

استفاده از ابزار بهینه‌سازی GP توسعه‌یافته برای بهره‌برداری چندهدفه از مخازن در شرایط تغییر اقلیم

پریسا سادات آشفته^{۱*} و امید بزرگ‌حداد^۲

۱. دکتری مهندسی آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشیار پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۲/۲۰)

چکیده

استفاده از روش‌ها و ابزارهای بهینه‌سازی برای بهره‌برداری چندهدفه از مخزن در شرایط تغییر اقلیم امری اجتناب‌ناپذیر است. در این تحقیق از برنامه‌ریزی ژنتیک چندهدفه (MO-GP) برای استخراج قواعد بهره‌برداری بهینه چندهدفه مخزن آیدوغموش در استان آذربایجان شرقی، در شرایط تغییر اقلیم، استفاده شد. این قواعد با دو هدف کمینه‌سازی آسیب‌پذیری و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری در شرایط پایه (بازه ۱۹۸۷-۲۰۰۰) و شرایط تغییر اقلیم (بازه ۲۰۲۶-۲۰۳۹) استخراج شدند. نتایج نشان داد محدوده تغییرات شاخص آسیب‌پذیری در شرایط پایه و تغییر اقلیم، به ترتیب، برابر ۱۶ تا ۴۱ درصد و ۱۱ تا ۳۵ درصد و محدوده تغییرات شاخص اطمینان‌پذیری در شرایط پایه و تغییر اقلیم، به ترتیب، برابر ۴۶ تا ۷۸ درصد و ۳۰ تا ۷۷ درصد است. به منظور بررسی بیشتر، دو گزینه توسعه قواعد در بازه بهره‌برداری پایه بر اساس شرایط پایه و توسعه قواعد در بازه بهره‌برداری تغییر اقلیم بر اساس شرایط تغییر اقلیم در نظر گرفته می‌شوند. به منظور بررسی عملکرد مخزن در تأمین تقاضا، مقادیر تابع هدف به ازای نقطه پارتو (اطمینان‌پذیری ۷۵٪) در دو گزینه تحت بررسی مقایسه شدند. نتایج نشان داد گزینه دوم نسبت به گزینه اول عملکرد بهتری دارد.

کلیدواژگان: ابزار بهینه‌سازی، اطمینان‌پذیری، تغییر اقلیم، قاعده‌های تصمیم‌گیری، کیفیت و پراکنش پاسخ‌ها.

مقدمه

چگونگی ایجاد توازن بین تغییرات منابع و مصارف آب در بهره‌برداری از طرح‌های آبی اهمیتی ویژه دارد. در این میان استفاده از قوانین بهینه منطبق با شرایط تغییر اقلیم برای بخش تأمین و تقاضا، که علاوه بر دوره حاضر به شرایط حاکم دوره‌های بعدی نیز توجه داشته باشد، ضروری به نظر می‌رسد. از آنجا که اهداف در سطح حوضه در شرایط تغییر اقلیم تغییر می‌کنند، گزینه‌های تصمیم‌گیری باید با در نظر گرفتن همه اهداف و با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه استخراج شوند. در این میان، الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه در هر تکرار یا نسل مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه را به دست می‌دهند که در قالب منحنی پارتو قابل ارائه‌اند. برنامه‌ریزی ژنتیک یکی از الگوریتم‌های تکاملی است که محققان مختلف از آن استفاده می‌کنند.

Sivapragasam *et al.* (2008)، با استفاده از GP،

هیدروگراف جریان با اوج‌های متعدد را برای رودخانه‌ای در آمریکا روندیابی کردند. Sivapragasam *et al.* (2009) تبخیر از

دو مخزن در هند را با استفاده از GP مدل‌سازی کردند. Wang *et al.* (2009) کارآیی روش‌های مختلف را برای پیش‌گویی جریان ماهیانه دو رودخانه مقایسه کردند. همچنین، برنامه‌ریزی ژنتیک در بخش‌های مختلف علوم مهندسی و به‌ویژه بهینه‌سازی منابع آب استفاده شده که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

Reddy and Kumar (2008) رویکرد تکامل دیفرانسیلی چندهدفه^۲ (MODE) را برای تعیین الگوی کشت بهینه تحت سیاست‌های بهره‌برداری از سامانه مخزن پیشنهاد دادند. مدل توسعه‌یافته برای مخزنی در هند اعمال شد. نتایج نشان داد تغییرات شرایط هیدرولوژیکی بر الگوی کشت و منافع خالص حاصل از سامانه مخزن تأثیراتی شایان توجهی دارد.

به منظور حل مسائل چندهدفه، Yang *et al.* (2009) با یکپارچه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه^۳ (MOGA)، برنامه‌ریزی پویای دیفرانسیلی مقید^۴ (CDDP)، و مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی (ISOQUAD) رویکردی جدید را توسعه دادند. در

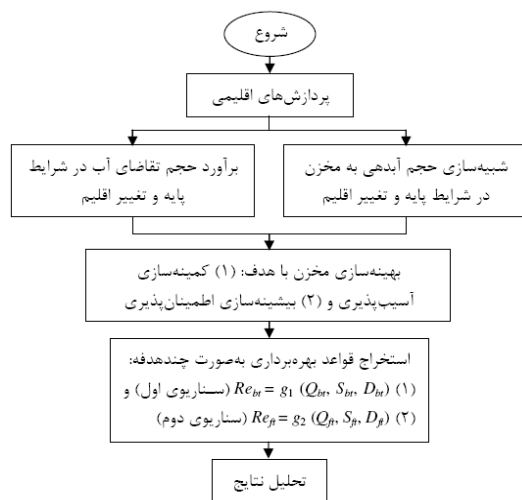
2. Multi Objective Differential Evolution
3. Multi Objective Genetic Algorithm
4. Constrained Differential Dynamic Programming

* نویسنده مسئول: pashofteh@ut.ac.ir

می‌تواند توجیه‌پذیر باشد. در تحقیق حاضر، توسعه و استفاده از MO-GP^۵ به مثابه ابزار بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهاد می‌شود؛ که در تحقیقات پیشین به آن نپرداخته‌اند و در حوزه منابع آب نوآوری به شمار می‌رود. در این تحقیق، از جعبه ابزار الگوریتم توسعه‌یافته GP برای نرم‌افزار MATLAB 11.0 (Silva, 2007) استفاده شد. نیز، قواعد بهره‌برداری بهینه از سامانه تک‌مخزنه آیدوگموش (آذربایجان شرقی) در شرایط پایه (بازه ۱۹۸۷-۲۰۰۰) و شرایط تغییر اقلیم (بازه ۲۰۲۶-۲۰۳۹) به کمک الگوریتم MO-GP، با دو هدف کمینه کردن شاخص آسیب‌پذیری و بیشینه‌سازی شاخص اطمینان‌پذیری در تأمین تقاضا، در بازه‌های مذکور، تعیین و مقایسه شد.

روش تحقیق

روش‌های مورد نیاز برای این تحقیق (شکل ۱) شامل پردازش‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی برای برآورد حجم آبدهی به مخزن و نیز محاسبه حجم تقاضای آب در شرایط پایه و تغییر اقلیم، استخراج قواعد بهره‌برداری به صورت چندهدفه (بر اساس سه متغیر آبدهی به مخزن، حجم ذخیره، حجم تقاضا) در شرایط پایه و تغییر اقلیم، مقایسه سیاست‌های بهینه تخصیص در شرایط پایه و تغییر اقلیم، با استفاده از معیارهای عملکرد و شاخص‌های کارآیی مخزن بود.



شکل ۱. روند نمای تحقیق

اطلاعات و پردازش‌های اولیه

برای پردازش سناریوی اقلیمی از مدل HadCM3 [از مجموعه مدل‌های گردش عمومی جو- اقیانوس (AOGCM)]^۶ و

نهایت، اثربخشی مدل یکپارچه پیشنهادی با حل یک مسئله برنامه‌ریزی منابع آب برای بهره‌برداری تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی در جنوب تایوان صحت‌سنجی شد.

Raje and Mujumdar (2010) عملکرد مخزن را تحت عدم قطعیت آثار هیدرولوژیکی ناشی از تغییر اقلیم مطالعه کردند. آن‌ها در تحقیق خود اثر تغییر اقلیم را بر عملکرد مخزن چندمنظوره هیراکود^۱ در هند بررسی و برای سناریوهای محتمل آبی سیاست‌گذاری کردند. نتایج نشان داد تولید برق و شاخص اطمینان‌پذیری (با توجه به اهداف برق‌آبی و آبیاری) در بیشتر سناریوهای آبی کاهش خواهد یافت؛ در حالی که اگر سیاست بهره‌برداری استاندارد^۲ (SOP) برای حفاظت سیلاب به کار رود، شاخص‌های نسبت کمبود و آسیب‌پذیری در نتیجه تغییر اقلیم افزایش خواهند یافت.

در تحقیق Rezapour Tabari and Soltani (2012)، الگوریتم ژنتیک (GA) با مرتب‌سازی نامغلوب نخبه‌گرا^۳ (NSGA-II) برای بهینه‌سازی اطمینان‌پذیری سامانه و همچنین کمینه کردن هزینه‌های ناشی از تأمین آب، احیای آبخوان، و غیره توسعه داده شد. همچنین، الگوریتم ژنتیک متوالی^۴ (SGA) به منظور مقایسه با NSGA-II به کار رفت. نتایج نشان داد مدل‌های NSGA-II در مقایسه با مدل بهینه‌سازی SGA می‌توانند به طور شایان توجه بار محاسبه را کم کنند. منحنی تقابل به‌دست‌آمده نشان داد افزایش کم در اطمینان‌پذیری به هزینه‌های بیشتر سامانه منجر می‌شود.

از آنجا که برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) قادر است علاوه بر تغییر پارامترها به تعیین رابطه ریاضی یا ارائه قاعده یا دستورالعمل بپردازد، امکان استفاده از این ابزار در شرایط بهره‌برداری از مخزن و ارائه دستورالعمل در مدیریت بهره‌برداری از طرح‌های تأمین وجود دارد. اهمیت ارائه دستورالعمل بهره‌برداری در شرایط تغییر اقلیم دوچندان است. با توجه به مشخص نبودن سیاست‌ها در شرایط تغییر اقلیم، سیاست‌های بهره‌برداری بهتر است به صورت چندهدفه استخراج شوند؛ به گونه‌ای که مجموعه‌ای از گزینه‌های تصمیم‌گیری در قالب ارائه منحنی پارتو در اختیار برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران قرار گیرند. به دلیل داشتن قابلیت GP در ارائه قاعده یا دستورالعمل به شکل رابطه ریاضی، در شرایط بهره‌برداری از مخازن، چندهدفه کردن

1. Hirakud
2. Standard Operating Policy
3. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
4. Sequential Genetic Algorithm

5. Multi Objective-Genetic Programming
6. Atmosphere-Ocean General Circulation Model

اگر

$$S_t + Q_t - Re_t - E_t \bar{A}_t \geq S \max \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

$$Sp_t = 0$$

$$S_t + Q_t - Re_t - E_t \bar{A}_t < S \max \quad \text{اگر}$$

$$\forall t = 1, 2, \dots, T \quad (\text{رابطه ۴})$$

S_t و S_{t+1} به ترتیب حجم ذخیره مخزن در ابتدا و انتهای دوره t ام، Q_t حجم آبدی به مخزن در طول دوره t ام، Re_t حجم رهاسازی از مخزن در طول دوره t ام، E_t عمق تبخیر از دریاچه مخزن در طول دوره t ام، \bar{A}_t متوسط مساحت سطح مخزن در ابتدا و انتهای دوره t ام، Sp_t حجم سرریز از مخزن در طول دوره t ام، \bar{S}_t متوسط حجم ذخیره مخزن در ابتدا و انتهای دوره t ام، $Smax$ حجم بیشینه (ظرفیت) مخزن، a_0 و a_1 ضریب‌های ثابت منحنی سطح - حجم ذخیره مخزن، و T بازه بهره‌برداری‌اند.

در این تحقیق، دو تابع هدف به صورت کمینه‌سازی آسیب‌پذیری و بیشینه‌سازی شاخص اطمینان‌پذیری (Ashofteh et al., 2014) در شرایط پایه و تغییر اقلیم مطابق روابط ۵ و ۶ به کار رفت:

$$Minimize \quad Fu_1 = \frac{\sum_{t=1}^T (D_t - Re_t | Re_t < D_t)}{\left[\frac{T}{N} (Re_t < D_t) \right] \cdot D \max} \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

(رابطه ۵)

$$Maximize \quad Fu_2 = \frac{\sum_{t=1}^T (D_t - Re_t | Re_t \geq D_t)}{T} \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

(رابطه ۶)

Fu_1 تابع هدف شاخص آسیب‌پذیری، Fu_2 تابع هدف شاخص اطمینان‌پذیری، D_t حجم تقاضا در طول دوره t ام، $Dmax$ بیشینه تقاضای آب در بازه بهره‌برداری مورد نظر، $N(Re_t < D_t)$ تعداد ماه‌های کمبود آب، و $N(D_t - Re_t | Re_t \geq D_t)$ تعداد ماه‌های تأمین آب‌اند.

محدودیت‌های مسئله بهره‌برداری از مخزن مطابق روابط ۷ و ۸ است:

(رابطه ۷)

$$S_t \geq S \min \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

$$\forall t = 1, 2, \dots, T \quad R_t \geq 0$$

(رابطه ۸)

$Smin$ حجم کمینه (مرده) مخزن است.

در صورت تخطی از محدودیت‌های ۷ و ۸، توابع جریمه‌ای به ترتیب به صورت روابط ۹ و ۱۰ به توابع هدف اضافه می‌شود:

(رابطه ۹)

$$Fu_1 \text{ (or } Fu_2) = Fu_1 \text{ (or } Fu_2) \pm \left[A' \cdot \left(\frac{S \min - S_t}{S \max - S \min} \right) + B' \right] \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

سناریوی انتشار [A2 سری گزارش ویژه سناریوی‌های انتشار^۱ (SRES)] استفاده شد (Ashofteh et al., 2013a). برای تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از سناریوهای اقلیمی مدل HadCM3، اطلاعات اقلیمی سلول محاسباتی که حوضه داخل آن واقع شده، استفاده می‌شود (Wilby and Harris, 2006; Ashofteh et al., 2013b). یکی از ورودی‌های مدل میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای است. از ویژگی‌های سناریوی انتشار A2 تقویت نیروهای جمعیتی منطقه‌ای با تأکید بر رشد زیاد جمعیت است (جمعیت برابر ۱۵٫۱ میلیارد نفر تا سال ۲۱۰۰). از خصوصیات دیگر این سناریوی انتشار وابستگی کمتر به رشد و پیشرفت اقتصادی (با تولید ناخالص ملی برابر $10^{12} \times 243$ دلار تا سال ۲۱۰۰) است.

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی آبدی به مخزن در شرایط پایه و تغییر اقلیم از مدل نیمه‌مفهومی IHACRES استفاده می‌شود (Jakeman and Hornberger, 1993). از ورودی‌های اصلی این مدل متغیرهای دما و بارندگی (در شرایط پایه و تغییر اقلیم)، متغیر هیدرولوژیکی رواناب (در شرایط پایه) و مساحت حوضه است. مقایسه نتایج خروجی مدل IHACRES در شرایط پایه و داده‌های مشاهداتی در تحقیق Ashofteh et al. (2013a) نشان داد عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان ورودی به مخزن تحقیق حاضر موفقیت‌آمیز است؛ طوری که مدل در دوره واسنجی و صحت‌سنجی، به ترتیب، دارای ضریب همبستگی برابر ۸۸ و ۷۷ درصد است. به منظور برآورد سری زمانی تقاضای آب با در نظر گرفتن متغیرهای اقلیمی (در شرایط پایه و تغییر اقلیم) و با فرض سطح کشت ثابت، از روش‌های فائو ۲۴ و فائو پنمن-مانتیس برای تعیین به ترتیب تبخیر-تعرق گیاهی و پتانسیل استفاده شده است (Ashofteh et al., 2013a).

توسعه مدل بهینه‌سازی

قبل از پرداختن به توسعه مدل بهینه‌سازی، لازم است شبیه‌سازی مخزن به کمک معادله پیوستگی یا بیلان جرم مطابق روابط ۱ تا ۴ ارائه شود:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - Re_t - E_t \bar{A}_t - Sp_t \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

(رابطه ۱)

$$\bar{A}_t = a_0 + a_1 \bar{S}_t \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

(رابطه ۲)

$$Sp_t = S_t + Q_t - Re_t - E_t \bar{A}_t - S \max \quad (\text{رابطه ۳})$$

(رابطه ۱۰)

$$Fu_t \text{ (or } Fu_t) = Fu_t \text{ (or } Fu_t) \pm \left[C' \cdot \left(\frac{Re_t}{D \max} \right) + D' \right] \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

$$\left[A' \cdot \left(\frac{S \min - S_t}{S \max - S \min} \right) + B' \right]$$

تابع جریمه ناشی از تختی از رابطه ۷، و ضرایب A' تا D' ثابت‌های مثبت توابع جریمه (۱) =
 از رابطه ۸، و ضرایب A' تا D' ثابت‌های مثبت توابع جریمه (۱) =
 $D' = 16, C' = 1, B' = 0.5, A'$ هستند.

منحنی فرمان بهره‌برداری

در این تحقیق، قاعده تصمیم برای بهره‌برداری از سامانه مخزن با اهداف کمینه‌سازی آسیب‌پذیری ناشی از کمبود سامانه، به منظور تأمین تقاضای مورد نیاز و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری ناشی از تأمین تقاضا به کمک الگوریتم MO-GP، مطابق روابط ۱۱ و ۱۲ استخراج می‌شود:

(رابطه ۱۱)

$$Re_{bt} = g_1(Q_{bt}, S_{bt}, D_{bt}) \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

(رابطه ۱۲)

$$Re_{ft} = g_2(Q_{ft}, S_{ft}, D_{ft}) \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$$

$g_1(Q_{bt}, S_{bt}, D_{bt})$ گزینه اول، فرمان مستخرج از MO-GP در بازه بهره‌برداری پایه برای شرایط پایه، و $g_2(Q_{ft}, S_{ft}, D_{ft})$ گزینه دوم، فرمان مستخرج از MO-GP در بازه بهره‌برداری تغییر اقلیم برای شرایط تغییر اقلیم، اندیس b برای شرایط پایه، و اندیس f برای شرایط تغییر اقلیم‌اند.

الگوریتم MO-GP

هدف هر بهینه‌سازی چندهدفه دستیابی به مجموعه پاسخ‌های نامغلوب [نقاط پارتو^۱] با در نظر گرفتن همه اهداف است (Deb, 2000). الگوریتم MO-GP الگوریتمی قدرتمند در حل مسائل چندهدفه است. آنچه در هر گام زمانی محاسباتی این الگوریتم رخ می‌دهد در نظر گرفتن کیفیت پاسخ‌ها (رتبه آن‌ها) به منزله عامل اول و نظم آن‌ها (پراکنش پاسخ‌ها) به منزله عامل دوم است.

مرحله اول حل الگوریتم MO-GP تولید تصادفی جمعیت درخت‌های اصلی اولیه است. هر درخت تصمیم شامل مجموعه توابع و پایانه‌هاست که همراه ساختار خود درخت به مثابه متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی مطرح‌اند. هر درخت با

مقادیر توابع هدف ارزیابی می‌شود. در ادامه، درخت‌ها بر اساس رتبه‌بندی نامغلوب، با در نظر گرفتن مقادیر توابع هدف، به جبهه‌های مختلف پارتو گروه‌بندی می‌شوند. سپس، درخت‌هایی که در جبهه‌های با رتبه کمتر قرار دارند انتخاب و مابقی درخت‌ها حذف می‌شوند؛ به گونه‌ای که جمعیت درخت‌های اصلی در نسل بعدی هم‌اندازه با جمعیت درخت‌های اصلی در نسل قبلی باشد. در نسل بعدی اگر اندازه جمعیت درخت‌های اصلی به گونه‌ای باشد که برخی از درخت‌ها باید انتخاب شوند، عامل دوم، یعنی عامل پراکنش پاسخ‌ها، ملاک قرار می‌گیرد و بر این اساس مابقی درخت‌های تصمیم حذف می‌شوند.

بعد از تولید جمعیت درخت‌های اصلی، دو درخت از میان جمعیت درخت‌های اصلی به طور تصادفی انتخاب و در نهایت به روش تورنومنت^۲ یکی از آن‌ها (با در نظر گرفتن هر دو عامل) انتخاب می‌شود. جمعیت درخت‌های فرزندان توسط عملگر انتخاب^۳ و تزویج^۴ و جمعیت درخت‌های جهش‌یافتگان توسط عملگر جهش^۵ به وجود می‌آیند و دوباره مقادیر تابع هدف جمعیت فرزندان و جهش‌یافتگان محاسبه می‌شود. هر سه جمعیت اصلی، فرزندان، و جهش‌یافتگان با هم تلفیق و رتبه‌بندی نامغلوب روی جمعیت تلفیق‌شده انجام می‌شود. این گام‌ها تا ارضای معیار توقف تکرار می‌شود و نسل آخر به منزله نقاط پارتو یا راه‌حل‌های بهینه مسئله شناخته می‌شوند.

مورد مطالعاتی

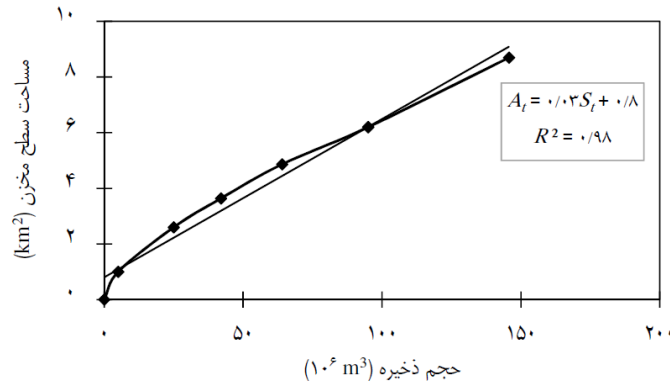
به منظور استخراج قواعد بهره‌برداری به کمک الگوریتم MO-GP، از سامانه تک‌مخزنه آیدوغموش (آذربایجان شرقی) و شبکه ۱۳'۵۰۰ هکتاری پایین‌دست آن، به منزله مورد مطالعاتی این تحقیق، استفاده شد. ظرفیت کل و حجم مرده مخزن، به ترتیب، برابر ۱۴۵،۷ و ۸،۷ میلیون متر مکعب است (Ashofteh et al., 2013a). a_0 و a_1 ثابت‌های منحنی سطح-حجم مخزن به ترتیب برابر ۰،۳ و ۰،۸ است (شکل ۲). بیشینه تقاضا در شرایط پایه و تغییر اقلیم، به ترتیب، برابر ۳۹،۵۷ و ۴۷،۲۴ میلیون متر مکعب است. شکل ۳ میانگین ماهیانه حجم آبدهی به مخزن، میانگین عمق ماهیانه تبخیر، و حجم تقاضای آب را در شرایط پایه و تغییر اقلیم نشان می‌دهد.

نتایج نشان داد حجم آبدهی به مخزن و حجم تقاضای آب

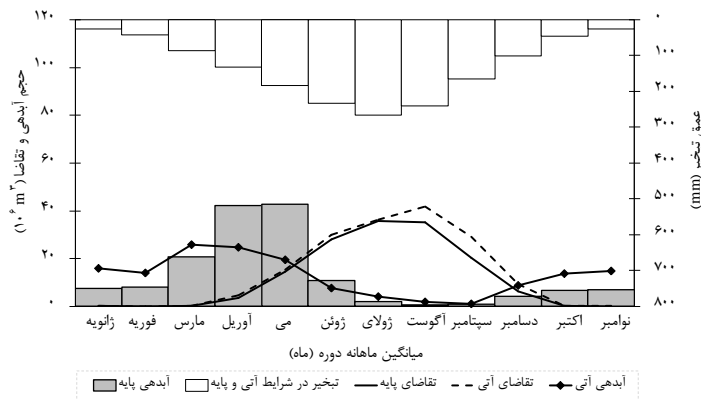
2. Tournament
 3. Selection
 4. Crossover
 5. Mutation

پارامترهای MO-GP
 پارامترهای به‌کاررفته در الگوریتم معرفی‌شده MO-GP در جدول ۱ می‌آید.

در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط پایه، به‌ترتیب، حدود ۰٫۷ درصد کاهش و ۱۶ درصد افزایش می‌یابد (Ashofteh et al., 2013a).



شکل ۲. منحنی سطح-حجم مخزن همراه ثابت‌های منحنی



شکل ۳. میانگین ماهیانه حجم آبدی به مخزن و میانگین ماهیانه عمق تبخیر همراه میانگین ماهیانه حجم تقاضای آب در شرایط پایه و تغییر اقلیم

جدول ۱. پارامترهای الگوریتم MO-GP

| نرخ تزویج | نرخ جهش | توابع به‌کاررفته در MO-GP | اندازه جمعیت (تعداد درخت) | تعداد نسل (معیار توقف) |
|-----------|---------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| ۰٫۹ | ۰٫۱ | {+, -, ×, ÷, sin, cos} | ۱۰۰ | ۳۰۰ |

MO-GP را به شکل منحنی پارتو، برای شرایط پایه و تغییر اقلیم، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، محدوده تغییرات آسیب‌پذیری در شرایط پایه و تغییر اقلیم، به‌ترتیب، برابر ۱۶ تا ۴۱ درصد و ۱۱ تا ۳۵ درصد و محدوده تغییرات اطمینان‌پذیری در شرایط پایه و تغییر اقلیم، به‌ترتیب، برابر ۴۶ تا ۷۸ درصد و ۳۰ تا ۷۷ درصد است. به‌ازای اطمینان‌پذیری ۷۵ درصد، آسیب‌پذیری ۳۳ و ۳۱ درصد، به‌ترتیب، برای شرایط پایه و تغییر اقلیم ایجاد می‌شود. به بیان ساده‌تر، محدوده تغییرات آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط پایه بیشتر است.

فرآیند تکامل یا رسیدن به پاسخ بهینه یا نزدیک به بهینه تا جایی پیش می‌رود که دیگر افزایش نسل به تغییر در بهبود توابع هدف منجر نشود. گفتنی است در تحقیق حاضر در اجرای مدل از رایانه‌ای با مشخصه CPU Intel(R) Core(TM) I7 2.20GHz و RAM 6.00GB استفاده شد و زمان اجرای مدل حدود ۱ ساعت بود.

یافته‌ها و بحث

قواعد بهره‌برداری بهینه مخزن آیدوغموش از یک مسئله دوهدفه توسط MO-GP استخراج شد. این مسئله دوهدفه شامل کمینه‌سازی آسیب‌پذیری سامانه و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری در تأمین تقاضا بود. شکل ۴ نتایج الگوریتم بهینه‌سازی دوهدفه

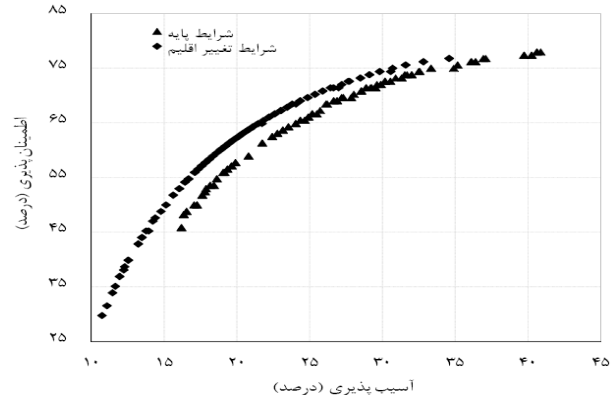
رابطه ۱۳)

$$Re_{bt} = 1 \cdot \cos(\cos((\cos(D_{bt}) - D_{bt} \cdot Q_{bt} - Q_{bt}) / D_{bt} / \cos((S_{bt} + D_{bt} + Q_{bt}) / D_{bt} (2D_{bt} + \sin(\cos(Q_{bt}/S_{bt}), Q_{bt})))) / \cos(\cos(\cos((S_{bt} + D_{bt} + 1)S_{bt}))) / \cos(\cos(\cos(S_{bt}/\sin(\cos(Q_{bt}/(2S_{bt} + D_{bt}), D_{bt}))) / \sin(D_{bt}) / D_{bt} / \sin(\cos(S_{bt}/(D_{bt} - Q_{bt}))), \cos(D_{bt}))) / (2S_{bt}/D_{bt} + D_{bt}) \cdot S_{bt}$$

رابطه ۱۴)

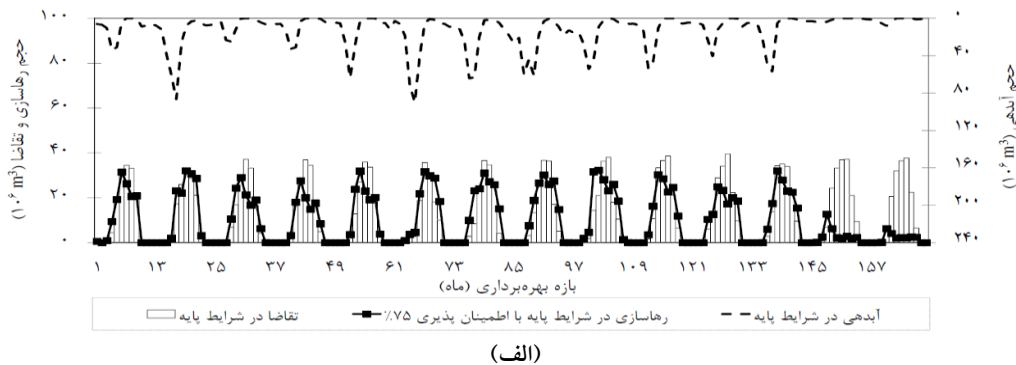
$$Re_{ft} = D_{ft} \cdot S_{ft} / (S_{ft}^2 / (S_{ft}^2 / (S_{ft} + 2D_{ft} + D_{ft} \cdot S_{ft} / (S_{ft}^2 / (\cos(S_{ft}) + 3D_{ft} / S_{ft} \cdot (3S_{ft} + D_{ft} + (\cos(S_{ft}) + D_{ft}) \cdot \cos(\cos((S_{ft} + 2D_{ft}) / (S_{ft} + \sin(S_{ft}) \cdot Q_{ft})))) + D_{ft})) + D_{ft} + D_{ft} / S_{ft} \cdot (2S_{ft} + S_{ft}^2 / (2S_{ft} + S_{ft}^2 / (Q_{ft} + S_{ft} / Q_{ft} - D_{ft} + 2S_{ft} - \sin((S_{ft} + D_{ft} + Q_{ft}) / \cos(Q_{ft} / (D_{ft} + S_{ft} \cdot Q_{ft}))) + \cos((D_{ft} - S_{ft}) / \cos(Q_{ft}) \cdot D_{ft})) / S_{ft} - \cos(\sin(Q_{ft})))))) + D_{ft})$$

در گام بعدی، قواعد بهینه در شرایط پایه برای تقاضای آب در شرایط تغییر اقلیم بررسی و ارزیابی شد. بدین منظور، قواعد بهینه پایه منتج از شرایط پایه (گزینه اول) با قواعد بهینه حاصل از تغییر اقلیم با شرایط تغییر اقلیم (گزینه دوم) مقایسه شدند. نتایج مربوطه در تأمین تقاضای آب مربوط به بازه زمانی مربوط به خود و به منزله نمونه به ازای ۷۵ درصد در شکل ۵ الف (برای گزینه اول) و ۶ الف (برای گزینه دوم) ارائه می‌شود. در ادامه، تغییرات حجم کمبود با قواعد بهره‌برداری بهینه مستخرج از MO-GP برای گزینه‌های دوگانه مذکور همراه تقاضای مربوطه بررسی شدند. نتایج، به ترتیب، در شکل‌های ۵ ب و ۶ ب می‌آید.

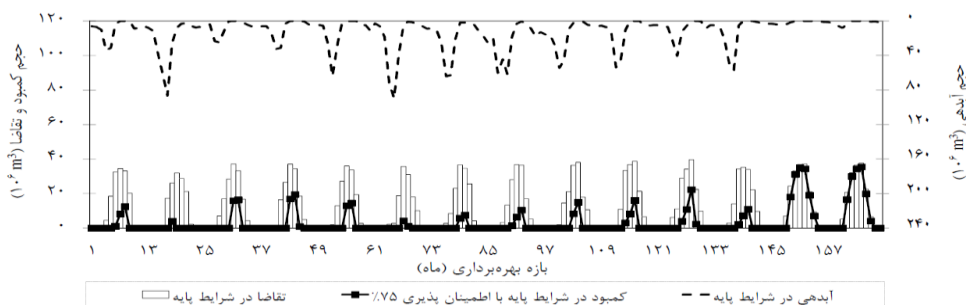


شکل ۴. مقایسه منحنی پارتو و تغییرات توابع هدف آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری

هر یک از نقاط منحنی پارتو در شکل ۴، مثلاً برای شرایط تغییر اقلیم، بیانگر یک قاعده بهره‌برداری از مخزن است که شاخص‌های آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری مربوط به خود را در بر می‌گیرند. هیچ‌یک از این نقاط پارتو (مثلاً برای شرایط تغییر اقلیم) بر دیگری ارجحیت ندارد؛ بلکه بسته به شرایط و سیاست‌های مختلف حاکم بر سطح حوضه می‌تواند تغییر کند. در تحقیق حاضر هدف این است که قاعده و دستورالعمل هر یک از نقاط پارتو قابل استخراج باشد. مثلاً، قواعد توسعه‌داده‌شده با MO-GP برای زوج مرتب (۳۳، ۷۵) = (Fu_1, Fu_2) و $(Fu_1, Fu_2) = (31, 75)$ ، به ترتیب، برای شرایط پایه در رابطه ۱۳ و برای شرایط تغییر اقلیم در رابطه ۱۴ می‌آید:



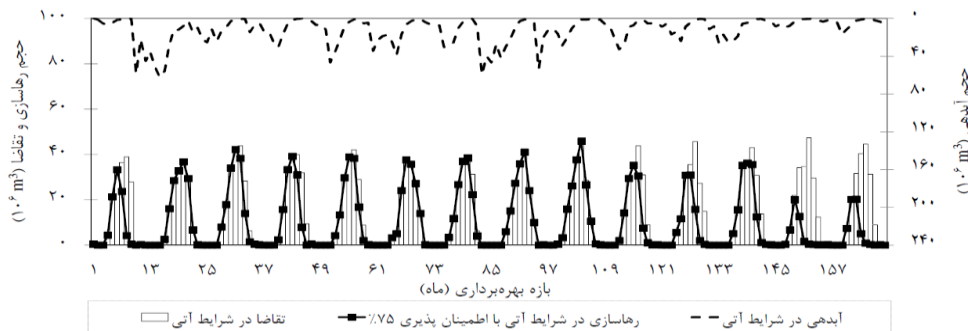
(الف)



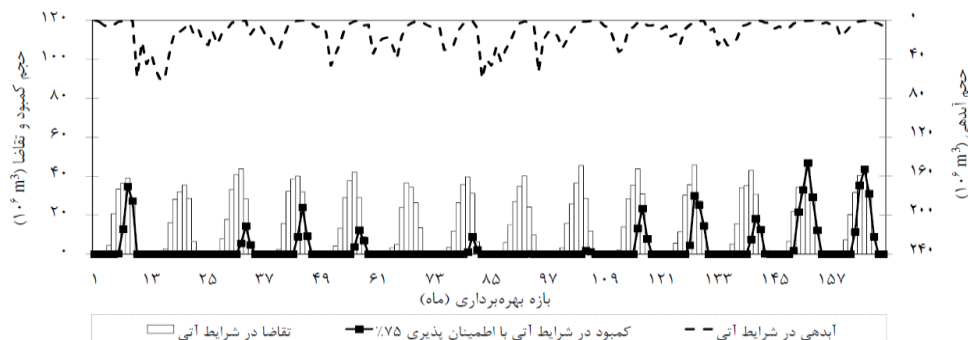
(ب)

شکل ۵. مقایسه (الف) حجم رهاسازی و (ب) حجم کمبود

در گزینه اول بر اساس قاعده استخراج‌شده از MO-GP، به ازای نقطه پارتوی حاصل از اطمینان‌پذیری ۷۵ درصد، همراه تغییرات حجم آبدهی به مخزن و حجم تقاضای آب در بازه بهره‌برداری مربوطه



(الف)



(ب)

شکل ۶. مقایسهٔ (الف) حجم رهاسازی و (ب) حجم کمبود

در گزینهٔ دوم بر اساس قاعدهٔ استخراج‌شده از MO-GP، به ازای نقطهٔ پارتوی حاصل از اطمینان‌پذیری ۷۵ درصد، همراه تغییرات حجم آبدهی به مخزن و حجم تقاضای آب در بازهٔ بهره‌برداری مربوطه

مهم‌ترین عاملی که باید مد نظر قرار گیرد در نظر گرفتن همهٔ هدف‌ها با توجه به سیاست‌های حاکم در سطح حوضه است. با توجه به تغییرپذیری هدف‌ها و سیاست‌ها در سطح حوضه در افق برنامه‌ریزی بلندمدت مشخص نیست تکیهٔ اصلی بر کدام هدف باشد. بنابراین، به ارائهٔ مجموعه‌ای از گزینه‌های تصمیم‌گیری (منحنی پارتو)، با در نظر گرفتن شرایط تغییر اقلیم، نیاز است؛ به گونه‌ای که تصمیم‌گیران و مدیران و بهره‌برداران، با توجه به مجموعهٔ گزینه‌های موجود و در نظر گرفتن اهمیت نسبی هدف‌ها، تصمیم بگیرند. بنابراین، قاعده‌های بهره‌برداری یا متغیرهای تصمیم‌گیری باید به صورت چندهدفه استخراج شوند. هر یک از نقاط منحنی پارتو بیانگر یک قاعدهٔ بهره‌برداری از مخزن است که بسته به شرایط و سیاست‌های مختلف حاکم بر سطح حوضه می‌تواند تغییر کنند. در تحقیق حاضر، هدف این بود که قاعده و دستورالعمل هر یک از این نقاط پارتو قابل استخراج باشد. بنابراین، اگر هدف برنامه‌ریزی منابع آب این باشد که ۷۵ درصد ماه‌ها دارای تأمین آب باشند (اطمینان‌پذیری ۷۵ درصد)، باید قاعده و دستورالعمل نقطهٔ پارتوی مربوطه مشخص باشد.

در این تحقیق، الگوریتم MO-GP برای حل مسئلهٔ بهره‌برداری از سامانهٔ تک‌مخزنهٔ آیدوغموش (آذربایجان شرقی در شمال شرقی ایران) در شرایط پایه و تغییر اقلیم به کار رفت.

همان‌طور که در شکل ۵ الف و ۶ الف ملاحظه می‌شود، میزان رهاسازی در گزینهٔ سوم نسبت به گزینهٔ اول بیشتر شده است. این موضوع به دلیل افزایش حجم تقاضای آب (شکل ۳) در گزینهٔ دوم به میزان ۱۶ درصد است (Ashofteh *et al.*, 2013a). همچنین، شکل‌های ۵ ب و ۶ ب نشان می‌دهند که در گزینهٔ دوم عملکرد سد بهتر شده است.

در گام بعد، به منظور بررسی عملکرد مخزن در تأمین تقاضا، مقادیر تابع هدف به ازای نقطه پارتو (اطمینان‌پذیری ۷۵ درصد) در دو گزینه مقایسه شدند که در جدول ۲ می‌آید.

جدول ۲. مقایسهٔ توابع هدف در دو گزینه به ازای نقطهٔ پارتو (اطمینان‌پذیری ۷۵ درصد)

| گزینه | اطمینان‌پذیری (%) | آسیب‌پذیری (%) |
|-------|-------------------|----------------|
| اول | ۷۵ | ۳۳ |
| دوم | ۷۵ | ۳۱ |

همان‌طور که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود، گزینهٔ دوم نسبت به گزینهٔ اول عملکرد بهتری دارد. این موضوع نشان می‌دهد در گزینهٔ دوم نسبت به گزینهٔ اول میزان رهاسازی از مخزن با تقاضا تطابق بیشتری دارد.

نتیجه‌گیری

در بهره‌برداری از سامانه‌های منابع آب، به منظور تأمین تقاضاها،

از تغییر اقلیم با شرایط مربوط به تغییر اقلیم مقایسه شدند. نتایج مربوطه در تأمین تقاضای آب مربوط به بازه زمانی مربوط به خود و به منزله نمونه به ازای اطمینان‌پذیری ۷۵ درصد نشان دادند میزان رهاسازی در شرایط مربوط به تغییر اقلیم نسبت به شرایط پایه بیشتر است. این موضوع به دلیل افزایش حجم تقاضای آب در شرایط مربوط به تغییر اقلیم بود. در گام بعد، به منظور بررسی عملکرد مخزن در تأمین تقاضا، مقادیر تابع هدف به ازای نقطه پارتو (اطمینان‌پذیری ۷۵ درصد) در دو گزینه تحت بررسی مقایسه شدند. نتایج نشان داد گزینه شرایط تغییر اقلیم نسبت به گزینه اول عملکرد بهتری دارد.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت و پشتیبانی معاونت پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام گرفت که بدین وسیله از حمایت آن معاونت قدردانی می‌شود.

توابع به‌کاررفته در این تحقیق عبارت بودند از کمینه‌سازی شاخص آسیب‌پذیری و بیشینه‌سازی شاخص اطمینان‌پذیری. استخراج قواعد رهاسازی از مخزن در شرایط پایه و تغییر اقلیم توابعی از پارامترهایی هم‌چون حجم آبدهی به مخزن، حجم ذخیره، و حجم تقاضای آب در نظر گرفته شدند که به کمک الگوریتم MO-GP به دست آمدند. استخراج این قواعد، که مبتنی بر منحنی پارتو بود، با انتخاب هر یک از پاسخ‌ها بر منحنی پارتو و با هر ترکیبی از توابع هدف آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری امکان‌پذیر بود. نتایج نشان داد محدوده تغییرات شاخص آسیب‌پذیری در شرایط پایه و تغییر اقلیم، به ترتیب، برابر ۱۶ تا ۴۱ درصد و ۱۱ تا ۳۵ درصد و محدوده تغییرات شاخص اطمینان‌پذیری در شرایط پایه و تغییر اقلیم، به ترتیب، برابر ۴۶ تا ۷۸ درصد و ۳۰ تا ۷۷ درصد است. به ازای اطمینان‌پذیری ۷۵ درصد، آسیب‌پذیری ۳۳ و ۳۱ درصد، به ترتیب، برای شرایط پایه و تغییر اقلیم ایجاد می‌شود. قواعد بهینه پایه منتج از شرایط پایه با قواعد بهینه حاصل

REFERENCES

- Ashofteh, P. S., Bozorg Haddad, O., and Mariño, M. A. (2013a). "Climate change impact on reservoir performance indices in agricultural water supply", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139 (2), 85-97.
- Ashofteh, P. S., Bozorg Haddad, O., and 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.
- Ashofteh, P. S., Bozorg Haddad, O., Akbari-Alashti, H., and Mariño, M. A. (2014). "Determination of irrigation allocation policy under climate change by genetic programming", *Journal of Hydrologic Engineering*, doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000807, 04014059.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., and Meyarivan, T. (2000). "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II", *Lecture notes in computer science, In Proceedings of Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI*, Paris, France, September 16-20, pp. 849-858.
- Jakeman A. J. and Hornberger G. M. (1993). "How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model?", *Water Resources Research*, 29 (8), 2637-2649.
- Raje, D. and Mujumdar, P. P. (2010). "Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change", *Advances in Water Resources*, 33 (3), 312-326.
- Reddy, M. J. and Kumar, D. N. (2008). "Evolving strategies for crop planning and operation of irrigation reservoir system using multi-objective differential evolution", *Irrigation Science*, 26 (2), 177-190.
- Rezapour Tabari, M. M. and Soltani, J. (2012). "Multi-objective optimal model for conjunctive use management using SGAs and NSGA-II models", *Water Resources Management*, 27 (1), 37-53.
- Silva, S. (2007). "GPLAB: A genetic programming toolbox for Matlab, Version 3", ECOS-Evolutionary and Complex Systems Group, University of Coimbra, Portugal, pp. 13-15.
- Sivapragasam, C., Mahewaran, R., and Venkatesh, V. (2008). "Genetic programming approach for flood routing in natural channels", *Hydrological Processes*, 25 (5), 623-628.
- Sivapragasam, C., Vasudevan, G., Maran, J., Bose, C., Kaza, S., and Ganesh, N. (2009). "Modeling evaporation-seepage losses for reservoir water balance in semi-arid regions", *Water Resources Management*, 23 (5), 853-867.
- Wang, W. C., Chau, K. W., Cheng, C. T., and Qiu, L. (2009). "A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series", *Journal of Hydrology*, 374 (3-4), 294-306.
- Wilby, R. L. and Harris, I. (2006). "A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the river Thames, UK", *Water Resources Research*, 42 (2), W02419.
- Yang, C. Ch., Chang, L. Ch., Chen, Ch. Sh., and Yeh, M. Sh. (2009). "Multi-objective planning for conjunctive use of surface and subsurface water using genetic algorithm and dynamics programming", *Water Resources Management*, 23 (23), 417-437.