

Technical Note

Optimal Operation of Multi-Reservoir System Using Symbiotic Organisms Search Algorithm

S. Akbarifard¹, M. Sharifi^{2*} and F. Radmanesh³

Abstract

In recent decades, metaheuristic algorithms have been applied successfully in various water resource engineering and management issues especially in optimal operation of reservoirs. In this paper, a model has been developed based on Symbiotic Organisms Search (SOS) algorithm for modeling optimal operation of complex multi-reservoir systems. In the first step, the performance of the method was successfully assessed through several benchmark functions. Then SOS algorithm was used to derive the optimal operation of four- and ten-reservoir systems. The results of SOS were compared with other developed evolutionary algorithms including Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO). The results showed that for cases of four- and ten-reservoir systems the best solutions achieved by the SOS were 308-8114 and 1190-0227, respectively. The results revealed that the SOS algorithm was the superior algorithm in optimal operation of multi-reservoirs systems.

Keywords: SOS Algorithm, Optimal Operation, Metaheuristic Algorithms, Multi-Reservoir Systems.

Received: February 24, 2017

Accepted: February 28, 2017

یادداشت فنی

بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چند مخزنه با استفاده از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست

سعید اکبری فرد^۱، محمدرضا شریفی^{۲*} و فریدون رادمش^۳

چکیده

در چند دهه اخیر الگوریتم‌های فراکاوشی نقش مؤثری در مسائل مختلف مهندسی از جمله بهره‌برداری بهینه از مخازن داشته‌اند. به دلیل پیچیدگی مسائل مدیریت منابع آب و در نتیجه نیاز روزافزون به توسعه و رواج روش‌های مزبور، در پژوهش حاضر اقدام به مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های پیچیده چند مخزنی با استفاده از روشی مبتنی بر الگوریتم جستجوی موجودات همزیست (Symbiotic Organisms Search) گردید. در گام اول، عملکرد موفقیت‌آمیز روش با استفاده از تعدادی توابع محک استاندارد ارزیابی شد. سپس الگوریتم جستجوی موجودات همزیست در حل سیستم چهار و ده مخزنه محک مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست، با الگوریتم‌های تکاملی توسعه یافته دیگر از جمله الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات مقایسه شد. نتایج نشان داد که در سیستم‌های چهار و ده مخزنه، بهترین نتایج بدست آمده توسط الگوریتم جستجوی موجودات همزیست به ترتیب برابر ۳۰۸/۸۱۱۴ و ۱۱۹۰/۰۲۲۷ بوده است. نتایج نشان داد که الگوریتم جستجوی موجودات همزیست در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنه از عملکرد مناسب‌تری برخوردار می‌باشد.

کلمات کلیدی: الگوریتم جستجوی موجودات همزیست، بهره‌برداری بهینه، الگوریتم‌های فراکاوشی، سیستم‌های چند مخزنه.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۲/۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۲/۱۰

1- PhD. Candidate in Water Resources Engineering, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

2- Assistant Professor of Water Engineering, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. Email: msharifi@scu.ac.ir

3- Associate Professor of Water Engineering, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- استادیار گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- دانشیار گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

پرداختند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با روش‌های سنتی حل برنامه‌ریزی غیرخطی مانند نرم‌افزار Lingo 8 بوده است. یکی از روش‌های مؤثر بهینه‌سازی که توسط Cheng and Prayogo (2014) ارائه شده، الگوریتم جستجوی موجودات همزیست (SOS) می‌باشد. Baghlani and Hajivandi (2016) برای به حداقل رساندن نوسانات تراز سطح آب در کانال‌های انتقال آب دارای ایستگاه پمپاژ از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست استفاده کردند. مقایسه نتایج، نشان داد که هیدروگراف ورودی به‌دست آمده از این روش نسبت به روش‌های پیچیده تحلیلی، نوسانات تراز سطح آب را به‌طور قابل ملاحظه‌تری کاهش می‌دهد. Panda and Pani (2016) با استفاده از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست به حل مسائل بهینه‌سازی مقید چندهدفه پرداختند. آن‌ها از دوازده مسأله معیار چندهدفه نامقید و شش مسأله مقید استفاده و جهت بررسی و رسیدگی به برابری و نابرابری در محدودیت‌ها از تابع پناستی تطبیقی استفاده کردند. نتایج بدست آمده از ۵۰ اجرای مختلف نشان‌دهنده برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به دیگر الگوریتم‌های چندهدفه مورد بررسی بوده است. Tejani et al. (2016) برای بهینه‌سازی طراحی سازه از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست استفاده کردند. نتایج حاکی از عملکرد مناسب و کارآمدتر الگوریتم SOS در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های موردبررسی بوده است. همانطور که در پیشینه پژوهش نیز نشان داده شد، امروزه روش‌های هوشمند از جمله الگوریتم‌های فراکاوشی به دلیل قابلیت‌های متعدد نظیر سرعت عمل، دقت بالا، سهولت اجرا، انعطاف‌پذیری، نیاز به اطلاعات ورودی کمتر، قابلیت حل مسائل پیچیده و دارای ابعاد بالا و غیره در تمامی مسائل مهندسی و به‌طور خاص در مسأله بهره‌برداری از سیستم مخازن ورود کرده‌اند و همواره به عنوان روشی موفق ظاهر شده‌اند. همچنین از سوی دیگر با توجه به قابلیت کاربردی و دقت بالای الگوریتم جستجوی موجودات همزیست که پیش‌تر در اموری نظیر، حل مسائل بهینه‌سازی مقید چندهدفه و بهینه‌سازی طراحی سازه، عملکرد قابل قبولی داشته‌اند، در پژوهش حاضر به بررسی کارایی الگوریتم مزبور در بهینه‌سازی تخصیص منابع آبی پرداخته شد. به همین منظور مدلی بر اساس الگوریتم SOS در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB R2014a توسعه داده شد. همچنین نتایج الگوریتم مورد بررسی با الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات مورد مقایسه قرار گرفت.

۲- سیستم چهار و ده مخزنه محک

سیستم چهار مخزنه محک برای اولین بار توسط Chow and Cortes (1974) پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفت.

بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها از اولویت‌های برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب می‌باشد. از لحاظ وجود نیازهای آبی در مناطق متعدد مکانی، گاهی سیستم ذخیره‌ای شامل یک مخزن و گاهی شامل چندین مخزن متوالی روی رودخانه و یا شبکه‌ای از مخازن بر روی رودخانه‌ها و سرشاخه‌های آن طرح می‌گردد. با پیشرفت‌های انجام شده در شاخه‌های مختلف علوم و مهندسی، نحوه طرح، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی منابع آب با استفاده از روش‌های مختلفی امکان‌پذیر گردیده است. Qaderi et al. (2010) از روش برخورد گروهی با داده‌ها (GMDH¹) برای بهره‌برداری سیستماتیک از مخازن چندگانه موجود در دشت تهران و Nourani et al. (2012) از ترکیب مدل برنامه‌ریزی آرمانی و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی در بهره‌برداری بهینه از سیستم مخزنی حوضه آبریز سفیدرود، استفاده نمودند. Qaderi et al. (2017) با استفاده از الگوریتم چرخه آب (WCA²) به بهره‌برداری از سیستم مخازن پرداختند. در این پژوهش ابتدا مسائل چهار و ده مخزنه محک با استفاده از الگوریتم چرخه آب حل و سپس از این الگوریتم در حل مسأله بهره‌برداری از سیستم مخازن حوضه آبریز گرگان‌رود استفاده گردید. نتایج نشان داد که الگوریتم چرخه آب توانست با ۰/۵ و ۱ درصد اختلاف نسبت به بهینه سراسری در مسائل چهار و ده مخزنه تخمین مناسبی از بهینه سراسری داشته باشد. همچنین، در مسأله بهره‌برداری از سیستم مخازن حوضه آبریز گرگان‌رود نتایج حاکی از برتری الگوریتم چرخه آب در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی از جمله الگوریتم‌های GA³ و PSO⁴ بوده است. Bozorg-Haddad et al. (2017) جهت بهره‌برداری بهینه از مخزن از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست استفاده کردند. در این پژوهش از مخزن کارون ۴ به عنوان گزینه تک مخزنه و از سیستم چهار مخزنه محک به عنوان گزینه چند مخزنه استفاده گردید. نتایج حاکی از برتری الگوریتم جستجوی موجودات همزیست نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و چرخه آب در هر دو سیستم تک مخزنه و چهار مخزنه بوده است. Ehteram et al. (2017) به بهره‌برداری از مخزن و نیروگاه برای مدیریت بهتر منابع آب و تولید انرژی برقی، با استفاده از الگوریتم کوسه^۵ پرداختند. به این منظور از مخزن کارون ۴، سیستم چهار و ده مخزنه محک و همچنین سیستم مخازن برقی در چین استفاده کردند. نتایج حاکی از برتری مطلق الگوریتم کوسه در هر چهار مسأله مورد بررسی نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات بوده است. Ehteram et al. (2017) به بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن کارون ۴، سیستم چهار و ده مخزنه محک و همچنین سیستم مخازن برقی در چین با استفاده از ترکیب الگوریتم کریل^۶ و ژنتیک

همانطور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، این سیستم چند مخزنه از مخازن سری و موازی تشکیل شده است. همچنین سیستم ده مخزنه توسط Murray and Yakowitz (1979) معرفی و با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویای گسسته (DDP⁷) حل شد. سیستم مخازن مورد نظر از ده مخزن سری و موازی مطابق شکل ۱-۱ تشکیل شده است. در این شکل Q_i و R_i به ترتیب جریان ورودی و رهاسازی از مخزن i می‌باشند. تابع هدف در سیستم مخازن محک، حداکثرسازی سود سیستم در ۱۲ دوره بهره‌برداری می‌باشد. جزییات بیشتر در مورد داده‌ها و فرمولاسیون مسائل مورد نظر توسط Murray and Yakowitz (1979) ارائه شده است.

$$X_{i, \text{new}, k} = X_{i, k} + \text{rand}(0,1) \times (X_{\text{best}} - \text{Mutual Vector} \times \text{BF}_1) \quad (1)$$

$$X_{j, \text{new}, k} = X_{j, k} + \text{rand}(0,1) \times (X_{\text{best}} - \text{Mutual Vector} \times \text{BF}_2) \quad (2)$$

$$\text{Mutual Vector} = \frac{X_{i, k} + X_{j, k}}{2} \quad (3)$$

که در روابط فوق، $X_{i, k}$ و $X_{j, k}$ ارگانیسیم‌های k بعدی که با λ امین و λ امین عضو محیط همخوانی دارند، X_{best} بهترین عضو جمعیت، Mutual Vector بردار متقابل یا همکاری و $\text{rand}(0,1)$ یک بردار از اعداد تصادفی است. فاکتور سود (BF_1 و BF_2) به صورت تصادفی در روابط (۱) و (۲) تعریف شده‌اند. این فاکتورها نشان‌دهنده سطح سود بردن هر موجود است که آیا یک موجود از این رابطه سود کامل می‌برد یا بخشی از سود را می‌برد. مقادیر فاکتور سود با استفاده از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند.

$$\text{BF}_1 = \text{round}(1 + \text{rand}) \quad (4)$$

$$\text{BF}_2 = \text{round}(1 + \text{rand}) \quad (5)$$

که rand عددی تصادفی بین صفر و یک می‌باشد. بر اساس فاز همکاری، همه موجودات با افزایش توانایی و انطباق خود در محیط‌زیست روبرو هستند. بنابراین، X_{best} (راه‌حل سراسری^{۱۱}) برای مدل کردن بالاترین درجه انطباق به عنوان نقطه نهایی و افزایش برآزش هر دو موجود استفاده می‌شود. در نهایت موجود زمانی انطباق پیدا می‌کند که میزان برآزندگی جدیدش نسبت به قبل از تعاملش بهتر باشد.

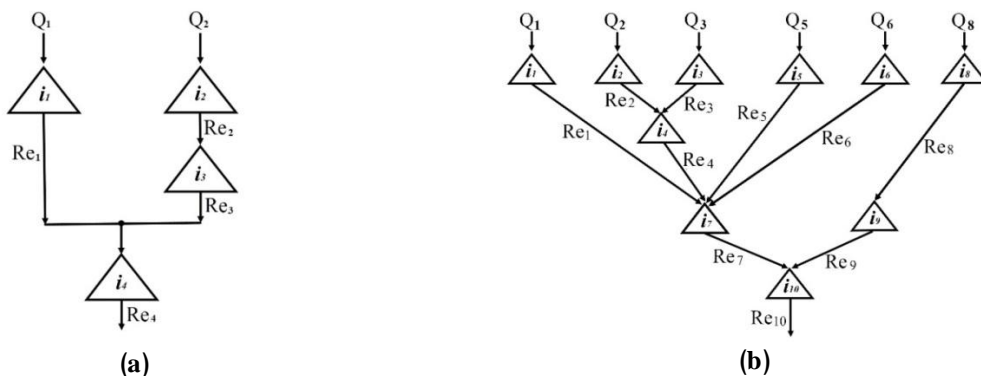


Fig. 1- Schematic representation of (a) four-reservoir system and (b) ten-reservoir system

شکل ۱- شماتیک سیستم مخازن محک (a) سیستم چهار مخزنه و (b) سیستم ده مخزنه

۳- روش تحقیق

۳-۱- الگوریتم جستجوی موجودات همزیست (SOS)

الگوریتم جستجوی موجودات همزیست SOS یکی از الگوریتم‌های فراکاوشی است که بر پایه شبیه‌سازی رفتاری متقابل میان موجودات، ارائه شده است (Cheng and Prayogo, 2014). موجودات به علت تکیه بر دیگر گونه‌ها برای گذراندن زندگی و حتی بقاء، به ندرت در انزوا زندگی می‌کنند. این رابطه مبتنی بر اعتماد، به‌عنوان همزیستی شناخته می‌شود. الگوریتم SOS فعل و انفعالات همزیستی در رابطه بین دو گونه را شبیه‌سازی می‌کند، به نحوی که یک گونه به جستجو برای پیدا کردن مناسب‌ترین موجود می‌پردازد. روند کلی الگوریتم به شکل زیر است:

مقداردهی اولیه \leftarrow تکرار \leftarrow فاز همکاری \leftarrow فاز هم‌سفرگی \leftarrow فاز انگلی \leftarrow خاتمه فرآیند پس از رسیدن به حداکثر تعداد تکرار

۳-۳- فاز همکاری^{۱۱}

در SOS، ارگانیسیم $X_{i, k}$ موجودی است k بعدی (تعداد متغیرهای تصمیم^{۱۱}) که با λ امین عضو محیط (جمعیت^{۱۱}) همخوانی دارد. مقدار i با استفاده از یک حلقه از یک شروع شده و تا اندازه جمعیت ادامه دارد

۴- نتایج و تحلیل نتایج

در این پژوهش برای بررسی کارآمدی الگوریتم‌های موردبررسی، از توابع محک استاندارد استفاده گردیده است (Cheng and Prayogo, 2014). جدول ۱ نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراکاوشی بر روی توابع محک استاندارد را نشان می‌دهد.

نتایج جدول ۱ نشان‌دهنده عملکرد بالای الگوریتم SOS در مقایسه با الگوریتم‌های فراکاوشی دیگر می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در مسائل با ابعاد کوچک عملکرد هر ۳ الگوریتم به‌طور تقریبی یکسان و مناسب می‌باشد. با افزایش بعد مسأله و پیچیدگی آن (تابع Rosenbrock با بعد ۱۰ و ۳۰) عملکرد الگوریتم‌های دیگر به‌خصوص GA سیر نزولی داشته و از مقدار بهینه فاصله گرفته، اما الگوریتم SOS نسبت به ۲ الگوریتم دیگر به مراتب به جواب بهینه نزدیک‌تر بوده و خطای پایین‌تری دارد. همچنین الگوریتم SOS توانسته در زمان کمتری نسبت به دو الگوریتم دیگر به بهینه مطلق دست یابد.

پس از تأیید عملکرد قابل قبول الگوریتم SOS با استفاده از توابع محک استاندارد، به منظور نشان دادن قابلیت‌های الگوریتم پیشنهادی در مسائل مهندسی، مسائل پیچیده و بزرگ مقیاس محک چهار و ده مخزنه با استفاده از الگوریتم‌های مورد بررسی حل شد. نتایج حاصل از ۱۰ اجرای مختلف الگوریتم‌های مورد بررسی در سیستم مخازن محک بر اساس رایانه‌ای با مشخصات (CPU 2.4 GHz/4 GB i5 ram/500 GB HDD) در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند.

مشابه با حالت تعامل دو طرفه، موجود $X_{j,k}$ به صورت تصادفی از اکوسیستم مرتبط با موجود $X_{i,k}$ انتخاب می‌شود. در این شرایط، موجود $X_{i,k}$ تلاش می‌کند که از این ارتباط بیشترین سود را دریافت کند در حالی که موجود $X_{j,k}$ در این رابطه نه سودی می‌برد و نه متحمل ضرری می‌شود. راه‌حل جدید $X_{i,k}$ بر طبق همزیستی هم‌سفرگی بین موجودات $X_{i,k}$ و $X_{j,k}$ از رابطه (۶) محاسبه می‌شود. بر طبق قوانین حاکم بر طبیعت، موجود $X_{i,k}$ فقط وقتی انطباق پیدا می‌کند که میزان برازندگی جدیدش بهتر از برازندگی قبل از تعاملش باشد.

$$X_{i, \text{new}, k} = X_{i, k} + \text{rand}(-1, 1) \times (X_{\text{best}} - X_{j, k}) \quad (6)$$

قسمت $(X_{\text{best}} - X_{j, k})$ ، به سودی که توسط $X_{j, k}$ برای کمک به $X_{i, k}$ به وجود می‌آید گردد تا شانس نجات خود را در اکوسیستم کنونی بیشتر کند.

۳-۳-۳- فاز انگلی^{۱۳}

در SOS، موجود $X_{i,k}$ به وسیله ایجاد انگلی مصنوعی به نام "بردار انگل"^{۱۴}، نقشی انگلی را ایفا می‌کند. همچنین موجود $X_{j,k}$ به عنوان میزبان و به صورت تصادفی از اکوسیستم انتخاب می‌شود. بردار انگل تلاش می‌کند تا $X_{j,k}$ را در اکوسیستم جایجا کند. هر دو موجود ($X_{i,k}$ و $X_{j,k}$) با اندازه‌گیری میزان برازندگی (میزان تابع هدف^{۱۵}) خود مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. اگر بردار انگل برازندگی بیشتری داشته باشد، موجود $X_{j,k}$ را خواهد کشت و جایگاه آن را در اکوسیستم تصاحب می‌کند اما اگر برازندگی $X_{i,k}$ بیشتر باشد، نسبت به انگل در امان خواهد بود و بردار انگل توانایی بیشتری برای زندگی در آن اکوسیستم را نداشته و در آن اکوسیستم جایی ندارد.

همان‌طور که گفته شد، برای ارزیابی توانایی الگوریتم جستجوی موجودات همزیست، نتایج آن با نتایج الگوریتم‌های

Table 1- Performance of metaheuristic algorithms in solving benchmark functions

جدول ۱- عملکرد الگوریتم‌های فراکاوشی در حل توابع محک استاندارد

Function	Dimensions	Global optimum	SOS		GA		PSO	
			Optimal value	CPU time (s)	Optimal value	CPU time (s)	Optimal value	CPU time (s)
Goldsten-Price	2	3	3	1.89	3.0004	8.18	3	6.03
Mccormick	2	-1.9132	-1.9132	5.11	-1.9132	8.066	-1.9132	5.94
Rosenbrock	2	0	5.3×10^{-13}	5.07	2.3×10^{-5}	10.98	0	8.44
Rosenbrock	10	0	2.16×10^{-8}	6.28	4.55	22.82	0.035	19.24
Rosenbrock	30	0	4.05×10^{-8}	10.59	25.52	29.71	0.087	28.28
Shekel	4	-10.5364	-10.5321	5.42	-10.4339	10.13	-10.532	6.1
Six-Hump Camel	2	-1.0316	-1.0316	1.34	-1.0316	5.96	-1.0316	5.83

Table 2- Results of 10 different runs of the four-reservoir system

جدول ۲- نتایج حاصل از ۱۰ اجرای مختلف در سیستم چهار مخزنه

Number of the run	SOS		PSO		GA	
	Optimal value	CPU time (s)	Optimal value	CPU time (s)	Optimal value	CPU time (s)
1	307.8237	311.25	302.6236	649.77	282.8175	2301.95
2	307.1124	633.019	304.7871	413.78	280.8773	2706.14
3	305.6018	453.12	301.5753	631.35	282.2553	1903.83
4	306.8827	396.44	302.3245	613.26	277.7444	1902.11
5	308.2535	418.53	304.6611	599.96	286.9277	1808.45
6	308.2035	528.4	302.9668	575.44	279.774	2705.37
7	308.7625	528.4	304.6658	663.01	294.7569	3918.51
8	307.7873	534.67	303.2507	441.86	290.2545	2372.35
9	308.8114	419.06	302.3353	453.6	283.9267	3260.49
10	305.4295	628.45	300.6436	461.67	282.492	2747.72

Table 3- Results of 10 different runs of the ten-reservoir system

جدول ۳- نتایج حاصل از ۱۰ اجرای مختلف در سیستم ده مخزنه

Number of the run	SOS		PSO		GA	
	Optimal value	CPU time (s)	Optimal value	CPU time (s)	Optimal value	CPU time (s)
1	1182.3531	1413.46	1152.2156	3488.12	976.7165	2874.45
2	1176.3699	3310.08	1154.6668	3403.85	1027.2485	3197.02
3	1180.3323	3536.19	1134.2587	892.98	986.8026	4052.37
4	1190.0227	2753.33	1142.2862	1251.44	974.6125	3300.71
5	1186.99	4917.11	1148.0216	1869.03	1028.3123	4215.31
6	1189.3972	2685.49	1155.3906	2678.47	996.9853	925.66
7	1183.6481	2607.69	1159.0929	2081.36	968.4771	2740.42
8	1171.5651	3155.98	1146.8826	1756.95	988.2665	6698.32
9	1177.703	4145.02	1149.4607	5863.72	1027.9787	4152.21
10	1172.6252	4407.04	1154.6668	2308.55	980.0559	3733.93

۵- خلاصه و جمع‌بندی

در این پژوهش جهت بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنه منابع آب، مدلی مبتنی بر الگوریتم جستجوی موجودات همزیست (SOS) توسعه داده شد. همان‌گونه که نتایج نشان داد در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنه منابع آب، الگوریتم مذکور از کارایی بسیار خوبی برخوردار می‌باشد. مقایسه روند مدل‌سازی الگوریتم مزبور در مقایسه با دو الگوریتم PSO و GA، ضمن تأیید نتایج نشان داد که الگوریتم مورد نظر در این پژوهش، از نظر تطبیق با توابع محک در مرحله اعتبارسنجی، در مقایسه با دو الگوریتم رایج PSO و GA تطابق بهتری دارد. ابتدا به منظور نشان دادن قابلیت‌های الگوریتم پیشنهادی، مسائل پیچیده و بزرگ مقیاس چهار و ده مخزنه محک با استفاده از آن حل و با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که بهترین مقدار تابع هدف حاصل از ۱۰ اجرای مختلف

همانطور که در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است، الگوریتم SOS نسبت به دو الگوریتم مورد بررسی دیگر در حل بهینه سیستم مخازن محک برتری محسوسی داشته و توانسته در زمان کم‌تری مسائل را به بهینه سراسری نزدیک نماید. همچنین در سیستم‌های چهار و ده مخزنه، بهترین نتایج بدست آمده توسط الگوریتم جستجوی موجودات همزیست به ترتیب برابر ۳۰۸/۸۱۱۴ و ۱۱۹۰/۰۲۲۷ بوده است در صورتی که در پژوهش Qaderi et al. (2017) بهترین نتایج بدست آمده توسط الگوریتم چرخه آب پیشنهادی برای سیستم‌های چهار و ده مخزنه به ترتیب برابر ۳۰۶/۳۹۱۸ و ۱۱۷۲/۴۱۹۷ بدست آمده است. نتایج حاکی از برتری قابل توجه الگوریتم جستجوی موجودات همزیست در مسائل پیچیده و بزرگ مقیاس مانند بهره‌برداری از سیستم مخازن می‌باشد.

Ehteram M, Allawi MF, Karami H, Mousavi SF, Emami M, Ahmed ES, Farzin S (2017) Optimization of Chain-reservoirs' operation with a new approach in artificial intelligence. *Water Resources Management* 31(7):2085-2104

Ehteram M, Mousavi SF, Karami H, Farzin S, Emami M, Othman FB, Amini Z, Kisi O, El-Shafie A (2017) Fast convergence optimization model for single and multi-purposes reservoirs using hybrid algorithm. *Advanced Engineering Informatics* 32:287-298

Holland J (1975) *Adaptation in natural and artificial system*. University of Michigan Press

Kennedy J, Eberhart R (1995) Particle swarm optimization (PSO). In *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 1942-1948

Murray DM, Yakowitz SJ (1979) Constrained differential dynamic programming and its application to multireservoir control. *Water Resources Research* 15(5):1017-1027

Nourani V, Abolvaset N, Salehi K (2012) A hybrid goal programming method and adaptive neural-fuzzy inference system for optimal operation of a multi-objective two-reservoir system. *Journal of Iran-Water Resources Research* 8(2):1-11 (In Persian)

Panda A, Pani S (2016) A symbiotic organism search algorithm with adaptive penalty function to solve multi-objective constrained optimization problems. *Applied Soft Computing* 46:344-360

Qaderi K, Arab D, Teshnehlab M, Ghazagh A (2010) Intelligent operation modeling of reservoirs using group method of data handling (GMDH). *Journal of Iran-Water Resources Research* 6(3):55-67 (In Persian)

Qaderi K, Akbarifard S, Madadi MR, Bakhtiari B (2017) Optimal operation of multi-reservoirs by water cycle algorithm. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (pp. 1-12) Thomas Telford Ltd

Tejani G, Savsani V, Patel V (2016) Adaptive symbiotic organisms search (SOS) algorithm for structural design optimization. *Journal of Computational Design and Engineering* 3(3):226-249

الگوریتم‌های SOS، GA و PSO در سیستم چهار مخزنه به ترتیب برابر ۳۰۸/۸۱۱۴، ۲۹۴/۷۵۶۹ و ۳۰۴/۷۸۷۱ و در سیستم ده مخزنه به ترتیب برابر ۱۱۹۰/۰۲۲۷، ۱۰۲۸/۳۱۲۳ و ۱۱۵۹/۰۹۲۹ بوده که حاکی از عملکرد برتر الگوریتم SOS در مسائل پیچیده و بزرگ مقیاس می‌باشد. لذا می‌توان استفاده از الگوریتم SOS را برای تبیین سیاست‌های بهره‌برداری، خصوصاً سامانه‌های چند مخزنی پیچیده، قویاً توصیه نمود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Group Method of Data Handling
- 2- Water Cycle Algorithm
- 3- Genetic Algorithm
- 4- Particle Swarm Optimization
- 5- Shark Algorithm
- 6- Krill Algorithm
- 7- Discrete Dynamic Programming
- 8- Mutualism Phase
- 9- Decision Variables
- 10- Population
- 11- Global Solution
- 12- Commensalism Phase
- 13- Parasitism Phase
- 14- Parasite Vector
- 15- Objective Function Value

۶- مراجع

Baghlani AH, Hajivandi Z (2016) Stabilize the water level in open channels using symbiotic organisms search algorithm. 9th National Congress on Civil Engineering, 10-11 May, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, 1-9 (In Persian)

Bozorg-Haddad O, Azarnivand A, Hosseini-Moghari SM, Loáiciga HA (2017) Optimal operation of reservoir systems with the symbiotic organisms search (SOS) algorithm. *Journal of Hydroinformatics* p.jh2017085

Cheng MY, Prayogo D (2014) Symbiotic organisms search: A new metaheuristic optimization algorithm. *Journal of Computers & Structures* 139:98-112

Chow VT, Cortes-Rivera G (1974) Application of DDDP in water resources planning. WRC RESEARCH REPORT, NO. 78, 89p