مدیریت آب و آبیاری

دوره ۴ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۳

صفحه‌های ۲۲۸-۲۱۵

بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چندمخزنی با استفاده از الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE) (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ کرخه)

کورش قادری[۱]*، آناهیتا زلقی[۲] و بهرام بختیاری[۳]

۱. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۳/۱/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۶/۲۴

چکیده

در چند دههٔ اخیر روش‌های تکامل‌گرا، کاربردهای موفقیت‌آمیز زیادی در مسائل مختلف مهندسی و مدیریتی منابع آب، به‌ویژه در بهره‌برداری بهینه از مخازن داشته‌اند. در این پژوهش مدلی بر مبنای الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE) برای مدلسازی بهره‌برداری بهینه از سیستم پیچیدهٔ چندمخزنی واقع در حوضهٔ آبریز کرخه توسعه داده شد. مسیر بهینه‌سازی سیستم مورد نظر شامل تخصیص بهینه بین چهار منطقهٔ کشاورزی به‌منظور تأمین نیاز آبیاری با اولویت تأمین نیازهای زیست‌محیطی در هر بازه در دو رویکرد کوتاه‌مدت و بلندمدت بود. در این پژوهش، در نظر گرفتن سازوکار مناسب چرخ گردان در ساختار الگوریتم، به توسعه و افزایش کارایی و مقاومت الگوریتم SCE منجر شد. ابتدا اعتبارسنجی مدل توسعه‌داده‌شده توسط چند تابع استاندارد بررسی شد. نتایج بیانگر عملکرد مناسب مدل توسعه‌داده‌شده است. سپس این مدل برای حل مسئلهٔ بهره‌برداری از سیستم چندمخزنی حوضهٔ آبریز کرخه استفاده شد. نتایج مدل با استفاده از معیارهای آماری و مقایسهٔ آنها با نتایج الگوریتم شناخته‌شدهٔ GA ارزیابی شد. نتایج حاکی از عملکرد خوب و تناسب الگوریتم SCE در بهره‌برداری بهینه از مخازن است.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم SCE، بهره‌برداری بهینه، حوضهٔ کرخه، روش‌های تکامل‌گرا، سیستم‌های چندمخزنی.

* نویسنده مسئول

Email: kouroshqaderi@uk.ac.ir

۱. مقدمه

بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها از اولویت‌های برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب است. از لحاظ وجود نیازهای آبی در مناطق متعدد مکانی، گاه سیستم ذخیره‌ای شامل یک مخزن و گاهی شامل چند مخزن متوالی روی رودخانه یا شبکه‌ای از مخازن بر روی رودخانه‌ها و سرشاخه‌های آن طرح می‌شود. با پیشرفت شاخه‌های مختلف علوم و مهندسی، نحوهٔ طرح، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی منابع آب با استفاده از روش‌های مختلفی امکان‌پذیر شده است.

ارزیابی جامعی از روش‌های مختلف بهینه‌سازی و کاربردهای آنها در مسائل مهندسی آب و به‌ویژه بهره‌برداری از مخازن در تحقیقات یه (۱۸)، سیمونویچ (۱۵) و لابادیه (۱۲) مطرح شده است. در بسیاری از مسائل مهندسی، به‌دلیل پیچیده بودن نوع مسئلهٔ تحت بررسی و تابع اهداف و وجود چند نقطهٔ بهینهٔ موضعی و سراسری، روش‌های کلاسیک قادر به تفکیک آنها و یافتن نقاط بهینهٔ سراسری نیستند. در چند سال اخیر با ابداع روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم که اغلب جست‌وجو را براساس جمعیت اولیه انجام می‌دهند، می‌توان در مسائل بسیار پیچیده، پاسخ‌های تقریبی بسیار نزدیک به بهینهٔ سراسری را پیدا کرد. از جملهٔ این روش‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک(GA)[1]، جست‌وجوی ممنوعه(TS)[2]، جامعهٔ مورچه‌ها (AC)[3]، الگوریتم تکامل رقابتی جوامع(SCE)[4] و ... اشاره کرد. کاربردهای متعددی از روش‌های یادشده در منابع آب و به‌ویژه بهره‌برداری بهینه از مخازن گزارش شده است.

ایسات و هال (۱۱) کاربرد مدل GA را با برنامه‌ریزی پویا در یک سیستم چهارمخزنی مقایسه کردند. آنها مدل GA را به‌لحاظ نیازهای محاسباتی کاملاً برتر گزارش کردند. واردلا و شریف (۱۶) از GA برای بهینه‌سازی یک سامانهٔ چهارمخزنه استفاده کردند. نورانی و همکاران (۵) ترکیب مدلی از برنامه‌ریزی آرمانی و سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی را در بهره‌برداری بهینه از سیستم دومخزنی حوضهٔ آبریز سفیدرود به‌کار گرفتند. قادری و همکاران(۲) از روش برخورد گروهی با داده‌ها (GMDH)[5] برای بهره‌برداری سیستماتیک از مخازن چندگانهٔ دشت تهران استفاده کردند. همچنین فلاح مهدی‌پور و بزرگ حداد (۱) به مقایسهٔ برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP)[6] با روش بهینه‌سازی چندهدفهٔ جمعیت ذره‌ها (MOPSO)[7] در بهره‌برداری بهینه از مخزن بازفت با چندین هدف پرداختند که نتایج، برتری جواب‌های الگوریتم MOPSO را با متوسط ۰/۳ درصد اختلاف با NLP نشان داد.

یکی از روش‌های قدرتمند بهینه‌سازی که دوان و همکاران (۹) معرفی کرده‌اند، الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE) است. محققان زیادی توانایی و قدرت زیاد این روش را به‌ویژه در کالیبراسیون مدل‌های بارش- رواناب به اثبات رسانده‌اند. از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های دوان و همکاران (۱۰)، یاپو و همکاران (۱۹)، مادسن (۱۴)، براس و همکاران (۶)، قادری و همکاران (۳)، زیامونگ و همکاران (۱۷) و دونگ‌می و همکاران (۷) اشاره کرد. همچنین قدوسی و همکاران با استفاده از روش SCE، میزان تنظیم بهینهٔ سازه‌های کنترل و تنظیم را در طول کانال شبکهٔ آبیاری قزوین تعیین کردند (۴). نتایج نشان داد عملیات بهره‌برداری بهینه به‌روش SCE تأثیر زیادی در افزایش عملکرد کانال‌های آبیاری دارد.

به‌رغم کاربرد گسترده و موفقیت‌آمیز SCE در منابع آب و هیدرولوژی، از این ابزار قدرتمند در بهره‌برداری بهینه از مخازن کمتر استفاده شده است. در پژوهش حاضر با توجه به اهمیت بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چندمخزنه،

1.Genetic Algorithm
2. Tabu Search
3. Ant Colony
4. Shuffled Complex Evolution

5. Group Method of Data Handling
6. Nonlinear Programming
7. Multi Objective Particle Swarm Optimization

عملکرد و کارایی این الگوریتم در مسئلهٔ بهره‌برداری بهینهٔ سیستم پیچیدهٔ چندمخزنهٔ حوضهٔ کرخه بررسی شده است. به‌همین منظور مدلی براساس الگوریتم SCE در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار متلب توسعه داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از کاربرد مدل توسعه‌داده‌شده با استفاده از شاخص‌های آماری و همچنین با نتایج روش الگوریتم ژنتیک ارزیابی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. روش بهینه‌سازی SCE

روش SCE یک الگوریتم جست‌وجوی سراسری است که دوان و همکاران (۹) آن را معرفی کرده‌اند و برگرفته از بهترین ویژگی‌های چند الگوریتم موجود از جمله الگوریتم ژنتیک و معرفی مفهوم ترکیب جوامع است. در این روش، جست‌وجو از یک جمعیت تصادفی از نقاط درون فضای امکان‌پذیر شروع می‌شود. این جمعیت به جوامع مختلفی تقسیم شده که هر کدام براساس ابعاد مسئله دارای تعداد نقاط خاصی است. هر جامعه براساس فرایندهای تولید مثل که از شکل هندسی پیچیده‌ای استفاده می‌کنند، جست‌وجو را در جهت‌های مناسب هدایت می‌کند. در دوره‌های تناوب تکامل، تمام جوامع دوباره بُر زده می‌شوند و جمعیت دیگری با خصوصیات مناسب‌تر به‌وجود می‌آید و در نهایت جمعیت به‌دست‌آمده دوباره در یک سری از جوامع دسته‌بندی می‌شود. با ادامهٔ جست‌وجو، تمام جمعیت تمایل دارد به‌سمت همسایگی بهینهٔ سراسری حرکت کند. در واقع روش SCE روشی تکاملی متشکل از دو بخش کلی به‌نام SCE و CCE[1] است.

۲.۲. الگوریتم SCE

نمودار کلی الگوریتم SCE در شکل ۱ و توصیف کلی از مراحل مختلف آن در زیر ارائه شده است:

۱. ایجاد یک نمونه: ایجاد یک نمونهٔ تصادفی (S نقطه) در فضای امکان‌پذیر و به‌دست آوردن مقدار تابع در هر کدام از نقاط؛

۲. مرتب‌سازی: مرتب شدن نقاط S نمونه به‌صورت صعودی در آرایه‌ای مانند D به‌صورت $D=\{x_i, f_i, i=1,2,...,S\}$؛

۳. دسته‌بندی نقاط S نمونه به P جامعه طوری که هر جامعه دارای m نقطه باشد. در واقع D به جوامع $A^1, A^2, ..., A^P$, P که هر کدام دارای m نقطه‌اند تبدیل می‌شود؛ یعنی:

$$A^x=\left\{X_j^x, f_j^x \middle| X_j^x=X_x+P(j-1) f_j^x=f_x+P(j-1), j=1,...m\right\} \quad (۱)$$

۴. توسعهٔ هر جامعهٔ A^x و $X=1,2,...,P$ براساس الگوریتم تکامل رقابتی(CCE)؛

۵. اختلاط دوبارهٔ نقاط جوامع مختلف با هم طوری که تنها یک نمونه از نقاط وجود داشته باشد، یعنی جوامع $A^1, A^2,...,A^P$ دوباره در آرایهٔ D جایگزین و براساس مقادیر صعودی مرتب شوند؛

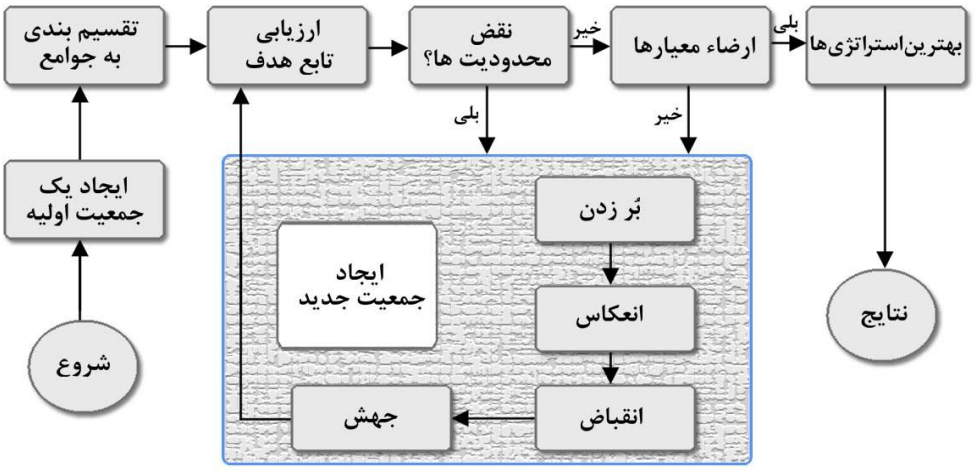
۶. بررسی همگرایی: توقف برنامه در صورت ارضای هر کدام از معیارهای همگرایی؛

۷. در غیر این صورت برگشت به مرحلهٔ سه و اجرای محاسبات.

۲.۳. الگوریتم CCE

الگوریتم CCE بخشی از الگوریتم کل SCE است. الگوریتم به‌محض رسیدن به گام چهارم SCE، وارد الگوریتم CCE می‌شود و هر جامعه را جداگانه توسعه می‌دهد و دوباره وارد مسیر اصلی می‌شود. در الگوریتم CCE، تمام نقاط جامعه امکان دارند که به‌عنوان والدین انتخاب شوند و در فرایند تولید مثل شرکت کنند. وظیفهٔ زیرمجموعه‌های جوامع مانند یک جفت والدین است با این تفاوت که ممکن است بیش از دو والد در نظر گرفته شوند (۹). در ادامه مراحل الگوریتم CCE ارائه شده است.

1. Competitive Complex Evolution



شکل ۱. ساختار کلی جست‌وجوی نقطهٔ بهینهٔ سراسری در روش SCE

۱. یک زیرمجموعه q نقطه‌ای به‌طور تصادفی از هر جامعه براساس یک توزیع احتمالاتی ذوزنقه‌ای انتخاب می‌شود. بهترین نقطه (نقطه با بهترین مقدار تابع هدف) دارای بیشترین احتمال برای انتخاب شدن در این زیرمجموعه است و بدترین نقطه دارای کمترین شانس است.

۲. انتخاب تصادفی q والدین از هر جامعه و قرار دادن آنها در آرایهٔ $B=\{u_i,v_i,i=1,...g\}$ که v_i برابر با مقدار تابع هدف در نقطهٔ u_i است.

۳. تولید فرزندان:

الف) نقاط q براساس مقدار افزایشی تابع هدف مرتب شده و مرکز ثقل نقاط (g) با استفاده از رابطهٔ ۲ تعیین می‌شود.

$$g=\left[\frac{1}{(q-1)}\right]\sum_{j=1}^{q-1}u_j \qquad (۲)$$

برای محاسبهٔ نقطهٔ ثقل ابتدا بدترین نقطه کنار گذاشته شده و سپس مرکز ثقل بقیهٔ نقاط محاسبه می‌شود:

ب) ایجاد نقطهٔ جدید $r=2g-u_q$ (گام انعکاس)[1]

ج) اگرنقطهٔ جدید به‌دست‌آمده درون محدودهٔ مورد نظر قرار داشت، تابع f_r محاسبه می‌شود و الگوریتم به گام (د) می‌رود، در غیر این صورت کوچک‌ترین مقدار عددی درون فضای امکان‌پذیر که شامل A^K می‌شوند، محاسبه شده و به‌طور تصادفی نقطه‌ای مانند Z درون فضای امکان-پذیر تولید و f_z را محاسبه می‌کند، r =z و f_r برابر با f_z قرار داده می‌شود $f_r=f_z$. (گام جهش)[2].

د) اگر نقطهٔ جدید ایجادشده بهتر از بدترین نقطهٔ موجود در زیرمجموعه بود ($f_r<f_q$)، آنگاه نقطهٔ جدید جایگزین بدترین نقطه می‌شود و الگوریتم به گام (م) می‌رود. در غیر این صورت نقطه‌ای که در وسط فاصلهٔ مرکز ثقل و بدترین نقطه قرار دارد (گام انقباض)[3] محاسبه می‌شود و تابع هدف در آن نقطه به‌دست می‌آید، یعنی $c=\frac{g+u_q}{2}$.

ل) اگر نقطهٔ جدید ایجادشده (c) دارای ارزش بهتری از بدترین نقطه بود، یعنی $f_c<f_q$ ،c جایگزین آن می‌شود و الگوریتم به گام (م) می‌رود، وگرنه با ایجاد یک نقطهٔ تصادفی z درون فضای امکان‌پذیر، f_z محاسبه شده و z جایگزین u_q می‌شود (گام جهش).

م) گام‌های (الف) تا (ل) ∞ بار تکرار می‌شوند. $\infty\geq 1$ و پارامتری ویژه است که کاربر آن را تعیین می‌کند.

1. Reflection Step

2. Mutation
3. Contraction Step

۴. جایگذاری فرزندان به‌جای والدین:آرایهٔ B با استفاده از موقعیت اصلی ذخیره‌شده در L درون A^k جایگزین می‌شود. A^k به‌صورت صعودی مرتب می‌شود.

۵. مراحل ۲ تا ۴ β بار تکرار می‌شوند. $\beta \geq 1$ و پارامتری ویژه است که تعداد گام‌های تکاملی را که هر جامعه قبل از اختلاط با دیگر جوامع باید طی کند نشان می‌دهد.

۴.۲. پارامترهای الگوریتم

روش SCE شامل اجزای قطعی و احتمالاتی بسیاری است که تمام آنها توسط چند پارامتر کنترل می‌شوند. این پارامترها شامل m: تعداد اعضای یک جامعه؛ q: تعداد اعضای هر زیرمجموعه (والدین)؛ P: تعداد جوامع؛ $\propto$: تعداد فرزندان تولیدشده در هر زیرمجموعه؛ و β: تعداد گام‌های تکامل در هر جامعه است. اگر تعداد نقاط موجود در هر جامعه بسیار کم باشد، جست‌وجو، بسیار معمولی می‌شود و توانایی پیدا کردن نقطهٔ بهینهٔ سراسری بسیار کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، اگر تعداد اعضای هر جامعه بسیار زیاد باشد، ممکن است زمان بسیار زیادی بدون رسیدن به هیچ هدف مؤثری صرف پردازش‌های کامپیوتری شود. دوان و همکاران مقادیر این پارامترها را به‌استثنای P (تعداد جوامع) در قالب فرمول پیشنهاد داده‌اند (۱۰). لیونگ و همکاران (۱۳) برای پیدا کردن تعداد جوامع رابطهٔ زیر را ارائه کردند:

$$pm = 2^n + 2n + 1 \qquad (۳)$$

که P: تعداد جوامع؛ n: تعداد ابعاد مسئله؛ و m: تعداد اعضای جوامع است که از طریق رابطهٔ $m = (2n+1)$ محاسبه می‌شود.

در مدل توسعه‌داده‌شده در این پژوهش، برای مسائلی با ابعاد بالا، مقادیر پارامترها به‌صورت ثابت β=m، 2= α و q=m/2 و تعیین مقادیر پارامترهای P وm بنا بر نوع مسئله و تعداد متغیرهای تصمیم به‌صورت متغیر در نظر گرفته شده است. براساس نتایج این پژوهش، برای مسائلی با ابعاد کمتر از ۱۰۰ مقدار۱۰> P و برای بعدهای بالاتر مقدار P≥10 پیشنهاد می‌شود.

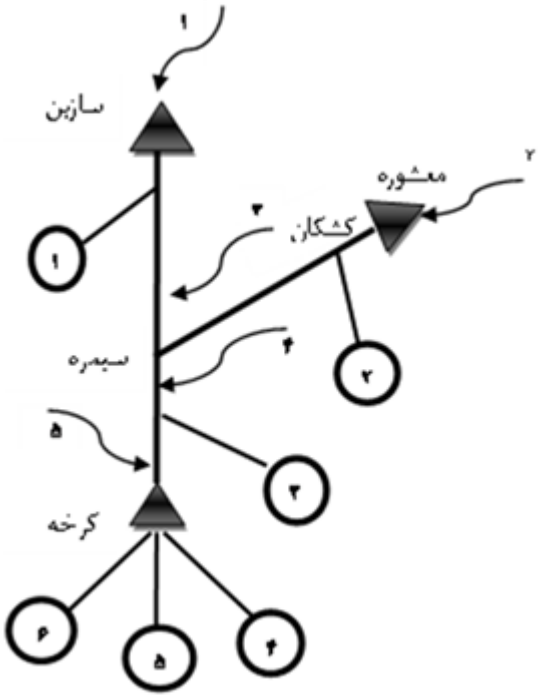
۵.۲. سازوکار انتخاب والدین و تولید فرزندان با استفاده از الگوریتم چرخ گردان

در الگوریتم پیشنهادشده توسط دوان و همکاران (۹)، رقابت در فرایند تولید مثل با استفاده از توزیع احتمالاتی سادهٔ ذوزنقه‌ای که توجه خاصی به نقاط بهتر دارد، انجام می‌گیرد که ممکن است در این روش همهٔ نقاط به‌عنوان والدین در تولید فرزند شرکت نکنند. برای رفع این مشکل، در الگوریتم توسعه‌داده‌شده در این پژوهش، از الگوریتم چرخ گردان که روش رولت هم خوانده می‌شود، برای انتخاب والدین استفاده شده است. در نظر گرفتن این سازوکار سبب می‌شود که هر عضو جامعه فرصت دست‌کم یک بار شرکت در فرایند تولید مثل را داشته باشد که ممکن است یک والد با برازندگی کم در صورت ترکیب با والد دیگر به تولید فرزند با شرایط بهتری منجر شود، قبل از اینکه در مجموعه اعضای جامعه جایگزین شده یا دور انداخته شود. شرط تکراری نبودن والدهای انتخاب‌شده نیز به الگوریتم چرخ گردان اضافه شده است. بنابراین هیچ کدام از اطلاعات موجود در جوامع و نمونه‌ها بدون استفاده باقی نمی‌مانند. در نهایت استفاده از این الگوریتم انتخاب سبب افزایش سرعت محاسبات و رسیدن به جواب مطلوب در تعداد تکرارهای پایین شده است.

۶.۲. مطالعهٔ موردی

حوضهٔ آبریز رودخانهٔ کرخه در محدودهٔ مختصات جغرافیایی ′۲۳ – °۴۶ تا ′۱۲–°۴۹ طول شرقی و ′۴۰– °۳۳ تا ′۰۰–°۳۵ طول شمالی قرار دارد. این حوضه

از لحاظ تقسیمات کشوری در استان‌های همدان، کرمانشاه، ایلام، لرستان و خوزستان واقع شده است. شاخه‌های اصلی رودخانهٔ کرخه عبارتند از رودخانهٔ گاماسیاب، قره‌سو، کشکان، سیمره و رودخانهٔ کرخه در حد فاصل محل تلاقی دو رودخانهٔ کشکان و سیمره تا محل تخلیهٔ آن به مرداب هورالعظیم. سد مخزنی کرخه در ۲۱ کیلومتری شمال غربی شهر اندیمشک بر روی رودخانهٔ کرخه در استان خوزستان واقع شده است. ارتفاع این سد ۱۲۷ متر و طول تاج آن ۳۰۳۰ متر است. سد از نوع خاکی با هستهٔ رسی است که حجم کل آن، ۷۳۰۰ میلیون متر مکعب است و آبگیری آن از بهمن ۱۳۷۸ آغاز شده است. اهداف احداث این مخزن، کنترل و تنظیم جریان‌های سطحی آب رودخانهٔ کرخه به‌منظور تأمین آب اراضی دشت‌های پای پل شامل اوان، دوسالق، ارایض و باغه و دشت‌های حمیدیه، قدس، دشت آزادگان، دشت عباس، فکه و عین خوش و تولید انرژی برقابی و همچنین کنترل سیلاب‌های فصلی و جلوگیری از خسارات وارد به پایین‌دست بوده است. سدهای سازبن در ۳۰ کیلومتری شرق استان ایلام روی رودخانهٔ سیمره با حجم ۱۶۰۹ میلیون متر مکعب و تنگ معشوره در ۹۰ کیلومتری خرم‌آباد روی رودخانهٔ کشکان در استان چهارمحال و بختیاری با حجم ۹۵۰ میلیون متر مکعب قرار گرفته‌اند. مخازن سازبن و معشوره در فاز مطالعاتی بوده و در مرحلهٔ ساخت قرار نگرفته‌اند. شکل ۲ سیستم سه‌مخزنی مورد نظر در این تحقیق را نشان می‌دهد. در این سیستم، بهره‌برداری بهینه از مخازن سازبن، معشوره و کرخه برای تأمین نیازهای چهار منطقهٔ کشاورزی مورد نظر است. همچنین در پایین‌دست هر مخزن و نقطهٔ انشعاب به منطقهٔ شمارهٔ سه کشاورزی، تأمین نیازهای زیست‌محیطی در رودخانه الزامی است. اولویت در تأمین نیازها به‌ترتیب برای جریان زیست‌محیطی داخل رودخانه و سپس کشاورزی مناطق است. نیازهای زیست‌محیطی ماهانه در چهار بازه از رودخانه شامل پایین‌دست مخزن سازبن، پایین‌دست مخزن تنگ معشوره، بالادست و پایین‌دست مخزن کرخه (جدول ۱) در نظر گرفته شده است.



۱. نیاز کشاورزی سازبن
۲. نیاز کشاورزی کشکان
۳. نیاز کشاورزی پاعلم
۴. نیاز کشاورزی دشت عباس
۵. نیاز کشاورزی اوان_دوسالق_ارایض و باغه
۶. نیاز کشاورزی کرخهٔ سفلی

۱. ورودی به مخزن سازبن
۲. ورودی به مخزن معشوره
۳. شاخهٔ ورودی در پایین‌دست سازبن
۴. شاخهٔ ورودی در پایین‌دست مقاطع رودخانه‌های کشکان و سیمره
۵. شاخهٔ ورودی در بالادست کرخه

شکل ۲. پیکربندی سیستم سه‌مخزنی کرخه همراه با نیازها

جدول۱. اطلاعات ماهیانهٔ میانگین نیاز زیست‌محیطی در مناطق چهارگانهٔ سیستم سه‌مخزنی MCM (میلیون متر مکعب)

نام مخزن	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
سازبن	۴۲/۳	۴۲/۳	۴۲/۳	۴۲/۳	۴۲/۳	۷۸/۷	۸۴/۱	۸۴/۱	۸۴/۱	۴۳/۷	۴۳/۷	۴۳/۷	۶۷۳/۶
معشوره	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱۵/۶
بالادست کرخه	۹۷/۲	۹۷/۲	۹۷/۲	۹۷/۲	۹۷/۲	۱۲۹/۹	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۱۳۸/۹	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۰۰/۴	۱۳۳۳/۶
پایین‌دست کرخه	۱۲۱	۱۵۱	۲۳۲	۲۵۱	۱۵۹/۸	۵۹/۶	۳۷/۵	۲۸/۵	۲۶/۱	۳۵/۴	۷۰/۴	۱۰۶/۶	۱۲۷/۹

جدول ۲. توابع استاندارد استفاده‌شده برای بررسی اعتبار مدل

شماره	نام تابع	بعد	FD-CCD لیونگ و همکاران(۱۳)		SCE-UA دوان و همکاران(۸)		SCE-UA قادری و همکاران(۳)		مدل حاضر	
			NF*	AFE**	NF	AFE	NF	AFE	NF	AFE
۱	Goldstien-Price	۲	۱	۱۶۳	۲	۱۶۲	۰	۱۴۹	۰	۱۸
۲	Rosenbrock	۲	۰	۲۶۹	۰	۲۷۴	۰	۵۴	۰	۳۳
۳	Six-hump Camelback	۲	۰	۱۱۸	۰	۱۰۵	۰	۳۰	۰	۱۸
۴	Rastirgin	۲	۳۰	۲۶۵	۴۱	۳۱۷	۰	۴۷۹	۰	۳۳
۵	Grilwank	۱۰	–	–	–	–	۳	۸۷۵	۰	۵۶
۶	Shekel	۴	۱۴	۴۷۸	۲۴	۴۸۷	۰	۵۱	۰	۴۱
۷	Rosenbrock	۱۰	–	–	–	–	–	–	۰	۸۱

* NF تعداد شکست‌ها در ۱۰۰ بار اجرای مدل؛ * * AFE تعداد ارزیابی‌های متوسط هر تابع برای همگرا شدن

۲ .۷. اعتبارسنجی مدل توسعه‌داده‌شده

از جمله کارهای معمول پس از تهیهٔ مدل بهینه‌سازی، بررسی اعتبارسنجی آن است. در این پژوهش از هفت تابع استاندارد که دارای یک نقطهٔ بهینهٔ سراسری و چندین نقطهٔ بهین موضعی‌اند برای بررسی اعتبارسنجی مدل SCE استفاده شد. سپس نتایج این مدل با مدل‌های بیان‌شدهٔ دیگر محققان مقایسه شد (جدول ۲). مکان‌های خالی در جدول بیانگر این نکته است که بعضی از توابع را دیگر محققان به‌کار نگرفته‌اند. تعداد اجراهای انجام‌گرفته برای هر تابع ۱۰۰ بوده است. هر اجرا با انتخاب مستقل تصادفی جمعیت نقاط اولیهٔ S که به‌طور یکنواخت در تمام فضای امکان‌پذیر گسترده شده‌اند، شروع می‌شود. از دو معیار ارزیابی NF[1] (مقاومت) و AFE[2] (کارایی) برای بررسی مدل تهیه‌شده استفاده شده است. در مدل حاضر از معیار همگرایی 10^{-6} به‌عنوان نزدیک‌ترین نقطه به صفر استفاده شده است، درحالی که دوان و همکاران (۸) و لیونگ و همکاران (۱۳) از معیار همگرایی 10^{-3} و قادری و همکاران

1. Number of Failure
2. Average Function Evaluation

(۳) از معیار همگرایی 10^{-4} استفاده کرده‌اند. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، مدل تهیه‌شده در این تحقیق از لحاظ مقاومت، کارایی و همگرایی در تمام موارد از مدل‌های قبلی بهتر عمل کرده است.

۸.۲ مدلسازی و نتایج

در این پژوهش تابع هدف به‌صورت حداقل‌سازی میزان کمبود اعمال‌شده نسبت به یک نیاز مشخص تعریف شده است. فرمولاسیون تابع هدف و قیود به‌صورت زیر است. رابطهٔ ۴ بیانگر تابع هدف و روابط ۵ تا ۱۰ بیانگر قیود مسئله‌اند.

$$\min z = \sum_{t=1}^{60}\sum_{j=1}^{4}(D_t^j - Ragr_t^j)^2 \qquad (۴)$$

$$S_{t+1}^{NR} = S_t^{NR} + Q_t^{NR} - R_t^{NR} - L_t^{NR} - SP_t^{NR} \qquad (۵)$$

$$S_{min}^{NR} \le S_t^{NR} \le S_{max}^{NR} \qquad (۶)$$

$$R_{min}^{NR} \le R_t^{NR} \le R_{max}^{NR} \qquad (۷)$$

(۸)

$$SP_t = \begin{cases} S_t + Q_t - R_t - L_t - S_{max\,0} \\ 0 \end{cases}$$

$$\text{if} \quad S_t + Q_t - R_t - L_t > S_{max}$$

$$\text{if} \quad S_t + Q_t - R_t - L_t < S_{max} \qquad (۹)$$

$$A_t = aS_t^2 + bS_t + c$$

$$L_t = A_t * E_t$$

$$L_t = A_t * E_t \qquad (۱۰)$$

که Z مقدار تابع هدف (کمبود) و S، Q، R، L، Sp و D به‌ترتیب عبارتند از حجم ذخیرهٔ اول دوره (میلیون مترمکعب)، مقدار ورودی (میلیون مترمکعب)، مقدار رهاسازی (میلیون مترمکعب)، حجم تلفات از سطح مخازن (میلیون متر مکعب)، حجم سرریز از مخزن (میلیون مترمکعب) و نیاز ماهیانهٔ مناطق کشاورزی (میلیون مترمکعب)، NR: شمارهٔ مخزن؛ j: شماره منطقهٔ کشاورزی؛ t: طول دورهٔ بهره‌برداری؛ و $Ragr^j$: مقدار تخصیص آب به منطقهٔ jام کشاورزی است. تلفات از مخزن به‌صورت تبخیر و با در نظر گرفتن روابط توانی سطح-حجم مخزن براساس رابطهٔ ۶ محاسبه شده که A_t: سطح آب مخزن در دورهٔ tام (کیلومتر مربع)، E_t: مقدار تبخیر از سطح مخزن در دورهٔ tام (متر)، و a، b و c ضرایب ثابت تبدیل حجم ذخیرهٔ مخزن iام به سطح متناظر آن در ابتدای همان دوره‌اند. با استفاده از این مدل، مسئله برای یک دورهٔ کوتاه‌مدت یکساله (دوازده ماه) و بلندمدت پنج‌ساله (شصت ماه) از سال آبی ۱۳۵۹- ۶۰ تا سال آبی ۱۳۶۳-۶۴ حل شده است. مسیر بهینهٔ بهره‌برداری شامل مقدار بهینهٔ تأمین هر یک از نیازها در طول این ماه‌ها بوده است. در مدل کوتاه‌مدت از آمار میانگین ۴۷ سالهٔ حوضه استفاده شده است. مجموع جریان ورودی به حوضه در این مدت ۶۲۶۱ میلیون متر مکعب و کل نیاز حوضه نیز ۶۶۷۴/۳۸۳ میلیون متر مکعب بوده است.

همان‌طور که گفته شد استفادهٔ بهینه از الگوریتم SCE مستلزم یافتن مقادیر مناسب پارامترهای این روش است؛ مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم SCE که از طریق آنالیز حساسیت به‌دست‌آمده در جدول ۳ نشان داده شده است. جواب‌های حاصل از اجرای مدل کوتاه‌مدت الگوریتم SCE با جواب‌های حاصل از الگوریتم ژنتیک نیز مقایسه شده است. بدین منظور از جعبهٔ ابزار GA در نرم‌افزار MATLAB نسخهٔ ۲۰۱۰ با شرایط یکسان در تعداد تکرار ۱۰۰۰ و جمعیت اولیهٔ ۱۰۰ در الگوریتم ژنتیک، نرخ تزویج ۰/۶، نرخ جهش ۰/۰۱ و تابع انتخاب چرخ گردان استفاده شد. بهترین مقدار تابع هدف حاصل از حل مسئله با استفاده از هر دو الگوریتم به‌ترتیب برابر ۱۲۰۱/۹۱و ۱۲۳۳/۱ میلیون متر مکعب به‌دست آمده که نشان‌دهندهٔ عملکرد مناسب الگوریتم بهینه‌سازی SCE نسبت به GA است.

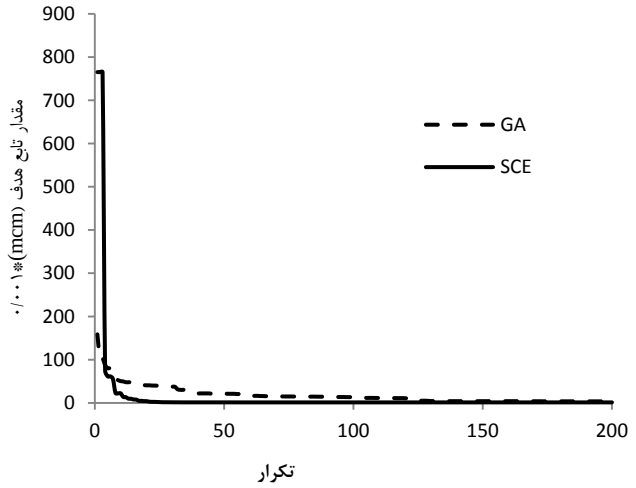
مقایسهٔ نتایج حاصل از اجرای این مدل در جدول ۴ ارائه شده است. شکل ۳ فرایند همگرایی دو الگوریتم نامبرده را نشان می‌دهد. برای مشاهدهٔ بهتر تغییرات و اختلاف همگرایی هر دو الگوریتم نمودار در مقادیر ۲۰۰ تکرار رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم SCE سریع‌تر همگرا می‌شود و در نهایت به جواب مطلوب‌تری نیز دست پیدا می‌کند.

جدول۳. پارامترهای بهینهٔ مدل کوتاه‌مدت در الگوریتم SCE

تعداد جامعه (P)	تعداد اعضای جامعه (m)	تعداد والدین(q)	ضریب α	ضریب β
۵	۱۰	۵	۲	۵

جدول۴. مقادیر تابع هدف در ده اجرای مستقل در دورهٔ کوتاه‌مدت

معیار ارزیابی	SCE	GA
بهترین مقدار	۱۲۰۱/۹۱	۱۲۳۳/۱
بدترین مقدار	۱۴۲۶/۳۵	۱۵۶۲/۲۴
میانگین	۱۲۲۷/۵۹	۱۳۴۵/۳۶
انحراف معیار	۷۰/۶۹	۱۰۲/۳۳
تعداد تکرار	۱۰۰۰	۱۰۰۰

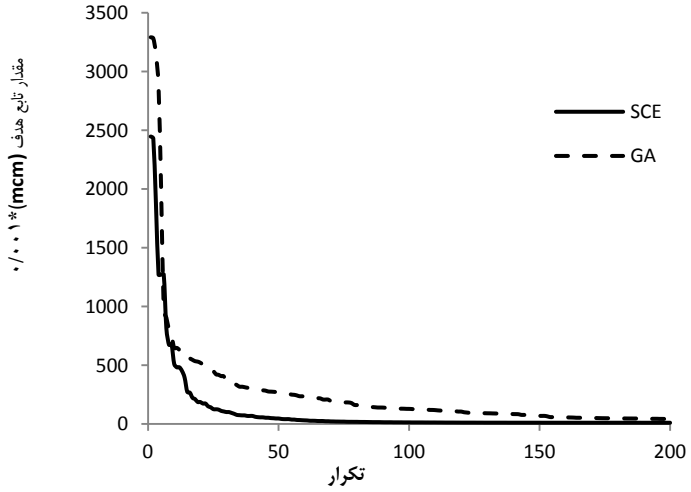


شکل۳. نحوهٔ همگرایی جواب‌ها در بهره‌برداری کوتاه‌مدت

ساختار مدل توسعه‌داده‌شدهٔ بلندمدت مشابه کوتاه‌مدت است و فقط در تعداد سال‌های بهینه‌سازی متفاوت است. مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم SCE همانند مدل کوتاه‌مدت در نظر گرفته شده و فقط در تعداد جوامع متفاوت بوده که مقدار آن برابر P=۱۰ لحاظ شده است. همچنین جمعیت اولیه در الگوریتم ژنتیک برابر با ۲۵۰ در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که تعداد جمعیت اولیهٔ مناسب برای الگوریتم ژنتیک در هر دو مدل کوتاه-مدت و بلندمدت توسعه‌یافته با استفاده از تحلیل حساسیت عملکرد مدل‌ها نسبت به تعداد جمعیت اولیه به‌دست آمده است. مدل با استفاده از هر دو الگوریتم در شرایط یکسان به‌طور مستقل ۱۰ بار اجرا شده و نتایج آن همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود برتری الگوریتم SCE در بهینه‌سازی سیستم را نسبت به GA نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود، الگوریتم SCE در مدل بلندمدت همانند کوتاه‌مدت سریع‌تر به جواب بهتر همگرا شده و در تکرارهای بعدی هر دو الگوریتم با اختلاف کمی پیش رفته، ولی در نهایت الگوریتم SCE به جواب بهتری همگرا شده است.

جدول۵. تابع هدف ده اجرای مستقل در دورهٔ بلندمدت

معیار ارزیابی	مقدار SCE	مقدار GA
بهترین مقدار	۱۰۳۹۸/۴۹	۱۰۸۵۵
بدترین مقدار	۱۱۹۶۴/۹۵	۱۲۲۸۱/۴
میانگین	۱۰۸۹۸/۳۵	۱۱۳۹۰/۹
انحراف معیار	۳۳۵/۸۹۸۱	۴۲۸/۴۹
تعداد تکرار	۱۰۰۰	۱۰۰۰

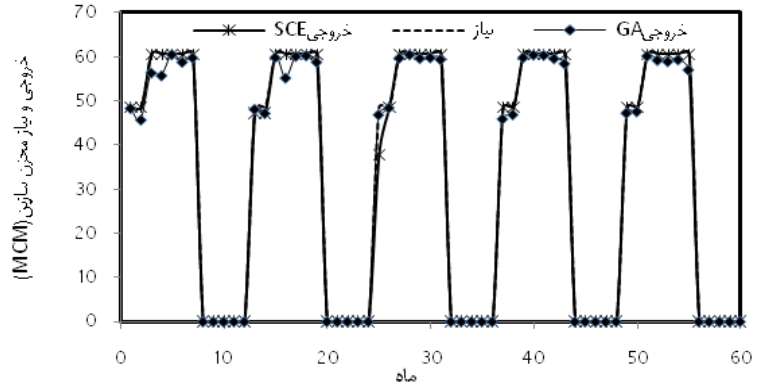


شکل۴. نحوهٔ همگرایی جواب‌ها در بهره‌برداری بلندمدت

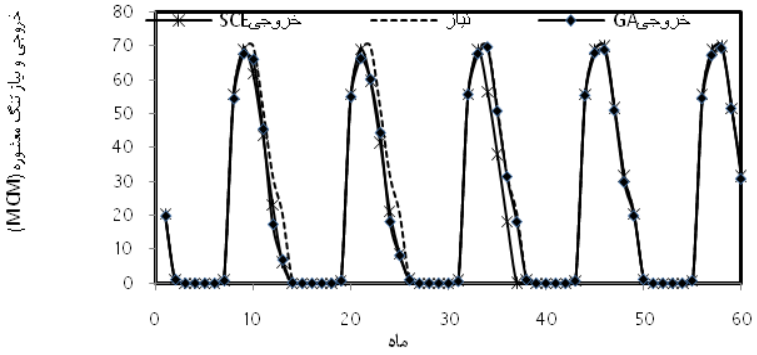
در جدول ۶ معیارهای ارزیابی کارایی مدل‌ها در سامانهٔ سه‌مخزنه در دورهٔ ۶۰ ماه و در شکل‌های ۵ تا ۸ مقدار رهاسازی با دو روش SCE و GA برای حوضه در سدهای مختلف ارائه شده است. با توجه به نمودارهای تغییرات مقدار رهاسازی در هر چهار منطقهٔ مورد بررسی، همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، بهره‌برداری با روش SCE با اختلاف کمی نسبت به روش GA از کمبودهای کمتری در بیشتر دوره‌ها دارد، به‌طوری که کمبود تأمین نیاز کشاورزی برای سدهای سازبن، تنگ معشوره، بالادست کرخه و کرخه در روش SCE به‌ترتیب ۰/۶۶، ۹/۷۵، ۱۵/۸ و صفر درصد است، درحالی که این مقادیر در روش GA، ۱/۱۷، ۵/۳۱، ۱۳/۳۸ و ۰/۴۲ درصد است.

جدول ۶. معیارهای ارزیابی کارایی در طول دورهٔ بهره‌برداری حوضهٔ کرخه (درصد)

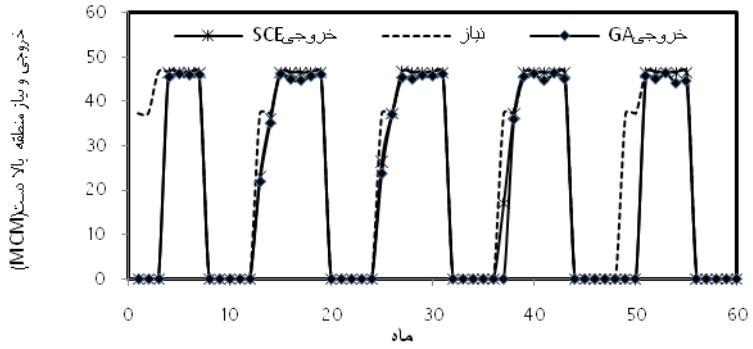
معیارها	سازبن		تنگ معشوره		بالادست کرخه		کرخه	
	SCE	GA	SCE	GA	SCE	GA	SCE	GA
اعتمادپذیری	۹۸	۸۴	۷۸	۷۴	۸۵	۷۳	۱۰۰	۵۸
آسیب‌پذیری	۲۲/۲۵	۸/۸۴	۶۰/۲۵	۵۵/۴	۱۰۰	۱۰۰	/۱۴	۱/۹۴



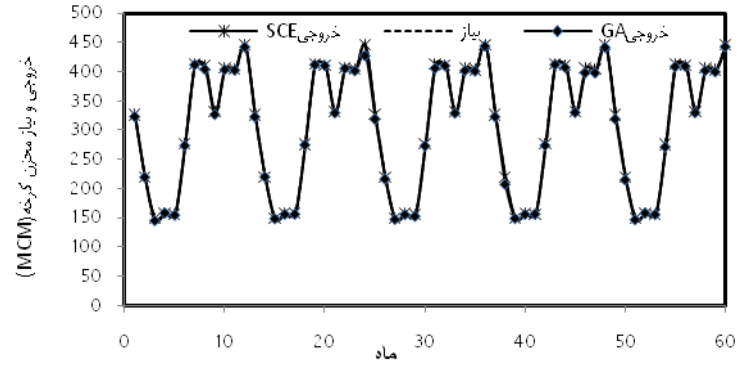
شکل ۵. تغییرات مقدار رهاسازی از مخزن سد سازبن در طول دورهٔ زمانی



شکل ۶. تغییرات مقدار رهاسازی از مخزن سد معشوره در طول دورهٔ زمانی



شکل ۷. تغییرات مقدار رهاسازی نیاز کشاورزی بالادست کرخه در طول دورهٔ زمانی



شکل۸. تغییرات مقدار رهاسازی از مخزن سد کرخه در طول دورهٔ زمانی

۳. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدلی بر مبنای روش توسعه‌یافتهٔ تکامل رقابتی جوامع(SCE) به‌منظور بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن چندگانهٔ حوضهٔ کرخه توسعه داده شد. کد الگوریتم SCE در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB نوشته شد. با به‌کارگیری سازوکار مناسبی به‌نام تابع انتخاب چرخ گردان برای افزایش قابلیت الگوریتم و همچنین ایجاد تمهیداتی در ساختار الگوریتم، کارایی و قابلیت الگوریتم افزایش پیدا کرد. اعتبارسنجی الگوریتم توسعه‌داده‌شده با استفاده از هفت تابع استاندارد بررسی شد. نتایج، برتری الگوریتم توسعه‌داده‌شده در این پژوهش را نسبت به مدل‌های توسعه‌داده‌شده توسط محققان قبلی نشان می‌دهد. در ادامه عملکرد این الگوریتم در بهره‌برداری بهینه از سیستم پیچیدهٔ سه‌مخزنی حوضهٔ کرخه بررسی شد. نتایج حاصل از حل مسئله، نشان‌دهندهٔ عملکرد مناسب الگوریتم SCE نسبت به GA است؛ به‌طوری که مقدار میانگین تابع هدف توسط الگوریتم SCE و GA به‌ترتیب در رویکرد کوتاه‌مدت، ۱۲۰۱/۹۱ و ۱۲۳۳/۱؛ و در رویکرد بلندمدت ۱۰۸۹۸/۳۵ و ۱۱۳۹۰/۹ به‌دست آمده است. در ادامه، بررسی خروجی‌های بهینه‌سازی‌شدهٔ حاصل از مدل SCE در مقایسه با مقادیر نیاز سیستم با استفاده از معیارهای ارزیابی کارایی مخزن، برتری قابلیت بهینه‌سازی مدل در الگوریتم توسعه‌داده‌شده را نشان می‌دهد. این نتایج در کاربرد الگوریتم SCE در حل مسائل سیستم‌های پیچیدهٔ بهره‌برداری مخزن بسیار نویدبخش است و می‌توان از این الگوریتم در مطالعات بهینه‌سازی بهره‌برداری مخازن با توابع هدف و ساختار پیچیده استفاده کرد.

منابع

۱. فلاح مهدی‌پور ا و بزرگ حداد ا (۱۳۹۱) بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدهای چندمنظوره با کاربرد روش بهینه‌سازی مجموعه ذرات. مجله آب و فاضلاب. ۴ (۲): ۹۷-۱۰۵.

۲. قادری ک، عرب د ر، تشنه‌لب م و قزاق آ (۱۳۸۹) مدل‌سازی بهره‌برداری هوشمند از مخازن با استفاده از برخورد گروهی با داده‌ها (GMDH). تحقیقات منابع آب ایران. ۶(۳): ۵۵-۶۷.

۳. قادری ک، محمد ولی سامانی ج، اسلامی ح ر و تقفیان ب (۱۳۸۵) واسنجی اتوماتیک مدل بارش- رواناب با استفاده از روش بهینه‌سازی SCE. تحقیقات منابع آب ایران. ۲(۲): ۳۹-۵۲.

۴. قدوسی ح، منعم م ج و عمادی ع ر (۱۳۸۷) بهینه-سازی بهره‌برداری از کانال‌های آبیاری با استفاده از روش بهینه‌سازی SCE. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، تبریز.

۵. نورانی و، ابوالواسط ن و صالحی ک (۱۳۹۱) ترکیب مدل برنامه‌ریزی آرمانی و سیستم استنتاج عصبی- فازی در بهره‌برداری بهینهٔ چندمخزنه از یک سیستم دومخزنی. مجلهٔ تحقیقات منابع آب ایران. ۲ (۳): ۱-۱۲.

6. Brath A, Montarani A and Toth E (2004) Analysis of the effects of different scenarios of historical data availability on the calibration of a spatially-distributed hydrological model. Hydrology. 291: 232-253.

7. Dongmei X, Wang W, Chau K, Cheng C H and Chen S H (2013) Comparison of three global optimization algorithms for calibration of the xinanjiang model parameters. Hydro informatics. 15: 174_193.

8. Duan Q, Gupta V K and Sorooshian S (1993) A Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Optimization. Optimization Theory and Its Applications. 76(3): 501-521.

9. Duan Q, Gupta V K and Sorooshian S (1992) Effective and efficient global optimization for conceptual Rainfall_runoff models. Water Resources Research. 28(4): 1015_1031.

10. Duan Q, Sorooshian S and Gupta V K (1994) Optimal Use of the SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models. Hydrology. 158: 265-284.

11. Esat V and Hall M J (1994) Water resources system optimization using genetic algorithm. Hydro informatics. 94: 225-231.

12. Labadie J W (2004) Optimal operation of multi-reservoir systems: State of the art review. Journal of Water Resources Planning and Management. 130(2): 93-111.

13. Liong S Y and Muttil N (2004) Shuffled Complex Evolution Coupled with Experimental Design Technique. National University of Singapore Singapore 119260.

14. Madsen H (2003) Parameter estimation in distributed hydrological catchment modeling using automatic calibration with multiple objectives. Advances in Water Resources. 26(2): 205-216.

15. Simonovic S P (1992) Closing gap between theory and practice. Water Resources Planning and Management. 118(3): 262-280.

16. Wardlaw R and Sharif M (1999) Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system Operation. Water Resources Planning and Management. 125(1): 25-33.

17. Xiamong S and Chang Z, Jun X (2011) integration of a statistical emulator approach with the SCE_UA method for parameter optimization of a hydrological model. Chinese Science Bulletin. 57(26): 3397_3403.

18. Yeh W G (1985) Reservoir management and operation models: A State-of-the-art review. Water Resources Research. 21(12): 1797-1818.

19. Yapo P O, Gupta H V and Sorooshian S (1998) Multi-objective global optimization for hydrologic models. Hydrology. 204: 83-97.