نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و سوم، شماره پنجم، ۱۳۹۵
http://jwsc.gau.ac.ir

بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ سیستم‌های تأمین آب با استفاده از الگوریتم جامعه زنبورهای عسل مصنوعی (ABC)

بهرام سامی‌کشکولی[۱]، *مهدی بهرامی[۲] و محمد انصاری‌جابری[۳]

[۱]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، [۲]استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فسا،
[۳]کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران، مدیر بنیاد مسکن انقلاب اسلامی فسا

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/٤/۲۹

چکیده

سابقه و هدف: امروزه با افزایش سرسام‌آور هزینه‌های انرژی مصرفی در ایستگاه‌های پمپاژ، تعیین برنامه زمانی مناسب بهره‌برداری از پمپ‌های یک سامانه انتقال آب در جهت صرفه‌جویی در میزان هزینه انرژی به‌عنوان یک موضوع پژوهشی بسیار مورد توجه است. در بسیاری از ایستگاه‌های پمپاژ دستورالعمل خاصی برای بهره‌برداری از پمپ‌های موجود وجود ندارد و متصدی ایستگاه طبق تجربه و نیازی که به او اعلام می‌شود اقدام به روشن و خاموش کردن پمپ‌ها می‌نماید. این روش سنتی هزینه زائد بسیار زیادی را به سیستم تحمیل می‌کند. بنابراین علاوه بر طراحی صحیح ایستگاه‌های پمپاژ، بهره‌برداری از این ایستگاه‌ها نیز دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای است. مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر هزینه انرژی سیستم‌های پمپاژ، نحوه عملکرد پمپ‌ها می‌باشد. استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی این امکان را فراهم می‌آورد تا با تنظیم بهینه فعالیت پمپ‌ها در دوره‌های زمانی کم باری و همچنین پرهیز از استفاده از پمپ‌ها در شرایط بهره‌برداری با راندمان پایین، هزینه انرژی مصرفی پمپاژ را مدیریت نمود. در این پژوهش برای حل این مسأله از یکی از انواع نوظهور الگوریتم‌های الهام‌گرفته از رفتار زنبورهای عسل تحت عنوان الگوریتم جامعه زنبورهای عسل مصنوعی (ABC) استفاده شد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش برنامه بهره‌برداری از یک پمپ به‌صورت رشته‌ای از مقادیر صفر و یکی به‌گونه‌ای تعریف شد که هر یک از خانه‌های این رشته وضعیت روشن یا خاموش بودن آن پمپ در یک دوره زمانی به‌خصوص را نشان دهد و مسأله تعیین برنامه بهره‌برداری بهینه پمپ‌ها به‌صورت مسأله تعیین بهترین رشته صفر و یکی کد شد. یک مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی مبتنی بر الگوریتم جامعه زنبورهای مصنوعی صفر و یکی (BitABC) برای مسأله تعیین برنامه بهره‌برداری بهینه پمپ‌ها ارائه شد. در این مدل الگوریتم جامعه زنبورها در محیط MATLAB با بخش هیدرولیکی مدل EPANET به‌عنوان مرجعی از فرامین و اطلاعات تلفیق شد و سپس برای تعیین برنامه بهینه بهره‌برداری از سامانه انتقال آب شیراز استفاده گردید. بدین‌منظور در یک روز عادی برنامه بهینه بهره‌برداری از پمپ‌های این سامانه تعیین گردید. سپس حالت بهره‌برداری بهینه در این روز خاص با یک سناریوی بهره‌برداری معمول مورد مقایسه قرار گرفت. هزینه متوسط انرژی الکتریکی در این پژوهش برابر ۲۷۵ ریال در نظر گرفته شد.

* مسئول مکاتبه: mehdibahrami121@gmail.com

یافته‌ها: نتایج نشان داد که ضمن رعایت همه قیود مسأله، هزینه انرژی در حالت بهره‌برداری بهینه ۳۲ درصد نسبت به بهره‌برداری کنونی کاهش داشت. همچنین استفاده از الگوریتم BitABC حدود ۸ درصد باعث بهبود پاسخ بهینه روش الگوریتم PSO- با همسایگی کلی شد ولی هزینه پاسخ به‌دست آمده در این پژوهش از الگوریتم PSO با همسایگی موضعی حدود ۲ درصد بیش‌تر بود.

نتیجه‌گیری: مقایسه برنامه بهینه بهره‌برداری استخراج شده با نتایج پژوهش‌های پیشین و همچنین شرایط بهره‌برداری عادی، توانایی مدل را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جامعه زنبور مصنوعی، ایستگاه‌های پمپاژ، EPANET

مقدمه

قسمت قابل‌توجهی از هزینه‌های بهره‌برداری سالانه سیستم‌های تأمین و توزیع آب مربوط به بهره‌برداری از پمپ‌ها می‌باشد. حداقل‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری توأم با تأمین آب با فشار مناسب و حفظ ذخیره روزانه مخازن هدف اصلی برنامه‌های زمان‌بندی پمپاژ تلقی می‌شود. در بسیاری از ایستگاه‌های پمپاژ دستورالعمل خاصی برای بهره‌برداری از پمپ‌های موجود وجود ندارد و متصدی ایستگاه طبق تجربه و نیازی که به او اعلام می‌شود اقدام به روشن و خاموش کردن پمپ‌ها می‌نماید. این روش سنتی هزینه‌های مازادی را به سیستم تحمیل می‌کند. بنابراین علاوه بر طراحی صحیح ایستگاه‌های پمپاژ، بهره‌برداری از این ایستگاه‌ها نیز دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای می‌باشد. مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر عملکرد سیستم‌های پمپاژ، نحوه عملکرد پمپ‌ها می‌باشد. از آن‌جا که راندمان هر پمپ در دبی‌های مختلف متغیر است بنابراین میزان انرژی مصرفی در واحد حجم آب پمپاژ شده در هر پمپ به در دبی‌های مختلف پمپاژ متفاوت است و حتی‌الامکان باید پمپ‌ها به گونه‌ای کار کنند که در حالت حداکثر راندمان خود فعال باشند. همچنین زمان‌بندی پمپاژ اهمیت ویژه‌ای دارد، چون تعرفه قیمت برق در ساعات مختلف شبانه‌روز متفاوت است (۸). واقعیت این است که یافتن برنامه زمان‌بندی بهینه پمپ‌های سامانه‌های تأمین و توزیع آب بسیار دشوار است و سال‌هاست که ذهن مدیران شبکه‌ها و پژوهشگران را به خود معطوف کرده است. دلیل اصلی دشوار بودن چنین مسأله‌ای را می‌توان به مواردی نظیر پیچیدگی و گستردگی سیستم‌های توزیع آب، تغییرات زیاد الگوی مصارف و پیچیده‌بودن تعرفه‌های زمانی قیمت انرژی، نسبت داد. مکل و همکاران (۱۹۹۵) و رودین و همکاران (۱۹۹۸ و ۲۰۰۲) از الگوریتم ژنتیک و یوان و لیو (۲۰۱۲) از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها، برای بهینه‌سازی برنامه بهره‌برداری یک سیستم پمپاژ با یک ایستگاه منفرد استفاده کردند (۵، ۹، ۱۰، ۱۱). رجب‌پور و افشار (۲۰۰۸) از الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی برنامه بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ متوالی سامانه انتقال آب از سد درودزن به شهر شیراز استفاده نمودند (۸). در پژوهش ایشان قیمت انرژی در طول یک شبانه‌روز ثابت در نظر گرفته شده و اثر تغییرات قیمت لحاظ نشد. از طرف دیگر با توجه به متغیر بودن دور پمپ‌ها، مسئله بهینه‌سازی مورد بررسی ایشان پیوسته بود. همچنین در مدل ایشان برنامه زمان‌بندی یک پمپ به‌صورت یک رشته عدد صحیح تعریف شده است که دبی پمپاژ هر پمپ را مشخص می‌نماید. مهرجو (۲۰۱٤) از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی بهره‌برداری ایستگاه‌های پمپاژ سامانه انتقال

آب سد درودزن به شیراز استفاده نمود (٦). هاشمی و همکاران (۲۰۱۳) از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها برای بهینه‌سازی برنامه بهره‌برداری از پمپ‌های دور متغیر استفاده نمودند و نشان دادند که استفاده از پمپ‌های دور متغیر به جای پمپ‌های دور ثابت می‌تواند هزینه انرژی مصرفی برنامه بهینه بهره‌برداری را کاهش دهد (۱).

در سال‌های اخیر الگوریتم جامعه زنبورهای مصنوعی (ABC[1]) به‌عنوان یک الگوریتم نوظهور مبتنی بر رفتار جمعی توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. این الگوریتم از رفتار زنبورهای عسل در شناسایی بهترین منبع غذایی الهام گرفته است. این الگوریتم اولین بار توسط کارابوگا (۲۰۰۵) برای بهینه‌سازی مسائل بهینه‌سازی عددی ارائه شد (۳). کاشان و همکاران (۲۰۱۲) با اعمال تغییراتی در الگوریتم ABC اولیه، الگوریتم DisABC را برای مسائل گسسته با متغیرهای تصمیم "صفر و یکی" توسعه دادند. در این الگوریتم بردار عملگر تفریق در ABC اولیه با یک بیان تفاضلی دیگر (مبتنی بر عدم مشابهت بردارهای صفر و یکی) جایگزین شده است (٤). علاوه بر این پامپارا و انگلبرات (۲۰۱۱) با الهام گرفتن از الگوریتم‌های صفر و یکی PSO و DE، سه نسخه "صفر و یکی" دیگر از ABC را با نام‌های BinABC، AMABC و normABC ارائه نمودند (۷).

هدف از پژوهش حاضر استفاده از الگوریتم جامعه زنبورهای مصنوعی ویژه مسائل صفر و یکی در بهینه‌سازی نحوه بهره‌برداری (روشن یا خاموش بودن) از پمپ‌های موجود در سیستم پمپاژ سامانه انتقال آب از سد درودزن به شهر شیراز بود تا علاوه بر تأمین نیاز مصرف‌کننده، هزینه برق مصرفی حداقل شود.

1- Artificial Bee Colony

مواد و روش‌ها

الگوریتم بهینه‌سازی: در این پژوهش مسأله بهینه‌سازی برنامه بهره‌برداری پمپ‌ها در یک سامانه انتقال آب با ایستگاه‌های پمپاژ متوالی مدنظر قرار گرفت. در این مسأله وضعیت پمپ‌های سامانه (روشن یا خاموش بودن آن‌ها) در یک دوره زمانی ٢٤ ساعته به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شد. در این‌جا با توجه به ماهیت متغیرهای تصمیم مسأله، از الگوریتم BitABC ویژه مسائل "صفر و یکی" استفاده شد. الگوریتم BitABC ورژن "صفر و یکی" الگوریتم ABC است که اولین بار توسط توسط ژیا و همکاران (۲۰۱٤) توسعه داده شده و تا حد زیادی به ساختار ABC اولیه وفادار است و تنها تفاوت آن در نحوه اعمال جستجوی محلی است (۲). در این الگوریتم رابطه جبری اصلی جستجوی محلی الگوریتم ABC با یک رابطه تشکیل شده از عملگرهای منطقی (صفر و یکی) جایگزین شده است و محل جدید منبع غذایی برای یک زنبور با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$v_{ij} = x_{ij} \Lambda \left(\phi_{ij} \,\&\, \left(x_{ij} \mid x_{kj} \right) \right) \qquad (۱)$$

که در آن، علامت "Λ" نشان‌دهنده عملگر صفر و یکی "xor"، علامت "&" نشان‌دهنده عملگر صفر و یکی "and" و علامت "|" نشان‌دهنده عملگر صفر و یکی "or" می‌باشند. در ABC اصلی پارامتر ϕ_{ij} یک عدد حقیقی تصادفی بین ۱ و ۱- است و ایجاد منابع غذایی جدید در اطراف x_{ij} توسط آن کنترل می‌شود. اما در الگوریتم BitABC پارامتر ϕ_{ij} تنها می‌تواند یکی از مقادیر ۰ یا ۱ را اختیار کند. در این الگوریتم با تعریف پارامتری تحت عنوان r احتمال نسبت داده شدن ۰ یا ۱ به پارامتر ϕ_{ij} به‌صورت زیر کنترل می‌شود:

$$\phi_{ij} = \begin{cases} 1 if\ rand\ (0,1) < r \\ 0 if\ rand\ (0,1) \geq r \end{cases} \qquad (۲)$$

مدل شبیه‌سازی: اولین گام تهیه یک مدل EPANET از مسأله موردنظر می‌باشد. بدین‌منظور همه مشخصات شبکه از قبیل مشخصات خطوط لوله، شیرآلات، مخازن و تانک‌ها در مدل وارد شد. مشخصات پمپ‌های شبکه از قبیل منحنی کارکرد و منحنی راندمان آن‌ها برای مدل تعریف شد. همچنین مقادیر مصرف و الگوی مصرف پایین‌دست و نیز الگوی تغییرات قیمت انرژی در ساعات مختلف شبانه‌روز برای مدل تعریف گردید. در یک سامانه انتقال آب با ایستگاه‌های پمپاژ متوالی، هزینه انرژی مصرفی پمپاژ و همچنین تغییرات تراز مخازن ذخیره در دوره بهره‌برداری از طریق شبیه‌سازی بهره‌برداری تعیین می‌شوند. با استفاده از مدل شبیه‌سازی هزینه انرژی مصرفی در یک دوره زمانی با روابط زیر تعیین می‌شود:

$$EnergyCost = \sum_{s=1}^{st}\sum_{j=1}^{m(s)}\sum_{t=1}^{K}(E_{sjt} \times CE_t) \qquad (۳)$$

$$E_{sjt} = P_{sjt} \times \Delta t \qquad (٤)$$

$$P_{sjt} = \rho g \frac{Q_{sjt} H_{st}}{e_{sjt}} \qquad (٥)$$

که در آن، Energy Cost هزینه انرژی پمپاژ کل سیستم در طول دوره زمانی موردنظر است که هدف تعیین مقدار کمینه آن است، E_{sjt}، P_{sjt}، Q_{sjt} و e_{sjt} به‌ترتیب انرژی مصرفی، توان مصرفی، دبی و راندمان پمپ j ام ایستگاه s ام در بازه زمانی t ام می‌باشند و CE_t قیمت هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی در بازه زمانی t ام، H_{st} ارتفاع پمپاژ ایستگاه s ام در بازه زمانی t ام، Δt طول بازه زمانی، m(s) تعداد پمپ‌ها در ایستگاه s، K تعداد بازه‌های زمانی، s_t تعداد ایستگاه‌های پمپاژ می‌باشند.

در رابطه ۵ ارتفاع پمپاژ ایستگاه s ام در بازه زمانی t ام (H_{st}) با توجه به مقادیر اختلاف هد استاتیکی ایستگاه (اختلاف ارتفاع سطح آب در مخزن بعد و قبل از ایستگاه) در دوره زمانی t ام (HS_{st}) و افت‌های موجود در مسیر پمپاژ (Hf_{st}) از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$H_{st} = HS_{st} + Hf_{st} \qquad (٦)$$

$$Hf_{st} = \frac{10.68L}{D^{4.85}}\left(\frac{\sum_{j=1}^{m(s)} Q_{st}}{C}\right)^{1.852} \qquad (۷)$$

در رابطه ۷، L و D و C به‌ترتیب طول مسیر پمپاژ، قطر لوله و ضریب هیزن ویلیامز لوله در هر ایستگاه و Q_{st} دبی پمپاژ کل ایستگاه است که برابر مجموعه دبی پمپاژ پمپ‌های آن ایستگاه در بازه زمانی موردنظر است. لازم به ذکر است که دبی هر پمپ در هر بازه زمانی با توجه به رابطه منحنی مشخصه پمپ تابعی از ارتفاع پمپاژ ایستگاه می‌باشد. از طرف دیگر ارتفاع پمپاژ ایستگاه که برابر میزان افت در مسیر پمپاژ است، نیز مطابق رابطه‌های ٦ و ۷ تابعی از دبی پمپاژ است. بر این اساس در طول شبیه‌سازی مقادیر Q_{sjt} و H_{st} هر ایستگاه در هر دوره زمانی t به‌نحوی محاسبه می‌شوند که به‌طور هم‌زمان در رابطه ٦ و معادله مشخصه پمپ صدق کنند. علاوه بر این راندمان پمپاژ (e_{sji}) نیز تابعی از دبی پمپ و ارتفاع پمپاژ است.

لازم به ذکر است که در مدل‌سازی مخازن ذخیره در مدل EPANET2 قید حداقل و حداکثر عمق مخزن لحاظ نمی‌شود. دلیل این امر آن است که با لحاظ کردن قیود حداقل و حداکثر در مدل، هنگامی که برنامه بهره‌برداری متناظر با یک پاسخ باعث تخطی عمق آب در یک بازه زمانی از دوره بهره‌برداری شود، مدل EPANET به‌طور اتوماتیک بدون این‌که به برنامه بهره‌برداری تحمیل شده توسط گزینه مورد

بررسی توجه کند در جهت رعایت این قیود ممکن است به همراه پیام اخطار یک یا چند عدد از پمپ‌ها را خاموش کند. بدین‌ترتیب عملاً برنامه بهره‌برداری شبیه‌سازی شده با برنامه تحمیل‌شده توسط گزینه مغایریت پیدا می‌کند و این مسأله روند بهینه‌سازی را مختل می‌کند. برای اجتناب از این مسأله برای مخازن ذخیره عمق حداقل و حداکثر غیرواقعی تعریف شده و اجازه داده می‌شود که سیستم دقیقاً مطابق برنامه تحمیل شده توسط گزینه بهره‌برداری شود. آن‌گاه در صورتی که عمق مخازن در یک گزینه از حداقل یا حداکثر تجاوز کرده باشد، متناسب با مقدار تخطی گزینه مربوطه در هنگام محاسبه تابع هدف جریمه می‌شود.

متغیرهای تصمیم، تابع هدف و قیود مسأله بهینه‌سازی: تابع هدف در مسأله مورد بررسی به حداقل رساندن میزان هزینه انرژی مصرفی در طول شبانه‌روز بود. متغیرهای تصمیم وضعیت روشن و خاموش بودن پمپ‌های موجود در هر ایستگاه در ساعات مختلف شبانه‌روز می‌باشد. محدودیت‌های این مسأله را می‌توان در دو بخش تقسیم نمود. بخش اول قید تأمین نیاز پایین‌دست و قیدهای هیدرولیکی مربوط به پمپ‌های موجود، قانون پیوستگی و قانون بقای انرژی می‌باشد که به‌صورت ضمنی در فرآیند شبیه‌سازی لحاظ می‌شود. از آن‌جا که ایستگاه‌های پمپاژ به‌صورت متوالی قرار گرفته‌اند، با رعایت قیدهای فوق در خلال شبیه‌سازی خروجی از هر مخزن برابر ورودی به مخزن بعدی و خروجی از مخزن انتهایی برابر نیاز پایین‌دست خواهد بود.

بخش دیگر قیدها مربوط به مخازن ذخیره است. این قیدها بیان می‌کنند که عمق آب مخازن در طول دوره بهره‌برداری نباید از حداقل و حداکثر ظرفیت مخزن تجاوز کند. همچنین در جهت جلوگیری از خالی شدن مخزن در انتهای دوره بهره‌برداری قید دیگری تحت عنوان کمبود عمق نیز لحاظ می‌شود. این قید بیان می‌کند که عمق آب ذخیره شده در مخازن در انتهای دوره نسبت به ابتدای دوره نباید کاهش داشته باشد. این قیدها را می‌توان با رابطه زیر نوشت:

$$H_k^t \le H_{\max,k} \quad H_k^t \ge H_{\min,k} \quad H_k^t \ge H_{Ini,k} \qquad (۸)$$

که در آن، $H_{max,k}$ ارتفاع حداکثر مجاز ذخیره آب در مخزن k، $H_{min,k}$ ارتفاع حداقل مجاز ذخیره آب در مخزن k، $H_{Ini,k}$ عمق آب در مخزن k در ابتدای دوره بهره‌برداری و H_k^t ارتفاع آب داخل مخزن k در زمان t می‌باشند.

الگوریتم BitABC مقادیری تصادفی را برای متغیرهای تصمیم (وضعیت روشن و خاموش بودن هر پمپ در هر ساعت) انتخاب می‌کند. سپس برای هر متغیر تصمیم میزان تخلف از قیود محاسبه می‌گردد و در نهایت هزینه کل انرژی مصرفی برای تمام متغیرهای تصمیم محاسبه می‌گردد. از طرفی چون مسأله حاضر یک مسئله مقید می‌باشد و الگوریتم BitABC برای مسائل نامقید می‌باشد، بنابراین مسأله با اضافه کردن جریمه به تابع هدف به‌صورت نامقید تعریف می‌شود. برای محاسبه تابع هدف یک گزینه، رشته صفر و یکی به‌صورت مجموعه‌ای از عبارت‌های کنترلی که تغییر وضعیت پمپ را دستور می‌دهند، برای مدل EPANET تعریف شده و سپس با حل هیدرولیکی گزینه موردنظر در مدل EPANET به‌ازای مقادیر کنترل تنظیم‌شده مقدار تابع هدف (Fitness Value) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$FitnessValue = EnergyCost + Penalty1 + Penalty2 \qquad (۹)$$

هزینه انرژی (Energy Cost): توسط مدل EPANET به‌صورت مستقیم محاسبه گردید. برای محاسبه هزینه انرژی در مدل EPANET از رابطه ۳ استفاده می‌شود.

Penalty1: جریمه‌ای که برای انحراف گزینه موردنظر از تراز حداکثر و حداقل مجاز مخازن در نظر گرفته شد. مقدار این جریمه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Penalty1 = \alpha \times \left\{ \begin{array}{ll} \sum_{K=1}^{Nt}\sum_{t=1}^{T}(\frac{H_k^t}{H_{\min,k}}-1)^2 & \forall \quad H_k^t < H_{\min,k} \\ \sum_{K=1}^{Nt}\sum_{t=1}^{T}(\frac{H_k^t}{H_{\max,k}}-1)^2 & \forall \quad H_k^t > H_{\max,k} \end{array} \right\} \quad (۱۰)$$

که در آن، k شماره مخزن، N_t تعداد کل مخازن، t شماره بازه زمانی موردنظر و T تعداد کل بازه‌های زمانی است که مقادیر عمق آب در مخازن محاسبه می‌شود.

Penalty2: جریمه‌ای است که برای به‌وجود آمدن کمبود عمق در نظر گرفته می‌شود. کمبود عمق عبارت است از کمبود عمق مخزن ذخیره‌ای در انتهای دوره نسبت به عمق آن در ابتدای دوره که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Penalty2 = \beta \times \left\{ \sum_{K=1}^{Nt}(\frac{H_k^T}{H_{Ini,k}}-1)^2 \quad \forall \quad H_k^T < H_{Ini,k} \right\} \quad (۱۱)$$

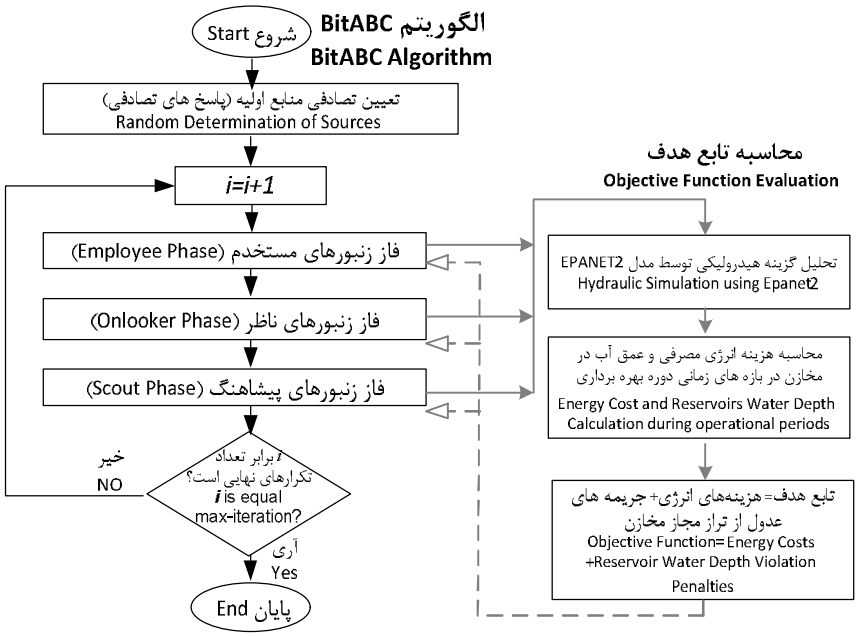
که در آن، α و β ضرایب جریمه می‌باشند. مقدار مناسب این پارامترها در هنگام استفاده از مدل و با سعی و خطا تعیین می‌شود. به این ترتیب که اگر مقادیر آن‌ها کوچک در نظر گرفته شود باعث می‌شود جواب نهایی به‌دست آمده توسط الگوریتم قیدهای مربوطه را رعایت نکرده باشد. اگر هم بسیار بزرگ در نظر گرفته شوند باعث می‌شود با جریمه بسیار سنگین برای کوچک‌ترین مقدار تخطی که ممکن است از نظر فیزیکی کاملاً قابل‌قبول باشد، امکان جستجوی مرزها که در واقع پاسخ بهینه در آن‌جا قرار دارد برای الگوریتم محدود شود.

شکل ۱ فلوچارت مدل کامپیوتری تهیه‌شده برای تعیین دستورالعمل نحوه بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ متوالی را نشان می‌دهد. اساس کار این مدل تلفیق تحلیل‌گر هیدرولیکی و الگوریتم BitABC در محیط MATLAB می‌باشد. مدل بهینه‌سازی موردنظر در محیط MATLAB توسعه داده شد. در این مدل برای شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه و تعیین پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز، بخش هیدرولیکی مدل EPANET2 به‌عنوان مرجعی از فرامین و اطلاعات (DLL[1]) در محیط MATLAB وارد شده و با فراخوانی دستورات لازم شبکه موردنظر تحلیل هیدرولیکی می‌گردد. مدل بهینه‌سازی که برای مسأله‌ای با فرمول‌بندی ذکر شده در بخش قبل توسعه داده شد، در محیط MATLAB با تحلیل‌گر هیدرولیکی شبکه تلفیق گردید.

ایستگاه‌های پمپاژ سامانه انتقال آب سد درودزن به شیراز: انتقال آب از سد درودزن به شهر شیراز با پمپاژ انجام می‌شود و هزینه‌های جاری این طرح با حذف یارانه‌های برق به‌تدریج افزایش می‌یابد. سد درودزن در فاصله ۱۲۰ کیلومتری از شهر شیراز واقع شده که سالانه ٦٧ میلیون مترمکعب آب شرب و صنعتی را تأمین می‌کند که از این بین ۲۷ میلیون مترمکعب آن در اختیار پتروشیمی که در فاصله ۵۰ کیلومتری از شیراز واقع شده است، قرار می‌گیرد و بقیه به شهر منتقل می‌شود (شکل ۲).

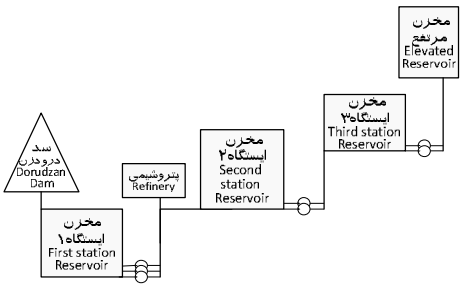
شکل ۳ نیز شکل شماتیک مدل EPANET سیستم تأمین آب شهر شیراز از سد درودزن را نشان می‌دهد.

1- Dynamic Link Library



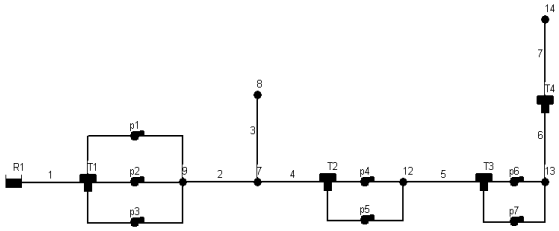
شکل ۱- فلوچارت مدل بهینه‌سازی- نحوه ارتباط الگوریتم BitABC و مدل EPANET.

Figure 1. The optimization model flowchart-Connection between BitABC algorithm and EPANET.



شکل ۲- شکل شماتیک طرح آبرسانی به شهر شیراز.

Figure 2. Schematic diagram of the Shiraz supply project.



شکل ۳- شکل شماتیک مدل EPANET سیستم تأمین آب شهر شیراز از سد دورودزن.

Figure 3. Schematic diagram of the Shiraz water supply system from Doroudzan dam in EPANET model.

برای آزمایش قابلیت مدل بهینه‌سازی تهیه شده، مسأله بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ موجود در طرح آبرسانی از سد دورودزن به شهر شیراز در یک روز معمولی مورد بررسی قرار گرفت. برای جزئیات توزیع زمانی نیازآبی شهر شیراز در روز انتخابی و سایر جزئیات سیستم انتقال به پژوهش رجب‌پور و افشار (۲۰۰۸) مراجعه شود.

در بیش‌تر موارد قیمت انرژی الکتریکی در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز متفاوت است. بر این اساس یکی از مهم‌ترین ارکان بهینه‌سازی هزینه‌های انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ، اطلاع از ساختار محاسبه قیمت انرژی الکتریکی در محل است. به‌طورکلی ساعات شبانه‌روز به ۳ دوره کم‌باری، میان‌باری و پرباری تقسیم شده و قیمت برق در هر دوره متفاوت است. در این پژوهش براساس بخش‌نامه‌های رایج وزارت نیرو در محاسبه قیمت انرژی الکتریکی ساختار محاسبه قیمت انرژی به‌صورت جدول ۱ در نظر گرفته شد. قابل ذکر است که هزینه متوسط انرژی الکتریکی در این پژوهش برابر ۲۷۵ ریال در نظر گرفته شد.

جدول ۱- ساختار محاسبه قیمت انرژی الکتریکی (ریال) در دوره‌های کم‌باری، میان‌باری و پرباری.

Table 1. Calculation of the electrical energy price (IRR) in periods of low load, medium load and full load.

کم‌باری Low Load							میان‌باری Medium Load								پرباری High Load					کم‌باری
ساعت Hour	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
ضریب قیمت Price Index	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	1.77	1.77	1.77	1.77	0.59
قیمت هر کیلووات Price per KW	162	162	162	162	162	162	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	486	486	486	486	162

نتایج و بحث

با استفاده از مدل تهیه شده مبتنی بر الگوریتم BitABC برنامه بهینه بهره‌برداری از پمپ‌های سیستم تأمین آب شیراز تهیه شد. باید توجه داشت که این برنامه برای یک روز معمولی و عمق اولیه مخازن برابر ۱ متر تهیه شد. مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم BitABC که پس از چندین بار اجرای مدل با مقادیر مختلف این پارامترها به‌نحوی تنظیم شد که الگوریتم BitABC بهترین عملکرد را داشته باشد، در جدول ۲ آمده است. همچنین مقدار مناسب ضرایب جریمه (α و β) نیز پس از سعی و خطا برابر (۱۰[۱۱]) تعیین گردید.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای الگوریتم BitABC.

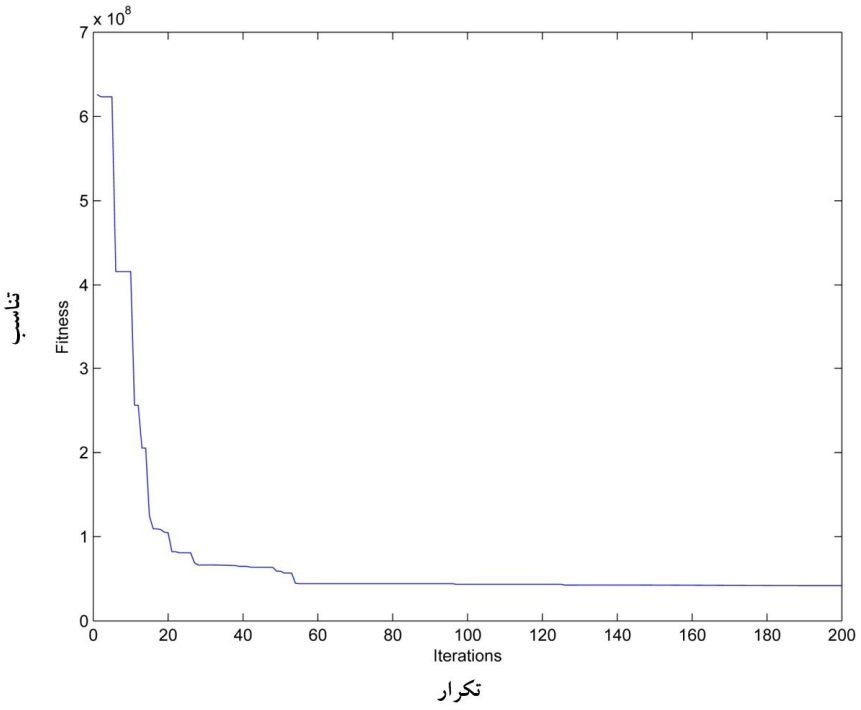
Table 2. The values of BiABC algorithm parameters.

علامت Sign	مقدار Value	پارامتر Parameter
SN	40	تعداد منابع غذایی The number of food sources
MFE	5	حداکثر تعداد دفعات محاسبه تابع هدف در هر تکرار برای هر زنبور The maximum number of times the objective function is calculated in each iteration for each bee
r	0.5	پارامتر کنترل Control parameter
Limit	3360	معیار رهاسازی Release criterion

برای بررسی توانایی مدل توسعه داده شده با تنظیم پارامترها برابر مقادیر فوق‌الذکر، مدل ۵ بار مورد آزمایش قرار گرفت. تعداد تکرارهای حلقه الگوریتم BitABC در هر یک از این آزمایش‌ها برابر ۱۳۰ در نظر گرفته شد. بهترین پاسخ و متوسط پاسخ‌های به‌دست آمده در این ۵ بار استفاده از مدل به‌ترتیب برابر ۳۰۶،۵۳۶،۴۰ و ۸۱۲،۲۶۱،۴۲ می‌باشند. شکل ٤ شمایی از حرکت بهترین عضو هر نسل به‌سمت پاسخ بهینه را در حالی‌که منجر به بهترین پاسخ شده است نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود در این حل پس از گذشت ۱۲٦ نسل، پاسخ بهینه‌ای با مقدار تابع هدفی برابر ۷۱٦،۹۹۱،٤۱ ریال توسط مدل بهینه‌سازی حاصل شد که مبلغ ٤۰،۵۳٦،۳۰٦ ریال از مقدار تابع هدف مربوط به انرژی کل مصرفی و ۱،٤۵۵،٤۱۰ ریال باقی‌مانده مربوط به مقدار بسیار اندکی تخطی از قیدهای مخازن می‌باشد. این مقدار تخطی با توجه به فیزیک مسأله قابل اغماض است.

جدول ۳ نیز وضعیت روشن- خاموشی پمپ‌ها و پاسخ بهینه را در طول ۲٤ ساعت نشان می‌دهد.

جدول ٤ هزینه انرژی مصرفی کل و تفکیکی پمپ‌ها را در ۲٤ ساعت برای حالت بهره‌برداری بهینه نشان می‌دهد.



شکل ٤- نمودار حرکت بهترین عضو هر تکرار به‌سمت پاسخ بهینه در بهترین حل.

Figure 4. Schematic of the best solution move toward optimum in the best run

جدول ۳- پاسخ بهینه وضعیت روشن- خاموشی پمپ‌ها در طول دوره ۲٤ ساعته روز انتخابی (پاسخ به‌دست آمده در بهترین حل).

Table 3. Optimal response of pumps on-off status during the 24-hour period on selected day (obtained in the best model run).

ساعت Hour	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
پمپ ۱ pump1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
پمپ ۲ pump2	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
پمپ ۳ pump3	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0
پمپ ٤ pump4	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
پمپ ٥ pump5	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
پمپ ٦ pump6	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
پمپ ۷ pump7	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0

جدول ٤- هزینه کل انرژی مصرفی در حالت بهره‌برداری بهینه (پاسخ به‌دست آمده در بهترین حل).

Table 4. Total cost of energy in optimum operation state (obtained in the best model run).

پمپ Pump	عامل استفاده Usage Factor	بازده میانگین Avg. Effic.	Kw-hr/m^3	میانگین کیلووات Avg. Kw	پیک کیلووات Peak Kw	هزینه/روز Cost/day
p4	29.17	79.11	0.56	2665.33	2742.21	4150233
p5	29.17	79.11	0.56	2667.04	2752.17	4745059
p1	45.83	82.06	0.6	2331.43	2643.65	5708484
p2	58.33	82.57	0.62	2328.58	2648.65	7613700
p3	50	82.14	0.6	2335.19	2641.24	7515561
p6	29.17	84.29	0.64	2289.19	2533.2	3786377
p7	45.83	83.24	0.63	2358.48	2534.61	6999339
کل Total	هزینه: Cost:	40518752				

رجب‌پور و افشار (۲۰۰۸) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO، اقدام به ارائه برنامه بهینه بهره‌برداری از پمپ‌های سیستم انتقال آب شیراز نمودند (۸). در پژوهش مذکور تعرفه برق برابر ۵۵ ریال به‌ازای هر کیلووات در نظر گرفته شده است، در صورتی که در مدل تهیه شده در این پژوهش متوسط تعرفه برق در شرایط کنونی برابر ۲۷۵ ریال به‌ازای هر کیلووات در نظر گرفته شد. بر این اساس به‌منظور مقایسه نتایج لازم است ابتدا هزینه انرژی پاسخ بهینه به‌دست آمده توسط رجب‌پور و افشار (۲۰۰۸) و همچنین هزینه اعلام شده توسط شرکت آب منطقه‌ای فارس با در نظر گفتن نسبت ۲۷۵ به ۵۵ (نسبت تعرفه کنونی به تعرفه سال ۱۳۸۵) تعدیل شود. علاوه بر این، در فرمول‌بندی مسأله به‌جای در نظر گرفتن متغیر تصمیم واقعی یعنی دور پمپ، دبی پمپاژ به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده که این خود یک فرض ساده‌کننده است و می‌تواند عامل خطا باشد. زیرا در این شرایط امکان لحاظ شرایط هیدرولیکی واقعی ناشی از تغییر دور پمپ که منجر به تغییر منحنی کار پمپ می‌شود، وجود ندارد. رجب‌پور و افشار (۲۰۰۸) از PSO در دو حالت با همسایگی کلی و همسایگی موضعی استفاده نمودند. علاوه بر این مهرجو (۲۰۱٤) نیز از الگوریتم ژنتیک برای حل این مسأله با در نظر گرفتن پمپ‌ها به‌صورت دور ثابت و لحاظ کردن حالت روشن یا خاموشی پمپ‌ها به‌عنوان متغیر تصمیم، استفاده نمود (٦). در هر دو پژوهش تنها نتیجه بهترین پاسخ به‌دست آمده در فرآیند بهینه‌سازی اعلام شده و هیچ اشاره‌ای به تعداد دفعات حل مدل نشده است. پاسخ‌های بهینه به‌دست آمده در این پژوهش‌ها به‌منظور مقایسه به همراه بهترین پاسخ به‌دست آمده در این پژوهش در جدول ۵ ارائه شده است.

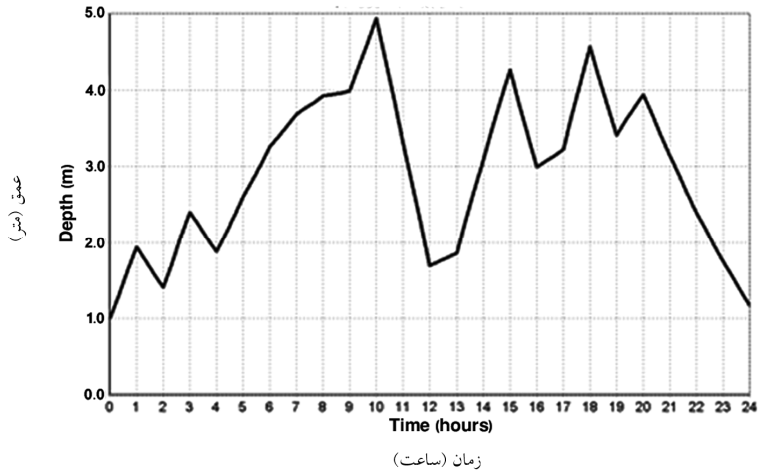
جدول ۵- مقایسه هزینه کل انرژی مصرفی در حالت بهره‌برداری بهینه با سناریوی بهره‌برداری معمول.

Table 5. Comparison of the total cost of energy in the optimal operation with non-optimum operation scenario.

هزینه (ریال در روز) Cost (Rial per day)	پژوهش Study
59328919	هزینه متوسط برق مصرفی در یک روز متوسط (ریال) The average cost of electricity in an average day
44089686	الگوریتم PSO با همسایگی کلی (۸) PSO algorithm with general neighborhood
39618690	الگوریتم PSO با همسایگی موضعی (۸) PSO algorithm with local neighborhood
41914610	الگوریتم ژنتیک (٦) Genetic algorithm
40536306	هزینه برق مصرفی در شرایط بهره‌برداری بهینه (الگوریتم جامعه زنبورهای مصنوعی صفر و یکی BitABC)- این پژوهش Cost of electric power in optimum operating conditions (algorithm of bees zero and one BitABC) - The research

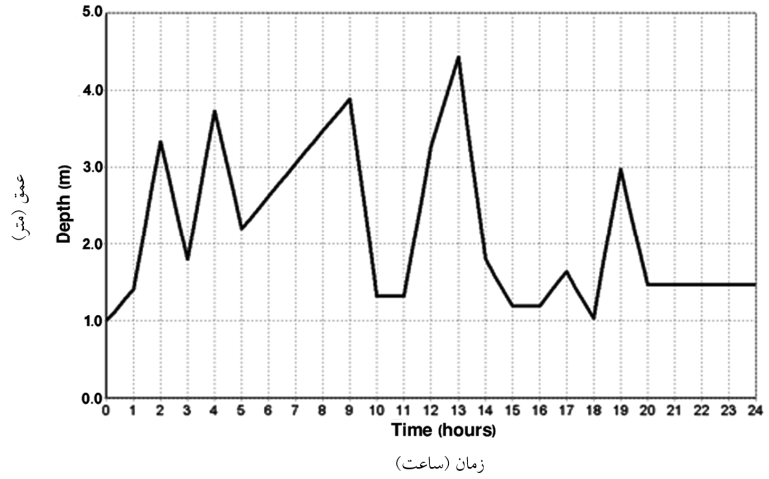
چنان‌که در جدول ۵ نشان داده شده است هزینه کل انرژی مصرفی در حالت بهره‌برداری بهینه در بهترین حل و در متوسط مجموع حل‌ها به‌ترتیب ۳۲ و ۲۹ درصد کم‌تر از هزینه متوسط برق مصرفی در یک روز متوسط است. همچنین استفاده از الگوریتم BitABC به‌ترتیب حدود ۸ و ۳ درصد باعث بهبود پاسخ بهینه روش الگوریتم PSO- با همسایگی کلی و الگوریتم ژنتیک شده است. ولی هزینه پاسخ به‌دست آمده در بهترین حل در این پژوهش از الگوریتم PSO با همسایگی موضعی حدود ۲ درصد بیش‌تر است.

شکل‌های ۵ تا ۷ تغییرات سطح آب در مخازن سیستم در بهترین حل به‌دست آمده توسط BitABC را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود، در این مخزن‌ها حداقل و حداکثر مجاز عمق آب در تمام دوره بهره‌برداری رعایت شده است.



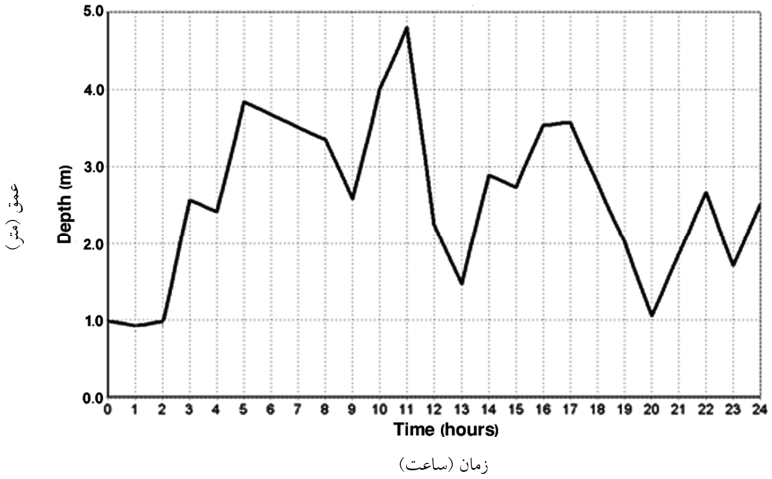
شکل ۵- تغییرات تراز سطح آب در مخزن اصلی (مخزن مرتفع).

Figure 5. Changes of water level in the main reservoir (high reservoir).



شکل ٦- تغییرات سطح آب در مخزن ایستگاه پمپاژ شماره ۳.

Figure 6. Water level changes in the reservoir of pumping station (no. 3).



شکل ۷- تغییرات سطح آب در مخزن ایستگاه پمپاژ شماره ۲.

Figure 7. Water level changes in the reservoir of pumping station (no. 2).

نتیجه‌گیری

مدلی کامپیوتری برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های توزیع آب تحت فشار توسعه داده شد و مدل مذکور برای بهینه‌سازی مصرف انرژی سیستم تأمین آب شهر شیراز از سد درودزن مورد استفاده قرار گرفت. بدین‌منظور در یک روز عادی برنامه بهینه بهره‌برداری از پمپ‌ها تعیین گردید. سپس حالت بهره‌برداری بهینه در این روز خاص با یک سناریوی بهره‌برداری غیربهینه مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضمن رعایت همه قیود مسأله، هزینه کل انرژی مصرفی در حالت بهره‌برداری بهینه در بهترین حل و در متوسط مجموع حل‌ها به‌ترتیب ۳۲ و ۲۹ درصد کم‌تر از هزینه متوسط برق مصرفی در یک روز متوسط است. این موضوع توان مدل توسعه داده شده در کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی را نشان می‌دهد.

مسأله مورد بررسی در پژوهش‌های پیشین توسط الگوریتم‌های PSO (رجب‌پور و افشار، ۲۰۰۸) و ژنتیک (مهرجو، ۲۰۱٤) نیز مورد بهینه‌سازی قرار

گرفته است. در هیچ‌یک از این دو پژوهش اشاره‌ای به تعداد دفعات حل مسأله و متوسط پاسخ‌های به‌دست آمده نشده است و تنها بهترین پاسخ ارائه شده است. مقایسه بهترین پاسخ‌ها نشان می‌دهد که از این نظر BitABC نسبت به PSO با همسایگی کلی و الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری داشته است، اما PSO با همسایگی موضعی جواب بهتری به‌دست آورده است. البته باید به این نکته نیز توجه داشت که نحوه فرمول‌بندی الگوریتم‌های PSO (رجب‌پور و افشار، ۲۰۰۸) برای حل این مسأله دارای اشکال است که باعث خطا در استفاده از آن می‌شود.

منابع

1.Hashemi, S.S., Tabesh, M., and Ataeekia, B. 2013. Ant-colony optimization of pumping schedule to minimize the energy cost using variable speed pumps in water distribution networks. Urban Water Journal. Advance online publication. doi: 10.1080/1573062X.2013.795233.

2.Jia, D.L., Duan, X.T., and Khan, M.K. 2014. Binary Artificial Bee Colony optimization using bitwise operation. Computers & Industrial Engineering. 76: 360-365.

3.Karaboga, D. 2005. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department.

4.Kashan, M.H., Nahavandi, N., and Kashan, A.H. 2012. DisABC: a new artificial bee colony algorithm for binary optimization. Applied Soft Computing. 12: 1. 342-352.

5.Mackle, G., Savic, D.A., and Walters, G.A. 1995. Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply. Institute of Electrical Engineers Conference Publication. GALESIA, 95. London: 4/4: 400-405.

6.Mehrjoo, Y. 2014. Optimized operation of Shiraz drink and industrial water delivery system serial pump stations, using genetic algorithm. M.Sc. thesis, Civil Engineering, Islamic Azad University of Yasuj. (In Persian)

7.Pampara, G., and Engelbrecht, A.P. 2011. Binary artificial bee colony optimization, in 2011 IEEE Symposium on Swarm Intelligence (SIS), Pp: 1-8.

8.Rajabpour, R., and Afshar, H. 2008. Optimized operation of serial pump stations using PSO algorithm. J. Water Wastewater. 66: 56-66. (In Persian)

9.Rodin, S.I. 1998. Use of genetic algorithm for optimal control of bulk water supply. Online, http://stullia.t-k.ru/waterpump/waterpump.htm.

10.Rodin, S.I., and Moradi-Jalal, M. 2002. Use of genetic algorithm in optimization of irrigation pumping stations. WAPIRRA program. Online, http://stullia.t-k.ru/waterpump/ waterpump.htm.

11.Yuan, Y., and Liu, C. 2012. Solving optimum operation of single pump unit problem with ant colony optimization (ACO) algorithm. IOP Conf. SER.: Earth Environ. Sci. 15 022008 doi: 10.1088/17551315/15/2/022008.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(5), 2017
http://jwsc.gau.ac.ir

Optimized Operation of Pump Stations of Water Delivery System Using Bees Algorithm (ABC)

B. Sami Kashkooli[1], *M. Bahrami[2] and M. Ansari Jaberi[3]
[1]M.Sc. Graduate, Dept. of Water Structures, Tarbiat Modarres University,
[2]Assistant Prof., Dept. of Water Sciences and Engineering, Fasa University,
[3]M.Sc. of Civil Engineering, Executive of Islamic Revolution Housing Foundation of Fasa
Received: 11/26/2015; Accepted: 07/19/2016

Abstract
Background and Objectives: The optimization algorithms inspired by honey bee's social behavior are among the most recent optimization techniques. Artificial bee colony algorithm (ABC) is one of these algorithms. Today, considering the dramatic increase in pumping energy prices in water conveyance systems, problem of optimal operation of pumping stations is one of the hottest research areas. In many pumping stations there are no specific guidelines for the operation of the existing pumps and station operator acts to turn on and turn off the pumps based on experience and need will be announced him. This traditional method imposes a lot of extra cost to system. Therefore, in addition to proper design of pumping stations, operation of these stations is also extremely important. The most important factor affecting the pumping station performance is the performance of the pumps, thus pumps should be used as much as possible in their maximum efficiency.
Materials and Methods: In this research a pump operation schedule is represented as a string of binary values with each bit representing pump on and off status during a particular time interval and pump optimal scheduling problem is coded as a problem of finding the best binary string which results in the least energy price. In this study a Binary Artificial Bee Colony Optimization algorithm based simulation- optimization model has been developed for optimal scheduling of serial pumping stations. The model integrates ABC optimizer and EPANET hydraulic network solver in MATLAB software. The proposed model is applied to find the optimal pump operation schedule of Shiraz water conveyance system from Doroudzan Dam in an ordinary day of the year. Then, the optimal operation mode on this special day was compared with a non-optimal utilization scenarios. The average cost of electrical energy was considered equal to 275 Rials in this study.
Results: The results showed that having regard to all the constraints of the problem, the energy cost in the optimal operation was 32% less than average one in an ordinary day. Bit ABC algorithm also caused about 8 percent improvement in optimal algorithm of -PSO with the general neighborhood, but the cost of response obtained in this study was about 2 percent higher than the -PSO algorithm with local neighborhood.
Conclusion: The comparison between the optimal operation program and the previous researches results showed the model's abilities.

Keywords: Artificial Bee Colony Algorithm, Pumping stations, EPANET

* Corresponding Author; Email: mehdibahrami121@gmail.com