

ارزیابی الگوریتم بهینه‌یابی نیروی مرکزی (CFO) در بهره‌برداری بهینه از سیستم مخزنی

پرستو همه‌زاده^۱، حسن ترابی پوده^{۲*} و حجت‌اله یونسی^۳

چکیده

استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای تعیین سیاست بهره‌برداری از مخازن، مسأله‌ای مهم در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب است. در مقاله حاضر از الگوریتم بهینه‌یابی نیروی مرکزی (CFO) برای بهره‌برداری بهینه از سد دز واقع در استان خوزستان با هدف تأمین نیاز کشاورزی برای پنج سال آماری استفاده شده است. ابتدا با توجه به محدب بودن تابع هدف جواب بهینه مطلق بهره‌برداری توسط نرم‌افزار لینگو محاسبه شد. الگوریتم CFO با سرعت همگرایی قابل قبولی مسأله را حل کرد. مقدار تابع هدف با استفاده از نرم‌افزار لینگو برابر با $0/7303$ به دست آمد و این مقدار با استفاده از روش CFO برابر با $0/73604$ محاسبه شد که تنها $0/7\%$ با بهینه مطلق اختلاف دارد. می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم بهینه‌یابی نیروی مرکزی توانایی حل مسائل پیچیده‌تر و با مخازن بیشتر را نیز دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌یابی نیروی مرکزی، بهینه‌سازی هیدروسیستم‌ها، تک مخزنه، فراکاوشی.

ارجاع: همه‌زاده پ. ترابی پوده ح. و یونسی ح. ۱۳۹۶. ارزیابی الگوریتم بهینه‌یابی نیروی مرکزی (CFO) در بهره‌برداری بهینه از سیستم مخزنی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۷: ۵۵-۶۲.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان.

* نویسنده مسئول: Torabi1976@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۲۸

مقدمه

حل مرحله‌به‌مرحله‌ای آن منجر به حل مسأله اصلی خواهد شد. الگوریتم‌های فراکاوشی نیز در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. بسیاری از این روش‌ها از رفتارهای طبیعی موجودات زنده الهام گرفته شده‌اند. از میان این روش‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک^۴ (GA) (هلند، ۱۹۷۵)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۵ (PSO) (کندی و ابرهات، ۱۹۹۵)، الگوریتم مورچگان^۶ (ACO) (دوریگو و همکاران، ۱۹۹۷) و بهینه‌یابی جفت‌گیری زنبور عسل^۷ (HBMO) (عباس، ۲۰۰۱) اشاره کرد. این روش‌ها در حوزه‌های مختلف علوم و مهندسی از جمله بهینه‌سازی منابع آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند (واردلاو و شریف، ۱۹۹۹؛ کومار و ردی، ۲۰۰۶).

الگوریتم‌هایی که تاکنون ارائه شده‌اند به صورت تصادفی مسأله را حل می‌کنند و در هر بار اجرای برنامه مسیرهای متفاوتی را برای رسیدن به جواب طی می‌کنند. الگوریتم بهینه‌یابی نیروی مرکزی^۸ (CFO) یک الگوریتم تکاملی و فراکاوشی است که اولین بار آن را فورماتو در سال ۲۰۰۷ ارائه کرده است. این الگوریتم برخلاف روش‌های قبلی، کاملاً قطعی است. فورماتو روش CFO را با توابع پیچیده ریاضی شناخته شده و مسائل الکترونیکی سنجید و نتایج را با روش‌های دیگر مقایسه کرد. همچنین او در سال ۲۰۱۰ روش CFO را برای ۲۳ تابع شناخته شده به کار برد و به نتایج رضایت‌بخشی رسید (فورماتو، ۲۰۱۲). فورماتو در سال ۲۰۱۲ نیز این روش را برای بهبود پهنای باند در الکترونیک به کار برد و به نتایج بسیار دقیقی رسید. محمود (۲۰۱۱) الگوریتم جست‌وجوی موضعی را با الگوریتم CFO ترکیب کرد و از آن برای طراحی آنتن مایکرواستریپ بهره گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم ترکیبی CFO باعث افزایش سرعت همگرایی می‌شود. حقیقی و راموس (۲۰۱۲) روش CFO را برای شبکه آب آشامیدنی به کار بردند و نتایج را با کارهای قبلی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روش CFO سریع‌تر به جواب می‌رسد و مقادیر نهایی به طور قابل توجهی دقیق‌تر هستند.

سال‌هاست که پژوهشگران با استفاده از الگوریتم‌های مختلف به حل مسائل بهره‌برداری از مخازن پرداخته‌اند.

افزایش روز افزون جمعیت و محدودیت منابع آب‌های سطحی، ضرورت مدیریت صحیح از مخازن سدها را ایجاب می‌کند. فرآیند تصمیم‌گیری در بهره‌برداری از مخازن تحت تأثیر اهداف فراوانی است و عموماً بسیاری از این اهداف با یکدیگر نامتناسب هستند. از آنجا که جریان‌های ورودی به مخزن و حجم‌های ذخیره دارای عدم قطعیت هستند، چالش اصلی تعیین بهترین رهاسازی مخزن و بهینه‌سازی هیدروسیستم‌هاست.

به دلیل پیچیدگی‌ها و مشکلات مختلف در حل مسائل بهینه‌سازی، تلاش‌های گسترده‌ای برای استفاده از الگوریتم‌های مختلف در این زمینه انجام شده است. از جمله روش‌های تقریبی می‌توان به روش‌های تکاملی و فراکاوشی اشاره کرد (بلام و رولی، ۲۰۰۳). رانی و موریرا (۲۰۱۰)، انواع مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن را به صورت زیر، دسته‌بندی کرده‌اند: ۱- روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی^۱ (LP)؛ ۲- برنامه‌ریزی غیرخطی^۲ (NLP)؛ ۳- روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا^۳ (DP) و ۴- الگوریتم‌های فراکاوشی.

یکی از روش‌های پرکاربرد برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن است. این روش تاکنون در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن با اهداف مختلف به کار گرفته شده است (باروس و همکاران، ۲۰۰۳)؛ اما استفاده از LP با محدودیت‌هایی روبه‌روست و تنها می‌توان آن را برای مسائلی که تابع هدف و قیود خطی باشند، به کار برد. یکی دیگر از روش‌های مورد استفاده در بهره‌برداری از مخازن استفاده از مدل NLP است و یکی از مزایای استفاده از آن، وجود بسته‌های نرم‌افزاری آماده برای حل مسائل با این روش است (رانی و موریرا، ۲۰۱۰). نبود تضمین برای دستیابی به پاسخ بهینه‌ی مطلق در مسائل مقعر، مهم‌ترین دلایل کاربرد کم NLP در موارد عملی محسوب می‌شود (بازارا و همکاران، ۲۰۰۶). روش DP را برای اولین بار بلمن (۱۹۵۷) به عنوان یک روش بهینه‌سازی برای حل مسائل تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای معرفی کرد. در روش DP مسأله بهینه‌سازی و متغیرهای آن به چند مسأله بهینه‌سازی کوچک‌تر تقسیم می‌شود که

4- GA

5- PSO

6- ACO

7- HBMO

8- Central force optimization algorithm

1- Linear programming

2- None Linear programming

3- Dynamic programming

در ۱۰۰ کیلومتری بالادست محل اتصال رودخانه دز و کارون احداث شده است. حجم مفید مخزن معادل ۲۵۱۰ میلیون مترمکعب و حجم ورودی سالانه در یک دوره چهل ساله معادل ۵۹۰۰ میلیون مترمکعب است. از بین چهل سال آمار، پنج سال ابتدایی (۶۰ دوره ماهانه) برای مدل سازی CFO انتخاب شد. این سد قرار است نیاز کشاورزی پایین دست را تأمین کند. متوسط جریان ورودی سالانه به مخزن و متوسط نیاز سالانه پایین دست به ترتیب برابر ۵۹۰۰ و ۵۳۰۳ میلیون متر مکعب برآورد شده است. حجم حداقل و حجم حداکثر مخزن نیز به ترتیب برابر ۸۳۰ و ۳۳۴۰ میلیون متر مکعب است. هدف از طرح این مسأله، تعیین بهینه ترین رهاسازی ماهانه برای پنج سال بهره برداری است.

مدل بهینه یابی نیروی مرکزی

CFO یک روش جدید بهینه سازی است که اولین بار آن را فورماتو در سال ۲۰۰۷ مطرح کرد. اساس روش CFO برگرفته از علم حرکت شناسی در فیزیک است که به بررسی حرکت اجرام تحت تأثیر نیروی گرانشی می پردازد. CFO یک روش قطعی است؛ یعنی هر موقعیت ذره که در این روش پروب نامیده می شود، مسیری معین را برای رسیدن به جواب طی می کند. فضای تصمیم در CFO به صورت $x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}$ تعریف شده است که در آن x_i متغیرهای تصمیم هستند که موقعیت نقطه بهینه را برای تابع هدف تعیین می کنند. $f(\vec{x})$ در هر نقطه x برانزنگی آن نقطه است. ابتدا موقعیت اولیه ذرات با یک روش دقیق و غیر تصادفی تعیین می شود، سپس موقعیت ذرات خود را به روز رسانی می کند. CFO، با پرواز گروهی از پروبها که مسیرهایشان توسط دو معادله جبری حرکت (موقعیت و شتاب) در یک سری از گام های زمانی گسسته (تکرارها) محاسبه می شوند، جست و جو را انجام می دهد. الگوریتم CFO عمل ماکزیم سازی را انجام می دهد و برای کاربرد این روش در مسائل مینیمم سازی می توان تابع اصلی را در یک منفی ضرب کرد، بدین ترتیب ماکزیمم این تابع همان مینیمم تابع اصلی است. در واقع هر پروب یک جواب شذنی مسأله است که N_d مختصات در یک مسأله N_d - بعدی دارد؛ بنابراین بردار موقعیت یک پروب به صورت زیر است:

واردلاو و شریف (۱۹۹۹) GA را به عنوان یک جایگزین برای DP در حل مسائل چند مخزنه به کار بردند. کای و همکاران (۲۰۰۱) به حل مسائل غیرخطی در منابع آب با استفاده از GA پرداختند. جلیلی و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از ACO یک مسأله تک مخزنه را حل کردند و به نتایجی بهتر، در مقایسه با GA رسیدند. بزرگ حداد و همکاران (۲۰۰۶)، همچنین افشار و همکاران (۲۰۰۷) روش جفت گیری زنبور عسل را برای بهره برداری از مخازن به کار بردند. به منظور حداقل سازی کمبود آب کشاورزی سدی واقع در مالزی دو الگوریتم کلونی زنبور عسل^۱ (ABC) و جست و جوی گرانشی^۲ (GSA) مقایسه شد و نتایج نشان داد که الگوریتم ABC با داشتن ویژگی هایی از جمله همگرایی سریع تر، اطمینان پذیری بیشتر و آسیب پذیری کمتر برای بهره برداری از مخازن مناسب تر است (احمد و همکاران، ۲۰۱۶).

تاکنون گزارشی از کاربرد CFO در مسائل بهره برداری از مخزن نشده است. در پژوهش حاضر برای ارزیابی توانایی CFO در حل مسائل بهره برداری مخزن، بهره برداری بهینه از سد دز واقع در استان خوزستان برای پنج سال آمار (۶۰ ماه) در نظر گرفته شده است. هدف از بهینه سازی تأمین نیاز کشاورزی پایین دست است. نتایج بهینه مطلق بهره برداری با نرم افزار لینگو محاسبه و با نتایج الگوریتم CFO مقایسه خواهد شد.

مواد و روش ها

در مقاله حاضر، پس از طرح مسأله، الگوریتم CFO به همراه تمامی روابط مورد نیاز و مراحل جستجو ارائه شد. سپس مسأله تک مخزنه به همراه ورودی ها و روابط مورد نیاز داده شده است. نتایج بهینه مطلق تابع هدف با لینگو که یک مدل برنامه ریزی خطی می باشد، به دست آمده است.

طرح مسأله

در این پژوهش، برای ارزیابی CFO در منابع آب، سیستم تک مخزنه سد دز در نظر گرفته شده است. سد دز، بلندترین سد بتنی دو قوسی ایران است که در فاصله ۲۵ کیلومتری شمال شرقی شهر دزفول و ۲۲ کیلومتری اندیمشک در دره ای عمیق روی شاخه اصلی رودخانه دز و

1- Artificial Bee Colony
2- Gravitational Search Algorithm

که در آن Δt فاصله زمانی گام‌هاست که برای آن مقدار یک در نظر گرفته شده است. در هر تکرار توزیع جدیدی از پروب‌ها محاسبه می‌شوند و در موقعیت هر پروب برآوردی تابع هدف (M_{j-1}^p) محاسبه می‌شود. با توجه به رابطه تغییر موقعیت پروب‌ها ممکن است به موقعیتی خارج از فضای شدنی تصمیم جابجا شوند. روشی که برای بازگرداندن پروب‌های منحرف شده استفاده می‌شود در کارایی CFO بسیار اهمیت دارد. فورماتو (b) (۲۰۱۰) معادلات زیر را برای بازسازی پروب‌های منحرف شده پیشنهاد داد:

$$\text{if } \bar{R}_{j,i}^p < x_i^{\min} \text{ then } \bar{R}_{j,i}^p = \max(x_i^{\min}, \bar{R}_{j-1,i}^p) + F_{\text{rep}}(\bar{R}_{j-1,i}^p - x_i^{\min}), x_i^{\min} \quad (۶)$$

$$\text{if } \bar{R}_{j,i}^p > x_i^{\max} \text{ then } \bar{R}_{j,i}^p = \min(x_i^{\max}, \bar{R}_{j-1,i}^p) - F_{\text{rep}}(x_i^{\max} - \bar{R}_{j-1,i}^p), x_i^{\max} \quad (۷)$$

که در این روابط x_i^{\min} و x_i^{\max} به ترتیب کران پایین و کران بالای مقدار متغیرهای تصمیم در آمین بعد فضای تصمیم هستند و F_{rep} عامل تغییر موقعیت پروب است که به وسیله کاربر و بین صفر و یک تعیین می‌شود. پارامترهای روش CFO عبارتند از: $\alpha, \beta, G, N_t, N_p, \Delta t$ و F_r . شتاب اولیه پروب به طور معمول صفر در نظر گرفته می‌شود. با انتخاب مقادیر مختلف پارامترها به وسیله کاربران و اجرای CFO، می‌توان به تجربه‌هایی در این زمینه به دست آورد. عامل مهم دیگر در CFO، توزیع مکانی اولیه پروب‌هاست. لیو و تیان (۲۰۱۵) اهمیت توزیع اولیه پروب‌ها را به اثبات رساندند و پیشنهاد کردند که برای همگرایی بهتر تابع هدف می‌توان تعدادی از پروب‌ها را به صورت قطری و تعدادی دیگر را به صورت محوری قرار داد که با این تغییر نتایج CFO بهبود می‌یابد. آنها نام این روش را MCFO نامیدند.

مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن

تابع هدف در این مسئله مینیمم‌سازی مجذور تفاضل رهاسازی از نیاز در کل دوره است:

$$\text{Min TSD} = \sum_{t=1}^{nt} \left(\frac{(R_t - D_t)}{D_{\max}} \right)^2 \quad (۸)$$

$$S(t) = S(t+1) - Q(t) + R(t) - L(t) \quad (۹)$$

$$R_{\min}(t) \leq R(t) \leq R_{\max}(t) \quad (۱۰)$$

$$S_{\min}(t) \leq S(t) \leq S_{\max}(t) \quad (۱۱)$$

$$\bar{R}_j^p = \sum_{m=1}^{N_d} x_m^{p,j} \hat{e}_m \quad (۱)$$

که در آن $x_m^{p,j}$ مختصات آمین بعد از پروب در گام زمانی j و \hat{e}_m بردار یکه در طول محور x_m است. در واقع پروب‌ها در CFO معادل کروموزوم‌ها در GA هستند. در فضای تصمیم مسأله، پروب‌های کوچک‌تر به وسیله پروب‌های بزرگ‌تر کشیده می‌شوند و شتاب جدیدی را تجربه می‌کنند که موجب می‌شود آن‌ها در سرتاسر فضا در تمام زمان پرواز کنند. بردارهای موقعیت پروب به وسیله برخی قوانین گرفته شده از معادلات حرکت تغییر می‌کنند تا زمانی که تمام پروب‌ها در اطراف بزرگ‌ترین جرم (پروب) که در فضای تصمیم یافته شده است مستقر شوند. بر اساس قانون جهانی جاذبه نیوتن، هر پروب با بردار موقعیت $\bar{R}_{j-1}^p \in R^{N_d}$ در گام زمانی $j-1$ بردار شتاب \bar{a}_{j-1}^p را تحت تأثیر نیروهای مرکزی گرانشی ایجاد شده به وسیله سایر پروب‌ها تجربه می‌کند. به صورت زیر است:

$$\bar{a}_{j-1}^p = G \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^{N_p} U(M_{j-1}^k - M_{j-1}^p) \cdot (M_{j-1}^k - M_{j-1}^p)^\alpha \frac{(\bar{R}_{j-1}^k - \bar{R}_{j-1}^p)}{\|\bar{R}_{j-1}^k - \bar{R}_{j-1}^p\|^\beta} \quad (۲)$$

که در آن N_p تعداد پروب‌ها، $p=1,2,3,\dots, N_p$ شماره پروب، j گام زمانی محاسبات است که همان شماره تکرار بهینه‌سازی است و α, β و G ثابت‌های CFO هستند.

$M_{j-1}^p = f(x_1^{p,j-1}, x_2^{p,j-1}, \dots, x_{N_d}^{p,j-1})$ مقدار تابع هدف بر حسب پروب p در گام زمانی $j-1$ و U تابع پله‌ای یکه است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (۳)$$

و $\|\bar{R}_{j-1}^k - \bar{R}_{j-1}^p\|$ اندازه فاصله بین موقعیت‌های پروب p و k است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\|\bar{R}_{j-1}^k - \bar{R}_{j-1}^p\| = \sqrt{\sum_{m=1}^{N_d} (R_{j-1}^{k,m} - R_{j-1}^{p,m})^2} \quad (۴)$$

اگر تعداد کل گام‌های زمانی (تکرارهای الگوریتم) برابر با N_t باشد، داریم $0 \leq j \leq N_t$ و موقعیت جدید پروب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{R}_j^p = \bar{R}_{j-1}^p + \frac{1}{2} \bar{a}_{j-1}^p \Delta t^2, \quad j \geq 1 \quad (۵)$$

$$\text{Min TSD} = \sum_{t=1}^{nt} \left(\frac{R_t - D_t}{D_{max}} \right)^2 + \sum_{t=1}^{nt} (P1_i + P2_i + P3_i + P4_i) \quad (19)$$

ضرایب C_1 تا C_4 مربوط به تابع جریمه هستند که با توجه به مسأله انتخاب خواهند شد. در بخش نتایج و بحث به مقادیر انتخاب شده برای آنها اشاره شده است. فورماتو (ب) ۲۰۱۰) به صورت جامع پارامترهای CFO را با اجرای آن برای توابع مختلف پیچیده و چند بعدی بررسی کرد. در این بررسی نتیجه این شد که مقادیر α ، β و G برابر با ۲ و $Frep$ برابر با ۰/۵ بهترین عملکرد را در اغلب موارد داشته‌اند. وی عنوان کرد که همگرایی مسأله به شدت به این مقادیر بستگی دارد و ممکن است با توجه به نوع مسأله اعداد دیگری را بپذیرند.

مدل برنامه‌ریزی غیرخطی

با توجه به این که مسأله مورد نظر یک مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی است، این مسأله را می‌توان با استفاده از نرم‌افزار لینگو حل کرد. مدل لینگو توانایی حل مدل‌های غیرخطی را دارد و در مواردی مانند مسأله مورد نظر که تابع هدف محدب است، جواب بهینه مطلق را ارائه می‌دهد؛ بنابراین جواب‌های حاصل از مدل CFO با جواب‌های حاصل از نرم‌افزار لینگو ارزیابی شد که نتایج در ادامه خواهد آمد.

نتایج و بحث

پس از اجرای برنامه، مشاهده شد حتی در تکرارهای بالا جریمه صفر نمی‌شود که نشان از قرار گرفتن بخشی از جواب‌های به دست آمده در محدوده جواب‌های نشدنی دارد. از میان قیود تعریف شده بیشترین تخطی مربوط به حجم ماکزیمم مخزن ($P2$) بود و در بعضی از ماه‌ها حجم ماکزیمم مخزن از ۳۳۴۰ بیشتر می‌شد، به همین دلیل $C_2 = 1000$ و $C_1 = C_3 = C_4 = 10$ انتخاب شد. توان تابع جریمه نیز یک در نظر گرفته شد؛ زیرا بسیاری از جریمه‌ها کمتر از یک به دست می‌آید که با انتخاب توان دو، جریمه کمتری برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شد. پارامترهای الگوریتم CFO نیز با چندین بار اجرای برنامه، مقادیر بهینه ثابت‌ها به دست آمد. $Frep$ و β به ترتیب برابر ۰/۵ و ۲ در نظر گرفته شد؛ اما در طول اجرای برنامه

$$S_1 = 830 \quad (12)$$

در روابط بالا S_{min} و S_{max} به ترتیب حجم مخزن حداقل و حداکثر؛ R_{min} و R_{max} به ترتیب رهاسازی حداقل و حداکثر؛ S حجم مخزن، Q جریان ورودی، R رهاسازی ماهانه و L حجم افت‌های موجود در مخزن است که از حاصل ضرب ارتفاع افت ماهانه در سطح مخزن به دست می‌آید. متوسط نیاز کشاورزی ماهانه پایین دست در جدول ۱ ارائه شده است. D_{max} بیشترین نیاز ماهانه است که برابر با ۸۳۱/۱ میلیون مترمکعب می‌باشد. با استفاده از رابطه (۱۳) می‌توان حجم مخزن را به سطح متناظر تبدیل کرد.

$$A(t) = 11.291 + 0.0157 \times S(t) \quad (13)$$

در مسائل بهینه‌سازی قیود یکی از ارکان اصلی هستند. قیود، در مسائل محدوده جواب ممکن را تعریف می‌کنند. در خصوص اعمال قیود مسأله کارهای زیادی انجام شده است (السن، ۱۹۹۴). گلوور و گرینبرگ (۱۹۸۹) پیشنهاد کردند که برای بهینه‌سازی سریع و رسیدن به جواب نهایی بهتر، امکان عبور از محدوده‌های غیرممکن به الگوریتم داده شود. از جمله این راهکارها حذف قید و اعمال جریمه به تخطی از قیود و وارد کردن آن به تابع هدف است. میزان تابع جریمه به صورت زیر به تابع هدف افزوده می‌شود:

$$P = C \cdot \Delta^n \quad (14)$$

که در آن P میزان جریمه، Δ میزان تخطی از قید، C و n پارامترهای تابع جریمه هستند که توسط کاربر و با توجه به مسأله انتخاب می‌شوند. در مقاله حاضر توابع جریمه به صورت زیر تعریف شده‌اند:

توابع جریمه مربوط به حجم مخزن:

$$P1_i = \begin{cases} C_1 \cdot (1 - S_i/S_{min}) & \text{if } S_i < S_{min} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

$$P2_i = \begin{cases} C_2 \cdot (S_i/S_{max} - 1) & \text{if } S_i > S_{max} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

توابع جریمه مربوط به رهاسازی:

$$P3_i = \begin{cases} C_3 \cdot (1 - R_i/R_{min}) & \text{if } R_i < R_{min} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

$$P4_i = \begin{cases} C_4 \cdot (R_i/R_{max} - 1) & \text{if } R_i > R_{max} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

در نهایت تابع هدف به صورت رابطه (۱۹) نوشته می‌شود:

می‌دهد. تغییرات α از ۰/۱-۲ در نظر گرفته شده است. بدترین نتیجه مربوط به $\alpha = 1/5$ و بهترین نتیجه برای $\alpha = 0/3$ است. بنابراین مقادیر $G = 500$ و $G = 0/3$ انتخاب شد. شکل ۱ شیوه تغییرات تابع هدف به ازای مقادیر مختلف α را در طول دویست تکرار نشان می‌دهد.

بعضی از شتاب‌ها، بسیار کوچک به دست می‌آمدند و برنامه در پیدا کردن نقطه بهینه دچار مشکل می‌شد. با انتخاب G بزرگ‌تر این مشکل حل شد و سرعت همگرایی افزایش یافت. از طرفی با انتخاب G بزرگ‌تر، α نیز تحت تأثیر قرار گرفته و α کوچک‌تر، نتایج بهتری را ارائه می‌کرد. جدول ۲ تغییرات تابع هدف را نسبت به α نشان

جدول ۱- نیاز متوسط ماهانه در پایین‌دست برحسب میلیون مترمکعب

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
نیاز	۵۱۶/۴	۶۰۳/۷	۷۵۷/۲	۸۳۱/۱	۸۱۸/۸	۷۰۶	۴۶۷/۶	۳۱۸	۱۶۳	۱۵۰/۱	۲۰۳	۳۶۵/۵

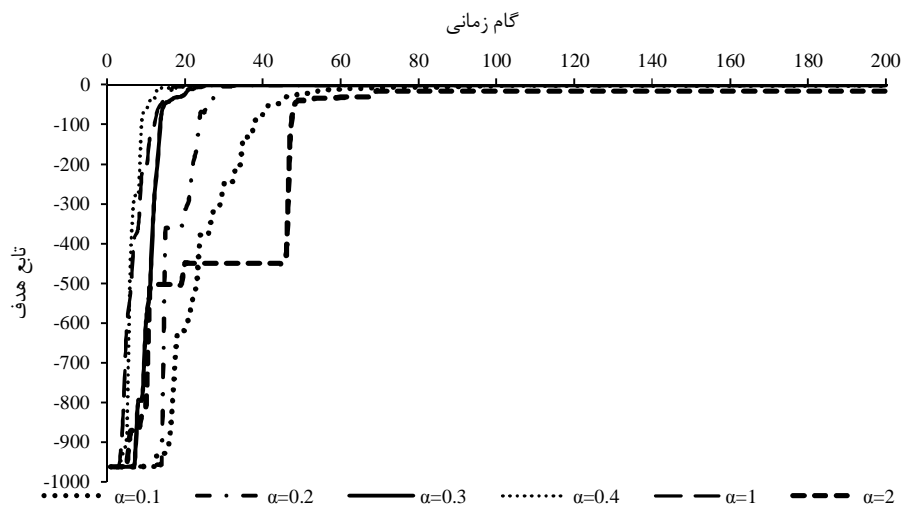
ماکزیمم تابع تغییر یافته همان مینیمم تابع اصلی است. شکل ۲ حجم رهاسازی به‌دست آمده از روش CFO و لینگو به همراه نیاز ماهانه و شکل ۳ حجم مخزن را در هرماه و برای هر دو روش نشان می‌دهد. در شکل ۲ در سیزده ماه اول رهاسازی به دلیل بالا بودن جریان ورودی به مخزن، بیشتر از نیاز است.

پس از سه هزار تکرار، مقادیر رهاسازی ماهانه برای پنج سال به دست می‌آید. مقدار تابع هدف با استفاده از نرم‌افزار لینگو برابر با $0/7303$ به دست آمد و این مقدار با استفاده از روش CFO برابر با $0/73604$ محاسبه شد که تنها $0/7\%$ با بهینه مطلق اختلاف دارد. در طی اجرای برنامه در تکرار ۲۰۰ مقدار تابع هدف برابر $0/80417$ است که این موضوع نشان می‌دهد الگوریتم CFO از سرعت همگرایی بالایی برای حل مسأله تک‌مخزنه برخوردار است. به علت پیچیده بودن مسأله از این گام به بعد تا رسیدن به جواب نهایی از سرعت همگرایی کاسته می‌شود و تابع هدف به‌صورت جزئی تغییر می‌کند.

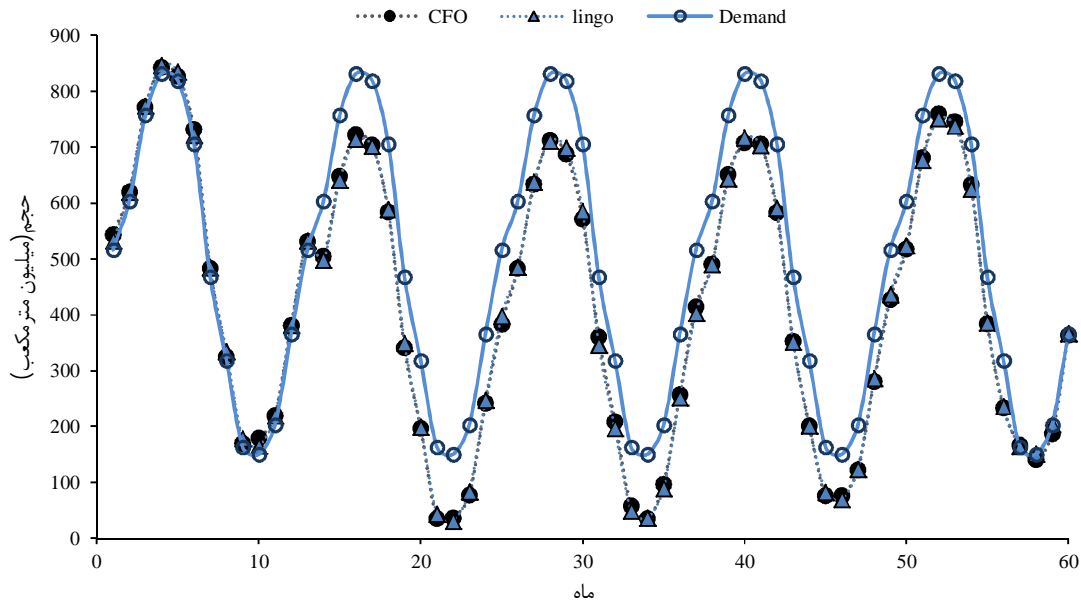
جدول ۲- نحوه تغییرات تابع هدف به ازای مقادیر مختلف α در پایان دویست تکرار

α	تابع هدف
۰/۱	۱/۰۰۵۲۸
۰/۲	۰/۸۵۲۸۸
۰/۳	۰/۸۰۴۱۷
۰/۴	۰/۹۷۷۳۱
۱	۰/۹۲۵۳
۲	۱۶/۰۶۴۳

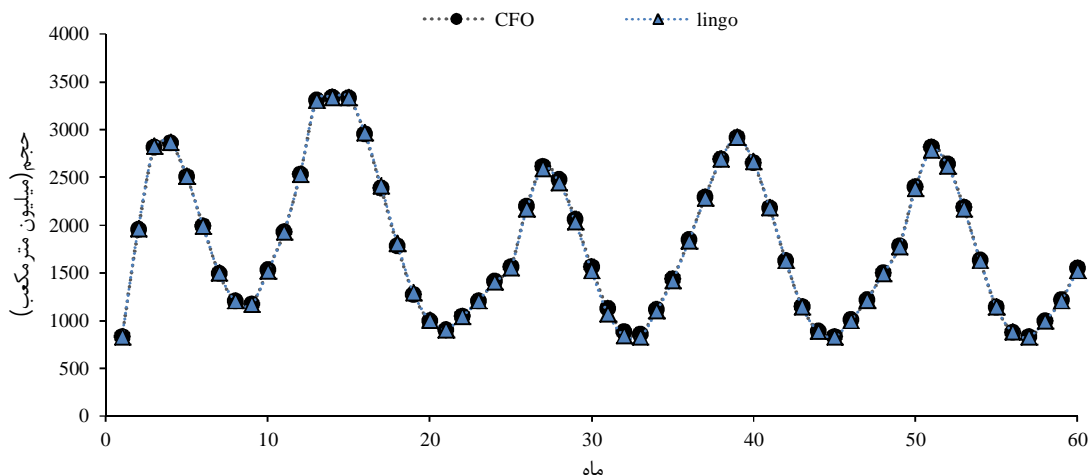
علامت منفی در مقادیر تابع هدف، به این دلیل است که برنامه CFO عمل ماکزیمم‌سازی را انجام می‌دهد؛ ولی با ضرب کردن تابع در یک منفی می‌توان از این روش برای مینیمم‌سازی نیز استفاده کرد. در این صورت پیدا کردن



شکل ۱- نحوه تغییرات تابع هدف به ازای مقادیر مختلف α



شکل ۲- رهاسازی به دست آمده از الگوریتم CFO و نرم افزار لینگو برای ۶۰ ماه



شکل ۳- حجم مخزن به دست آمده از الگوریتم CFO و نرم افزار لینگو برای ۶۰ ماه

نتیجه گیری

برنامه مقدار تابع هدف به دست آمد. مقدار تابع هدف با استفاده از نرم افزار لینگو برابر با $0/7303$ به دست آمد و این مقدار با استفاده از روش CFO برابر با $0/73604$ محاسبه شد که تنها $0/7\%$ با بهینه مطلق اختلاف دارد. CFO از سرعت همگرایی قابل قبولی برخوردار است؛ اما به انتخاب پارامترهای الگوریتم حساس بوده و پیدا کردن مقادیر بهینه امری وقت گیر است. با توجه به حل مسئله حاضر می توان نتیجه گرفت الگوریتم CFO توانایی حل مسائل پیچیده تر و با مخازن بیشتر را نیز دارد.

در این پژوهش، بهره برداری بهینه از یک سد مخزنی تک هدفه در یک دوره ۶۰ ماهه با استفاده از الگوریتم CFO و مقادیر به دست آمده از نرم افزار لینگو مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که هدف مینیمم سازی کمبود آب در بخش کشاورزی در اراضی پایین دست سد دز است، بایستی جواب به دست آمده کمترین اختلاف را با بهینه مطلق داشته باشد. از آن جایی که روش CFO یک روش قطعی برای محاسبه بهینه تابع است؛ پس با یک بار اجرای

- al. (Eds.), ICIC 2010, Lecture Notes in Computer Science. 6215: 309-318.
14. Formato R. A. 2012. Improving Bandwidth of Yagi-Uda Arrays. *Wireless Engineering and Technology*. 3: 18-24.
 15. Glover F. and Greenberg H. J. 1989. New approaches for heuristic search: linkage with artificial intelligence *European Journal of Operational Research*. 39: 119-130.
 16. Haghighi A. and Ramos H. M. 2012. Detection of Leakage Freshwater and Friction Factor Calibration in Drinking Networks Using Central Force Optimization. *Water Resources Management*. 26: 2347-2363.
 17. Holland J. H. 1975. *Adaption in natural and artificial systems*. University of Michigan Press.
 18. Jalali M. R. Afshar A. and Marino M. A. 2006. Improved Ant Colony Optimization Algorithm for Reservoir Operation. *Scientia Iranica*. 13(3): 295-302.
 19. Kennedy J. and Eberhart R. 1995. Particle Swarm Optimization. *IEEE International Conference on Nov/Dec 1995*, 4: 1942-1948.
 20. Kumar N. and Reddy J. 2006. Ant Colony Optimization for Multi-Purpose Reservoir Operation. *Water Resources Management*, 20: 879-898.
 21. Liu Y. and Tian P. 2015. A multi-start central force optimization for global optimization. *Applied Soft Computing*. 27: 92-98
 22. Mahmoud K. R. 2011. Central Force Optimization: Nelder-Mead Hybrid Algorithm for Rectangular Microstrip Antenna Design. *Electromagnetics*. 31(8): 578-592.
 23. Olsen A. L. 1994. Penalty functions and the knapsack problem. *IEEE World Congress on Computational Intelligence. Proceedings of the First IEEE Conference on Jun 1994*. 2: 554-558.
 24. Rani D. and Moreira M. M. 2010. Simulation-Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation. *Water Resources Management*. 24: 1107-1138.
 25. Wardlaw R. and Sharif M. 1999. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system reservoir system operation. *Water Resources Planning and Management*. 125: 25-33.
- منابع**
1. Abbass H. A. 2001. MBO: marriage in honey bees optimization-A Haplometrosis polygynous swarming approach. *Conference Evolutionary Computation, Seoul*. 1: 207-214.
 2. Afshar A. Bozorg Haddad O. Marino M. A. and Adams B. J. 2007. Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation. *Journal of the Franklin Institute*. 344: 452-462.
 3. Ahmad A. Razali S. F. M. Mohamed Z. S. and El-shafie A. 2016. The Application of Artificial Bee Colony and Gravitational Search Algorithm in Reservoir Optimization. *Water Resources Management*. 30: 2497-2516.
 4. Barros M. Tsai F. Yang S. Lopes J. and Yeh W. 2003. Optimization of Large-Acale Hydropower System Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 129(3): 178-188.
 5. Bazaraa M. S. Sherali H. D. and Shetty C. M. 2006. *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms 3rd Edition*. John wiley and sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
 6. Bellman R. 1957. *Dynamic programming*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
 7. Blum C. and Roli A. 2003. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*. 35(3): 268-308.
 8. Bozorg Haddad O. Afshar A. and Marino M. A. 2006. Honey-Bees Mating Optimization (HBMO) Algorithm: A New Heuristic Approach for Water Resources Optimization. *Water Resources Management*, 20(5): 661-680.
 9. Cai X. McKinney D. C. and Lasdon L. S. 2001. Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach. *Advances in water resources*, 24: 667-676.
 10. Dorigo. M and Gambardella. L. M. 1997. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*. 1: 53-66.
 11. Formato R. A. 2007. Central force optimization: A new metaheuristic with applications in applied electromagnetics. *Progress in Electromagnetics Research*. 77: 425-491.
 12. Formato R. A. 2010(a). Central force optimization applied to the PBM suite of antenna benchmarks. *Electromagnetics Research*. 19: 405-425.
 13. Formato R. A. 2010(b). Parameter-Free Deterministic Global Search with Simplified Central Force Optimization. D. S. Huang, et