ارزیابی تابع هدف جهت رسیدن به جواب بهینه، عملکرد الگوریتم ملخ به مقدار قابل توجهی مناسب‌تر از الگوریتم ژنتیک است.

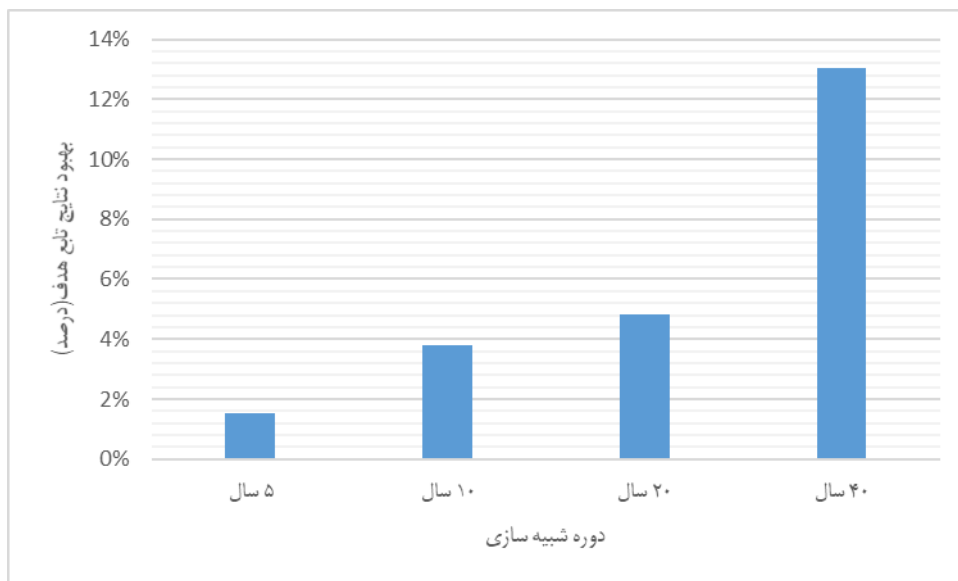
ملخ و الگوریتم ژنتیک تقریباً عملکرد مشابهی دارند. هرچند در این تحقیق و برای مسائل طرح شده، جوابهای الگوریتم ملخ اندکی بهتر است. از نظر پایداری جوابها نیز الگوریتم ملخ در اغلب موارد شرایط

جدول ۲- نتایج تابع هدف تامین نیاز پایین دست توسط الگوریتم‌های مختلف و برای دوره‌های شبیه‌سازی متفاوت

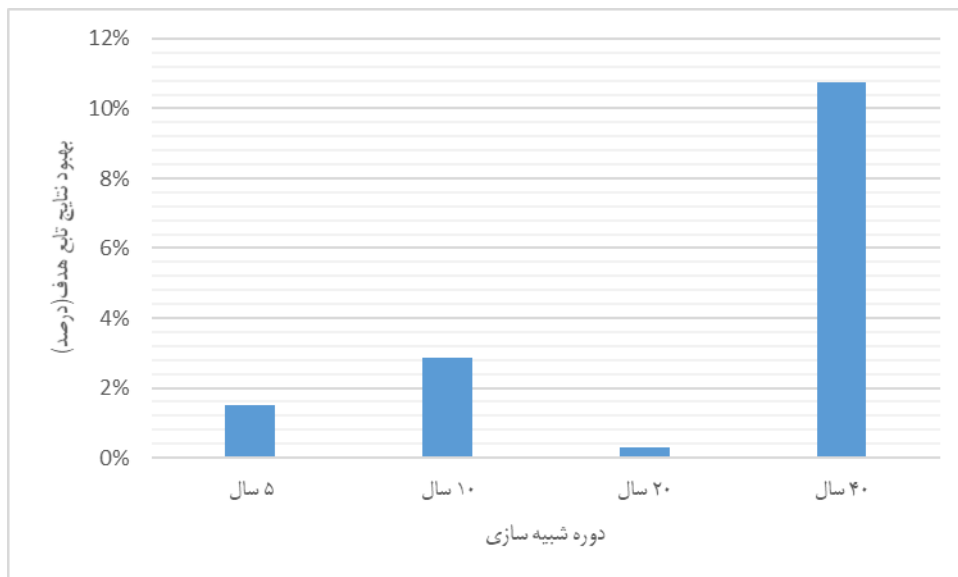
شماره اجرا	نتایج الگوریتم ملخ			نتایج الگوریتم ژنتیک			
	۵ سال	۱۰ سال	۲۰ سال	۴۰ سال	۵ سال	۱۰ سال	۲۰ سال
۱	۴/۴۱۲	۷/۵۸۹	۱۴/۱۶۴	۳۵/۸۷۱	۴/۹۹۹	۸/۸۰۲	۱۴/۵۷۸
۲	۴/۸۵۷	۱۰/۳۵۹	۱۶/۱۸۹	۳۲/۳۷۷	۵/۷۰۸	۱۰/۳۵۹	۱۷/۲۹۳
۳	۳/۶۹۷	۹/۳۲۶	۱۴/۱۷۳	۳۵/۴۴۷	۳/۹۵۰	۱۰/۰۰۴	۱۴/۶۳۳
۴	۴/۰۲۱	۸/۱۸۲	۱۳/۲۷۰	۳۱/۴۱۳	۴/۹۳۰	۷/۸۰۸	۱۳/۹۴۹
۵	۳/۷۴۶	۱۰/۵۹۴	۱۴/۹۵۸	۳۳/۷۰۶	۴/۸۵۰	۱۰/۶۱۷	۱۶/۰۸۵
۶	۳/۷۱۸	۱۱/۴۵۰	۱۵/۷۳۳	۳۵/۱۰۱	۴/۱۰۹	۱۱/۶۸۰	۱۵/۸۱۴
۷	۳/۵۲۵	۱۲/۸۲۱	۱۶/۷۱۶	۳۳/۰۳۲	۴/۲۵۰	۱۳/۴۸۸	۱۷/۲۲۲
۸	۳/۷۸۷	۱۰/۴۴۳	۱۵/۰۱۳	۳۱/۸۲۷	۴/۰۶۳	۱۱/۳۹۷	۱۵/۶۳۴
۹	۳/۶۸۷	۱۰/۵۶۱	۱۵/۶۴۶	۳۲/۹۶۰	۴/۰۵۵	۱۱/۵۵۰	۱۶/۵۵۵
۱۰	۴/۱۲۷	۷/۷۵۸	۱۳/۶۴۷	۳۱/۰۷۰	۴/۶۱۰	۸/۷۲۲	۱۳/۶۵۹
تعداد فراخوانی تابع هدف	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰
حداکثر مقدار توابع هدف	۴/۸۵۷	۱۲/۸۲۱	۱۶/۷۱۶	۳۵/۸۱۰	۵/۷۰۸	۱۳/۴۸۸	۱۷/۲۹۳
حداقل مقدار توابع هدف	۳/۵۲۵	۷/۷۵۸	۱۳/۲۷۰	۳۱/۰۷۰	۳/۹۵۰	۷/۸۰۸	۱۳/۶۵۹
میانگین توابع هدف	۳/۹۵۸	۹/۹۳۸	۱۴/۹۵۱	۳۳/۲۷۴	۴/۵۵۲	۱۰/۴۴۳	۱۵/۵۴۲
انحراف معیار توابع هدف	۰/۴۰۹	۱/۶۴۲	۱/۱۳۰	۱/۷۰۱	-۰/۵۶۸	۱/۶۹۲	۱/۲۹۷

جدول ۳- نتایج تابع هدف تولید انرژی برقایی توسط الگوریتم‌های مختلف و برای دوره‌های شبیه‌ساز متفاوت

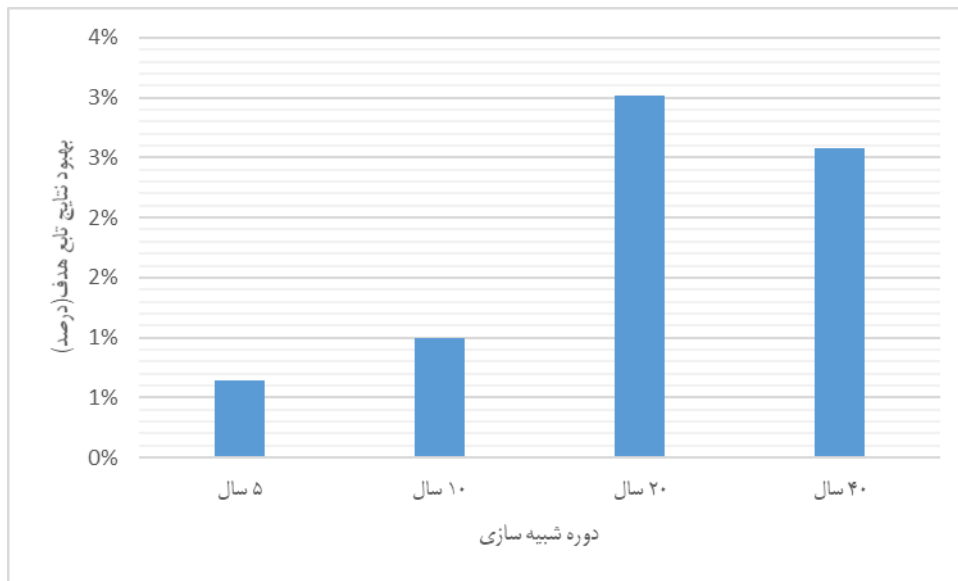
شماره اجرا	نتایج الگوریتم ملخ			نتایج الگوریتم ژنتیک			
	۵ سال	۱۰ سال	۲۰ سال	۴۰ سال	۵ سال	۱۰ سال	۲۰ سال
۱	۱۵/۲۳۳	۲۲/۱۱۵	۴۴/۳۹۶	۸۰/۷۴۶	۱۵/۲۶۸	۲۳/۰۹۲	۴۴/۶۲۶
۲	۱۵/۷۴۳	۱۸/۳۵۹	۴۱/۴۱۴	۸۲/۴۵۳	۱۵/۸۷۰	۱۹/۲۱۰	۴۱/۷۵۹
۳	۱۵/۳۸۸	۲۲/۶۴۲	۴۵/۲۰۹	۷۹/۲۵۳	۱۶/۱۳۶	۲۳/۵۳۹	۴۵/۶۶۹
۴	۱۴/۴۰۰	۲۳/۱۳۶	۴۴/۲۱۵	۸۱/۹۶۹	۱۴/۹۸۷	۲۴/۱۳۷	۴۴/۴۳۴
۵	۱۳/۱۸۲	۲۳/۹۷۱	۴۳/۳۰۵	۷۹/۰۹۲	۱۳/۷۱۱	۲۴/۱۴۳	۴۴/۲۸۳
۶	۱۳/۱۵۸	۲۳/۲۳۳	۴۲/۱۶۵	۸۲/۰۲۱	۱۳/۴۲۳	۲۳/۴۴۰	۴۲/۱۸۸
۷	۱۶/۸۱۴	۲۰/۴۶۳	۴۵/۱۳۷	۸۲/۷۸۲	۱۶/۹۱۸	۲۱/۴۶۳	۴۵/۶۸۹
۸	۱۶/۳۳۶	۱۷/۹۰۳	۴۱/۷۳۲	۸۲/۲۷۶	۱۶/۷۲۷	۱۸/۳۰۵	۴۲/۳۳۰
۹	۱۶/۰۶۷	۱۹/۲۷۵	۴۲/۵۵۸	۸۰/۱۷۹	۱۶/۶۸۶	۲۰/۳۳۳	۴۳/۲۷۱
۱۰	۱۵/۷۸۹	۲۲/۴۷۱	۴۵/۵۷۴	۷۹/۷۴۱	۱۶/۴۲۲	۲۲/۵۵۲	۴۵/۸۶۲
تعداد فراخوانی تابع هدف	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰
حداکثر مقدار توابع هدف	۱۶/۸۱۴	۲۳/۹۷۱	۴۵/۵۷۴	۸۲/۷۸۲	۱۶/۹۱۸	۲۴/۱۴۳	۴۵/۸۶۲
حداقل مقدار توابع هدف	۱۳/۱۵۸	۱۷/۹۰۳	۴۱/۴۱۴	۷۹/۰۹۲	۱۳/۴۲۳	۲۳/۵۳۹	۴۱/۷۵۹
میانگین توابع هدف	۱۵/۲۱۲	۲۱/۳۵۷	۴۳/۵۷۱	۸۱/۱۵۱	۱۵/۶۱۴	۲۲/۰۲۱	۴۴/۰۱۱
انحراف معیار توابع هدف	۱/۲۵۷	۲/۱۸۷	۱/۵۴۰	۱/۵۷۲	۱/۲۴۸	۲/۰۹۸	۱/۵۴۲



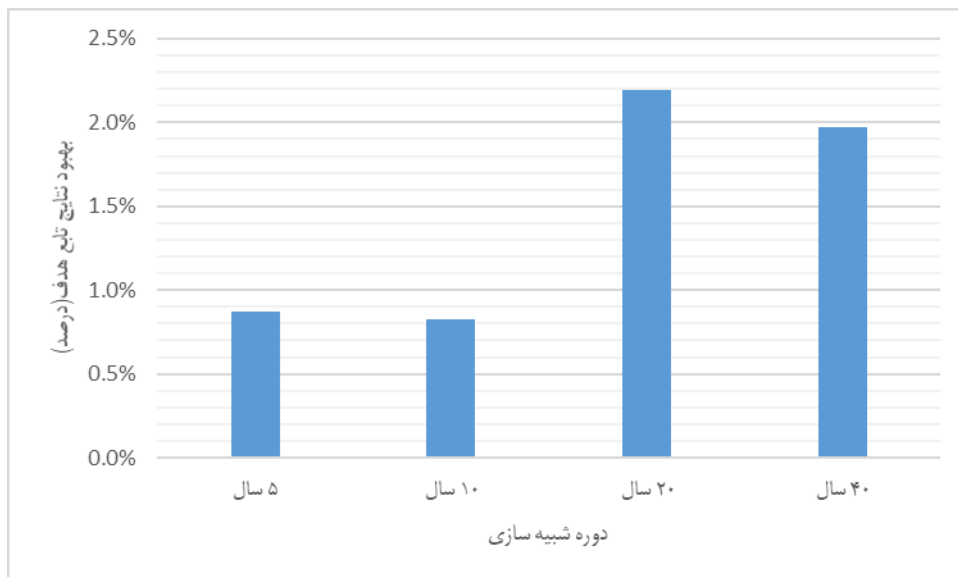
شکل ۴- میانگین بهبود تابع هدف تولید شده توسط الگوریتم ملخ نسبت به الگوریتم ژنتیک در مساله بهره‌برداری ساده از مخزن



شکل ۵- میزان بهبود بهترین تابع هدف تولید شده توسط الگوریتم ملخ نسبت به بهترین تابع هدف محاسبه شده توسط الگوریتم ژنتیک در مساله بهره‌برداری ساده از مخزن



شکل ۶- میانگین بهبود تابع هدف تولید شده توسط الگوریتم ملخ نسبت به الگوریتم ژنتیک در مساله بهره‌برداری برقابی از مخزن



شکل ۷- میزان بهبود بهترین تابع هدف تولید شده توسط الگوریتم ملخ نسبت به بهترین تابع هدف محاسبه شده توسط الگوریتم ژنتیک در مساله بهره‌برداری برقابی از مخزن

نتیجه‌گیری

در این مقاله، قابلیت الگوریتم بهینه‌سازی ملخ به عنوان یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی نوین در مساله بهره‌برداری از سد‌های مخزنی مورد بررسی قرار گرفته است. سد مخزنی دز که یکی از مهم‌ترین سد‌های چندمنظوره ایران است به عنوان مطالعه موردی در این زمینه انتخاب شد و بهره‌برداری از این سد در دو حالت بهره‌برداری ساده و نیز بهره‌برداری برقابی مورد بررسی قرار گرفت و گام‌های زمانی بهره‌برداری ماهانه و طول دوره‌های بهره‌برداری نیز ۵

ساله، ۱۰ ساله، ۲۰ ساله و ۴۰ ساله بودند. بدین ترتیب مساله برای دو حالت بهره‌برداری مختلف و در هر حالت با ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰ و ۴۸۰ مجهول حل گردید. در تمامی مساله‌ها، تخطی از قیودات مختلف بهره‌برداری از مخزن شامل قید رعایت حجم مرده و زنده مخزن، ظرفیت بهره‌برداری، رعایت نیاز زیست محیطی و غیره به صورت توابع جریمه مناسب تعریف شده و به تابع هدف اضافه گردیده و در جواب نهایی کنترل شد که این قیودات همگی رعایت شده باشند. نتایج اجرای مدل‌های مختلف، قابلیت بالای الگوریتم GOA را در

Management. 29(11): 3891-3904.

Afshar, A., and Masoumi, Fariborz. 2016. Waste load reallocation in river-reservoir systems: simulation-optimization approach. *Environmental Earth Sciences*. 75: 53. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4812-x>.

Afshar, A., Masoumi, F., & Sandoval Solis, S. 2018. Developing a reliability-based waste load allocation strategy for river-reservoir systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 144(9). DOI:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000973.

Askarzadeh, A. 2016. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm. *Comput. Struct*, 169: 1-12.

Bahrami, M., Bozorg-Haddad, O., and Chu, X. 2017. Application of cat swarm optimization algorithm for optimal reservoir operation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 144(1). 04017057.

Chu, S. C., and Tsai, P. W. 2007. Computational intelligence based on the behavior of cats. *Int. J. Innovative Comput. Inf. Control*, 3(1), 163-173.

Darlane, A.B. and Naeini, S.M.M., 2008. Comparison of heuristic methods applied for optimal operation of water resources. *Water & Waste Water (in Persian)*, 19(68), pp.57-66.

Esat, V., and Hall, M.J. 1994. Water resources system optimization using genetic algorithms. *Hydroinformatics*. 94:225-231.

Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A. and Hamdi, M. 2012. Water cycle algorithm -A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. *Computers and Structures*. 110(111): 151-166.

Garousi-Nejad, I., Bozorg-Haddad, O., Loáiciga, H.A., and Mariño, M.A. 2016. Application of the firefly algorithm to optimal operation of reservoirs with the purpose of irrigation supply and hydropower production. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 142(10), 04016041.

Holland, John H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor

Kangrang, A. and Lokham, C., 2013. Optimal reservoir rule curves considering conditional ant colony optimization with simulation model. *Journal of applied sciences*, 13(1), pp.263-267.

Kumar D.N. and Reddy J., 2007. Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 3:192-201.

Labadie J. 2004. Optimal Operation of Multi-Reservoir Systems: State-of-the-Art Review. *Journal of Water*

حل مساله بهره‌برداری از مخزن در حالت بهره‌برداری ساده و نیز بهره‌برداری برقابی نشان داد. در مقایسه با الگوریتم GA، الگوریتم GOA همواره توانست به جواب برتر دست یابد. هر چند این برتری با افزایش تعداد متغیرهای تصمیم کم‌رنگ‌تر می‌شد. از نظر تعداد فراخوانی توابع هدف که ارتباط مستقیمی با زمان اجرای مدل دارد الگوریتم GOA عملکرد فوق‌العاده‌ای داشته و توانست در مساله‌های مختلف بین ۳۳ الی ۵۰ درصد تعداد فراخوان‌های مورد لزوم را با حفظ دقت پاسخ‌ها نسبت به الگوریتم GA کم نماید. در ارتباط با پایداری جواب‌ها نیز می‌توان با اطمینان نسبتاً مناسبی عنوان کرد که پایداری الگوریتم GOA نسبت به GA کم‌تر نیست. جهت ادامه مطالعات پیشنهاد می‌شود که قابلیت الگوریتم GOA در حل مسائل با متغیرهای گسسته همچون مساله طراحی شبکه‌های آب و فاضلاب شهری با الگوریتم GA مقایسه شود.

منابع

اکبری فرد، س.، قادری، ک. و بختیاری. ۱۳۹۶. بررسی عملکرد چند الگوریتم هوشمند در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخازن. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱(۱). ۵۷-۴۶.

زینلی، م. ج.، محمدرضایپور، ا. ب.، فروغی، ف. ۲۰۱۵. ارزیابی الگوریتم‌های ازدحام ذرات، ژنتیک و سیستم مورچگان پیوسته در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد درودزن. دانش آب و خاک، ۲۵(۳)، ۲۷-۳۸.

وزیری، ح. ر.، کرمی، ح.، موسوی، س. ف.، و هادیانی، ا. ۱۳۹۷. بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد مخزنی با الگوریتم جستجوی کلاغ براساس یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره. نشریه علوم آب و خاک، ۲۲(۱)، ۲۷۹-۲۹۰.

Afshar, A., Sharifi F., and Jalali. M.R. 2009. Non-Dominated Archiving Multi-Colony Ant Algorithm for MultiObjective Optimization: Application to Multi-Purpose Reservoir Operation. *Engineering Optimization*. 41 (4): 313-325.

Afshar, A., Emami Skardi, M.J. and Masoumi, F., 2015 a. Optimizing water supply and hydropower reservoir operation rule curves: an imperialist competitive algorithm approach. *Engineering Optimization*. 47(9):1208-1225.

Afshar, A., Masoumi, F. and Solis, S.S., 2015 b. Reliability based optimum reservoir design by hybrid ACO-LP algorithm. *Water Resources Management*. 29(6):2045-2058.

Afshar, A., Masoumi, F., Afshar, A., and Mariño, M. A. 2015c. State of the art review of ant colony optimization applications in water resource management. *Water Resources*

- Ostadrhimi L., Marino M.A., and Afshar A. 2012. Multi-Reservoir Operation Rules: Multi-Swarm PSO-Based Optimization Approach. *Water Resources Management*. 26 (2):407–427.
- Saremi, S., Mirjalili, S., and Lewis, A. 2017. Grasshopper optimization algorithm: theory and application. *Advances in Engineering Software*. 105: 30-47.
- Shi Y. and Eberhart R. 1998. Parameter selection in particle swarm optimization. In: Porto VW, Saravanan N, Waagen D and Eiben AE (eds). *Evolutionary Programming*. 7: 611-616.
- Tennant, D.L. 1976. In stream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*. 1: 6–10
- Wurbs, R. 1993. Reservoir System Simulation and Optimization Models. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 119 (4): 455–472.
- Yeh, W. G. 1985. Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review. *Water Resources Research*. 21(12):1797–1818.
- Resources Planning and Management. ASCE 130 (2): 93–111.
- Madadgar S., and Afshar. A. 2009. An Improved Continuous Ant Algorithm for Optimization of Water Resources Problems. *Water Resources Management*. 23: 2119–2139.
- Momtahn, S., and Dariane, A. B. 2007. Direct search approaches using genetic algorithms for optimization of water reservoir operating policies. *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*. 133:202-209. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2007\)133:3\(202\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2007)133:3(202))
- Nicklow, J., P. Reed, D. Savic, T. Dessalegne, L. Harrell, A. Chan-Hilton, M. Karamouz, et al. 2010. State of the Art for Genetic Algorithms and Beyond in Water Resources Planning and Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 136 (4): 412–432.
- Oliveria, R., and Loucks, D.P. 1997. Operating rules for multireservoir systems. *Water Resource Research*. 33(4):839-852.

Evaluation of Grasshopper Optimization Algorithm for Optimal Operation of Surface Water Reservoirs with Reliability Constraints

F. Masoumi^{*1}, N. Salimi², N. Zafari³

Received: Oct.31, 2019

Accepted: Dec.11, 2019

Abstract

The use of metaheuristic optimization algorithms in the optimal management of surface water reservoirs systems has expanded considerably in recent years. The reason for this can be seen in the diversity and number of constraints of these systems, a large number of decision variables, and the multiplicity of objectives of these systems. In this research, the Grasshopper optimization algorithm as one of the new metaheuristic optimization algorithms, has been used for the management of reservoir dams. Dez Reservoir Dam has been selected as a case study for two separate simple operation and hydropower production problems (60, 120, 240 and 480 variables). In addition to the usual constraints on reservoir operation, the time reliability, volume reliability constraints as well as the provision of at least a percentage of the monthly requirement in the months with unmet demands are included in this research. The results of this study showed that in different scenarios, the Grasshopper optimization algorithm was able to improve the optimal solution by about 0.5 to 12%. However, as the number of decision variables increases, the efficiency of this algorithm is reduced compared to the genetic algorithm. Regarding the stability of the solutions, in most cases the Grasshopper optimization algorithm yielded better results. In terms of runtime, the grasshopper algorithm converged about 20 to 50 percent faster than the genetic algorithm. The results of comparing the grasshopper optimization algorithm with genetic algorithm indicate the high capability of this algorithm in solving the reservoir operation optimization problem.

Keywords: Simple Operation, Hydropower Operation, Dez Dam, Grasshopper Optimization Algorithm, Genetic Algorithm

1- Assistant Professor in Water Resource Management field in University of Mohaghegh Ardabili, Civil Engineering Faculty

2- M.Sc. Degree in Water Resource Management field in University of Mohaghegh Ardabili, Civil Engineering Faculty

3- M.Sc. Degree Water Resource Management field in University of Mohaghegh Ardabili, Civil Engineering Faculty

(*- Corresponding Author Email: f_masoumi@uma.ac.ir)