

بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن حوزه آبخیز کرخه با استفاده از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست (SOS)

سعید اکبری فرد^۱ و محمدرضا شریفی^{۲*}

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب؛ و استادیار گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
تاریخ دریافت: ۹۶/۶/۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۵

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 با استفاده از روشی مبتنی بر الگوریتم جستجوی موجودات همزیست، به مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های پیچیده چند مخزنی پرداخته شده است. در گام اول، عملکرد موفقیت‌آمیز روش با استفاده از تعدادی تابع محک استاندارد ارزیابی شد. پس از آن به منظور بهره‌برداری ماهانه، از مخازن تنگ‌معشوره، سازبن و کرخه، واقع در حوزه آبخیز کرخه استفاده شد. تخصیص بهینه برای تأمین نیاز آبی چهار منطقه کشاورزی، با اولویت تأمین نیاز آبی زیست‌محیطی برای دوره ۵ ساله (سال آبی ۶۰-۵۹ تا ۶۴-۶۳) در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست، با نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های تکاملی توسعه یافته دیگر، از جمله الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات، مقایسه شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در مقایسه با سیاست‌های حاصل از اعمال الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات، سیاست بهینه شده توسط الگوریتم جستجوی موجودات همزیست با شاخص پایداری ۹۹/۹۹، ۹۹/۱۱، ۸۲/۹۲ و ۷۹/۴۷، عملکرد مناسب‌تری در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنی دارد.

واژه‌های کلیدی

الگوریتم‌های فراکاوشی، سیستم‌های چند مخزنی

مقدمه

مختلفی امکان‌پذیر گردیده است. ارزیابی جامعی از روش‌های مختلف بهینه‌سازی و کاربردهای آنها در مسائل مهندسی آب و به‌ویژه در بهره‌برداری از مخازن، در تحقیقات یه (Yeh, 1985)، سیمونوویچ (Simonovic, 1992) و لابادیه (Labadie, 2004) ارائه شده است. در بسیاری از مسائل مهندسی، به دلیل پیچیده بودن نوع مسئله مورد بررسی و توابع هدف و وجود چندین نقطه بهینه موضعی و تنها یک نقطه بهینه سراسری، روش‌های کلاسیک قادر به تفکیک بین آنها و یافتن نقطه بهینه سراسری نیستند. در چند سال اخیر با

بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها از اولویت‌های برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب است. به لحاظ وجود نیازهای آبی در مناطق متعدد مکانی، سیستم ذخیره‌ای گاهی شامل یک مخزن و گاهی شامل چندین مخزن متوالی روی رودخانه و یا شبکه‌ای از مخازن روی رودخانه‌ها و سرشاخه‌های آن طرح می‌شود. با پیشرفت‌های به‌دست‌آمده در شاخه‌های مختلف علوم و مهندسی، نحوه طرح، برنامه‌ریزی، و بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی منابع آب با استفاده از روش‌های

بهره‌برداری از سیستم مخازن حوزه آبخیز گرگان‌رود، نتایج حاکی از برتری الگوریتم چرخه آب، در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی از جمله الگوریتم‌های GA و PSO است. بزرگ‌حداد و همکاران (Bozorg-Haddad et al., 2017) برای بهره‌برداری بهینه از مخزن از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست استفاده کردند. در این پژوهش، از مخزن سد کارون ۴ به‌عنوان گزینه تک‌مخزنی و از سیستم چهار مخزنی محک به‌عنوان گزینه چند مخزنی استفاده گردید. نتایج پژوهش‌ها برتری الگوریتم جستجوی موجودات همزیست را نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و چرخه آب در هر دو سیستم تک مخزنی و چهار مخزنی نشان می‌دهد. احترام و همکاران (Ehteram et al., 2017) به بهره‌برداری از مخزن و نیروگاه برای مدیریت بهتر منابع آب و تولید انرژی برقی، با استفاده از الگوریتم کوسه پرداختند. به این منظور از مخزن کارون ۴، سیستم چهار و ده مخزنی محک و همچنین سیستم مخازن برقابی در چین استفاده کردند. نتایج بررسی‌ها از برتری مطلق الگوریتم کوسه در هر چهار مسئله مورد بررسی، نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات، حکایت دارد.

یکی از روش‌های مؤثر بهینه‌سازی که چنگ و پرایوگو (Cheng & Prayogo, 2014) ارائه داده‌اند، الگوریتم جستجوی موجودات همزیست (SOS) است. تران و همکاران (Tran et al., 2015) برای بهینه‌سازی شیفتهای کاری در پروژه‌های ساختمانی با اهداف معاوضه میان مدت زمان پروژه، هزینه پروژه و استفاده از شیفتهای کار ظهر و شب، از الگوریتم چندهدفه جستجوی موجودات همزیست استفاده کردند. نتایج بررسی‌ها نشان‌دهنده قدرت بالای الگوریتم فوق در بهینه‌سازی برنامه شیفتهای کاری است که می‌تواند در انتخاب طرح مناسب پروژه به مدیران کمک کند. بقلانی و حاجی‌وندی (Baghlani & Hajivandi, 2016) برای به حداقل رساندن نوسانات تراز سطح آب در کانال‌های انتقال آب دارای ایستگاه پمپاژ، از الگوریتم

ابداع روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم که در آنها اغلب جستجو بر اساس مجموعه‌ای از جواب‌ها (جمعیت) است، می‌توان در مسائل بسیار پیچیده پاسخ‌های تقریبی بسیار نزدیک به پاسخ‌های بهینه سراسری را پیدا کرد. از جمله این روش‌ها می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، جستجوی ممنوعه (TS)، کلنی مورچگان (ACO)، ازدحام ذرات (PSO)، و جستجوی موجودات همزیست^۱ (SOS) اشاره کرد. کاربردهای متعددی از روش‌های فوق در منابع آب و به‌ویژه بهره‌برداری بهینه از مخازن گزارش شده است.

ایسات و هال (Esat & Hall, 1994) کاربرد مدل GA را با برنامه‌ریزی پویا در یک سیستم چهار مخزنی مقایسه و این مدل را به لحاظ نیازهای محاسباتی کاملاً برتر گزارش کردند. واردلو و شریف (Wardlaw & Sharif, 1999) از GA برای بهینه‌سازی سامانه‌ای چهار مخزنی استفاده کردند. قادری و همکاران (Qaderi et al., 2010) از روش برخورد گروهی با داده‌ها (GMDH) برای بهره‌برداری سیستماتیک از مخازن چندگانه موجود در دشت تهران بهره‌گیری کردند. نورانی و همکاران (Nourani et al., 2012) نیز از ترکیب مدل برنامه‌ریزی آرمانی و سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در بهره‌برداری بهینه از سیستم دو مخزنی حوزه آبخیز سفیدرود استفاده کردند. قادری و همکاران (Qaderi et al., 2017) با استفاده از الگوریتم چرخه آب (WCA) به بهره‌برداری از سیستم مخازن پرداختند. در این پژوهش، ابتدا مسائل چهار و ده مخزنه محک با استفاده از الگوریتم چرخه آب حل شد؛ پس از آن، از این الگوریتم در حل مسئله بهره‌برداری از سیستم مخازن حوزه آبخیز گرگان‌رود استفاده گردید. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که الگوریتم چرخه آب توانست با ۵/۰ و ۱ درصد اختلاف نسبت به بهینه سراسری در مسائل چهار و ده مخزنی تخمین مناسبی از بهینه سراسری داشته باشد. در مسئله

جستجوی موجودات همزیست در مسائل بزرگ‌مقیاس که پیشتر در اموری مانند حل مسائل بهینه‌سازی مقید چندهدفه و بهینه‌سازی طراحی سازه، عملکرد قابل قبولی داشته‌اند، به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید در بهره‌برداری از مخازن، که پیش از این در سامانه آبی مورد بررسی استفاده نشده است، پرداخته شد. تعدد سدها و ضرورت مدیریت صحیح سامانه پیچیده مورد بررسی واقع در سرشاخه‌های کارون و همچنین اهمیت تالاب‌های پایین‌دست رودخانه کارون و تأثیر بسزایی که این رودخانه بر تالاب‌ها دارد، از جمله دلایل انتخاب محدوده مطالعاتی بوده است. به‌همین منظور مدلی بر اساس الگوریتم SOS در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB R2014a توسعه داده شد. نتایج به‌دست آمده از مدل توسعه داده شده با استفاده از شاخص‌های عملکرد مخزن شامل اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری ارزیابی و نیز نتایج به‌دست آمده از الگوریتم موردبررسی با نتایج به‌دست آمده از الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

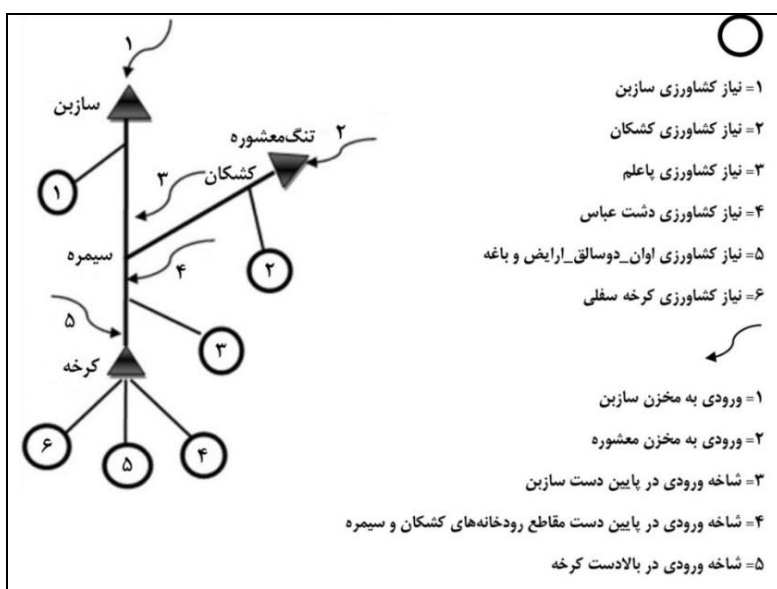
حوزه آبخیز رودخانه کرخه در محدوده مختصات جغرافیایی 23° - 46° تا 12° - 49° طول شرقی و 33° - 40° تا 0° - 35° عرض شمالی قرار دارد. شاخه‌های اصلی رودخانه کرخه عبارت‌اند از رودخانه‌های گاماسیاب، قره‌سو، حد فاصل کشکان و سیمره و کرخه تا محل تخلیه به مرداب هورالعظیم است. سدهای مورد مطالعه در سامانه آبی عبارت‌اند از سد مخزنی کرخه با ظرفیت مخزن ۷۳۰۰ میلیون مترمکعب و با اهداف کنترل سیلاب و تأمین آب دشت‌های اوان، دوسالق، ارایض و باغه و دشت‌های حمیدیه، قدس، دشت آزادگان، دشت عباس، فکه و عین خوش و همچنین تولید انرژی برقی است که از

جستجوی موجودات همزیست استفاده کردند. مقایسه نتایج نشان داده است که هیدروگراف ورودی به‌دست آمده از این روش نسبت به روش‌های پیچیده تحلیلی، نوسانات تراز سطح آب را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. پاندا و پانی (Panda & Pani, 2016) با استفاده از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست به حل مسائل بهینه‌سازی مقید چندهدفه پرداختند. این محققان از دوازده مسئله معیار چندهدفه نامقید و شش مسئله مقید بهره بردند و برای بررسی و رسیدگی به برابری و نابرابری در محدودیت‌ها از تابع پنالتی تطبیقی استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده از ۵۰ اجرای مختلف نشان‌دهنده برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های چندهدفه بهینه‌سازی اجسام در حال برخورد (MOCBO)، الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO)، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA)، الگوریتم چندهدفه گرادیان جستجوگر (MGE)، و الگوریتم چندهدفه گرادیان مسیریاب (MGP) بوده است. تجانی و همکاران (Tejani et al., 2016) برای بهینه‌سازی طراحی سازه از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست استفاده کردند. نتایج تحقیقات آنها حاکی از عملکرد مناسب و کارآمدتر الگوریتم SOS، در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی، بوده است.

همان‌طور که در پیشینه پژوهش نیز نشان داده شد، امروزه روش‌های هوشمند از جمله الگوریتم‌های فراکاوشی به‌دلیل قابلیت‌های متعدد نظیر سرعت عمل، دقت بالا، سهولت اجرا، انعطاف‌پذیری، نیاز به اطلاعات ورودی کمتر، قابلیت حل مسائل پیچیده و دارای ابعاد بالا در تمامی مسائل مهندسی و به‌طور خاص در مسئله بهره‌برداری از سیستم مخازن ورود کرده‌اند و همواره به‌عنوان روشی موفق ظاهر شده‌اند. از سوی دیگر، با توجه به محدودیت تعدادی از الگوریتم‌ها در مواجهه با مسائل با متغیرهای تصمیم زیاد، قابلیت کاربردی و دقت بالای الگوریتم

برای تأمین نیازهای چهار منطقه کشاورزی، پایین‌دست مخزن سازین، پایین‌دست مخزن تنگ‌معشوره، بالادست و پایین‌دست مخزن کرخه است. در پایین‌دست هر مخزن، تأمین نیازهای زیست‌محیطی در رودخانه به‌عنوان نیاز الزامی و با اولویت بالا، نسبت به مصارف کشاورزی، در نظر گرفته شده است. نیازهای زیست‌محیطی ماهانه در چهار بازه از رودخانه شامل پایین‌دست مخزن سازین، پایین‌دست مخزن تنگ‌معشوره، بالادست مخزن کرخه، و پایین‌دست مخزن کرخه در نظر گرفته شده است.

بهمن ۱۳۷۸ آگیری شده است. سد سازین با حجم ۱۶۰۹ میلیون مترمکعب و سد تنگ‌معشوره روی رودخانه کشکان در استان چهارمحال و بختیاری با حجم ۹۵۰ میلیون مترمکعب، از دیگر سدهای مورد مطالعه در سامانه تحقیق حاضر هستند. گفتنی است که سدهای سازین و تنگ‌معشوره در فاز مطالعاتی هستند (در مرحله ساخت قرار نگرفته‌اند). شکل ۱ پیکربندی سیستم مخازن مورد نظر در تحقیق را نشان می‌دهد. سامانه مورد مطالعه شامل بهره‌برداری بهینه از مخازن سازین، تنگ‌معشوره و کرخه



شکل ۱- پیکربندی سیستم سه مخزنی کرخه همراه با نیازها

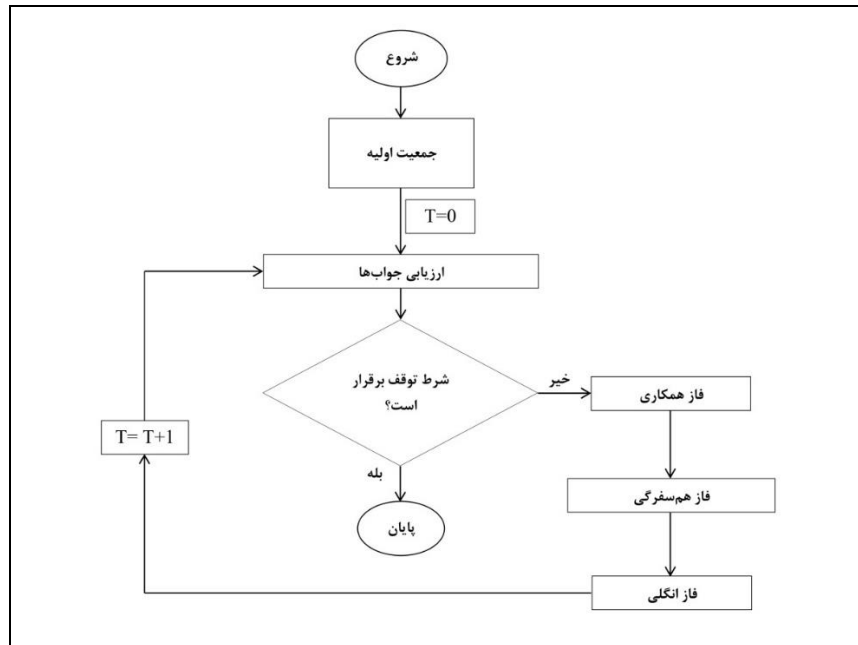
روند تکامل طبیعی را شبیه‌سازی می‌کند. الگوریتم SOS واکنش‌های همزیستی بین دو گونه را شبیه‌سازی می‌کند، به نحوی که یک گونه تلاش می‌کند تا مناسب‌ترین موجود را پیدا کند. مانند دیگر الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت، الگوریتم SOS مکرراً جمعیتی از کاندیداها را برای یافتن مناطقی به‌عنوان جواب بهینه در محدوده کلی جواب ایجاد می‌کند. این جمعیت معادل سناریوهای رهاسازی بهینه در هر دوره، در مسئله بهره‌برداری بهینه از سامانه مخازن است. الگوریتم SOS با یک جمعیت اولیه به نام اکوسیستم کار خود را آغاز می‌کند. در اکوسیستم اولیه، گروهی از

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 & Prayogo, 2014). موجودات به‌علت تکیه بر دیگر گونه‌ها برای گذراندن زندگی و حتی بقا، به‌ندرت در انزوا زندگی می‌کنند. این رابطه مبتنی بر اعتماد، همزیستی شناخته می‌شود. الگوریتم‌های فراکاوشی جدید تقلیدی از پدیده‌های طبیعی هستند. برای مثال، الگوریتم گروه ذرات (PSO) رفتار ازدحامی حیوانات و الگوریتم ژنتیک (GA)

(استفاده متقابل)، هم‌سفرگی، و انگلی معرفی می‌شود که شبیه به مدل تعاملی بیولوژیکی در دنیای واقعی است. هویت هر تعامل، مبتنی بر نوع تعامل تعریف می‌شود. به این ترتیب که سود دو طرفه بیانگر فاز همکاری، سود یک طرفه مبین فاز هم‌سفرگی و سود یک طرفه و زیان طرف دیگر نشان‌دهنده فاز انگلی است. در همه فازها، هر موجود به صورت تصادفی با موجود دیگر تعامل می‌کند. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که معیار خاتمه فرآیند (رسیدن به حداکثر تعداد تکرار) برآورده شود. روند کلی الگوریتم SOS در شکل ۲ را آورده شده است.

موجودات (متغیر تصمیم) به‌طور تصادفی در فضای جستجو تولید می‌شوند. هر موجود زنده به‌عنوان یک پیشنهاد از راه‌حل مسئله، که با میزان برآزش خاصی در ارتباط است، نشان‌دهنده درجه انطباق با هدف مورد نظر (مقدار تابع هدف) است. تقریباً تمام الگوریتم‌های فراکاوشی در هر تکرار، عملکرد جایگزینی را برای حل مسئله اعمال می‌کنند تا راه‌حل جدیدی برای تکرار بعدی به‌وجود آورند. برای مثال، یک الگوریتم ژنتیک استاندارد از دو عملگر ادغام و جهش برای این منظور استفاده می‌کند. در SOS، تولید راه‌حل جدید با تقلید تعامل بیولوژیک بین دو موجود در اکوسیستم اداره می‌شود. سه فاز همکاری



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم SOS

ارگانیسم $X_{i,k}$ انتخاب می‌شود. هر دو موجود در رابطه تعامل، با هدف افزایش مزایای بقای دو طرفه در اکوسیستم شرکت می‌کنند. راه‌حل‌های جدید برای $X_{i,k}$ و $X_{j,k}$ بر اساس همکاری تعاملی بین آن دو با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌شود:

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

فاز همکاری: در SOS، ارگانیسم $X_{i,k}$ موجودی است k بعدی (تعداد متغیرهای تصمیم) که با i آمین عضو محیط (جمعیت) همخوانی دارد. مقدار i با استفاده از یک حلقه از یک شروع می‌شود و تا اندازه جمعیت ادامه دارد ($i=1,2,\dots,N$) و پارامتر k نشان‌دهنده ابعاد موجود یا به عبارتی دیگر نشان‌دهنده تعداد متغیرهای تصمیم مسئله است. ارگانیسم $X_{j,k}$ نیز به‌صورت تصادفی برای همکاری با

توانایی و انطباق خود در محیط‌زیست روبه‌رو هستند. بعضی از آنها از رابطه همزیستی با موجودی دیگر برای افزایش امتیاز بقا استفاده می‌کنند. در اینجا هدف به‌دست آوردن X_{best} است زیرا X_{best} دارای بیشترین درجه انطباق با نقطه بهینه سراسری است. بنابراین، X_{best} (راه‌حل سراسری) برای مدل کردن بالاترین درجه انطباق به عنوان نقطه نهایی و افزایش برآزش هر دو موجود استفاده می‌شود. سرانجام، موجود زمانی انطباق پیدا می‌کند که میزان برآزندگی جدیدش نسبت به قبل از تعاملش بهتر باشد.

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

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

قسمت $(X_{best} - X_{j,k})$ به سودی برمی‌گردد که $X_{j,k}$ برای کمک به $X_{i,k}$ به وجود می‌آورد تا شانس نجات خود را در اکوسیستم کنونی بیشتر کند، و $\text{rand}(-1,1)$ یک بردار از اعداد تصادفی بین بازه -۱ و ۱ است.

فاز انگلی: در SOS، موجود $X_{i,k}$ با ایجاد انگلی مصنوعی به نام "بردار انگل"، نقشی شبیه به پشه آنوفل بازی می‌کند. بردار انگل در فضای جستجو با تکثیر موجود $X_{i,k}$ به‌وجود می‌آید، پس از آن، تغییرات بر اساس انتخاب تصادفی و با استفاده از یک عدد تصادفی روی آن رخ می‌دهد. موجود $X_{j,k}$ به‌عنوان میزبان و به‌صورت تصادفی از اکوسیستم انتخاب می‌شود. بردار انگل تلاش می‌کند تا

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

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

که در آنها،

$X_{i,k}$ = آرگانسیم‌های k بعدی که با آمین و زامین 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 بین بازه صفر و یک. نقش BF_1 و BF_2 به شرح زیر است.

در طبیعت، بعضی از روابط تعاملی ممکن است برای یک طرف سود بیشتری داشته باشد تا برای طرف دیگر، مثلاً موجود A ممکن است نسبت به موجود B سود بسیار بیشتری ببرد. در همین حال موجود B به سود خود بسنده می‌کند یا سود قابل توجهی نمی‌برد. در اینجا، فاکتور سود (BF_1 و BF_2) به‌صورت 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. 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 در آن، rand عددی تصادفی بین صفر و یک است. رابطه ۳ برداری را نشان می‌دهد که به آن بردار متقابل گفته می‌شود و خصوصیات ارتباطی بین $X_{i,k}$ و $X_{j,k}$ را نشان می‌دهد. قسمتی از رابطه $(X_{best} - \text{Mutual Vector} \times \text{BF}_1)$ به اثر تعاملی برمی‌گردد که با این تعامل و همکاری، چه میزان هدف بقا برای دو طرف به‌دست خواهد آمد. بر اساس فاز همکاری، همه موجودات با افزایش

بردار انگل (PV) به صورت تصادفی و با استفاده از رابطه ۹ در نظر گرفته می‌شود:

$$PV_{i,k} = \text{rand}(0,1) \times (UB - LB) + LB \quad (9)$$

که در آن،

UB و LB = به ترتیب حدود بالا و پایین متغیرهای تصمیم مسئله مورد بررسی.

همان‌طور که گفته شد، برای ارزیابی توانایی الگوریتم جستجوی موجودات همزیست، نتایج آن با نتایج الگوریتم‌های ژنتیک (Holland, 1975) و ازدحام ذرات (Kennedy & Eeberhart, 1995) مقایسه شد. با توجه به شناخته بودن الگوریتم‌های مذکور، تنها به ارائه منابع آن‌ها برای مطالعه بیشتر خوانندگان اکتفا می‌شود.

حداکثر تعداد تکرار به عنوان معیار همگرایی در این پژوهش با تحلیل حساسیت برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. الگوریتم‌های SOS، PSO و GA در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB R2014a کدنویسی شد. همچنین برای بررسی کارآمدی الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن، از شاخص‌های عملکرد مخزن شامل اعتمادپذیری زمانی و حجمی، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری استفاده و در نهایت شاخص پایداری جهت انتخاب سناریو برتر تعریف گردید.

مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن

در این پژوهش، تابع هدف به صورت حداقل‌سازی میزان کمبود اعمال شده نسبت به یک نیاز مشخص تعریف شده است. متغیرهای تصمیم در مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخازن، مقادیر خروجی بهینه ماهانه از مخازن هستند که با توجه به افق برنامه‌ریزی پژوهش، (۶۰ ماه)، مسئله مورد بررسی دارای ۲۴۰ بعد یا متغیر

$X_{j,k}$ را در اکوسیستم جابه‌جا کند. هر دو موجود ($X_{i,k}$ و $X_{j,k}$) با اندازه‌گیری میزان برازندگی (میزان تابع هدف) خود ارزیابی خواهند شد. بردار انگل اگر برازندگی بیشتری داشته باشد، موجود $X_{j,k}$ را خواهد کشت و جایگاه آن را در اکوسیستم تصاحب می‌کند. اما اگر برازندگی $X_{j,k}$ بیشتر باشد، $X_{j,k}$ نسبت به انگل در امان خواهد بود و بردار انگل توان بیشتر و بالطبع جایی برای زندگی در آن اکوسیستم ندارد. مراحل فاز انگلی به شرح زیر است:

- ۱- موجود $X_{i,k}$ یک انگل در نظر گرفته می‌شود که یک بردار انگل (PV) ایجاد می‌کند.
- ۲- موجود $X_{j,k}$ به عنوان میزبان و به صورت تصادفی از اکوسیستم انتخاب می‌شود.
- ۳- میزان برازش یا تابع هدف برای بردار انگل و $X_{j,k}$ ارزیابی می‌شود.
- ۴- اگر مقدار تابع هدف بردار انگل بهتر از مقدار آن در میزبان باشد، میزبان حذف می‌شود و انگل جایگاه آن را تصاحب می‌کند.
- ۵- اگر مقدار تابع هدف میزبان از مقدار آن در بردار انگل بهتر باشد، میزبان قدرت کافی برای محافظت از خود را دارد و انگل حذف می‌شود.
- ارگانیسم‌هایی که قدرت کافی برای بقا دارند و برای انتقال به مرحله بعد انتخاب می‌شوند، با استفاده از رابطه ۷ به دست می‌آیند:

$$PX_{p \times m} = [A_i]^T; \forall i \in [1, p] \quad (7)$$

که در آن، ماتریس $PX_{p \times m}$ به عنوان ارگانیسم‌های مرحله بعد انتخاب می‌شوند و A_i از رابطه ۸ قابل محاسبه است:

$$A_i = \begin{cases} X_{j,k} & \text{if } f(X_{j,k}) < f(PV) \\ PV_{i,k} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$; \forall j \in [1, p] \text{ and } j \neq i$

$$S_{1,t+1} = S_{1,t} + Q_{1,t} - Re_{1,t} - Sp_{1,t} - Loss_{1,t} \quad (14)$$

$$S_{2,t+1} = S_{2,t} + Q_{2,t} - Re_{2,t} - Sp_{2,t} - Loss_{2,t} \quad (15)$$

$$S_{3,t+1} = S_{3,t} + Q_{3,t} + Q_{4,t} + Sp_{1,t} + Sp_{2,t} + Dez_{1,t} + Dez_{2,t} - Re_{3,t} \quad (16)$$

$$S_{4,t+1} = S_{4,t} + Q_{5,t} + S_{3,t} + Dez_{3,t} - Re_{4,t} - Sp_{4,t} - Loss_{4,t} \quad (17)$$

تصمیم است. فرمولاسیون تابع هدف و قیود به صورت زیر است، رابطه ۱۰ بیانگر تابع هدف و روابط ۱۱ تا ۲۱ بیانگر قیود مسئله‌اند:

$$\text{Minimize } F(Re) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^4 (Re_{i,t} - De_{i,t})^2 + \text{Penalty}_{i,t} \quad (10)$$

که در آن،

• $F(Re)$ = مقدار تابع هدف (کمبود)؛ $Re_{i,t}$ = حجم رهاسازی؛

• برای نیاز نام در ماه t ؛ $De_{i,t}$ = مقدار نیاز نام در ماه t ؛ $T =$

طول دوره بهره‌برداری؛ $i =$ شماره‌دهنده نیاز که $i=1$ نیاز

پایین دست سد سازین، $i=2$ نیاز پایین دست سد

تنگ‌معشوره، $i=3$ نیاز بالادست سد کرخه، و $i=4$ نیاز

پایین دست سد کرخه؛ $\text{Penalty}_{i,t}$ = مقداری که برای در

نظر گرفتن عدم رعایت هر یک از قیود مسئله در هر بار

تکرار، و اصلاح آن در تکرارهای بعدی در الگوریتم، تحت

عنوان جریمه، به تابع هدف افزوده می‌شود تا به این ترتیب

به محض تأمین نشدن هر یک از قیود، خطای ناشی از آن

در مرحله بعد اصلاح گردد.

محدودیت‌های سیستم چند مخزنه مورد مطالعه در

روابط ۱۱ تا ۲۱ آورده شده است. قید مربوط به حجم

سرریز به صورت رابطه ۱۱ اعمال می‌شود:

$$Sp_{i,t} = \begin{cases} S_{i,t} - S_{\max i} + S_{\min i} & \text{if } S_{i,t} > (S_{\max i} - S_{\min i}) \\ 0 & \text{if } S_{i,t} \leq (S_{\max i} - S_{\min i}) \end{cases} \quad (11)$$

$$Loss_{i,t} = Ev_{i,t} \times \left(\frac{A_{i,t} + A_{i,t+1}}{2} \right) \quad (12)$$

$$A_{i,t} = a + b \times S_{i,t} + c \times S_{i,t}^2 \quad (13)$$

رابطه پیوستگی: در تمامی مراحل بهینه‌سازی بهره‌برداری

از مخزن باید موازنه جرمی بین مقادیر ورودی و خروجی و

حجم ذخیره مخزن برقرار باشد.

محدودیت متغیرهای تصمیم

$$S_{\min i} \leq S_{i,t} \leq S_{\max i} \quad (18)$$

$$Re_{\min i,t} \leq Re_{i,t} \leq Re_{\max i,t} \quad (19)$$

$$0 \leq Sp_{i,t} \leq Sp_{\max i} \quad (20)$$

تابع جریمه مربوط به حجم مخازن

$$\text{Penalty}_i = \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^4 \left(\frac{S_{i,t} - S_{\min i}}{S_{\min i}} \right)^2 & \text{if } S_{i,t} < S_{\min i} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^4 \left(\frac{S_{i,t} - S_{\max i}}{S_{\max i}} \right)^2 & \text{if } S_{i,t} > S_{\max i} \\ 0 & \text{if } S_{i,t} \geq S_{\min i} \text{ and } S_{i,t} \leq S_{\max i} \end{cases} \quad (21)$$

که در آنها،

$Sp_{i,t}$ = مقدار آب سرریز شده از مخزن سد نام در ماه t ؛

$S_{i,t}$ = حجم مخزن سد نام در ابتدای دوره t ؛ $S_{i,t+1}$ = حجم

مخزن سد i نام در انتهای دوره t ؛ $S_{\max i}$ = حجم مخزن سد

نام در رقوم حداکثر؛ $S_{\min i}$ = حداقل حجم مخزن سد نام؛

$Q_{i,t}$ = حجم آب ورودی به مخزن سد نام در ماه t ؛

$Loss_{i,t}$ = میزان تلفات مخزن سد نام در ماه t (که تلفات

از مخزن به صورت تبخیر و با در نظر گرفتن روابط توانی

سطح-حجم مخزن بر اساس رابطه ۱۲ محاسبه شده که

$A_{i,t}$ و $A_{i,t+1}$ به ترتیب میزان سطح آب مخزن نام در ابتدا و

انتهای دوره نام بر حسب کیلومتر مربع است)؛ $Ev_{i,t}$

= میزان تبخیر از سطح مخزن نام در دوره نام (متر)؛ a و b

بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن حوزه آبخیز...

$$\alpha_v = \frac{Re_{Total}}{De_{Total}} \times 100 \quad (23)$$

که در آن،

Re_{Total} = مقدار حجم رهاسازی در کل دوره؛ و
 De_{Total} = مقدار کل نیاز مخزن.

آسیب‌پذیری: این شاخص نشان‌دهنده بزرگی شکست‌های سیستم است که از رابطه ۲۴ محاسبه می‌شود
 (Hashimoto et al., 1982)

$$Val = \max \left\{ \frac{(De_t - Re_t)}{De_t} \right\} \times 100, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (24)$$

که در آن،

Val = آسیب‌پذیری سیستم؛ De_t = مقدار نیاز در دوره t ؛
 Re_t = مقدار خروجی در دوره t ؛ و T = تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری.

برگشت‌پذیری: این شاخص توانایی سیستم در تغییر شرایط موجود را نشان می‌دهد. احتمال اینکه سیستم پس از شکست به حالت مطلوب برگردد برگشت‌پذیری گویند
 (Hashimoto et al., 1982). این پارامتر از رابطه ۲۵ محاسبه می‌شود:

$$Res = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{N(Def_{t+1} = 0 | Def_t > 0)}{N(Def_t > 0)}}{T} \times 100, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (25)$$

T تعداد دوره‌هایی است که شرط درون پرانتز در آنها اتفاق افتاده و Def_t کمبود در دوره t است.

شاخص پایداری: این شاخص جمع‌بندی معیارهای عملکرد سیستم در یک شاخص کلی برای تسهیل در مقایسه و تصمیم‌گیری بین سناریوهای مختلف بر اساس شاخص‌های عملکرد مخزن است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود (Sandoval-Solis et al., 2011):

و c = ضرایب ثابت تبدیل حجم ذخیره مخزن λ ام به سطح متناظر آن در ابتدای همان دوره؛ $De_{i,t}$ = نیاز زیست‌محیطی سد i ام در ماه t ؛ $Re_{mini,t}$ = حداقل رهاسازی سد i ام در ماه t ؛ $Re_{maxi,t}$ = حداکثر رهاسازی سد i ام در ماه t ؛ Sp_{maxi} حداکثر رهاسازی ممکن از سد λ ام.
 با استفاده از این مدل، مسئله برای یک دوره پنج‌ساله (۶۰ ماه) از سال آبی ۶۰-۱۳۵۹ تا ۶۳-۱۳۶۳ حل شده است. مسیر بهینه بهره‌برداری شامل میزان بهینه تأمین هر یک از نیازها در طول این ماه‌ها بوده است.

شاخص‌های عملکرد مخزن

ارزیابی سیاست‌های بهره‌برداری، آخرین و مهم‌ترین گام در استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی برای بهره‌برداری از مخازن است.

اعتمادپذیری: اعتمادپذیری را می‌توان به دو صورت زمانی و حجمی تعریف کرد. منظور از اعتمادپذیری زمانی، درصد دوره‌هایی است که سیستم به‌طور کامل نیازهای موجود را تأمین می‌کند و با شکست روبه‌رو نمی‌شود. مقدار این پارامتر از رابطه ۲۲ محاسبه می‌شود:

$$Rel = \left(1 - \frac{NDef}{T} \right) \times 100, \quad NDef = \text{تعداد } (De_t > Re_t) \quad (22)$$

که در آن،

$NDef$ = تعداد کل شکست‌ها در دوره بهره‌برداری؛
 De_t = مقدار نیاز در دوره t ؛ Re_t = مقدار خروجی دوره t ؛ و
 Rel = اعتمادپذیری سیستم در دوره بهره‌برداری.

هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، اعتمادپذیری زمانی سیستم بیشتر خواهد بود. اعتمادپذیری حجمی آن مقدار حجم رهاسازی در کل دوره نسبت به مقدار کل نیاز مخزن است و از رابطه ۲۳ محاسبه می‌شود. می‌توان اعتمادپذیری را به‌صورت متمم ریسک مطرح کرد (اعتمادپذیری - ۱ = ریسک) (Hashimoto et al., 1982):

نتایج و بحث

الگوریتم‌های فراکاوشی روی توابع محک استاندارد را نشان می‌دهد. تعداد اعضای جمعیت اولیه در هر الگوریتم یکسان و متناسب با بعد هر تابع و تعداد تکرارها برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش، برای بررسی کارآمدی الگوریتم‌های موردبررسی، از توابع محک استاندارد استفاده شده است (Cheng & Prayogo, 2014). جدول ۱ نتایج پیاده‌سازی

جدول ۱- نتایج پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراکاوشی روی توابع محک استاندارد

PSO		GA		SOS		مقدار هدف	بعد	تابع
زمان اجرا (ثانیه)	مقدار بهینه	زمان اجرا (ثانیه)	مقدار بهینه	زمان اجرا (ثانیه)	مقدار بهینه			
۶/۰۳	۳	۸/۱۸	۳/۰۰۰۴	۱/۸۹	۳	۳	۲	Goldsten-Price
۵/۹۴	-۱/۹۱۳۲	۸/۰۶۶	-۱/۹۱۳۲	۵/۱۱	-۱/۹۱۳۲	-۱/۹۱۳۳	۲	Mccormick
۸/۴۴	۰	۱۰/۹۸	$۲/۳ \times ۱۰^{-۵}$	۵/۰۷	$۵/۳ \times ۱۰^{-۱۳}$	۰	۲	Rosenbrock
۱۹/۲۴	۰/۰۳۵	۲۲/۸۲	۴/۵۵	۶/۲۸	$۲/۱۶ \times ۱۰^{-۸}$	۰	۱۰	Rosenbrock
۲۸/۲۸	۰/۰۸۷	۲۹/۷۱	۲۵/۵۲	۱۰/۵۹	$۴/۰۵ \times ۱۰^{-۸}$	۰	۳۰	Rosenbrock
۵۸/۴۱	۱۶۱/۷۱	۷۳/۹۷	۱۶۴۶۰/۸۴	۲۸/۲۸	۳۲/۸۳	۰	۱۰۰	Rosenbrock
۶/۱	-۱۰/۵۳۲	۱۰/۱۳	-۱۰/۴۳۳۹	۵/۴۲	-۱۰/۵۳۲۱	-۱۰/۵۳۶۴	۴	Shekel
۵/۸۳	-۱/۰۳۱۶	۵/۹۶	-۱/۰۳۱۶	۱/۳۴	-۱/۰۳۱۶	-۱/۰۳۱۶	۲	Six-Hump Camel

مخازن کرخه با ۲۴۰ بعد (متغیر تصمیم) استفاده شد. ابتدا برای محاسبه بهترین مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن، تحلیل حساسیت روی این پارامترها صورت گرفت که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن کرخه در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۴ نیز روند همگرایی مقدار جریمه را در جمعیت آخر نشان می‌دهد.

در شکل ۳ دیده می‌شود که الگوریتم‌های مورد بررسی تقریباً از تکرار ۲۰۰ به بعد همگرا شده‌اند و جواب نهایی بهبود قابل توجهی در تکرارهای بالاتر نداشته است. الگوریتم SOS نیز نسبت به دو الگوریتم دیگر عملکرد مناسب‌تری در فرآیند بهینه‌سازی داشته است.

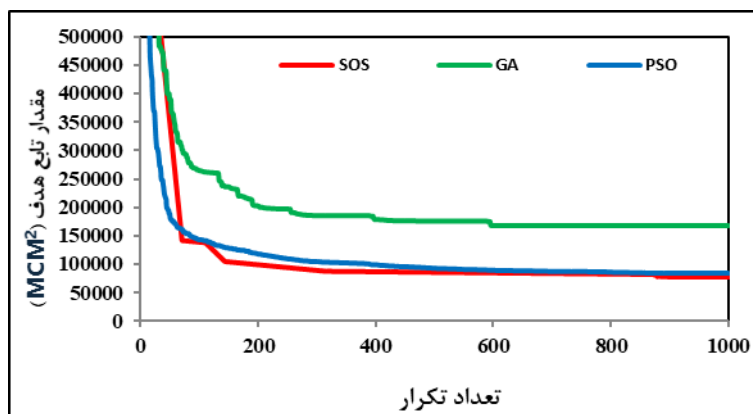
نتایج به‌دست آمده از ۱۰ اجرای مختلف الگوریتم‌های مورد بررسی در سیستم مخازن کرخه در جدول ۳ نشان داده شده است.

نتایج جدول ۱ نشان‌دهنده عملکرد بالای الگوریتم SOS در مقایسه با الگوریتم‌های فراکاوشی دیگر است. در این جدول مشاهده می‌شود که در مسائل با ابعاد کوچک عملکرد هر ۳ الگوریتم به‌طور تقریبی یکسان و مناسب است. با افزایش بعد مسئله و پیچیدگی آن (تابع Rosenbrock با بعد ۳۰ و ۱۰۰)، عملکرد الگوریتم‌های دیگر به‌خصوص GA سیر نزولی دارد و از مقدار بهینه فاصله می‌گیرد، اما الگوریتم SOS نسبت به ۲ الگوریتم دیگر به مراتب به جواب بهینه نزدیک‌تر است و خطای پایین‌تری دارد. همچنین، الگوریتم SOS توانسته در مدت زمان کمتری نسبت به دو الگوریتم دیگر به بهینه سراسری دست یابد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در جدول ۱، به نظر می‌رسد الگوریتم SOS در مسائل بزرگ مقیاس مثل بهره‌برداری از سامانه مخازن قابلیت کافی داشته باشد. پس از بررسی صحت و عملکرد الگوریتم‌های مورد استفاده با توابع محک استاندارد، از این الگوریتم‌ها برای حل مسئله پیچیده بهره‌برداری از سیستم

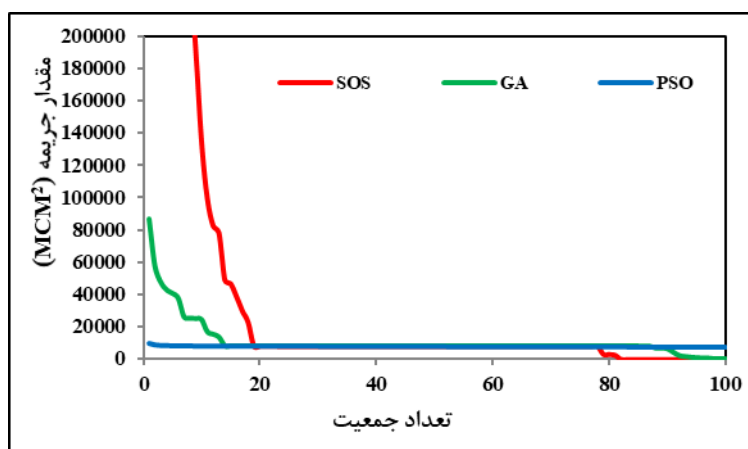
بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن حوزه آبخیز...

جدول ۲- مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های مورد بررسی در سیستم مخازن کرخه

SOS	پارامتر	تعداد تکرار	اندازه جمعیت	تعداد ارزیابی تابع هدف	BF1	BF2
	مقدار	۱۰۰۰	۵۰	۵۰۰۰۰	۱ یا ۲	۱ یا ۲
PSO	پارامتر	تعداد تکرار	اندازه جمعیت	تعداد متغیر تصمیم	C1	C2
	مقدار	۱۰۰۰	۳۰۰	۲۴۰	۱/۴۹	۱/۴۹
GA	پارامتر	تعداد تکرار	اندازه جمعیت	تعداد ژن‌ها	میزان جهش	میزان تزویج
	مقدار	۱۰۰۰	۳۰۰	۲۴۰	۰/۰۱	۰/۸



شکل ۳- روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی



شکل ۴- روند همگرایی مقدار جریمه در جمعیت آخر

اجرای مدل بهره‌برداری از سیستم مخازن سدهای سازبن، تنگ‌معشوره، و کرخه با تابع هدف حداقل کردن کمبود کل برای دوره ۶۰ ماهه (سال آبی ۶۰-۵۹ تا ۶۴-۶۳) ارائه می‌شود. نتایج بهترین مقدار تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخزن حاصل از اجرای الگوریتم روی تابع هدف در دوره مذکور، برای ۱۰۰۰ تکرار در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

نتایج جدول ۳ نشان دهنده برتری الگوریتم SOS نسبت به دو الگوریتم دیگر، هم در مقدار تابع هدف و هم در مدت زمان اجرا، است. روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری از سیستم مخازن کرخه نشان می‌دهد که الگوریتم SOS نسبت به دو الگوریتم دیگر سریع‌تر همگرا شده و تخمین مناسب‌تری از بهینه سراسری داشته است. در این قسمت، نتایج به‌دست‌آمده از

جدول ۳- نتایج به‌دست‌آمده از ۱۰ اجرای مختلف الگوریتم‌های مختلف در سیستم مخازن کرخه

GA		PSO		SOS		تعداد اجرا
زمان اجرا (ثانیه)	مقدار هدف	زمان اجرا (ثانیه)	مقدار هدف	زمان اجرا (ثانیه)	مقدار هدف	
۱۸۶/۴۲	۱۸۳۳۴۱/۲۳	۶۱/۸۳	۸۵۴۷۱/۲۶	۴۸/۶۳	۷۷۹۸۶/۱۶	۱
۲۶۳/۳۳	۱۸۰۳۲۲/۷۹	۶۲/۳۴	۸۵۴۹۱/۸۹	۵۰/۲۶	۷۷۹۸۶/۹۱	۲
۳۲۰/۶۸	۱۷۲۵۷۹/۵۴	۶۲/۰۹	۸۵۵۴۹/۹۳	۶۵/۱۲	۷۷۹۸۷/۵۴	۳
۲۰۸/۴۶	۱۷۵۳۸۸/۳۹	۹۲/۶	۸۵۱۷۳/۹۹	۶۵/۳۸	۷۷۹۸۸/۰۸	۴
۲۰۳/۸۳	۱۸۲۷۸۶/۰۵	۶۲/۲	۸۵۳۰۸/۹۹	۴۸/۷۵	۷۷۹۸۶/۷۶	۵
۱۹۴/۸۶	۱۸۰۳۸۹/۹۸	۶۲/۳۵	۸۵۴۹۲/۰۲	۱۲۸/۰۵	۷۷۹۸۶/۰۹	۶
۱۹۶/۴۵	۱۷۶۸۱۳/۶۷	۸۹/۳۹	۸۶۱۰۰/۴۶	۵۰/۲۹	۷۷۹۸۸/۴۷	۷
۱۹۸/۲۲	۱۶۸۵۷۲/۰۷	۹۴/۷۱	۸۵۴۶۷/۲۹	۵۳	۷۷۹۸۶/۱۱	۸
۲۰۴/۶۵	۱۸۳۶۶۶/۳۲	۱۰۲/۰۷	۸۵۴۹۷/۹۳	۴۸/۵۱	۷۷۹۸۶/۷۷	۹
۲۷۷/۲۹	۱۸۳۱۹۰/۹۳	۹۲/۸۷	۸۵۸۱۸/۸۱	۴۷/۸۳	۷۷۹۸۷/۷۲	۱۰
	۱۶۸۵۷۲/۰۷		۸۵۱۷۳/۹۹		۷۷۹۸۶/۰۹	بهترین جواب
	۱۸۳۶۶۶/۳۲		۸۶۱۰۰/۴۶		۷۷۹۸۸/۴۷	بدترین جواب
	۱۷۸۷۰۵/۰۹۷		۸۵۵۳۷/۲۵۷		۷۷۹۸۷/۰۶۱	میانگین
	۵۱۹۷/۴۲۲۷		۲۵۷/۲۵۰۷		۰/۸۵۲۷	انحراف معیار
	۰/۰۲۹۱		۰/۰۰۳		۱/۰۹×۱۰ ^{-۵}	ضریب تغییرات

جدول ۴- مقادیر تابع هدف و کمبود نیاز مخازن حاصل از اجرای الگوریتم‌ها

الگوریتم	مدت زمان اجرا (ثانیه)	تابع هدف	سازبن		تنگ‌معشوره		بالادست کرخه		پایین‌دست کرخه	
			کمبود (MCM)	درصد تأمین	کمبود (MCM)	درصد تأمین	کمبود (MCM)	درصد تأمین	کمبود (MCM)	درصد تأمین
SOS	۱۸۵/۸۷	۷۷۹۸۶/۰۹۷	۰/۰۰۸۴	۹۹/۹۹	۰	۱۰۰	۱۶۷/۴	۹۷/۹۶	۵۰۲/۷۹	۹۷/۹۸
PSO	۲۲۵/۷۷	۸۵۱۷۳/۹۹	۱۳۶/۴۷	۹۷/۴۶	۲۲۱/۱۶	۸۶/۰۲	۳۵۳/۶۶	۹۵/۶۹	۶۸۱/۵۴	۹۷/۲۶
GA	۲۷۵/۷۸	۱۶۸۵۷۲/۰۷	۸۳۹/۸۳	۸۴/۳۵	۷۱۵/۴۷	۵۴/۷۷	۷۹۳/۸۷	۹۰/۳۲	۱۵۲۳/۱۷	۹۳/۸۸

مهم در برتری الگوریتم‌های فراکاوشی است، قدرت و سرعت خود را در حل مسائل بزرگ و پیچیده نسبت به دیگر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. در جدول ۵، معیارهای ارزیابی کارایی الگوریتم‌های SOS، PSO و GA در بهره‌برداری از سامانه سه مخزن سازبن، تنگ‌معشوره، و کرخه شامل اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، و آسیب‌پذیری در دوره بهره‌برداری آورده شده است.

در جدول ۴ دیده می‌شود که مقدار تابع هدف در الگوریتم جستجوی موجودات همزیست (SOS) برابر ۷۷۹۸۶/۰۹۷ است که بیانگر قابلیت بیشتر الگوریتم SOS در مقایسه با الگوریتم‌های PSO و GA، در مسائل با ابعاد بالاست. الگوریتم SOS با تأمین ۹۹/۹۹، ۱۰۰، ۹۷/۹۶ و ۹۷/۹۸ درصد از نیازهای کل سدهای به‌ترتیب سازبن، تنگ‌معشوره، بالادست و پایین‌دست کرخه و مدت زمان اجرای برابر ۱۸۵ ثانیه، که یکی از پارامترهای

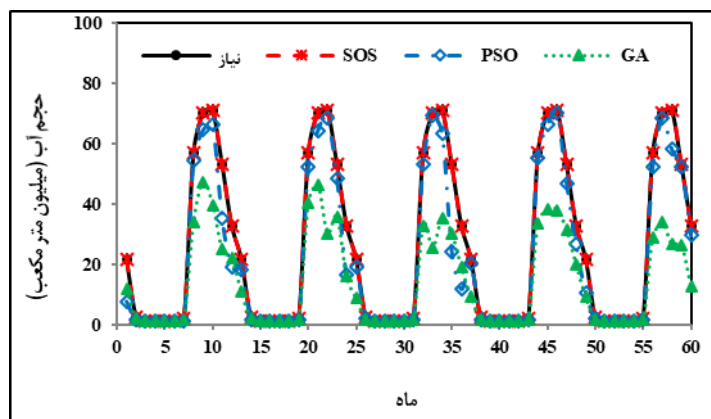
جدول ۵- معیارهای ارزیابی کارایی الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری از سامانه مخازن

نیاز	الگوریتم	اعتمادپذیری	برگشت پذیری	آسیب پذیری	شاخص پایداری
سازبن	SOS	۱۰۰	۱۰۰	۰/۰۰۴۵	۹۹/۹۹
	PSO	۸۸/۳۳	۱۷/۱۴	۱۲/۲۶	۵۱/۰۳
	GA	۴۱/۶۷	۱۴/۲۹	۳۶/۵۳	۳۳/۵۵
تنگ‌معشوره	SOS	۱۰۰	۹۷/۳۷	$1/22 \times 10^{-4}$	۹۹/۱۱
	PSO	۴۵	۱۷/۵	۶۳/۸۷	۳۰/۵۳
	GA	۳۳/۳۳	۱۷/۵	۶۳/۶۵	۲۷/۶۸
بالادست کرخه	SOS	۹۳/۳۳	۹۰/۳۲	۳۲/۳۶	۸۲/۹۲
	PSO	۸۱/۶۷	۱۴/۲۹	۳۱/۹۴	۴۲/۹۸
	GA	۴۱/۶۷	۱۴/۲۹	۲۷/۵	۳۵/۰۷
پایین‌دست کرخه	SOS	۹۱/۶۷	۹۲/۳۱	۴۰/۶۸	۷۹/۴۷
	PSO	۹۱/۶۷	۸/۳۳	۳۹/۹۸	۳۵/۷۹
	GA	۶۰	۰	۴۲/۵۸	۰

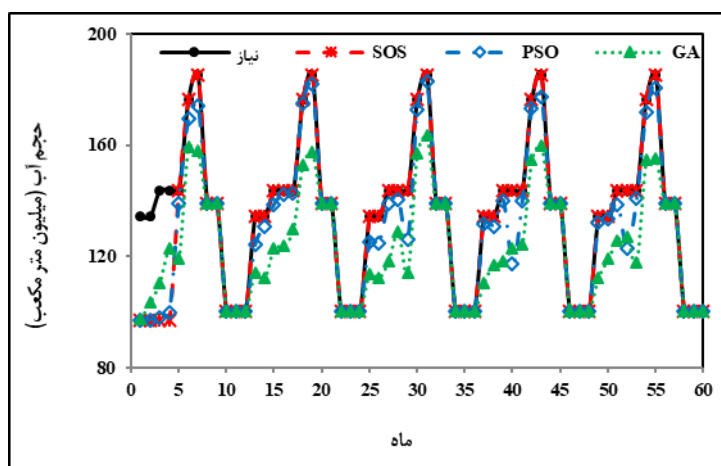
تنگ‌معشوره، بالادست و پایین‌دست کرخه در دوره مورد مطالعه (سال آبی ۶۰-۵۹ تا ۶۴-۶۳) نشان می‌دهند. در جدول ۶، خلاصه‌ای از مقادیر متغیرهای تصمیم (رهاسازی در هر ماه بر اساس نیازهای پایین دست) در دو سال آخر بهره‌برداری نشان داده شده است.

در اینجا دیده می‌شود که مقدار رهاسازی (متغیر تصمیم) به‌دست آمده از الگوریتم SOS برآورد بهتری از نیازهای پایین‌دست سدهای مورد مطالعه به‌دست می‌دهد و حداقل کمبود را داشته است. جدول ۷ مقادیر متوسط کمبود سالانه حاصل از الگوریتم‌های مورد بررسی را در سیستم مخازن حوضه کرخه نشان می‌دهد.

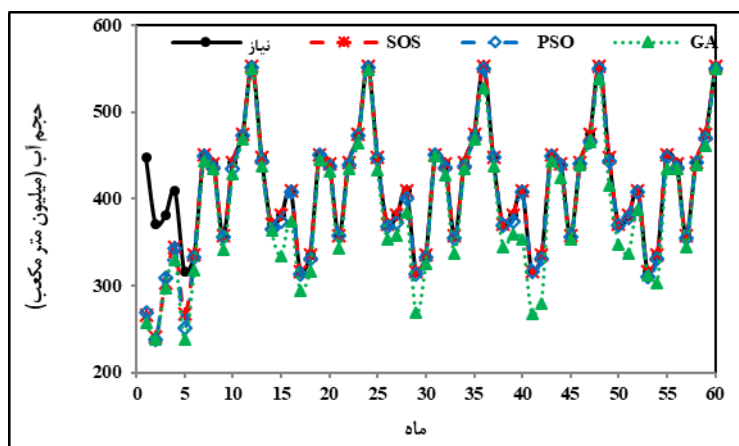
در جدول ۵ دیده می‌شود که شاخص پایداری به‌دست آمده با الگوریتم SOS، که یک معیار برای تشخیص عملکرد سیستم‌های منابع آب است، برای تأمین نیازهای مخازن سازبن، تنگ‌معشوره، بالادست و پایین‌دست کرخه به‌ترتیب برابر ۹۹/۹۹، ۹۹/۱۱، ۸۲/۹۲ و ۷۹/۴۷، در مقایسه با مقادیر متناظر در الگوریتم‌های PSO و GA بیشتر است. بدین ترتیب می‌توان گفت که الگوریتم SOS در حل مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن، با هدف تأمین نیاز پایین‌دست، توانایی و دقت بالایی دارد. شکل‌های ۵ تا ۸ میزان رهاسازی به‌دست آمده از الگوریتم‌های مورد بررسی را به‌ترتیب در مخازن سازبن،



شکل ۶- میزان رهاسازی در مقابل نیاز سد تنگ‌معشوره



شکل ۷- میزان رهاسازی در مقابل نیاز بالادست سد کرخه



شکل ۸- میزان رهاسازی در مقابل نیاز پایین‌دست سد کرخه

بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن حوزه آبخیز...

جدول ۶- خلاصه مقادیر متغیرهای تصمیم حاصل از الگوریتم‌های مورد بررسی در سیستم مخازن حوضه کرخه

ردیف	سد سازبن				سد تنگ معشوره				بالادست سد کرخه				پایین دست سد کرخه			
	نیاز	SOS	PSO	GA	نیاز	SOS	PSO	GA	نیاز	SOS	PSO	GA	نیاز	SOS	PSO	GA
۴	۹۰/۸	۹۰/۸	۹۰/۸	۸۸/۴۳	۷۲/۶۸	۲۱/۷	۲۰/۳	۹/۳۶	۱۳۴/۴	۱۳۴/۴	۱۳۱/۷	۱۱۰/۷	۴۴۷/۷	۴۴۷/۷	۴۴۷/۵	۴۳۸/۱
	۹۰/۸	۹۰/۸	۹۰/۸	۸۵/۱۷	۵۹/۹۱	۲/۵	۱/۸۱	۱/۸۶	۱۳۴/۴	۱۳۴/۴	۱۳۰/۹	۱۱۷	۳۷۰/۹	۳۷۰/۹	۳۶۹/۴	۳۴۵
	۱۰۲/۹	۱۰۲/۹	۱۰۲/۹	۱۰۱/۳	۷۵/۴۹	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱۴۳/۷	۱۴۳/۷	۱۴۰/۱	۱۱۸/۱	۳۸۰/۷	۳۸۰/۷	۳۷۴	۳۵۹
	۱۰۲/۹	۱۰۲/۹	۱۰۲/۹	۹۹/۰۵	۷۹/۴۲	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱۴۳/۷	۱۴۳/۷	۱۱۷/۳	۱۲۳/۲	۴۰۸/۹	۴۰۸/۹	۴۰۷/۸	۳۵۳
	۱۰۲/۹	۱۰۲/۹	۱۰۲/۹	۹۰/۲۹	۸۳/۴۹	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱۴۳/۷	۱۴۳/۷	۱۳۹/۹	۱۲۴/۳	۳۱۶	۳۱۶	۳۱۵/۸	۲۶۷/۱
	۱۳۹/۳	۱۳۹/۳	۱۳۹/۳	۱۳۴/۲	۱۰۳/۵	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱۷۶/۴	۱۷۶/۴	۱۷۳/۳	۱۵۴/۹	۳۳۵/۶	۳۳۵/۶	۳۳۱/۳	۲۷۹/۷
	۱۴۴/۷	۱۴۴/۷	۱۴۴/۷	۱۴۳/۱	۱۲۳/۷	۲/۰۹	۱/۵۷	۱/۸۹	۱۸۵/۴	۱۸۵/۴	۱۷۷/۶	۱۶۰	۴۵۱/۳	۴۵۱/۳	۴۴۹/۳	۴۴۳/۲
	۸۴/۱	۸۴/۱	۸۴/۱	۸۴/۱	۸۴/۱	۵۷/۱	۵۵/۶	۳۳/۸۸	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۴۴۰/۱	۴۴۰/۱	۴۳۹/۵	۴۲۴/۴
	۸۴/۱	۸۴/۱	۸۴/۱	۸۴/۱	۸۴/۱	۷۰/۴	۶۶/۴۱	۳۸/۲	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۳۵۸	۳۵۸	۳۵۵/۷	۳۵۳/۹
	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۷۱/۳	۷۰/۳۸	۳۸/۱۵	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۴۴۱/۹	۴۴۱/۹	۴۳۹/۹	۴۳۹/۵
	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۵۳/۱	۴۷/۱	۳۱/۴۵	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۴۷۴/۱	۴۷۴/۱	۴۵۶	۴۶۵/۷
	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۳۳	۲۶/۷	۲۰/۰۷	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۵۵۲/۴	۵۵۲/۴	۵۵۰	۵۳۸/۷
۵	۹۰/۸	۹۰/۸	۹۰/۸	۸۷/۳	۶۵/۵۲	۲۱/۷	۱۰/۷۳	۹/۲۸	۱۳۴/۴	۱۳۴/۴	۱۳۲	۱۱۲/۵	۴۴۷/۷	۴۴۷/۷	۴۴۳/۲	۴۱۵/۴
	۹۰/۸	۹۰/۸	۹۰/۸	۸۷/۱۹	۵۷/۶۳	۲/۵	۲/۱۱	۱/۸۹	۱۳۴/۴	۱۳۴/۴	۱۳۳/۶	۱۱۹/۲	۳۷۰/۹	۳۷۰/۹	۳۶۹/۱	۳۴۸
	۱۰۲/۹	۱۰۲/۹	۱۰۲/۹	۹۹/۶۵	۶۸/۰۶	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱۴۳/۷	۱۴۳/۷	۱۳۸/۵	۱۲۵/۹	۳۸۰/۷	۳۸۰/۷	۳۷۸/۸	۳۳۶/۷
	۱۰۲/۹	۱۰۲/۹	۱۰۲/۹	۹۹/۵۹	۸۳/۰۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱۴۳/۷	۱۴۳/۷	۱۲۳	۱۲۷/۲	۴۰۸/۹	۴۰۸/۹	۴۰۷/۴	۳۸۷/۱
	۱۰۲/۹	۱۰۲/۹	۱۰۲/۹	۱۰۰/۸	۸۱/۳۸	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱۴۳/۷	۱۴۳/۷	۱۴۰/۸	۱۱۸	۳۱۶	۳۱۶	۳۱۰/۵	۳۱۱/۹
	۱۳۹/۳	۱۳۹/۳	۱۳۹/۳	۱۲۹/۹	۱۱۲/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱۷۶/۴	۱۷۶/۴	۱۷۱/۸	۱۵۴/۶	۳۳۵/۶	۳۳۵/۶	۳۳۱/۵	۳۰۳
	۱۴۴/۷	۱۴۴/۷	۱۴۴/۷	۱۴۲/۷	۱۲۸/۷	۲/۰۹	۱/۹۱	۱/۵۴	۱۸۵/۴	۱۸۵/۴	۱۸۰/۷	۱۵۵/۴	۴۵۱/۳	۴۵۱/۳	۴۴۸/۲	۴۳۴/۱
	۸۴/۱	۸۴/۱	۸۴/۱	۸۴/۱	۸۴/۱	۵۷/۱	۵۲/۳۴	۲۸/۹۲	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۴۴۰/۱	۴۴۰/۱	۴۳۶/۴	۴۳۵
	۸۴/۱	۸۴/۱	۸۴/۱	۸۴/۱	۸۴/۱	۷۰/۴	۶۸/۵۴	۳۳/۹۴	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۳۵۸	۳۵۸	۳۵۵/۱	۳۴۴/۵
	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۷۱/۳	۵۸/۳۴	۲۶/۷۱	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۴۴۱/۹	۴۴۱/۹	۴۴۱/۸	۴۳۸/۴
	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۵۳/۱	۵۲/۴	۲۶/۵۳	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۴۷۴/۱	۴۷۴/۱	۴۷۰/۱	۴۶۱/۵
	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۳۳	۲۹/۶۴	۱۲/۹۲	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۵۵۲/۴	۵۵۲/۴	۵۴۹/۷	۵۴۹/۸

جدول ۷- میزان متوسط کمبود سالانه حاصل از الگوریتم‌های مورد بررسی در سیستم مخازن حوضه کرخه

سال	الگوریتم	کمبود سالانه سد سازبن	کمبود سالانه سد تنگ معشوره	کمبود سالانه بالادست سد کرخه	کمبود سالانه سد کرخه
۱	SOS	۰/۰۰۸۳۵۹	$۵/۷۲ \times ۱۰^{-۶}$	۱۶۷/۴	۵۰۲/۷۸۶۴
	PSO	۲۷/۹۴۲۸	۶۰/۲۳۱۵	۱۸۶/۴۲۱۵	۵۳۷/۷۰۶۱
	GA	۱۶۲/۵۰۸۱	۱۲۷/۴۸۳۹	۱۹۰/۳۹۳۹	۶۳۵/۹۳۵۳
۲	SOS	$۷/۷۸ \times ۱۰^{-۶}$	$۳/۴ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۳۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۴۳ \times ۱۰^{-۵}$
	PSO	۲۶/۰۴۵۴	۳۸/۷۳۵۷	۲۵/۳۶۳۳	۳۳/۴۶۱۹
	GA	۱۶۸/۴۶۶۷	۱۲۶/۸۷۸	۱۴۸/۱۵۷۵	۱۹۴/۳۴۴۱
۳	SOS	$۱/۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۱۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۹/۶۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۸/۹ \times ۱۰^{-۶}$
	PSO	۲۲/۴۸۶۲	۶۵/۶۹۵۱	۴۹/۵۱۹۸	۴۲/۴۷۷۶
	GA	۱۵۵/۱۴۲۹	۱۵۵/۲۸۴۵	۱۵۲/۹۴۸۹	۲۱۰/۹۲۳۳
۴	SOS	$۱/۲ \times ۱۰^{-۶}$	$۷/۷۶ \times ۱۰^{-۶}$	$۸/۴۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۳۱ \times ۱۰^{-۵}$
	PSO	۳۲/۷۹۷۱	۲۱/۳۱۶۹	۵۱/۰۲۳۴	۳۲/۲۷۷۱
	GA	۱۷۶/۰۸۹۸	۱۳۶/۳۵۳۶	۱۵۳/۳۸۳۲	۲۷۰/۴۰۷۶
۵	SOS	$۶/۵۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۷/۶۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۵/۶۲ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۵۱ \times ۱۰^{-۵}$
	PSO	۲۷/۱۹۷۱	۳۵/۱۷۶۸	۴۱/۳۳۵	۳۵/۶۱۳۸
	GA	۱۷۷/۶۲۱۶	۱۶۹/۴۷۴۷	۱۴۸/۹۸۵	۲۱۱/۵۵۹۴

- Ehteram, M., Allawi, M. F., Karami, H., Mousavi, S. F., Emami, M., Ahmed, E. S. and Farzin, S. 2017. Optimization of chain-reservoirs' operation with a new approach in artificial intelligence. *Water Resour. Manage.* 31(7): 2085-2104.
- Esat, V. and Hall, M. J. 1994. Water resources system optimization using genetic algorithm. *Hydroinform.* 94, 225-231.
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R. and Loucks, D. P. 1982. Reliability, resilience, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resour. Res.* 18(1): 14-20.
- Holland, J. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial System*. University of Michigan Press.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. 1995. Particle Swarm Optimization (PSO). *Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks*. Nov. 27-Dec. 1. Perth. Australia.
- Labadie, J. W. 2004. Optimal operation of multi-reservoir systems: state of the art review. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 130(2): 93-111.
- Nourani, V., Abolvaset, N. and Salehi, K. 2012. A hybrid goal programming method and adaptive neural-fuzzy inference system for optimal operation of a multi-objective two-reservoir system. *J. Iran-Water Resour. Res.* 8(2): 1-11. (in Persian)
- Panda, A. and Pani, S. 2016. A symbiotic organism search algorithm with adaptive penalty function to solve multi-objective constrained optimization problems. *Appl. Soft. Comput.* 46, 344-360.
- Qaderi, K., Arab, D., Teshnehlal, M. and Ghazagh, A. 2010. Intelligent operation modeling of reservoirs using group method of data handling (GMDH). *J. Iran-Water Resour. Res.* 6(3), 55-67. (in Persian)
- Qaderi, K., Akbarifard, S., Madadi, M. R. and Bakhtiari, B. 2017. Optimal operation of multi-reservoirs by water cycle algorithm. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*. Thomas Telford Ltd.
- Sandoval-Solis, S., McKinney, D. C. and Loucks, D. P. 2011. Sustainability index for water resources planning and management. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 137(5): 381-390.
- Simonovic, S. P. 1992. Closing gap between theory and practice. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 118(3): 262-280.
- Tejani, G., Savsani, V. and Patel, V. 2016. Adaptive symbiotic organisms search (SOS) algorithm for structural design optimization. *J. Comput. Design Eng.* 3(3): 226-249.
- Tran, D. H., Cheng, M. Y. and Prayogo, D. 2015. A novel multiple objective symbiotic organisms search (MOSOS) for time-cost-labor utilization tradeoff problem. *Knowl. Based Syst.* 94, 132-145.
- Wardlaw, R. and Sharif, M. 1999. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation. *Water Resour. Plan. Manage.* 125(1): 25-33.
- Yeh, W. G. 1985. Reservoir management and operation models: a state-of-the-art review. *Water Resour. Res.* 21(12): 1797-1818.

Optimization Operation of Karkheh River Basin Multi-Reservoirs System Operation by using Symbiotic Organisms Search (SOS) Algorithm

S. Akbarifard and M. Sharifi*

* Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: msharifi@scu.ac.ir
Received: 29 August 2017, Accepted: 24 February 2018

In recent decades, Meta-heuristic algorithms has played an effective role in solving different engineering problems such as optimal operation of reservoirs. Owing to the complexity of water resources management problems, as well as, the daily growing need for the development and expansion of these methods, in this research, a model based on Symbiotic Organisms Search (SOS) algorithm was developed for modeling the optimal operation of complex multi-reservoirs systems. In the first step, the performance of the method was successfully assessed through several benchmark functions. Then it was used for the monthly operation of Tangemashure, Sazbon and Karkheh reservoirs located in Karkheh basin. The optimal allocation were considered for meeting the irrigation demands of 4 agricultural regions, and priority was with allocation of water for the environmental demands., for a 5 year period (from 1980-81 to 1984-85). The results of SOS algorithm were compared with other developed evolutionary algorithms including Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO). The results indicated that, optimized operation policy through SOS algorithm with the sustainability index of 99.99, 99.11, 82.92 and 79.47 percent for Sazbon, Tangemashure, upstream and downstream of Karkheh reservoirs was more appropriate performance as compared to GA and PSO algorithms in optimal operation of multi-reservoirs systems.

Key Words: Meta-Heuristic Algorithms, Optimal Operation