سال سوم، شماره ۲، اسفند ۱۳۹۵، صفحات ۱۰۵ تا ۱۱۴
نشریه آب و توسعه پایدار

2017, Vol.3, No.2, Pages 105 to 114
Journal of Water and Sustainable Development

مروری بر الگوریتم‌های فراکاوشی در مدیریت منابع آب

سید مصطفی طباطبائی[۱*]، حسین خزیمه‌نژاد[۲]، ابوالفضل اکبرپور[۳]

۱، ۲ و ۳- به ترتیب کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، استادیار گروه مهندسی آب و دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند.
*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: tabatabaei1984@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۹
تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۱۳

چکیده

با توجه به وضعیت کنونی منابع آب و افزایش روزافزون تقاضای آب، تأمین نیازها در آینده با محدودیت جدی مواجه خواهد بود. عدم تامین نیازها از یک طرف بعضاً باعث بروز مشکلات اجتماعی و سیاسی شده و از طرف دیگر بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب خسارات جبران‌ناپذیری به دنبال خواهد داشت. لذا برای برنامه‌ریزی جهت تأمین و توسعه نیازهای فعلی و آینده استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی یک ابزار کارآمد محسوب می‌شود. امروزه با توسعه و پیشرفت فناوری اطلاعات، الگوریتم‌های فراکاوشی مختلفی ابداع شده‌اند که می‌توانند در مدیریت و توسعه پایدار منابع آب موثر واقع شوند. مدیریت و توسعه‌ای که سه هدف اقتصادی و اجتماعی و اکولوژیکی را به طور پایدار تامین سازد. در این مقاله ضمن معرفی و مقایسه جامع‌ترین الگوریتم‌های فراکاوشی، به بررسی کارآیی، معایب و مزایای این الگوریتم‌ها پرداخته شده و در هر بخش مطالعات کاربردی انجام گرفته نیز بیان شده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که الگوریتم‌های فراکاوشی جهت بهره‌وری بهینه از منابع آب و برنامه‌ریزی و توسعه آن در آینده، به طور موثری از حل مسائل بهینه‌سازی چند محدودیتی با فضای بزرگ و پیچیده برمی‌آیند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم فراکاوشی، بهینه‌سازی، توسعه پایدار، جستجوی تصادفی، مدیریت منابع آب.

Review of Heuristic Algorithms for Water Resources Management

S.M Tabatabaei [1*], H Khozeymehnezhad[2], A. Akbarpuor [3]

1- M.Sc in Water Resources Engineering, Assistant Professor in Water Engineering Faculty & Associate professor in Civil Engineering Faculty, University of Birjand, Iran.
*(Corresponding Author Email: tabatabaei1984@yahoo.com)

Received: 30-12-2015
Accepted: 3-7-2016

Abstract

According to the current state of water resources and the increasing demand for water, the supply of future needs will be faced with serious constraints. On the one hand, the failure to supply sometimes causes social and political problems. On the other hand, improper exploitation of water resources will lead to irreparable damages. Therefore, the use of optimization models for the planning of current and future supply needs is an efficient tool. Today, with the development of information technology, several heuristic algorithms have been developed which are able to be effective in the management and sustainable development of water resources. A management and development which can achieve the three goals of economic, social, and ecological sustainability. This study compares the most complete heuristic algorithms, where the performance, advantages, and disadvantages of these algorithms are evaluated and discussed. To this end, applied studies have been reported in each section. The results of this study show that heuristic algorithms are capable of effectively solving complex multi-restriction optimization problems for the optimal water resources planning and development in the future.

Keywords: Heuristic algorithms, Optimization, Sustainable development, Random search, Water resources management.

DOI: 10.22067/jwsd.v3i2.52605

مقدمه

امروزه آب به عنوان یکی از سه عامل تشکیل و بقای محیط زیست(خاک، هوا و آب) بیش از هر زمان دیگر مورد توجه می‌باشد. بی‌شک امروزه حفظ و صیانت از منابع آب و بهره‌برداری بهینه و اقتصادی و عادلانه از آب یک مسأله جهانی است و به همین جهت در قرن ۲۱ از تنش‌های آبی به عنوان یک چالش فراگیر بشری یاد می‌شود. افزایش روزافزون تقاضای آب در بخش‌های مختلف، آلودگی منابع آب، افزایش میزان آسیب‌پذیری سیستم‌های مختلف تامین آب با توجه به پیچیده‌تر شدن آن‌ها، تغییرات اقلیمی و ضرورت پیش‌بینی‌های بلند مدت را می‌توان از دلایل عمده تنش‌های آبی برشمرد که نقش مدیریت و توسعه پایدار منابع آب و ضرورت بهینه‌سازی را برجسته‌تر می‌سازد، بطوریکه استفاده بهینه از منابع موجود یکی از ارکان اساسی مدیریت منابع آب محسوب می‌شود (کارآموز و همکاران، ۱۳۸۵). دستیابی به توسعه پایدار نیز (با توجه به سیستم‌های منابع آب که خود متشکل از زیرسیستم‌های طبیعی، فیزیکی، اجتماعی و سیاسی است که به صورت پویا و به طور مداوم در تعامل هستند) نیاز به درک جامع و رویکرد درست دارد. در بخش منابع آب بهینه‌سازی و استفاده هوشمند از امکانات جهت دستیابی به توسعه پایدار پیش شرطی لازم است، اما کافی نیست (Sandoval و همکاران، ۲۰۱۱)، چرا که پایداری تنها یک مسئله بهینه‌سازی ساده با یک مجموعه راه‌حل بهینه منحصر به فرد نیست. در واقع توسعه پایدار در مورد کل جامعه بوده و در مورد یک بخش مانند منابع آب نیست و در حالی که اصول اساسی آن ثابت است؛ اهداف آن متنوع و در حال تغییر است. یکی از مشکلات اساسی در دستیابی به توسعه پایدار مربوط به تعریف این اهداف در بخش‌های مختلف می‌باشد. در واقع، عدم درک مشترک توسعه پایدار باعث شده بخش‌های مختلف مسائل را بر اساس ترجیحات خود تفسیر و توجیه کنند (Hjorth و Madani، ۲۰۱۴). بنابراین اگر توسعه پایدار بخواهد به عنوان یک پارادایم توسعه پایدار بماند، باید از ابزارهای قدرتمند و انعطاف‌پذیر بهره‌مند باشد تا بتواند در فرایند توسعه، استراتژی‌هایی انتخاب کند که با جنبه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی هماهنگ باشد (Simonovic، ۲۰۰۹).

فعالیت‌های بخش مدیریت منابع آب را می‌توان به سه دسته، تدوین سیاست‌های مدیریت منابع آب، اقدامات مدیریتی برای دستیابی به اهداف سیاست‌ها و ارزیابی اثرات آن‌ها، تقسیم نمود. سیاست‌های کلان مدیریت منابع آب، در واقع ارتباط توسعه و نحوه بهره‌برداری از این منابع را با اهداف توسعه ملی مشخص می‌سازند. اولین مرحله تدوین سیاست‌های کلان مدیریت منابع آب، پیشنهاد گزینه‌های مختلف با توجه به محدودیت‌ها و اهداف فراگیر و همه جانبه توسعه و مدیریت منابع آب است. با در نظرگرفتن ابعاد و پیچیدگی‌های سیستم‌های منابع آب، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی یک ابزار کارآمد محسوب می‌شود. اما همواره عدم قطعیت‌ها، نتایج مدل‌های بهینه‌سازی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. امروزه با گسترش فناوری اطلاعات، ابزارهای نوین انعطاف‌پذیر ایجاد شده و ترکیب آن‌ها با مدل‌های بهینه‌سازی، فضای جدیدی برای توسعه ابزارهای نوین برای تحلیل، برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های منابع آب فراهم کرده است (کارآموز و همکاران، ۱۳۸۵). توسعه این روش‌های انعطاف‌پذیر تا حد زیادی می‌تواند چگونگی برخورد با عدم قطعیت‌ها را بهبود دهد. انعطاف‌پذیری، عبارت است از سازوکارهایی که امکان بررسی وضعیت منابع آب را در شرایط مختلف عادی و اضطراری با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، در زمان واقعی، فراهم می‌کنند (کارآموز و زهرایی، ۱۳۸۲).

یکی از روش‌های انعطاف‌پذیر جهت حل مسائل پیچیده، بهینه‌سازی مبتنی بر هوش جمعی می‌باشد که با الهام از سیستم‌های بیولوژیکی و فیزیکی موجود در طبیعت به وجود آمده‌اند (آذرافرا و رضایی، ۱۳۹۱). تعداد زیادی ذره در فضای مسأله پخش شده و به طور همزمان به دنبال جواب بهینه می‌گردند. این روش‌ها را الهام گرفته از طبیعت[۱]، مبتنی بر جمعیت[۲] یا الگوریتم‌های فراکاوشی[۳] می‌نامند (Rao، ۲۰۰۹). طبق نظر Tukey (۱۹۶۵) جواب‌های تقریبی درست به مراتب بهتر از پاسخ دقیق غلط است. الگوریتم‌های فراکاوشی نیز با در نظر گرفتن قیودات و محدودیت‌های مختلف، به مجموعه‌ای از جواب‌های غیرغالب دست می‌یابند که بهترین حالت مجموعه جواب بوده و یا می‌توان امیدوار بود که با مجموعه جواب اصلی فاصله زیادی نداشته است (Montalvo و همکاران، ۲۰۰۸).

با وجود تنوع و کارآیی خوب الگوریتم‌های فراکاوشی در حل مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای زیاد و تصادفی با قیودات پیچیده، این الگوریتم‌ها تاکنون در مدیریت منابع آب کاربرد زیادی نداشته است. در این مقاله ضمن معرفی کاربردی‌ترین الگوریتم‌های فراکاوشی، نقاط ضعف و قوت و نحوه عملکرد آن‌ها بطور خلاصه بیان شده است. در انتهای هر بخش مطالعات کاربردی مربوطه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

معرفی انواع الگوریتم‌های فراکاوشی

• الگوریتم ژنتیک[۴]

Rechenberg (۱۹۶۵) در کتاب استراتژی‌های تکامل، ایده اولیه استفاده از روش‌های تکامل بیولوژیکی را برای تحلیل مسائل مطرح کرد. سپس ایده وی توسط سایر محققان بسط یافت. الگوریتم ژنتیک (GA) اولین بار در سال ۱۹۷۵ توسط Halland جهت یک پروسه بهینه‌سازی مطرح شد. در این الگوریتم ابتدا بطور تصادفی تعدادی از افراد به عنوان جمعیت اولیه تولید می‌شوند و میزان شایستگی هر یک از آن‌ها بر اساس تابع ارزیابی می‌شود. سپس تعدادی بر اساس میزان شایستگی به عنوان والد انتخاب شده و فرزندان جدیدی به وجود می‌آیند. فرزندان جدید در جمعیت کپی شده و جمعیت جدید بوجود می‌آید. این عمل تا برآورده شدن شرط خاتمه، ادامه می‌یابد (Halland، ۱۹۷۵). از GA می‌توان برای حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته و ترکیبی غیرخطی تحت قیود غیرخطی از نوع برابری و نابرابری نیز استفاده نمود (Rao، ۲۰۰۹). این الگوریتم فضای مسأله را به صورت سراسری بررسی می‌کند و جستجوی محلی آن ضعیف است (آذرافرا و رضایی، ۱۳۹۱). از دیگر معایب آن، نیاز به کدگذاری متغیرهای مسأله با استفاده از رشته‌های دو دویی است که سبب مصرف حافظه و افزایش بار محاسباتی الگوریتم خواهد شد (Rao، ۲۰۰۹).

Wardlaw و Sharif (۱۹۹۹) از GA جهت بهینه‌سازی برنامه‌ریزی مسائل چهارمخزنه استفاده کردند. آن‌ها به تشریح روش‌های مختلف ژنتیکی پرداخته و نحوه عمل هر کدام از این عملگرها را بر مسأله چهار مخزنه ارائه کردند. آن‌ها برای نشان دادن کارآیی خوب GA به حل یک مسأله ۱۰ مخزنه پرداخته و نتایج مطلوبی ارائه نمودند. قدمی و همکاران (۱۳۸۸) جهت حداکثر نمودن سود خالص ناشی از کاشت تمام گیاهان در یک الگوی کاشت انتخابی با استفاده از GA، مدلی برای بهره‌برداری بهینه از یک سیستم چندمخزنی منابع آب تک منظوره در شمال خراسان تهیه کردند. جوادزاده حقیقت (۱۳۸۹) از GA جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان استفاده کرد و نتایج را با روش تایس و جاکوب مقایسه کرد. نتایج وی بر دقت و کارآیی GA در تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان در تحلیل داده‌های پیزومترها دلالت داشت. اما تحلیل داده‌های چاه‌ها به نتایج دور از واقعیت منجر گردیده و بیان نموده است که تا حد امکان باید از داده‌های چاه‌ها برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان اجتناب نمود. کیافر و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از GA به تخصیص بهینه آب در شبکه آبیاری و زهکشی صوفی‌چای در استان آذربایجان شرقی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که اختلاف مقدار آب تخصیص یافته واقعی و مقدار بهینه در مناطق مختلف به طور متوسط ۲/۱ میلیون متر مکعب است و میانگین کل سطح زیر کشت حاصل از مقدار واقعی، سه درصد بیشتر از سطح زیر کشت حاصل از مقادیر پیش‌بینی منابع آب است. رجب‌پور و همکاران (۱۳۹۲) جهت بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ با تابع هدف حداقل انرژی مصرفی با استفاده از GA یک مدل تهیه کردند و از آن برای تعیین برنامه بهینه بهره‌برداری از سامانه انتقال آب از سد کوثر به شهر دوگنبدان استفاده نمودند. مقایسه برنامه بهینه بهره‌برداری با حالت عادی کاهش ۲۶/۸ درصد هزینه انرژی مصرفی در سامانه‌های انتقال آب تحت فشار را نشان داد.

• بهینه‌سازی کلونی مورچه[۵]

الگوریتم کلونی مورچه (ACO) توسط Marco Dorigo و همکاران در سال ۱۹۹۱ به منظور روشی برای حل مسأله فروشنده دوره‌گرد ارائه شد. کاربرد اصلی آن در مهندسی یافتن مسیر بهینه می‌باشد. در ACO ابتدا هر مورچه‌ای کم و بیش در جهت‌های تصادفی در اطراف لانه حرکت می‌کند. اگر این مورچه در مسیر خود با غذا مواجه شود در یک مسیر تقریباً مستقیم به لانه بازگشته و این مسیر را با فرومون علامت‌گذاری می‌کند. مورچه‌های نزدیک به این فرومون تمایل حرکت بر روی این مسیرهای علامت‌گذاری شده دارند. در موقع بازگشت به لانه هر یک از مورچه‌هایی که موفق به یافتن منبع غذایی شده است، مسیر را با فرومون‌گذاری مجدد تقویت می‌کند. اگر بیش از یک مسیر برای رسیدن به غذا موجود باشد، مسیر کوتاه‌تر در زمان یکسان بیشتر از مسیر طولانی‌تر توسط مورچه‌ها پیموده می‌شود. در این حال مسیر کوتاه‌تر مرتباً بیشتر از مسیرهای طولانی‌تر مورد استقبال قرار می‌گیرد. در نتیجه این حرکت مسیرهای طولانی‌تر با تبخیر فرومون‌ها ناپدید می‌شود. در انتها همه مورچه‌ها از کوتاه‌ترین مسیر حرکت می‌کنند. ACO ذاتاً برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی مناسب است و با تعریف مسأله بر روی یک گراف از آن می‌توان به راحتی برای حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته نیز استفاده کرد (Darigo، ۲۰۰۸). برخلاف الگوریتم PSO در زمان حل مسأله پیوسته به دلیل استفاده از مقادیر گسسته برای متغیرهای مسأله جواب‌های به دست آمده در تمام تکرارها حتماً در دامنه مسأله قرار خواهند داشت که در PSO به خاطر اضافه شدن سرعت‌هایی با مقادیر تصادفی به متغیرهای مسأله ممکن است مقادیر آن‌ها بطور ناخواسته به خارج از دامنه تعریفشان منتقل شوند. مهم‌ترین ضعف الگوریتم ACO پدیده رکورد است. حالتی است که در آن تمامی مورچه‌ها از یک مسیر واحد برای رسیدن از نقطه مبدأ به نقطه مقصد در یک گراف استفاده می‌کنند. یعنی نباید قبل از اینکه الگوریتم موفق به جواب بهینه سراسری قابل قبول گردد، این اتفاق بیفتد. برای جلوگیری از این اتفاق در ابتدا باید تعداد پارامترها متناسب با دامنه مسأله تعریف شود.

نسخه ارتقا یافته الگوریتم ACO توسط Bullnheimer و همکاران (۱۹۹۹) ارائه شد و به نام "سیستم مورچه رتبه محور"[۶] توسعه یافت که در آن مقدار فرومونی که هر مورچه از خود بر جای می‌گذارد متناسب با رتبه آن می‌باشد و بهترین مورچه از آغاز اجرای الگوریتم تا انتها بیشترین فرومون را بر جای می‌گذارد.

Kumar و Reddy (۲۰۰۶) جهت استخراج سیاست بهره‌برداری از مخزن چند منظوره از ACO استفاده کرده و نتایج را قابل قبول گزارش کردند. حسین‌زاده و همکاران (۱۳۸۹) قابلیت ACO را در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه تخصیص بار آلودگی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای بدست آوردن جواب‌های غالب از دو مدل دو هدفه و یک مدل سه هدفه استفاده کردند. در مدل اول حداقل‌سازی هزینه و میزان تخطی از میزان اکسیژن محلول مجاز در طول رودخانه و در مدل دوم حداقل‌سازی هزینه و مقدار شاخص بی‌عدالت[۷] و تخطی از میزان اکسیژن محلول مجاز به عنوان اهداف طرح تعریف شدند. مدل سوم در قالب حداقل‌سازی هزینه شاخص بی‌عدالت و تخطی از میزان اکسیژن محلول مجاز به عنوان اهداف مربوطه بررسی و انتخاب شد. مدل‌های تعریف شده آن‌ها بر روی رودخانه ویلمیت[۸] در ایالات متحده پیاده شده است. نتایج تحقیقات آن‌ها توانایی الگوریتم ACO را در مسائل تخصیص بار آلودگی نشان داد. از مزیت ACO در این گونه مسائل دلخواه بودن گسسته‌سازی در ابتدای طرح است که می‌توان مقادیری از تصفیه که عملی بوده و قابلیت اجرایی دارند را در نظر گرفت. این خاصیت باعث می‌شود خروجی مدل‌ها در راستای فضای اجرایی تحت کنترل باشد. عمادی و کاکویی (۱۳۹۳) با استفاده از ACO جهت تعیین ابعاد بهینه حوضچه رسوبگیر سد انحرافی گنج افروز واقع در استان مازندران با در نظر گرفتن خصوصیات هیدرولیکی، رسوبی و سازه‌ای پرداختند. تابع هدف آن‌ها ترکیبی از راندمان تله‌اندازی و ضریب اطمینان لغزش و واژگونی در نظر گرفته شده است. نتایج آن‌ها نشان داد مقادیر طول، عرض و ارتفاع بدست آمده توسط مدل در هر سه راندمان تله‌اندازی ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد، کمتر از شرایط موجود می‌باشد.

• بهینه‌سازی توده ذرات[۹]

الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (PSO) توسط Kennedy و Eberhart (۱۹۹۵) ابداع شد. یکی از روش‌های مبتنی بر هوش جمعی با الهام‌گیری از زندگی گروهی پرندگان و ماهی‌ها می‌باشد. در PSO تعداد زیادی ذره در فضای مسأله پخش شده و به طور همزمان به دنبال جواب بهینه سراسری می‌گردند. هر یک از این ذرات تا حدی به طور تصادفی فضای مسأله را جستجو می‌کند و به مرور احتمال حضور هر یک از ذرات در نقاط بهینه‌تر با درس گرفتن از حرکت‌های غلط گذشته افزایش می‌یابد (Kennedy و Eberhart، ۱۹۹۵). PSO از این نظر که جمعیتی از جواب‌ها به طور تصادفی توسط الگوریتم تولید شده و با حرکت در دامنه مسأله به دنبال جواب می‌گردند، مانند الگوریتم ژنتیک است. همچنین مانند الگوریتم ژنتیک ذاتاً برای حل مسائل بیشینه‌سازی بدون قید در حالت پیوسته مناسب است. با این حال می‌توان با انجام تغییراتی در نحوه تعریف تابع هدف، از آن برای حل مسائل بهینه‌سازی(اعم از کمینه‌سازی یا بیشینه‌سازی) در حالت تحت قید نیز استفاده نمود. در PSO بر خلاف الگوریتم ژنتیک به هر یک از جواب‌های بالقوه مسأله(هر یک از ذرات) یک سرعت تصادفی نسبت داده می‌شود. هر ذره با توجه به سرعتش در فضای مسأله جابجا می‌شود (آذرافرا و رضایی، ۱۳۹۱). از دیگر برتری PSO این است که بر خلاف GA بهترین جواب به دست آمده از آغاز اجرای برنامه تا آخرین تکرار توسط هر ذره ذخیره می‌شود. از دیگر مزایای PSO پیاده‌سازی آسان و تعداد کم پارامترها می‌باشد.

مهم‌ترین ضعف PSO این است که جستجوی محلی به منظور یافتن موقعیت دقیق نقطه بهینه گاهی به درازا می‌کشد. برای این منظور نسخه بهبودیافته PSO توسط Shi و Eberhart (۱۹۹۸) ارائه شد. Chu (۲۰۰۶) از الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات جهت پیش‌بینی روان‌آب در منطقه لکیون و پیش‌بینی تراز سطح آب در رودخانه شینگ‌مان در هنگ کنگ، بهره برد. Montalvo و همکاران (۲۰۰۸) جهت طراحی بهینه شبکه توزیع آب شهری شهر نیویورک از PSO استفاده کردند و نتایج را در شرایط مشابه با ACO و GA مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد PSO نسبت به دو الگوریتم دیگر از قابلیت و کارآیی بالاتری برخوردار است. Izquierdo و همکاران (۲۰۰۸) برای طراحی بهینه شبکه جمع‌آوری فاضلاب از الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات استفاده کردند و نتیجه گرفتند که این روش نسبت به روش برنامه‌ریزی دینامیک برتری دارد. در مطالعه دیگری آذرافزا و رضایی (۱۳۹۱) سه الگوریتم PSO، GA و SA را جهت استخراج منحنی فرمان بهره‌برداری مخزن شهر شهرچای به کار گرفتند. طبق نتایج آن‌ها، PSO عملکرد بالاتری نسبت به دو الگوریتم دیگر در بهینه‌سازی مخزن سد شهرچای داشته است. صابرچناری و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از PSO و GA یک مدل کوتاه مدت بهره‌برداری بهینه از منابع آب ارائه نمودند و نتایج حاصل از دو الگوریتم را مقایسه کردند. تابع هدف آن‌ها تأمین نیاز آبی پایین دست بر اساس برقراری رابطه پیوستگی انتخاب گردید. نتایج آن‌ها نشان داد که PSO با تعداد ارزیابی کمتر تابع هدف، نسبت به GA قابلیت بالاتری در رسیدن به جواب بهینه دارد.

• بهینه‌سازی غذایابی باکتری[10]

الگوریتم بهینه‌سازی غذایابی باکتری (BFO) توسط Passino (۲۰۰۲) برای کمینه‌سازی مسائل بهینه‌سازی پیوسته ارائه شد. این الگوریتم با الهام از گونه خاصی از باکتری‌های تاژکدار در طبیعت ابداع شده است. برای پیاده‌سازی BFO در عمل ابتدا جمعیت اولیه‌ای از باکتری‌های مصنوعی به طور تصادفی تولید می‌شوند و در طول اجرای الگوریتم به ترتیب سه نوع عملیات کموتکسیز، ماوری و حذف و پراکندگی بر روی آن‌ها انجام می‌شود. در مرحله اول هر یک از باکتری‌ها بطور تصادفی در یک جهت خاص به حرکت در می‌آیند و اگر در اثر این حرکت تصادفی باکتری به نقطه بهینه‌تری جابجا شود این حرکت بطور تصادفی ادامه می‌یابد، در غیر این صورت حرکت آن باکتری متوقف می‌گردد. در مرحله دوم باکتری‌ها بر اساس مجموع امتیازاتی که در طی N بار انجام عمل کموتکسیز کسب کرده‌اند مرتب‌سازی می‌شوند. پس از آن نیمی از باکتری‌ها که دارای کمترین امتیاز باشند حذف می‌شوند و بجای هر یک از آن‌ها یک کپی از هر یک از باکتری‌های باقیمانده جایگزین می‌شود. تا زمانی که شرایط مورد نیاز برای ادامه حیاتشان فراهم باشد به طور نامحدود به تکثیر و ازدیاد جمعیت ادامه می‌دهند. در مرحله سوم هر یک از باکتری‌ها با یک احتمال مشخص دچار مرگ و پراکندگی می‌شوند (Tripathy و همکاران، ۲۰۰۶). از برتری BFO نسبت به PSO این است که تعداد تکرارهای هر قسمت از الگوریتم به طور مستقل از سایر قسمت‌ها تعیین می‌گردد، در حالی که در PSO تعداد تکرار برای کل الگوریتم باید به صورت یکجا تعریف شود و این از قابلیت انعطاف الگوریتم می‌کاهد (Zhu و Chen، ۲۰۰۸).

صادقی رام (۱۳۹۳) دو الگوریتم PSO و BFO را در شرایط مساوی با کمینه‌سازی توابع ۲ تا ۲۰ بعدی مورد بررسی قرار داد. نتایج وی نشان داد که دقت همگرایی هر دو الگوریتم در توابع ساده خیلی بالا و در توابع چندبعدی کارآیی BFO بالاتر است. وی بیان کرد که افزایش کارآیی PSO، نیاز به تنظیم مقادیر پارامترها دارد و برای دستیابی به مقادیر بهینه پارامترهای آن می‌توان از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده کرد. قنبری (۱۳۹۰) هماهنگی کوتاه مدت نیروگاه‌های آبی و حرارتی با قیود حفاظتی را مورد مطالعه قرار داد. قیودات این مسأله معادله توازن آب، حدود حجم مخازن، حجم اولیه و نهایی مخازن، نواحی تخلیه ممنوعه، اثرات بارگذاری شیر بخار در منحنی هزینه و توازن توان فعال بود. تابع هدف در این مسأله ارزیابی بهینه آب خروجی از مخازن و تولید هر یک از نیروگاه‌ها با حداقل هزینه بود. وی کند بودن سرعت همگرایی BFO در ابعاد بزرگ را مهم‌ترین عیب آن برشمرد. و کند بودن همگرایی الگوریتم را در یک گام حرکت اصلاح نموده و نتایج خود را با سایر محققین مقایسه، و نتایج را رضایت بخش اعلام کرد.

• الگوریتم دسته ماهی‌های مصنوعی[11]

الگوریتم دسته‌ی ماهی‌های مصنوعی (AFSA) توسط Li و همکاران (۲۰۰۲) ارائه شد. از مهم‌ترین ویژگی‌های این الگوریتم می‌توان به مقیاس‌پذیری، موازی بودن، همگرایی بالا، غیرحساس بودن به مقادیر اولیه اشاره کرد. مهم‌ترین عیب آن پیچیدگی ساختاری و محاسباتی می‌باشد. AFSA در بهینه‌سازی ترکیبی کاربرد دارد. در این زمینه تحقیقاتی درجهت تخمین پارامترها (Zhang و همکاران، ۲۰۰۶) و خوشه‌بندی فازی (Hi و همکاران، ۲۰۰۹) گزارش شده است.

• الگوریتم جهش قورباغه[12]

الگوریتم جهش قورباغه (SFL) جهت طراحی و توسعه بهینه شبکه آب شهری توسط Eusuff و Lansey (۲۰۰۳) ارائه شد. این الگوریتم از نحوه غذایابی قورباغه‌ها الهام گرفته است. و در آن تعدادی قورباغه با ساختار مشابه و انطباق‌پذیری متفاوت وجود دارند. هر قورباغه بیانگر یک راه حل ممکن برای حل مسأله بهینه‌سازی می‌باشد. اجرای SFL در دو مرحله جستجوی سراسری و جستجوی محلی انجام می‌گیرد. قورباغه‌ها متناسب با شایستگی خود به صورت نزولی مرتب می‌شوند سپس همه جمعیت به چند زیر مجموعه تقسیم می‌شود (Rao، ۲۰۰۹). این مسأله باعث می‌شود که قورباغه‌های خوب در زیرمجموعه آخر وجود نداشته باشند که این مسأله فرایند یادگیری را دچار مشکل می‌سازد. در نتیجه امکان گیرافتادن الگوریتم در نقاط محلی و نرسیدن به جواب بهینه سراسری افزایش می‌یابد (Eusuff و Lansey، ۲۰۰۳). همچنین Eusuff و Lansey (۲۰۰۶) الگوریتم SFL را جهت حل مسائل بهینه‌سازی گسسته مهندسی توسعه دادند. Huynh (۲۰۰۸) مکانیزم یادگیری را با اضافه کردن یک عدم قطعیت اصلاح کرد و تحت عنوان جهش قورباغه اصلاح شده (MSFL)[13] ارائه نمود. با توجه به این عدم قطعیت، موقعیت قورباغه جدید با شایستگی کمتر لزوماً به مسیر مستقیمی که بین موقعیت جدیدش و موقعیت بهترین قورباغه است محدود نمی‌شود. بر این اساس قورباغه بدتر می‌تواند از خط غیرمستقیم پرش کند.

Chung و Lansey (۲۰۰۸) جهت بهینه‌سازی یک سیستم پیچیده تأمین آب، شامل لوله‌ها، کانال‌ها، شبکه توزیع، مخزن و تصفیه خانه و ... از الگوریتم SFL استفاده نمودند. در این بهینه‌سازی

تابع هدف به حداقل رساندن هزینه بود. با توجه به وجود چندصد متغیر تصمیم و قیودات پیچیده در این مسأله، آن‌ها نتایج را رضایت بخش گزارش کردند. سارانی و داریان (۱۳۹۲) از دو الگوریتم بهینه‌سازی MSFL وSFL جهت بهره‌برداری از آب مخزن در یک دوره ۱۲ ماهه استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش SFL به جواب بهینه مطلق دست نیافته است، در حالی که روش MSFL به یک جواب بهینه سراسری دست یافته است. آن‌ها در گام بعدی بهینه‌سازی برای یک دوره ۴۲ ساله با گام‌های ماهانه انجام دادند. با توجه به افزایش متغیرهای تصمیم و پیچیده شدن مسأله بهینه‌سازی، نتایج نشان داد که SFL در بهینه‌های محلی گیر افتاد و حتی نتوانست به پاسخ نزدیک بهینه مطلق دست یابد. در حالی که MSFL کارآیی خوبی نشان داد و به نزدیک پاسخ بهینه مطلق دست یافت. آن‌ها در شرایط مشابه عملکرد مخزن را با PSO مورد ارزیابی قرار داده و نتایج را با MSFL مقایسه کردند، که در نتیجه آن کارآیی PSO از MSFL کمتر بوده است.

• بهینه‌سازی جمعی گربه‌ها[۱۴]

بهینه‌سازی جمعی گربه‌ها (CSO) توسط Chu و همکاران (۲۰۰۶) ارائه شد. آن‌ها CSO را در شش مسأله پایه بررسی کردند و نتایج را با PSO مقایسه کردند. نتایج نشان داد که CSO عملکرد بهتری نسبت به PSOدارد. در CSO ابتدا مشخص می‌شود که چند گربه (هر گربه دارای m بعد است که هر بعد دارای یک سرعت می‌باشد) وجود دارد و رفتار گربه‌ها با دو زیرمدل "ردیابی" و "جستجو" مدل می‌شود. در حالت "جستجو" جستجوی استخرحافظه (SMP)[۱۵] جستجو در محدوده تعریف شده ابعاد (SRD)[۱۶] تعداد ابعادی که تغییر می‌کنند (CDC)[۱۷] و در نظر گرفتن موقعیت گربه (SPC)[۱۸] چهار عامل اصلی می‌باشند. با توجه به این چهار عامل هنگامی که گربه در حالت جستجو قرار داشته باشد، به صورت زیر عمل می‌کند.
در گام اول با توجه به حافظه (SMP) ایجاد کپی از گربه مفروض، در گام دوم برای هر کپی CDC درصد از ابعاد آن به صورت تصادفی به علاوه یا منهای SRD درصد از مقدار خودش می‌شود. در گام سوم برای هر یک از نقاط کاندید برازندگی محاسبه می‌شود. در گام چهارم اگر همه برازندگی‌ها با هم برابر نبودند استفاده از هر یک از کاندیدها با استفاده از گام سوم محاسبه می‌شود. در غیر این صورت احتمال انتخاب همه نقاط کاندید عدد یک در نظر گرفته می‌شود. در گام پنجم بهترین کاندید برای حرکت انتخاب و جایگزین می‌شود. در فرآیند "ردیابی" گربه بر اساس سرعتش در هر یک از ابعاد حرکت می‌کند. در گام اول سرعت بروزرسانی می‌شود (با توجه به گام چهارم مرحله ردیابی). در گام دوم بررسی می‌شود که سرعت در محدوده تعریف‌شده باشد. در گام سوم موقعیت بهترین گربه بروزرسانی می‌شود(با توجه به گام پنجم مرحله ردیابی). از مهم‌ترین ضعف CSO همگرایی ضعیف آن است. Tsai و همکاران (۲۰۰۸) با اعمال تغییراتی در مرحله ردیابی طرح بهینه‌سازی جمعی گربه موازی (PCSO)[۱۹] را ارائه نمودند که باعث افزایش همگرایی الگوریتم شد.
صمدزادگان و علیزاده (۱۳۸۹) با استفاده از CSO جهت خوشه‌بندی تصاویر فراطیفی سنجنده‌ی AVIRIS بکار بردند و نتایج را با روش پایه خوشه‌بندی K-Means و PSO مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که خوشه‌بندی CSO توانایی بسیار بالایی نسب به K-Means داشته و در مقایسه با PSO نیز عملکرد مناسب‌تری داشته است. داریان و سارانی (۱۳۹۲) از PCSO در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخزن مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ابتدا از یک دوره کوتاه مدت ۱۲ماهه با گام‌های ماهانه استفاده کردند و نتایج را با EMPSO و PSO و CSO مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که PCSO به جواب بهینه سراسری دست یافته و اختلاف چندانی بین پاسخ الگوریتم‌ها وجود ندارد. سپس در یک دوره بلند مدت ۴۲ ساله با گام‌های ماهانه بهره‌برداری از مخزن مورد بررسی قرار دادند. با توجه به افزایش قابل توجه متغیرهای تصمیم در این حالت اختلاف عملکرد الگوریتم‌ها بیشتر شد. نتایج نشان داد که PCSO با صرف زمان کمتری به نتایج بهتری نسبت به EMPSO و PSO و CSO دست یافته است.

• الگوریتم چرخه آب[۲۰]

الگوریتم چرخه آب (WCA) جهت حل مسائل بهینه‌سازی تحت قید توسط Eskandar و همکاران (۲۰۱۲) ارائه شد. جمعیت اولیه WCA را قطرات باران تشکیل می‌دهند. در ابتدا با فرض یک بارندگی، بهترین قطره به عنوان دریا انتخاب می‌شود. پس از آن قطرات خوب باران به عنوان رودخانه بزرگ و سایر قطره‌ها به عنوان نهر و جوی‌ها در نظر گرفته می‌شوند که به سمت رودخانه و دریا جریان پیدا می‌کنند. در این روش به هر یک قطره که خود معادل یک پاسخ است، "قطره باران" اطلاق می‌شود. در GA و PSO هر یک از این پاسخ‌ها به ترتیب "کروموزوم" و "موقعیت ذره" نام دارند (Eskandar و همکاران، ۲۰۱۲).
در هر دور از اجرای WCA برای هر پارامتر از مسأله (با یک اولویت) مقادیری انتخاب می‌شود. سپس (با در نظر گرفتن شایستگی

مقادیر) با ترکیب مقادیر مربوط به هر پارامتر چندین جواب برای مسأله تولید می‌شود. هر یک از جواب‌های مسأله در بهینه محلی خود (با توجه به میزان بهینه بودن) یک ظرفیت دریافت می‌کند (این ظرفیت میزان ماندگاری آن جواب در تعداد اجراهای متوالی می‌باشد. همچنین احتمال کاندید شدن برای حرکت دیگر جواب‌ها به سمت خود را بیان می‌کند). در هر دور از اجرا جواب‌هایی از مسأله به سمت جوابی بهینه‌تر حرکت می‌کنند. در هر جستجو یک جواب بهینه محلی باقی می‌ماند. در پایان هر دور از این جستجوها، این جواب‌های بهینه محلی وارد مجموعه مقادیر اولیه می‌شوند. بعد از پایان n دور از الگوریتم بهترین جواب دور n ام، جواب بهینه مسأله می‌باشد (Baghipour و همکاران، ۲۰۱۴).

Eskandar و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه تطبیقی میزان کارآیی WCA را با چند الگوریتم بررسی کرد. نتایج آنها نشان داد این الگوریتم از بار محاسباتی کمتر و دقت بالا در یافتن تابع هدف برخوردار است. Bozorg Haddad و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از الگوریتم WCA به بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن کارون ۴ و یک سیستم چهار مخزنه پرداختند و نتایج آن‌ها بیانگر همگرایی خوب و قابلیت اطمینان بالای این الگوریتم بود. اکبری فرد و همکاران (۱۳۹۴) از الگوریتم WCA برای یافتن استراتژی‌های تخصیص بهینه منابع آب در سیستم دو مخزنه سدهای گلستان و وشمگیر برای یک دوره ۵ ساله استفاده کردند. تابع هدف آن‌ها کمینه‌سازی کل کمبود در کل دوره بود. آن‌ها نتایج خود را با الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) و بهره‌برداری استاندارد (SOP) مقایسه کردند. نتایج نشان داد اجرای روش‌های WCA، GSA و SOP به ترتیب قادر به تأمین ۹۸، ۸۵ و ۷۷ درصد از نیاز پایین دست سد گلستان می‌باشد. و بطور مشابه این مقادیر برای سد وشمگیر برابر ۹۷، ۸۹ و ۶۸ درصد بود.

جمع‌بندی

بهینه‌سازی و استفاده هوشمند از امکانات جهت دستیابی به توسعه پایدار منابع آب امری ضروری است. در راستای مدیریت و توسعه پایدار منابع آب، الگوریتم‌های فراکاوشی به عنوان یک ابزار قدرتمند در بهینه‌سازی و کمی کردن محدودیت‌ها جهت غلبه بر چالش‌های مدیریت و توسعه پایدار سیستم‌های منابع آب می‌باشند. در جدول (۱) معرفی الگوریتم‌های فراکاوشی (ذکر شده در بالا)، کاربرد و نقاط ضعف و قوت آن‌ها بطور خلاصه بیان شده است. به طور خلاصه تفاوت بین این الگوریتم‌ها به شرح زیر است.

الگوریتم ژنتیک (GA) از اولین و پرکاربردترین الگوریتم‌های فراکاوشی محسوب می‌شود. در الگوریتم GA نیاز به کدگذاری متغیرهای مسأله با استفاده از رشته‌های دودویی، سبب مصرف حافظه و افزایش بار محاسباتی الگوریتم می‌شود. PSO نیز از محبوبترین الگوریتم‌های فراکاوشی محسوب شده و کاربردهای مختلف، نشان از کارآیی و قابلیت بالاتر آن نسبت به GA دارد. اما به دلیل اضافه شدن سرعت‌هایی با مقادیر تصادفی به متغیرهای مسأله ممکن است مقادیر آن‌ها بطور ناخواسته به خارج از دامنه تعریفشان منتقل شوند. بنابراین دستیابی به قابلیت بالا و کارآیی خوب PSO نیاز به تجربه و کسب مهارت در حل مسائل مختلف دارد. در ACO برخلاف الگوریتم PSO، بدلیل استفاده از مقادیر گسسته برای متغیرهای مسأله، جواب‌های به دست آمده در تمام تکرارها حتماً در دامنه مسأله قرار خواهند داشت؛ امّا دستیابی به جواب بهینه سراسری گاهاً طولانی می‌شود. تنها برتری BFO نسبت به PSO انعطاف‌پذیری آن می‌باشد. چرا که در BFO تعداد تکرارهای هر قسمت از الگوریتم به طور مستقل از سایر قسمت‌ها تعیین می‌گردد. AFSA با غیر حساس بودن به مقادیر اولیه می‌تواند در بهینه‌سازی‌های ترکیبی کارآیی بالایی نشان دهد. SFL از دقیق‌ترین الگوریتم‌های فراکاوشی محسوب شده و در واقع ترکیبی از بهینه‌سازی پیوسته و گسسته است. این الگوریتم در مسائل با دامنه بزرگ جستجوی سراسری به درازا می‌انجامد که در نسخه‌های ارتقا یافته این عیب برطرف شده است. از مهم‌ترین ویژگی‌های آن توانایی حل مسائل غیرخطی، با ابعاد بزرگ و سرعت مناسب در همگرایی است. تجربیات عملی نشان داده این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌های ذکر شده در بالا کارآیی بالاتری دارد. CSO و WCA نیز از الگوریتم‌های فراکاوشی جدید محسوب می‌شود که قابلیت و کارآیی بالایی در جستجوی محلی و سراسری نشان داده است و نیاز به کاربردهای بیشتر دارد.

جدول ۱- معرفی و مقایسه الگوریتم‌های فراکاوشی از نظر کاربرد و نقاط قوت و ضعف

معرفی کلی روش‌های بهینه‌سازی	کاربرد	نقاط قوت	نقاط ضعف
الگوریتم ژنتیک (GA) توسط Halland در سال ۱۹۷۵ ابداع و ذاتاً برای مسائل بهینه‌سازی پیوسته (بیشینه‌سازی) ارائه شده است.	- بهینه‌سازی برنامه‌ریزی مسائل چهارمخزنه - مدل بهره‌برداری بهینه از یک سیستم چندمخزنی - تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان - تخصیص بهینه آب در شبکه آبیاری و زهکشی - بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ	جستجوی سراسری خوب	مصرف زیاد حافظه و جستجوی محلی ضعیف
بهینه‌سازی کلونی مورچه (ACO) توسط Marco Dorigo و همکاران در سال ۱۹۹۱ ابداع و ذاتاً برای مسائل بهینه‌سازی ترکیبی (کمینه‌سازی) ارائه شده است.	- بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره - بهینه‌سازی چند هدفه تخصیص بار آلودگی رودخانه - ابعاد بهینه حوضچه رسوبگیر سد انحرافی	تعداد کم پارامترها و استفاده از مقادیر گسسته	جستجوی سراسری ضعیف
بهینه‌سازی توده ذرات (PSO) توسط Kennedy و Eberhart در سال ۱۹۹۵ ابداع و ذاتا برای بهینه‌سازی پیوسته (بیشینه‌سازی) ارائه شده است.	- طراحی بهینه شبکه توزیع آب شهری - استخراج منحنی فرمان - مدل کوتاه مدت بهره‌برداری بهینه از منابع آب	پیاده‌سازی آسان، تعداد کم پارامترها و همگرایی بالا	جستجوی محلی ضعیف
بهینه‌سازی غذایابی باکتری (BFO) توسط Passino در سال ۲۰۰۲ ابداع و ذاتاً برای بهینه‌سازی پیوسته (کمینه‌سازی) ارائه شده است.	- هماهنگی کوتاه مدت نیروگاه‌های آبی و حرارتی	انعطاف‌پذیری بالا	تعداد پارامترهای زیاد و همگرایی کند
الگوریتم دسته ماهی‌های‌مصنوعی (AFSA) توسط Li و همکاران در سال ۲۰۰۲ ابداع و ذاتاً برای بهینه‌سازی ترکیبی (بیشینه‌سازی) ارائه شده است.	- تخمین پارامترها - خوشه‌بندی فازی	همگرایی بالا، حساس نبودن به مقادیر اولیه، انعطاف‌پذیری و تحمل‌پذیری خطا	پیچیدگی ساختاری و محاسباتی، عدم توازن میان جستجوی سراسری و جستجوی محلی، عدم استفاده از تجربیات گروه برای حرکت بعدی
الگوریتم جهش قورباغه (SFL) توسط Eusuff و Lansey در سال ۲۰۰۳ ابداع و ذاتاً برای بهینه‌سازی پیوسته (کمینه‌سازی) ارائه شده است.	- بهره‌برداری مخزن - طراحی بهینه مخزن - طراحی شبکه آب و تصفیه‌خانه فاضلاب	پیاده‌سازی آسان، انعطاف‌پذیری و همگرایی سریع و دقت جستجو بالا	جستجوی سراسری نسبتاً ضعیف
بهینه‌سازی جمعی گربه‌ها (CSO) توسط Chu و همکاران در سال ۲۰۰۶ ابداع و ذاتاً برای بهینه‌سازی پیوسته (بیشینه‌سازی) ارائه شده است.	- خوشه‌بندی تصاویر فراطیفی سنجنده - بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخزن	قابلیت جستجوی محلی و سراسری خوب	نیاز به کاربرد بیشتر دارد
الگوریتم چرخه آب (WCA) توسط Eskandar و همکاران در سال ۲۰۱۲ ابداع و ذاتاً برای بهینه‌سازی پیوسته (بیشینه‌سازی) تحت قید ارائه شده است.	- بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن - استراتژی‌های تخصیص بهینه منابع آب	همگرایی سریع و دقت بالا، بار محاسباتی کم	نیاز به کاربرد بیشتر دارد

پی‌نوشت

1- Nature-inspired
2- Population-based
3- Metaheuristic Algorithms
4- Genetic Algoritm
5- Ant Colony Optimization
6- Rank-Based Ant System
7- Inequity
8- Wilmate river
9- Particle Swarm Optimization
10- Bacterial Foraging Optimization
11- Artificial Fish Swarm Algorithm
12- Shuffled Frog Leaping Algorithm
13- Modified Shuffled Frog Leaping
14- Cat Swarm Optimization
15- Seeking Memory Pool
16- Seeking Range of the Dimension
17- Counts of Dimension to Change
18- Self-Position Considering
19- Parallel Cat Swarm Optimization
20- Water Cycle Algorithm

منابع

آذرافزا، ه. و رضایی، ح. ۱۳۹۱. مقایسه نتایج بکارگیری الگوریتم‌های SA، GA، PSO در بهینه‌سازی سیستم‌های تک مخزنه، مطالعه موردی سد شهرچای، ارومیه، نشریه آب و خاک، ۲۶(۵): ۱۱۰۱-۱۱۰۸.

اکبری فرد، س.، قادری، ک. و علیان‌نژاد، م. ۱۳۹۴. بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن با استفاده از دو الگوریتم چرخه آب و جستجوی گرانشی (مطالعه موردی حوزه آبریز گرگانرود). نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی، ۵(۲): ۶۹-۸۱.

جوادزاده حقیقت، س. ۱۳۸۹. تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان توسط تکنیک بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران- منابع آب. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

حسین‌زاده، ح.، افشار، ع. و شریفی، ف. ۱۳۸۹. تخصیص بهینه بار آلودگی چندهدفه با استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌گان. مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۶(۱): ۱۲۲-۱۳۶.

داریان، ع.ر. و سارانی، س. ۱۳۹۲. الگوریتم بهینه‌سازی موازی گروه گربه در بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب. کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران و معماری. دانشگاه آزاد تبریز، تبریز، ایران.

رجب‌پور، ر.، سامی کشکولی، ب.، فرجی، ط.، محمدزاده، ا. و سیف، ا. ۱۳۹۲. بهینه‌سازی هزینه انرژی مصرفی در سامانه‌های انتقال آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک. نشریه مباحث برگزیده در انرژی، ۲(۱): ۲۱-۳۳.

سارانی، س. و برهانی داریان، ع.ر. ۱۳۹۲. کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه در سیستم‌های منابع آب. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

صابرچناری، ک.، عبقری، ه. و عرفانیان، م. ۱۳۹۱. ارائه مدل کوتاه مدت بهره‌برداری بهینه از منابع آب با استفاده از الگوریتم جامعه ذرات و مقایسه آن با الگوریتم ژنتیک. مجله پژوهش‌های آبخیزداری، ۹۱(۳): ۴۸-۶۰.

صادقی رام، س. ۱۳۹۳. مقایسه کارآیی الگوریتم‌های بهینه‌سازی اجتماع ذرات و غذایابی باکتری در بهینه‌سازی مسائل چند بعدی. اولین کنفرانس ملی ریاضیات، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

صمدزادگان، ف. و علیزاده، ا. ۱۳۸۹. خوشه‌بندی داده‌های فراطیفی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه گربه‌سانان. نشریه علمی-ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، ۴(۱): ۱۱۳-۱۲۵.

عمادی، ع. و کاکویی، س. ۱۳۹۳. تعیین ابعاد حوضچه رسوبگیر با در نظر گرفتن خصوصیات هیدرولیکی، رسوبی و سازه‌ای با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۱(۲): ۷۱-۸۵.

قدمی، س م.، قهرمان، ب.، شریفی، م.ب. و رجبی مشهدی، ح. ۱۳۸۸. بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی منابع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۵(۲): ۱۲۰-۱۳۴.

قنبری، م. ۱۳۹۰. هماهنگی کوتاه مدت نیروگاه‌های آبی و حرارتی با قیود حفاظتی. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد برق قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر. دانشگاه سمنان.

کارآموز، م.، احمدی، آ. و نظیف، س. ۱۳۸۵. چالش‌ها و فرصت‌های بکارگیری مدل‌های بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های منابع آب. اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده‌رود، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

کارآموز، م.، زهرایی، ب. ۱۳۸۲. انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب. مجله علمی پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف،۲۳(۳): ۳۹-۵۲.

کیافر، ح.، اشرف صدرالدینی، ع.، ناظمی، ا.ح. و ثانی‌خانی، ه. ۱۳۹۰. تخصیص بهینه آب در شبکه آبیاری و زهکشی در استان آذربایجان شرقی با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۵(۲): ۴۵-۶۰.

Baghipour R., Hosseini S.M. and Boor Z. 2014. A Water Cycle Algorithm for Optimal Allocation of DGs in Distribution System Considering Environmental Profit. International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology, 4(11): 430-454.

Bozorg Haddad O., Moravej M. and Loáiciga H.A. 2014. Application of the Water Cycle Algorithm to the Optimal Operation of Reservoir Systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 141(5):140-164.

Bullnheimer B., Hartl R.F. and Strauss C. 1999. A new rank-based version of the Ant System: Acomputational study. Central European Journal for Operations Research and Economics, 7(1): 25-38.

Chen H. and Zhu Y. 2008. Optimization based on symbiotic multi-species coevolution. journal on Applied Mathematics and Computation, 22(3): 179-194.

Chu SC., Tsai PW. and Pan JS. 2006. Cat swarm optimization, Proc. of the 9th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, LNAI. (p. 854-858)

Chung G. and Lansey K. 2008. Application of the Shuffled Frog Leaping Algorithm for the Optimization of a General Large-Scale Water Supply System. Water Resource Manage, 23(3): 797-823.

Darigo M., and Stutzle T. 2008. Ant Colony Optimization IEEE Computational Intelligent Magazine, (p. 28-39).

Eskandar H., Sadollah A., Bahreininejad A. and Hamdi M. 2012. Water cycle algorithm -A nov-

2008. Particle Swarm Optimization applied to the design of water supply systems. Computers and Mathematics with Applications, (p. 769–776).

Passino K.M. 2002. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. IEEE Control Systems Magazine, 22(3): 52-67.

Sandoval S., McKinney D. and Loucks P. 2011. Sustainability index for water resources planning and management, 106(10): 381–468.

Shi Y. and Eberhart R.C. 1998. A modified Particle Swarm Optimizer, in Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, (p. 69-73).

Simonovic S.P. 2009. Managing water resources, methods and tools for a system approach. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris.

tripathy m., mishra l., lai l. and zhang q. 2006. transmission loss reduction based on FACTS and bacteria foraging algoritm. In Proceedings of the 9th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN IX), (p. 222-231).

Tsai PW., Pan JS., Chen SM., Liao BY. and Hao SP. 2008. Parallel Cat Swarm Optimization. Proceedings of the Seventh International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Kunming, (p. 3328-3333).

Tukey J. 1965. The future of data analysis. Ann. Math. Stat., 33(1):13.

Wardlaw R. and Sharif M. (1999) Evaluation of Genetic Algorithms for Optimal Reservior System Operation. Journal of Water Resource Planning and Management ASCE, 125(1): 25-33.

Yaghini M. and Akhavan R. 2010. DIMMA A Design and Implementation Methodology for Metaheuristic Algorithms - A Perspective from Software Development. International Journal of Applied Metaheuristic Computing, 1(4): 57-74.

Zhang M., Shao C. Li M. and Sun J. 2006. Mining Classification Rule with Artificial Fish Swarm, In 6thWorld Congress on Intelligent Control and Automation, (p. 5877-5881).

el metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. Computers and Structures, (p.151–166).

Eusuff M. and Lansey K. 2003. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. Journal of Water Resources Planning and Management, 129(2): 210–215.

Eusuff M., Lansey K. and Pasha F. 2006. Shuffled frog-leaping algorithm a memetic meta-heuristic fordiscrete optimization. Engineering Optimization, 38(2): 129-154.

Halland J. 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems. MIT Pess Combridge, (p. 228).

Hi S., Belacel N., Hamam H. and Bouslimani Y. 2009. Fuzzy Clustering with Improved Artificial Fish Swarm Algorithm. In International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, (p. 317-321).

Hjorth P. and Madani M. 2014. Sustainability Monitoring and Assessment New Challenges Require New Thinking. Journal Of Water Resources Planing And Management, (140)2: 133-135

Huynh T.H. 2008. A Modified Shuffled Frog Leaping Algorithm for Optimal Tuning of Multivariable PID Controllers. Industrial Technology, ICIT, IEEE International Conference on, Chengdu, (p. 1-6).

Izquierdo J., Montalvo I., Perez R. and Fuertes V. 2008. Design optimization of wastewater collection networks by PSO. Computers and Mathematics with Applications. (p. 777-784).

Kennedy J. and Eberhart R.C. 1995. Particle swarm optimization, in Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, Perth, Australia, (p. 1942-1948).

Kumar D.N., and Reddy M.J. 2006. Ant Colony Optimization for Multi-Purpose Reservoir Operation. Journal of Water Resources Management, 20(6): 879-898.

Li L., X Shao Z.J. and Qian J.X. 2002. An Optimizing Method Based on Autonomous Animate Fish Swarm Algorithm. In Proceeding of System Engineering Theory and Practice, (p. 32-38).

Montalvo I., Izquierdoa J., Pereza R. and Tungb M.M.