مدیریت آب و آبیاری
دوره ۹ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۸
صفحه‌های ۳۴۳-۳۳۳

توسعه عمل‌گرهای منطقی در برنامه‌ریزی ژنتیک متداول (CGP) و واسنجی آن در قاعده SOP

پریساسادات آشفته[1*]، امید بزرگ‌حداد[2]
۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.
۲. استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۳

چکیده

برنامه‌ریزی ژنتیک متداول (CGP) با در نظر گرفتن داده‌های تجربی (مشاهداتی) باعث بهبود و تکامل داده‌های تخمینی (محاسباتی) می‌شود. با این‌حال، الگوریتم CGP قادر به حل مسائل چندضابطه‌ای با عمل‌کرد مطلوب نیست. در این تحقیق، قابلیت الگوریتم CGP از طریق توسعه و ادغام توابع و عمل گرهای منطقی ریاضی به آن، بهبود داده می‌شود. الگوریتم پیشنهادی، برنامه‌ریزی ژنتیک منطقی (LGP) نامیده می‌شود که بهبود عمل‌کرد آن در مقایسه با الگوریتم CGP، در حوزه منابع آب بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که قابلیت الگوریتم LGP در این حوزه، مؤثرتر و کارآتر از CGP می‌باشد، به گونه‌ای که الگوریتم LGP باعث بهبود ۳۹ درصدی تابع هدف نسبت به الگوریتم CGP، در استخراج سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) در حوزه منابع آب [با تابع هدف کمینه نمودن متوسط قدر مطلق خطاها (*MAE*)]، می‌شود. مقایسه نتایج الگوریتم‌ها با استفاده از معیارهای ارزیابی نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتمLGP در بازسازی SOP سبب کاهش ۲۲ درصدی *RMSE* و افزایش ۱ درصدی *NSE*، نسبت به CGP شده است.

کلیدواژه‌ها: تابع هدف، توابع منطقی، توسعه الگوریتم، سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن.

Development of logical operator’s in common genetic programming (CGP) and its calibration in SOP rule

Parisa-Sadat Ashofteh[1*], Omid Bozorg-Haddad[2]
1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.
2. Professor, Department of Irrigation & Reclamation, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Tehran, Iran.
Received: July 28, 2019 Accepted: February 12, 2020

Abstract

Common genetic programming (CGP) with considering empirical data (observed) improves and evolves estimated data (calculated). However, CGP is not able to solve multi-conditional problems with satisfactory performance. In this study, capability of the CGP is improved through development and integration of mathematical functions and logical operators on it. Proposed algorithm is called logic genetic programming (LGP) that its performance improvement is investigated in comparison with CGP in field of water resources. Results show that LGP capability, is more effective and more efficient than CGP, so that LGP improves objective function by 39 percent compared to CGP, in extraction of standard operating policy (SOP) [with minimization of mean absolute error (*MAE*)]. Comparison of algorithms results using the evaluation criteria indicate that LGP algorithm in SOP reconstruction resulted in a 22% decrease in *RMSE* and a 1% increase in *NSE* compared to CGP.

Keywords: Development of the algorithm, Logical function, Objective function, Operation policy of reservoir.

* نویسنده مسئول
Email: parisa_ashofteh@yahoo.com

مقدمه

حل بسیاری از موضوعات منابع آبی به‌کمک مدل‌های شبیه‌سازی (از جمله مولوی و همکاران (۳)) و در رأس آن مدل‌های بهینه‌سازی (از جمله قادری و همکاران (۱)؛ کمالی و همکاران (۲)) و اضافه کردن توابع چندضابطه‌ای یا چندشرطی در ساختار مدل‌سازی آنها امکان‌پذیر است، به‌عنوان مثال بازسازی سیاست بهره‌برداری استاندارد[1] (SOP) و استخراج سیاست جیره‌بندی از مخازن به خصوص در شرایط خشک‌سالی. تنها در این صورت است که می‌توان به جواب‌های دقیق‌تر در این‌گونه مسائل دست یافت. این امر ضرورت پرداختن به توسعه مدل‌های بهینه‌سازی برای مسائل منابع آبی با ماهیت چندشرطی را نمایان می‌سازد. برخی مدل‌های بهینه‌سازی وجود دارند که به تشریح فرآیندهای فیزیکی سامانه نمی‌پردازند، بلکه ورودی‌های سامانه را با استفاده از رابطه ریاضی مطلوب به خروجی‌تبدیل می‌کنند. از این مدل‌ها می‌توان مدل‌های برپایه داده[2] را نام برد. برنامه‌ریزی ژنتیک متداول[3] (CGP) نمونه‌ای از این مدل‌های برپایه داده هستند که به‌منظور تخمین مناسب خروجی‌ها برای تعیین پارامترها و تنظیمات ساختار مدل خود، به داده‌های ورودی و خروجی نیازمند هستند. این تخمین در محدوده‌ای که داده‌های تجربی (مشاهداتی) موجود باشند، بهتر صورت می‌گیرد.

CGP در فرآیند جستجوی پاسخ هم‌زمان به یافتن پارامترها و ساختار ریاضی سامانه می‌پردازد. برای این که این رابطه ریاضی بتواند بیان‌گر ماهیت درونی سامانه باشد، کاربر باید تعدادی توابع را توسعه دهد و به‌کار برد. به این ترتیب، یکی از چالش‌ها در کاربرد CGP، می‌تواند توسعه CGP باشد. این موضوع می‌تواند با افزودن توابع و عمل‌گرهای ریاضی متعدد، به مدل بهینه‌سازی محقق شود.

در ادامه، تحقیقات صورت گرفته در زمینه توسعه‌های صورت‌گرفته بر روی CGP ارائه شده‌اند.

گلوبسکی (۹) در تحقیقی حل مسائل مربوط به رگرسیون فازی را با استفاده از GP انجام داد. نتایج نشان دادند که عمل‌کرد GP برای یافتن تابع فازی مناسب، موفقیت آمیز بوده است. شنگ- وو و وی- وو (۱۸) روش GP تک‌درختی[4] (PTGP) را معرفی نمودند. برای مسئله‌های رگرسیون تابع گسسته[5]، روش پیشنهادی در شناسایی هم زمان ساختار تابع و نقطه‌های گسسته، توان‌مند بود. هم‌چنین، این روش نه تنها در حل مسئله‌های مربوط به رگرسیون تابع گسسته، بلکه برای حل مسئله‌های مربوط به رگرسیون تابع پیوسته[6] نیز به‌راحتی قابل استفاده بود. نتیجه‌های عددی نشان دادند که روش PTGP، روشی کارآمد برای حل مسئله‌های مربوط به تابع‌های مختلط[7] بود. مورالس و واسکوز (۱۳) مشکلات مربوط به رگرسیون نمادین را توسط GP بررسی نمودند. آنها در تحقیق خود رویکرد GP چندشاخه‌ای[8] را معرفی کردند. به‌منظور بررسی کارآیی GP چندشاخه‌ای مجموعه‌ای از معادلات انتخاب شدند. نتایج نشان دادند که استفاده از این رویکرد، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌نماید. سیرسون و همکاران (۱۵) ابزار GPTIPS در نرم‌افزار MATLAB را برای مسائل رگرسیون نمادین معرفی نمودند. این ابزار به‌طور خاص برای تکامل مدل‌های ریاضی که داده های آن در طبیعت به‌صورت چندژنی[9] هستند، طراحی شده است. آنها از ابزار GPTIPS برای پیش‌بینی سمّیت ترکیبات شیمیایی استفاده نمودند. نتایج نشان دادند که روش‌های GP چندژنی اجرا شده توسط GPTIPS عمل‌کرد قابل قبولی داشته است. چادالاوادا و همکاران (۸) از رویکرد GP برای مدل‌سازی بارش‌رواناب استفاده نمودند و نتایج حاکی از

1. Standard Operating Policy
2. Data-Based Model
3. Common Genetic Programming

4. Point-Tree GP
5. Discontinuous
6. Continuous Function
7. Complex Function
8. Multi-Branch
9. Multigene

عمل‌کرد موفقیت‌آمیز GP در مدل‌سازی بارش- رواناب بوده است. تایفور (۱۹) روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته از جمله GP را در برنامه‌ریزی، مهندسی و مدیریت منابع آب ارائه نمودند. نتایج نشان دادند که این روش‌های بهینه‌سازی در حوزه‌های مختلف از جمله کنترل و تقلیل سیلاب، بهره برداری مخزن، آبیاری، روندیابی سیلاب، سرعت جریان، فرآیندهای بارش-رواناب، انتقال رسوب، مدیریت آب زیرزمینی، کیفیت آب، برق‌آبی، آبخوان‌ها با موفقیت به کاررفته است. آریافر و همکاران (٤) GP را برای تعیین رابطه بین پارامترهای کیفی آب زیرزمینی از جمله سختی کل[1] (TH)، کل مواد جامد محلول[2] (TDS) و هدایت الکتریکی[3] (EC) برای دشت خضری در ایران به‌کار بردند. نتایج نشان دادند که GP به‌عنوان ابزاری مهم برای مدل‌سازی خودکار پارامترهای هیدروشیمیایی با هدف مدیریت زیست‌محیطی و استفاده بهینه از منابع آب زیرزمینی می‌تواند در نظر گرفته شود. سپهوند و همکاران (١٦) در تحقیقی دیگر برنامه‌ریزی چندهدفه برای بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را با استفاده از GP بررسی نمودند. دو هدف در مقاله مدنظر قرار گرفت: ۱- کمینه کردن کمبود آب در تأمین نیازهای آبیاری و ۲- بیشینه نمودن منافع حاصل از سود کشاورزی. نتایج نشان‌دهنده موفقیت‌آمیز بودن رویکرد به‌کاررفته در تحقیق بود.

با توجه به بررسی پژوهش‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که CGP هنوز به‌طور کامل توسعه نیافته است. بنابراین قاعدتاً نمی‌تواند تمام مسائل را با عمل‌کرد مطلوب حل نماید. به‌خصوص مسائلی که دارای ماهیت چندشرطی و چندضابطه‌ای بوده و بسته به شرایط حاکم بر مسأله متفاوت خواهد بود، مانند بازسازی قاعده SOP و جیره‌بندی مخازم در شرایط خشک‌سالی. با این حال با توسعه‌هایی در آن، از طریق کدهای نوشته‌شده، می‌تواند برای حل مسائل خاص، نتایج بهتری را ارائه نماید. از نوآوری‌های تحقیق حاضر، توسعه و ادغام توابع و عمل گرهای منطقی به CGP و به‌وجودآمدن الگوریتم LGP برای حل مسائلی که ماهیت چندشرطی دارند، می‌باشد. در این تحقیق، برای اثبات صحت کارآیی الگوریتمLGP، از آن برای استخراج سیاست بهره‌برداری از مخازن در حوزه منابع آب، استفاده می‌شود. سپس، نتایج حاصله از الگوریتمLGP در هر دو حوزه با CGP در وضعیت مشابه، با استفاده از معیارهای عمل‌کرد مقایسه می‌شوند.

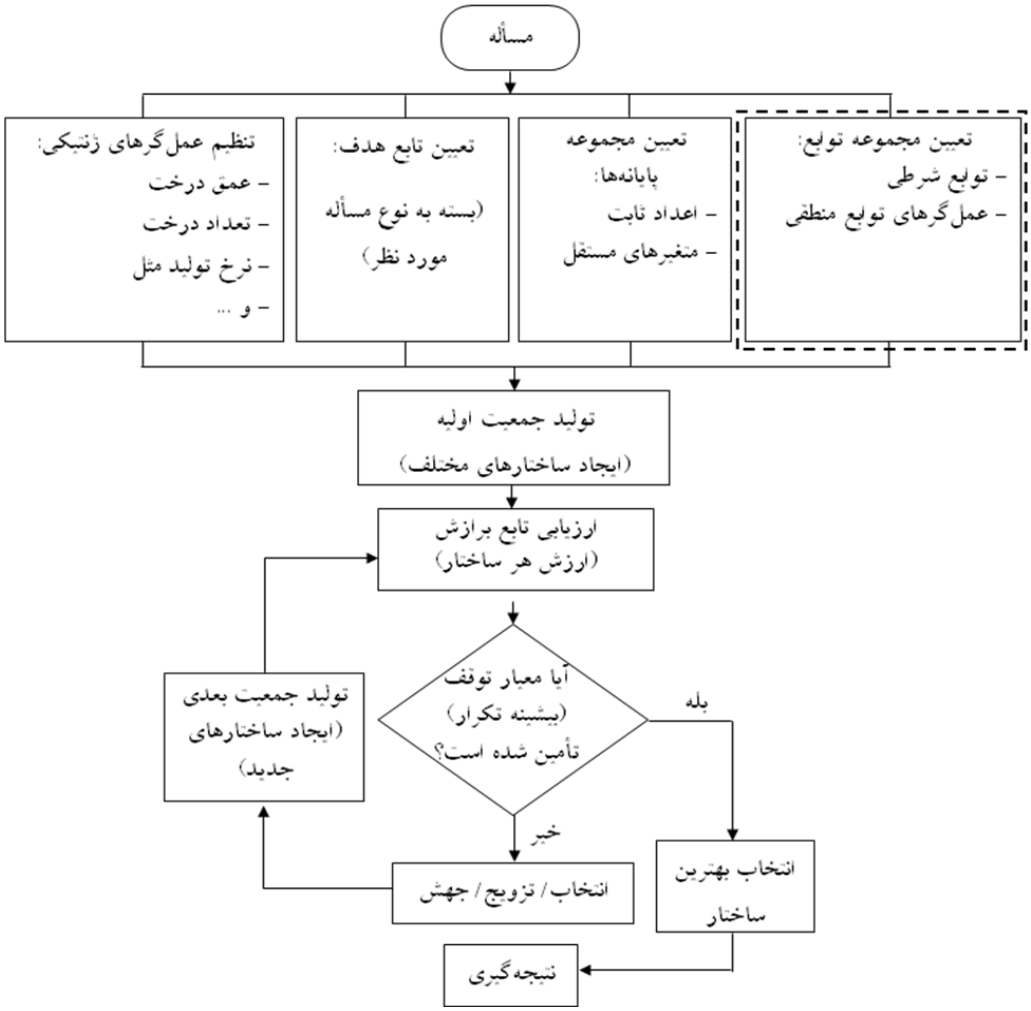
مواد و روش‌ها

در این بخش، روش‌های مورد نیاز برای انجام این تحقیق ارائه می‌شوند که شامل مرور مختصری از الگوریتمCGP، تشریح الگوریتمLGP به‌منظور بهبود عمل‌کرد CGP و بررسی کارآیی LGP از طریق بازسازی قواعد بهره‌برداری از مخزن (با قاعده‌SOP)، می‌باشد. روندنمای الگوریتم LGP در شکل ۱ ارائه شده است.

توسعه رویکرد CGP

ازآنجایی‌که CGP هنوز به‌طور کامل توسعه نیافته است، بنابراین یکی از مسائل پیش‌رو در کاربرد CGP، می‌تواند توسعه آن باشد، به‌گونه‌ای که بتواند برای مسائل خاص، نتایج مطلوب‌تری را ارائه دهد. لازم به ذکر است که قبل از آن‌که CGP به ساختن مدل یا تخمین رابطه ریاضی برای حل مسئله بپردازد، کاربر در ابتدا باید تعدادی توابع و عمل‌گرهای ریاضی و پارامترها را مشخص کند. بنابراین یکی از توسعه‌های صورت گرفته بر روی CGP می‌تواند توسعه و ادغام توابع و عمل‌گرهای منطقی ریاضی متعدد به آن می‌باشد. در ادامه، ابتدا الگوریتم CGP و سپس، الگوریتم LGP از طریق توسعه و ادغام توابع و عمل گرهای منطقی، تشریح شده‌اند.

1. Total Hardness
2. Total Dissolved Solid
3. Electrical Conductivity



شکل ۱. روندنمای الگوریتم LGP

الگوریتم CGP

همان‌طور که پیش که از این ارائه شد، حل بسیاری از موضوعات منابع آبی به‌کمک مدل‌های بهینه‌سازی و اضافه کردن توابع چندضابطه‌ای یا چندشرطی در ساختار مدل‌سازی آنها امکان‌پذیر است، به‌عنوان مثال بازسازی سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و استخراج سیاست جیره‌بندی از مخازن به‌خصوص در شرایط خشک‌سالی. تنها در این صورت است که می‌توان به جواب‌های دقیق‌تر در این‌گونه مسائل دست یافت. این امر ضرورت پرداختن به توسعه مدل‌های بهینه‌سازی برای مسائل منابع آبی با ماهیت چندشرطی را نمایان می‌سازد. فرآیند CGP که یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر فرآیند تکامل است، با یک جمعیت اولیه تصادفی شروع می‌شود. این جمعیت اولیه تصادفی دربرگیرنده مجموعه درخت‌ها یا راه‌حل‌ها است که هر کدام بسته به مسئله مورد نظر، متشکل از مجموعه توابع (تمام عمل‌گرها و یا رابطه‌های ریاضی) و پایانه‌ها[1] (تمام پارامترهای مستقل و ثابت‌ها) می‌باشند. عمق درخت، به‌عنوان یکی از پارامترهای CGP، توسط کاربر تعیین می‌شود که عبارت است از عمق عمیق‌ترین گره. تمام درخت‌ها در

1. Terminal

جمعیت برحسب این که برای حل مسئله موردنظر چگونه عمل نموده‌اند، می‌بایستی ارزیابی شوند. این ارزیابی اصطلاحاً تابع برازش (تابع هدف به‌اضافه جریمه) نامیده می شود. کرامر و ژانگ (۱۱) به‌منظور بقای اصلح برای ایجاد جمعیت جدید فرزندان، عمل‌گرهای ژنتیک (همانند، تزویج[1] و جهش[2]) بر روی درخت‌های جمعیت کنونی را به‌کار گرفتند. تزویج و جهش به‌صورت احتمالاتی انجام می‌گیرد و احتمال آنها در ابتدای محاسبات توسط کاربر، به‌صورت متغیر یا ثابت انتخاب می‌شود. قابل ذکر است که تعدادی از درخت‌ها یا راه‌حل‌ها در مجموعه درخت‌ها یا راه‌حل‌ها ممکن است بدون اعمال عمل‌گرهای ژنتیک در نسل بعدی عیناً تکرار شوند که با پارامتر نرخ تولید مثل[3] توسط کاربر مشخص می‌شوند.

برای حل یک مسئله رگرسیون، اعضای جمعیت می‌تواند به‌صورت یک ساختار درختی از عبارت‌های ریاضی، نشان داده شوند. مجموعه‌های توابع و پایانه‌ها برای ایجاد اعضای جمعیت ساختار درختی استفاده می‌شوند. ترکیب این دو مجموعه، CGP را برای ساخت راه‌حل‌های نهفته برای مسائل مربوطه، توان‌مند می‌سازد. کوزا (۱۰) در تحقیقی برای اولین بار نشان داده شد که چگونه یک CGP می‌تواند برای مسائل رگرسیونی به‌کار گرفته شود. این کار نیازمند شناسایی ساختار مدل و بهینه سازی پارامترهای عددی مرتبط، به‌منظور دست‌یابی به بهترین تطبیق‌پذیری ممکن بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد. بنابراین CGP می‌تواند به‌طور هم‌زمان برای بهینه‌سازی شکل[4] تابعی مدل و تخمین پارامترهای عددی مرتبط، به‌کار گرفته شود. این فرآیند به‌عنوان رگرسیون نمادین نامیده می‌شود. دانش اولیه از مسئله مورد نظر می‌تواند به برنامه‌ریز کمک کند تا با اضافه نمودن یا ادغام کردن توابع خاص به CGP، الگوریتم را توسعه دهد.

الگوریتم LGP

ادغام توابع جدید در جعبه‌ابزار GPLAB که اولین بار توسط سیلوا (۱۷) ارائه شد، با ویرایش ام-فایل[5] availableparams امکان‌پذیر است. این جعبه‌ابزار که در محیط برنامه‌نویسی MATLAB 9.0 توسعه یافته، از سه قسمت اصلی تشکیل شده است. قسمت اول پارامترها را معرفی می‌کند، قسمت دوم مقادیر ممکن برای هر پارامتر را مشخص می‌کند و قسمت سوم مقادیر پیش‌فرض[6] را برای هر پارامتر تعیین می‌کند.

در این تحقیق، به‌منظور توسعه CGP و بهبود عمل‌کرد آن، تابع چندضابطه‌ای، عمل‌گرهای توابع منطقی[7] تعریف و با CGP ادغام شده‌اند تا الگوریتمLGP به‌وجود آید، به نحوی که بتواند برای مسائلی با ویژگی‌ها و شرایط مختلف، قابل استفاده باشد.

صحت‌سنجی الگوریتم LGP در SOP

ساده‌ترین سیاست بهره‌برداری از مخازن، سیاست معروف به سیاست بهره‌برداری استاندارد از مخازن می‌باشد که اولین بار توسط لاکس (۱۲) مطرح شد و در ادامه تشریح می‌شود. این قاعده توسط محققین مختلف از جمله رامان و چاندرامولی (۱٤)، کنسلیر و همکاران (۷)، و آشفته و همکاران (۵)، برای استخراج قاعده بهره‌برداری از مخزن به‌کار گرفته شد. در این قاعده چندضابطه‌ای، میزان آب قابل دسترس به‌عنوان آستانه‌ای برای تعیین رهاسازی از مخزن در نظر گرفته می‌شود.

1. Crossover
2. Mutation
3. Reproduction Rate
4. Form

5. M-File
6. Default
7. Logical Operator Function

آب قابل دسترس به‌صورت حجم ذخیره داخل مخزن، به‌اضافه میزان آبدهی به مخزن با کسر تلفات ناشی از تبخیر، به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$AW_t = S_t + Q_t - E_t \qquad \forall t = 1,\ 2,\ \ldots,\ T \qquad (۱)$$

در این رابطه، AW_t = حجم آب قابل دسترس در طول دوره tام (متغیر تصمیم)، S_t = میزان حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره tام، Q_t = میزان حجم آبدهی به مخزن در طول دوره tام، T= بازه بهره‌برداری در افق بلندمدت و E_t= حجم تبخیر از دریاچه مخزن در طول دوره tام می‌باشند که E_t به‌صورت رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

$$E_t = \left[e_t \times \left(aS_t + b\right)\right]/1{,}000 \qquad (۲)$$

$$\forall t = 1,\ 2,\ \ldots,\ T$$

در این رابطه، e_t= ارتفاع تبخیر از دریاچه سد در طول دوره tام و a و b= ثابت‌های منحنی سطح- حجم ذخیره مخزن می‌باشند.

هم‌چنین، قاعده رهاسازی اضافی (مجموع رهاسازی و جریان سرریز)، براساس سیاست بهره‌برداری استاندارد، می‌تواند به‌صورت رابطه (۳) باشد:

$$rsp_t = \begin{cases} AW_t & 0 < AW_t \le D \\ D & D < AW_t \le D + S\max \\ AW_t - S\,max & D + S\max < AW_t \end{cases} \qquad (۳)$$

$$\forall t = 1,\ 2,\ \ldots,\ T$$

در این رابطه، rsp_t= رهاسازی اضافی مستخرج از سیاست بهره‌برداری استاندارد (مشاهداتی) در دوره tام، D= متوسط حجم تقاضا در کل بازه زمانی برنامه‌ریزی و $Smax$= حجم بیشینه مخزن، می‌باشند.

تابع هدف به‌کاررفته برای سیاست بهره‌برداری استاندارد می‌تواند به‌صورت کمینه‌کردن متوسط قدر مطلق خطاها[1] (MAE) در طول بازه بهره‌برداری از مخزن، مطابق رابطه (٤) باشد:

$$Minimize\ \ MAE_q = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\left|rsp_t - RSP_{qt}\right| \qquad (٤)$$

$$\forall q = 1,\ 2 \qquad \forall t = 1,\ 2,\ \ldots,\ T$$

در این رابطه، MAE_q= تابع هدف به‌صورت متوسط قدرمطلق خطاها براساس الگوریتمqام و RSP_{qt} = رهاسازی اضافی محاسباتی در دوره tام براساس الگوریتمqام، می‌باشد.

معیارهای ارزیابی

در این تحقیق، از معیارهای ضریب همبستگی[2] (R)، جذر میانگین مربعات خطا[3] ($RMSE$) و ضریب کارآیی نش- ساتکلیف[4] (NSE)، مطابق با رابطه‌های (۵) تا (۷) برای مقایسه نتایج رویکردهای CGP و LGP در بازسازی قاعده بهره‌برداری مستخرج از سیاست بهره‌برداری استاندارد استفاده شده است:

$$R_q = \frac{\left(\sum_{t=1}^{T}(z_t - \bar{z}).(Z_{qt} - \bar{Z}_q)\right)}{\left(\sqrt{\sum_{t=1}^{T}(z_t - \bar{z})^2.\sum_{t=1}^{T}(Z_{qt} - \bar{Z}_{qt})^2}\right)} \qquad (۵)$$

$$\forall q = 1,\ 2 \qquad \forall t = 1,\ 2,\ \ldots,\ T$$

$$RMSE_q = \sqrt{\sum_{t=1}^{T}(Z_{qt} - z_t)^2 \Big/ T} \qquad (٦)$$

$$\forall q = 1,\ 2 \qquad \forall t = 1,\ 2,\ \ldots,\ T$$

$$NSE_q = 1 - \left(\sum_{t=1}^{T}(z_t - Z_{qt})^2 \Big/ \sum_{t=1}^{T}(z_t - \bar{z})^2\right) \qquad (۷)$$

$$\forall q = 1,\ 2 \qquad \forall t = 1,\ 2,\ \ldots,\ T$$

در این رابطه، z_t = داده (یا رهاسازی اضافی) مشاهداتی در دوره tام، $\bar{z}$ = متوسط داده مشاهداتی در کل بازه زمانی، Z_{qt} = داده محاسباتی در دوره tام و براساس الگوریتمqام و $\bar{Z}_{qt}$ = متوسط داده محاسباتی در کل بازه زمانی براساس الگوریتمqام، می‌باشند.

1. Error Absolute Mean

2. Correlation Coefficient
3. Root Mean Square Error
4. Nash-Sutcliffe Efficiency

سامانه مورد مطالعه و داده‌ها

سامانه مخزن مورد مطالعه حوضه آیدوغموش است که در استان آذربایجان شرقی (شمال شرقی ایران) قرار گرفته است که پیش از این توسط آشفته و همکاران (٦) مورد مطالعه قرار گرفت. وسعت حوضه مورد نظر حدوداً ۱٬۸۰۰ کیلومتر مربع است. آبدهی سالانه رودخانه ۱۹۰ میلیون متر مکعب و طول آن حدود ۸۰ کیلومتر می‌باشد. مخزن سد آیدوغموش دارای تراز نرمال ۱٬۳٤۱/۵ متر از سطح دریا، به ظرفیت کل ۱٤۵/۷ میلیون متر مکعب و حجم مرده سد برابر با ۸/۷ میلیون متر مکعب می‌باشد. a و b ثابت‌های منحنی سطح- حجم مخزن به‌ترتیب برابر ۰/۰۳ و ۰/۸ می‌باشند.

بهره‌برداری نامناسب از آب‌های سطحی رودخانه آیدوغموش و مخزن آن به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین شبکه آبیاری تحت فشار کشور با سطح زیر کشت ۱۳۵۰۰ هکتار از محصولات کشاورزی می‌تواند تأثیرات گسترده و گاهی غیرقابل جبران برای این منطقه برجای بگذارد. بنابراین مدیریت بهره‌برداری کمّی از این مخزن دارای اهمیت است.

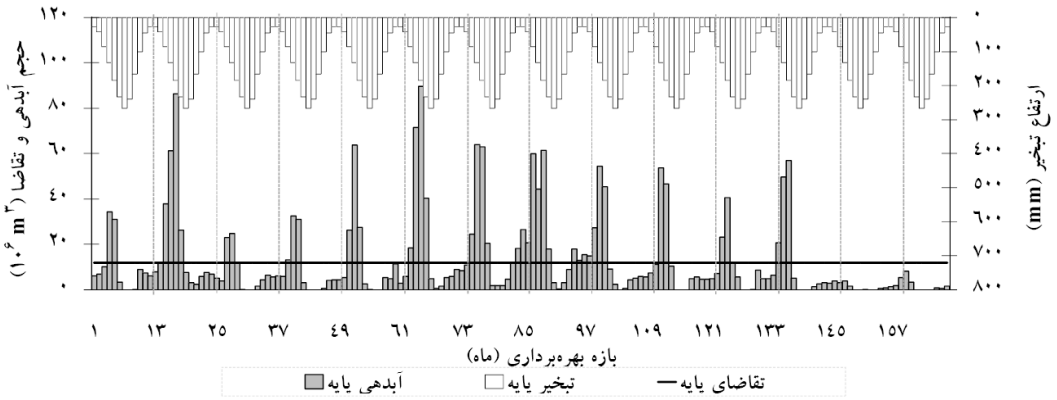
در این تحقیق از اطلاعات آبدهی ۱٤ ساله پایه (بازه ۲۰۰۰-۱۹۸۷) استفاده شده است. همچنین، متوسط تقاضا در کل دوره برنامه‌ریزی در شرایط پایه برابر با ۱۱/۹۷ میلیون متر مکعب می‌باشد که همراه با آمار مربوط به ارتفاع تبخیر در شکل (۲) ارائه شده‌اند.

اطلاعات، پارامترها و معیار توقف

GPLAB جعبه‌ابزار CGP برای نرم‌افزار MATLAB 9.0 می‌باشد (۱۷). در مجموعه توابع CGP، پنج عمل‌گر حسابی ($+, -, /, \times, \wedge$) و تابع ریاضی توسعه‌یافته (if) به‌کار گرفته شدند. فرآیند تکامل تا حصول به یک مقدار ثابت (بیشینه تکرار) صورت می‌گیرد، به‌گونه‌ای که راه‌حل به‌دست‌آمده به اندازه کافی به راه‌حل بهینه نزدیک شود. اطلاعات و مقادیر پارامترهای به‌کار رفته در الگوریتم‌های CGP و LGP برای سیاست بهره‌برداری از مخزن (مستخرج از سیاست بهره‌برداری استاندارد)، در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. پارامترهای CGP و LGP برای سیاست بهره‌برداری استاندارد از مخزن

پارامتر	مقدار
بیشینه تکرار (اجرا)	**۲٬۵۰۰**
نرخ تزویج	**۰/۸**
نرخ جهش	**۰/۲**
عمق بیشینه اولیه درخت	**۸**
تعداد درخت	**۱۰۰**
نرخ تولید مثل	**۰/۱**



شکل ۲. آبدهی به مخزن، متوسط تقاضا و ارتفاع تبخیر در کل بازه برنامه‌ریزی در شرایط پایه.

نتایج و بحث

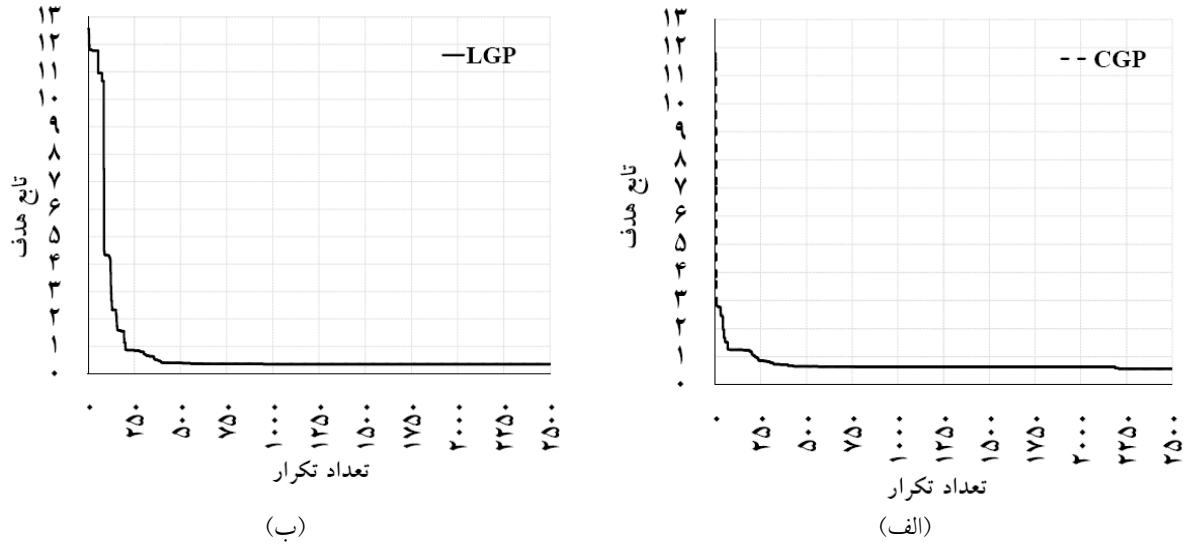
حل بسیاری از موضوعات منابع آبی مانند بازسازی سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و استخراج سیاست جیره‌بندی از مخازن در شرایط خشک‌سالی به‌کمک مدل های بهینه‌سازی و اضافه کردن توابع چندضابطه‌ای یا چندشرطی در ساختار مدل‌سازی آنها امکان‌پذیر است و این‌گونه است که می‌توان به جواب‌های دقیق‌تر در مسائل دست یافت. این امر ضرورت پرداختن به توسعه مدل‌های بهینه‌سازی برای مسائل منابع آبی با ماهیت چندشرطی را نمایان می‌سازد.

با توجه به بررسی پژوهش‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که CGP هنوز به‌طور کامل توسعه نیافته است. بنابراین قاعدتاً نمی‌تواند تمام مسائل را با عمل‌کرد مطلوب حل نماید. به‌خصوص مسائلی که دارای ماهیت چندشرطی و چندضابطه‌ای بوده و بسته به شرایط حاکم بر مسأله متفاوت خواهد بود، مانند بازسازی قاعده SOP و جیره‌بندی مخازن. با این حال با توسعه‌هایی در آن، از طریق کدهای نوشته شده، می‌تواند برای حل مسائل خاص، نتایج بهتری را ارائه نماید که از نوآوری‌های تحقیق حاضر به‌شمار می‌رود.

CGP در فرآیند جستجو هم‌زمان با تغییر پارامترها به تعیین رابطه ریاضی می‌پردازد. برای این که این رابطه ریاضی بتواند بیان‌گر ماهیت درونی سامانه باشد، کاربر باید تعدادی توابع را توسعه دهد و به‌کار برد تا CGP به ساختن مدل بپردازد. به این ترتیب، یکی از چالش‌های پیش‌رو در کاربرد CGP، می‌تواند توسعه CGP (الگوریتم LGP) با افزودن توابع و عمل‌گرهای ریاضی متعدد، باشد.

در ادامه، به بررسی نتایج حاصل از استخراج سیاست بهره‌برداری استاندارد در سامانه تک‌مخزنه آیدوغموش توسط LGP در مقایسه با CGP، پرداخته می‌شود.

شکل (۳) (الف) و (ب) روند تغییرات تابع هدف را برای سیاست بهره‌برداری استاندارد نشان می‌دهد. شکل ٤ (الف) و (ب) مقایسه مقادیر داده محاسباتی از سیاست بهره‌برداری استاندارد، به‌ترتیب توسط CGP و LGP با مقادیر مشاهداتی قاعده SOP را نشان می‌دهد.



شکل ۳. تابع هدف حاصل از استخراج سیاست بهره‌برداری استاندارد توسط الگوریتم CGP و LGP

همان‌طورکه در شکل (۳) (الف) و (ب) ملاحظه می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که هم‌گرایی LGP نسبت به CGP بهتر می‌باشد، به‌گونه‌ای که الگوریتم LGP با تابع هدفی برابر با ۰/۳۳۳ عمل‌کرد بهتری نسبت به الگوریتم CGP با تابع هدفی برابر با ۰/۵۵ دارد. به عبارت دیگر، الگوریتم LGP باعث بهبود ۳۹ درصدی تابع هدف نسبت به الگوریتم CGP در سیاست بهره‌برداری استاندارد را داشته است.

همچنین مقایسه داده محاسباتی توسط الگوریتم LGP و داده مشاهداتی، نسبت به داده محاسباتی توسط الگوریتم CGP در شکل (٤) (الف) و (ب) نشان می‌دهد که الگوریتم LGP در محاسبه قاعده SOP با ضریب تعیین برابر با ۹۹ درصد عمل‌کرد بهتری نسبت به الگوریتم CGP با ضریب تعیین برابر با ۹۵ درصد داشته است. این به این معنی است که الگوریتم LGP با قابلیت دارا بودن توابع منطقی، خطای کم‌تری را ایجاد کرده است و برازش منحنی به آن راحت‌تر بوده است.

در رابطه (۸) قاعده توسعه داده شده توسط الگوریتم CGP و در رابطه (۹) قاعده مستخرج از الگوریتمLGP، با کم ترین مقدار تابع هدف برای شرایط پایه، ارائه شده است:

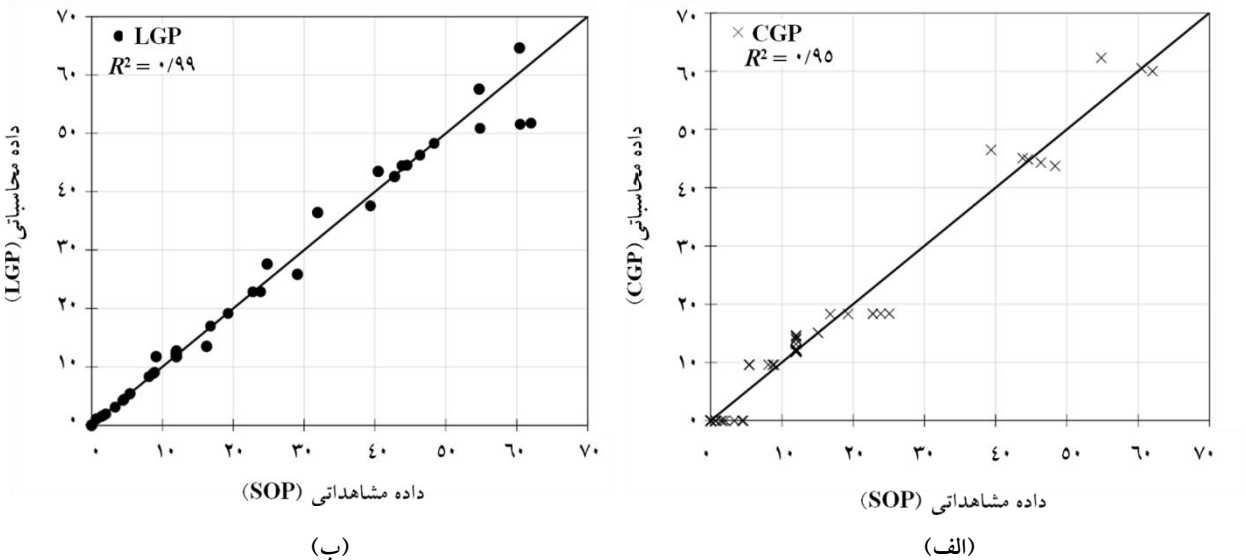
$$RSP_t = 16 + \frac{3}{0.08 \cdot AW_t - 15} + \frac{(9\times10^{-18} \times AW_t^{9.09}) - 131}{AW_t - 0.03 \cdot AW_t} \quad (۸)$$

$$RSP_t = \begin{cases} 0.89AW_t - 126 & 157.02 \le AW_t \\ 12 & 17.74 \le AW_t < 157.02 \\ AW_t - 8.5 & 0.12 \le AW_t < 17.74 \\ 0 & AW_t < 0.12 \end{cases} \quad (۹)$$

در ادامه، به‌منظور بررسی بیش‌تر اثبات کارآیی الگوریتمLGP نسبت به CGP، در سیاست بهره‌برداری استاندارد از مخزن، نتایج حاصل از دو الگوریتم‌مقایسه شدند که نتایج حاصله در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مقایسه الگوریتم LGP نسبت به CGP با استفاده از معیارهای عمل‌کرد در بازسازی سیاست بهره‌برداری از مخزن

LGP			CGP		
R	***RMSE***	***NSE***	***R***	***RMSE***	***NSE***
۰/۹۵	۱/٤۷	۰/۹۸	۰/۹۹۱	۱/۰۹	۰/۹۵



(الف) (ب)

شکل ٤. مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی حاصل از استخراج سیاست بهره‌برداری استاندارد توسط الگوریتم CGP و LGP.

همان‌طورکه در جدول (۲) ارائه شده است، نتایج الگوریتم LGP نسبت به CGP در سیاست بهره‌برداری استاندارد از مخزن، موفق‌تر بوده است. به‌گونه‌ای که در بازسازی سیاست بهره‌برداری استاندارد (قاعده SOP) استفاده از الگوریتم LGP سبب کاهش ۲۲ درصدی *RMSE* و افزایش ۱ درصدی *NSE*، نسبت به CGP شده است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به‌منظور بهبود عمل‌کرد CGP در حل مسائل چندشرطی، تابع چندضابطه‌ای، عمل‌گرهای منطقی، توسعه یافتند و به CGP اضافه شدند و الگوریتم LGP به‌وجود آمد.

در ادامه، قابلیت LGP در مسائلی که به‌طور ماهیتی به صورت چندانتخابی هستند یا مستلزم تصمیم‌گیری در شرایط مختلف می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفت. این توسعه صورت گرفته، به‌عنوان نوآوری تحقیق محسوب شده است که تاکنون در تحقیقات دیگر صورت نگرفته است.

بدین منظور، قابلیت LGP در حل مسأله در حوزه منابع آب (یعنی سیاست بهره‌برداری استاندارد (قاعده SOP))، صحت‌سنجی و ارزیابی شد. نتایج نشان دادند که الگوریتم LGP باعث بهبود ۳۹ درصدی تابع هدف نسبت به الگوریتم CGP به‌ترتیب در سیاست بهره‌برداری استاندارد (قاعده SOP) شد.

استفاده از الگوریتم LGP در بازسازی SOP سبب کاهش ۲۲ درصدی *RMSE* و افزایش ۱ درصدی *NSE*، نسبت به CGP شده است.

منابع

۱. قادری، ک.، زلقی، آ.، و بختیاری، ب. (۱۳۹۳). بهینه سازی بهره‌برداری از سیستم چند مخزنی با استفاده از الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE) (مطالعه موردی: حوضه کرخه). مدیریت آب و آبیاری، ٤ (۲): ۲۲۸-۲۱۵.

۲. کمالی، پ.، ابراهیمیان، ح.، و وردی‌نژاد، و.ر. (۱۳۹٤). ارزیابی و مقایسه روش بهینه‌سازی چندسطحی و مدل IPARM در تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای. مدیریت آب و آبیاری. ۵ (۱): ٥٤-٤٣.

۳. مولوی، ح.، لیاقت، ع.، و نظری، ب. (۱۳۹۵). ارزیابی سیاست‌های اصلاح الگوی کشت و مدیریت کم آبیاری با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم (مطالعه موردی: حوضه آبریز ارس). مدیریت آب و آبیاری، ٦ (۲): ۲۳٦-۲۱۷.

4. Aryafar, A., Khosravi, V., Zarepourfard, H. & Rooki, R. (2019). Evolving genetic programming and other AI-based models for estimating groundwater quality parameters of the Khezri plain, Eastern Iran. *Environmental Earth Science*, 78 (3), 1-13.
5. Ashofteh, P.-S., Bozorg-Haddad, O. & Mariño, M. A. (2013a). Climate change impact on reservoir performance indices in agricultural water supply. *Irrigation and Drainage Engineering*, 139 (2), 85-97.
6. Ashofteh, P.-S., Bozorg-Haddad, O. & Mariño, M. A. (2013b). Scenario assessment of streamflow simulation and its transition probability in future periods under climate change. *Water Resources Management*, 27 (1), 255-274.
7. Cancelliere, A., Ancarani, A. & Rossi, G. (1998). Susceptibility of water supply reservoirs to drought conditions. *Hydrologic Engineering*, 3(2), 140-148.
8. Chadalawada, J., Havlicek, V. & Babovic, V. (2017). A genetic programming approach to system identification of rainfall-runoff models. *Water Resources Management*, 31(12), 3975-3992.
9. Golubski, W. (2002). New results on fuzzy regression by using genetic programming. Genetic Programming, Lecture Notes in Computer Science. Kinsale. Ireland. 2278, 308-315.
10. Koza, J. R. (1992). Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection. MIT Press. Cambridge. Massachusets. London. England. 1-819.

11. Kramer, M. D. & Zhang, D. (2000). GAPS: A genetic programming system. The Twenty-Fourth Annual International Computer Software and Applications Conference. Taipei. 25-27 October. 614-619.
12. Loucks, D. P., Stedinger, J. R. & Haith, D. A. (1981). Water resources systems planning and analysis. Englewood Cliffs. N. J. Prentice-Hall. 1-559.
13. Morales, C. O. & Vázquez, K. R. (2004). Symbolic regression problems by genetic programming with multi-branches. Adv. in Art. Int. Lec. Not. in Com. Sci. Springer-Verlag. Mexico City. Mexico. 26-30 April. 2972, 717-726.
14. Raman, H. & Chandramouli, V. (1996). Deriving a general operating policy for reservoirs using neural network. *Water Resources Planning and Management*, 122(5), 342-347.
15. Searson, D. P., Leahy, D. E. & Willis, M. J. (2011). Predicting the toxicity of chemical compounds using GPTIPS: A free genetic programming toolbox for MATLAB, Intelligent Control and Computer Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer. 70: 83-93.
16. Sepahvand, R., Safavi, H. R. & Rezaei, F. (2019). Multi-objective planning for conjunctive use of surface and ground water resources using programming. *Water Resources Management*, 33(6), 2123-2137.
17. Silva, S. (2007). GPLAB: A genetic programming toolbox for Matlab, Version 3. ECOS-Evo. and Com. Sys. Gro. University of Coimbra. Portugal. 13-15.
18. Sheng-Wu, X. & Wei-Wu, W. (2003). Point-tree structure genetic programming method for discontinuous function's regression. Wuhan University Natural Sciences, 8, 323-326.
19. Tayfur, G. (2017). Modern optimization methods in water resources planning, engineering and management. *Water Resources Management*, 31(10), 3205-3233.