

## استفاده از توابع چندشرطی در حوزه مدیریت مخزن در شرایط تغییر اقلیم

پریسا سادات آشفته<sup>۱\*</sup>، امید بزرگ حداد<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشیار دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۵/۲۷)

### چکیده

توابع منطقی ریاضی در حوزه مدیریت منابع آب کاربرد فراوان دارد. در این تحقیق، از برنامه‌ریزی ژنتیک منطقی (LGP)، با ادغام این گونه توابع، برای استخراج قاعده جیره‌بندی مخزن در بازه‌های بهره‌برداری در شرایط پایه و تغییر اقلیم استفاده شد. بهترین مقادیر رهاسازی از مخزن در کل بازه بر اساس آب موجود استخراج می‌شود. تابع هدف به صورت کمینه کردن نسبت کمبود بلندمدت (LSR) است. نتایج استخراج قاعده جیره‌بندی در تأمین تقاضا به وسیله LGP با نتایج برنامه‌ریزی ژنتیک متداول (TGP) برای شرایط پایه و تغییر اقلیم با استفاده از شاخص‌های کارایی مقایسه شدند. نتایج نشان دادند بر اساس LGP و در شرایط تغییر اقلیم نسبت به پایه شاخص‌های اطمینان‌پذیری کاهش (۳۴٪)، آسیب‌پذیری افزایش (۳۷٪)، و برگشت‌پذیری نیز کاهش (۲۹٪) خواهند یافت. همچنین بر اساس TGP و در وضعیت مشابه شاخص‌های اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری، و برگشت‌پذیری به ترتیب کاهش (۲۵٪)، افزایش (۱۵٪)، و کاهش (۱۴٪) خواهند یافت.

**کلیدواژگان:** تغییر اقلیم، توابع چندشرطی، شاخص‌های کارایی، قاعده بهره‌برداری از مخزن

### مقدمه

امروزه تصمیمات کارآمد و پایدار در حوزه مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب به کمک مدل‌های بهینه‌سازی امکان‌پذیر است. این تصمیمات در محیطی از تغییر و عدم قطعیت انجام می‌شود. این مسئله اهمیت موضوع را دوچندان می‌سازد. از آنجا که هدف تحقیق حاضر کاربرد LGP<sup>۱</sup> در استخراج قواعد جیره‌بندی سد است، در بخش پیشینه پژوهش تحقیقات انجام‌شده در زمینه ابزارهای بهینه‌سازی در مدیریت منابع آب، به خصوص در حوزه جیره‌بندی سد، ارائه می‌شود.

### پیشینه پژوهش

Tu et al (2003) یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح (MILP) را توسعه دادند که به طور هم‌زمان منحنی‌های فرمان معمول و قواعد جیره‌بندی را برای مدیریت و بهره‌برداری از سامانه چندمخزنه و چندمنظوره در جنوب تایوان در نظر گرفت. بررسی‌ها نشان داد هرچند در طی دوره‌های خشک‌سالی تقاضا به طور کامل تأمین نشد، برای کمینه‌کردن اثر

خشک‌سالی قواعد جیره‌بندی مؤثر عمل کردند. Tu et al (2008) قواعد جیره‌بندی را برای یک سامانه چندمخزنه در جنوب تایوان به کار بردند. آن‌ها برای استخراج قواعد جیره‌بندی یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی آمیخته با عدد صحیح را به یک مدل برنامه‌ریزی درجه دو آمیخته با عدد صحیح تبدیل کردند. نتایج نشان داد قواعد بهینه جیره‌بندی کارایی بهره‌برداری مخزن را بهبود می‌بخشد. Fallah-Mehdipour et al (2012) برای توسعه سیاست بهره‌برداری از مخزن به طور هم‌زمان، همراه پیش‌بینی جریان ورودی، از GP استفاده کردند. آن‌ها قاعده تصمیم‌گیری خطی پیشنهادشده از سوی Karamouz and Hack (1982) را برای بهره‌برداری از سامانه مخزن با هدف تأمین تقاضای پایین دست به کار بردند. برای تعیین سیاست رهاسازی آب، دو منحنی فرمان بهره‌برداری در هر دوره، در دو حالت ۱، جریان ورودی در طول دوره حاضر و حجم ذخیره در ابتدای همان دوره، و حالت ۲، جریان ورودی در طول دوره قبل و حجم ذخیره در شروع دوره حاضر، استخراج شد. نتایج نشان داد تابع هدف به دست‌آمده از منحنی فرمان GP بر اساس متغیرهای قطعی ۴/۸۶ درصد بهتر از مقادیر تابع هدف به دست‌آمده از منحنی فرمان GP بر اساس متغیرهای استوکاستیکی است. نتایج نشان داد قواعد توسعه‌یافته بر اساس

\* نویسنده مسئول: PAshofteh@ut.ac.ir

1. Logical Genetic Programming

### ساختار تحقیق

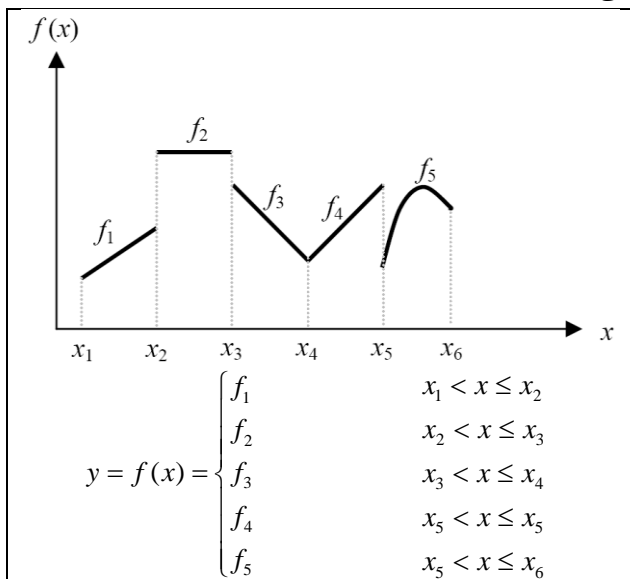
در این بخش روش‌های مورد نیاز برای این تحقیق ارائه می‌شود که شامل رویکرد TGP، توسعه LGP، قاعده جیره‌بندی از سد بر اساس متغیر مستقل موجودیت آب مخزن در شرایط پایه و تغییر اقلیم بر اساس رویکردهای TGP و LGP، و ارزیابی قواعد بهره‌برداری از مخزن بر اساس قاعده جیره‌بندی در چهار سناریوی تحت بررسی با استفاده از شاخص‌های کارایی مخزن است.

### توسعه رویکرد TGP

از آنجا که TGP هنوز به طور کامل توسعه نیافته است، یکی از مسائل پیش رو در کاربرد TGP می‌تواند توسعه آن باشد. یکی از توسعه‌های صورت گرفته بر TGP می‌تواند توسعه و ادغام توابع و عملگرهای منطقی ریاضی متعدد به آن باشد. در ادامه، رویکرد LGP از طریق توسعه و ادغام توابع و عملگرهای منطقی تشریح می‌شود.

### معرفی رویکرد LGP

ادغام توابع جدید در جعبه‌ابزار GPLAB با ویرایش ام-فایل availableparams امکان‌پذیر است. این جعبه‌ابزار در محیط برنامه‌نویسی MATLAB 9.0 توسعه یافته است. در این تحقیق، به منظور توسعه TGP و بهبود عملکرد آن تابع چندضابطه‌ای، عملگرهای توابع منطقی ( $\leq$ ،  $>$ ،  $\geq$ ،  $<$ )، و تابع بولین تعریف و با TGP ادغام شده‌اند تا رویکرد LGP به وجود آید؛ به نحوی که بتواند برای مسائلی با ویژگی‌ها و شرایط مختلف قابل استفاده باشد. شکل ۱ مبانی رویکرد LGP را به صورت پارامتری می‌دهد.



شکل ۱. مبانی رویکرد LGP به صورت پارامتری

متغیرهای قطعی در تعیین منحنی‌های فرمان بهینه همراه پیش‌بینی هم‌زمان جریان ورودی به مخازن مؤثرند. Taghian et al (2013) یک مدل ترکیبی را به منظور بهینه‌سازی هم‌زمان منحنی فرمان معمول و قاعده جیره‌بندی برای یک سامانه چندمخزنه و چندمنظوره در جنوب ایران توسعه دادند. در مدل ترکیبی، الگوریتم ژنتیک (GA) با یک روش برنامه‌ریزی خطی (LP) داخلی جفت شدند. در ادامه، سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن برای دستیابی به تخصیص مطلوب و تراز ذخیره هدف اعمال شدند. نتایج نشان داد مدل ترکیبی عملکرد خوبی برای هر دو شرایط نرمال و خشک‌سالی دارد. Fallah-Mehdipour et al (2013) قواعد بهره‌برداری بهینه را در سامانه آب‌خوان-سد با ابزار GP استخراج کردند. در تحقیق آن‌ها برای محاسبه قاعده بهره‌برداری، که تابع هدف مطلوب را نتیجه دهد، قاعده GP با موقعیت ثابت ژن<sup>۱</sup> (FLGGP) توسعه و استخراج شد. نتایج نشان داد تابع هدف به دست آمده از قاعده FLGGP حدود ۲۶ درصد بهتر از تابع هدف قاعده خطی به دست آمده با GA است. همچنین، بررسی‌ها بیان‌کننده انعطاف‌پذیری بیشتر FLGGP در تعیین منحنی‌های فرمان بهینه در سامانه آب‌خوان-سد است. بررسی پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد در پژوهش‌های صورت گرفته به استفاده از TGP<sup>۲</sup> در استخراج قواعد جیره‌بندی از مخازن و مسائلی با ماهیت چندشرطی پرداخته نشده است. با توجه به ماهیت مسئله، این موضوع می‌تواند از طریق افزودن توابع و عملگرهای منطقی به ابزار TGP (یعنی LGP) محقق شود.

در این تحقیق از رویکرد LGP برای استخراج قواعد چندشرطی جیره‌بندی در سامانه تک‌مخزن آیدوغموش (شمال شرقی ایران) در یک بازه بهره‌برداری ۱۴ ساله در شرایط پایه (بازه ۱۹۸۷-۲۰۰۰) و در شرایط تغییر اقلیم (بازه ۲۰۲۶-۲۰۳۹)، با توجه به تغییر حجم آب‌دهی و متوسط تقاضای متأثر از تغییر اقلیم، استفاده شد. تابع هدف به کاررفته در استخراج قاعده جیره‌بندی به صورت کمینه‌کردن LSR<sup>۳</sup> بود. سپس، عملکرد رویکرد LGP نسبت به TGP برای شرایط پایه و تغییر اقلیم در استخراج قاعده جیره‌بندی مقایسه شد. در نهایت، نتایج قاعده رهاسازی توسعه‌یافته در تأمین تقاضا به وسیله رویکرد LGP با نتایج مستخرج از رویکرد TGP برای شرایط پایه و تغییر اقلیم با استفاده از شاخص‌های کارایی مخزن مقایسه شد.

1. Fixed Location Gene Genetic Programming,  
2. Traditional Genetic Programming,  
3. Long-term Shortage Ration

در تحقیق حاضر، استخراج قاعده جیره‌بندی بر اساس پارامتر تصمیم‌گیری میزان موجودیت آب مخزن مطابق رابطه ۲ است:

$$RSPH_t = f(AW_t) \quad (\text{رابطه ۲})$$

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

$f(\ )$  قاعده جیره‌بندی مستخرج از رویکردهای TGP و LGP و  $AW_t$  حجم آب قابل دسترس در طول دوره  $t$ ام است که  $AW_t$  به صورت رابطه ۳ به دست می‌آید.

گفتنی است توابع، عملگرها، و مجموعه پایانه‌های به کاررفته برای محاسبه  $RSPH_t$  در رابطه ۲ متغیرهای تصمیم در مسئله بهره‌برداری از مخزن شناخته می‌شوند. ضمن اینکه با به کاربردن رویکرد LGP محل تغییر منحنی جیره‌بندی توسط مدل تعیین می‌شود. بنابراین، محل‌های شکستگی منحنی جیره‌بندی نیز به منزله متغیر تصمیم قاعده بهره‌برداری اند.

$$AW_t = S_t + Q_t - \frac{e_t \cdot (aS_t + b)}{1,000} \quad (\text{رابطه ۳})$$

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

$S_t$  میزان حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره  $t$ ام،  $Q_t$  میزان حجم آب‌دهی به مخزن در طول دوره  $t$ ام،  $T$  بازه بهره‌برداری بلندمدت،  $e_t$  ارتفاع تبخیر از دریاچه سد در طول دوره  $t$ ام، و  $a$  و  $b$  ثابت‌های منحنی سطح-حجم ذخیره مخزن است. قیودات جیره‌بندی می‌توانند مطابق رابطه‌های ۴ تا ۸ باشد:

$$S_{t+1} = AW_t - RSPH_t \quad (\text{رابطه ۴})$$

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

$$S_t \geq S_{min} \quad (\text{رابطه ۵})$$

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

$$RSPH_t \geq 0 \quad (\text{رابطه ۶})$$

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

$$RSPH_t \leq D \quad (\text{رابطه ۷})$$

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

$$RSPH_t = AW_t - S_{max} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$\forall t=1, 2, \dots, T \text{ اگر } S_{t+1} \geq S_{max}$$

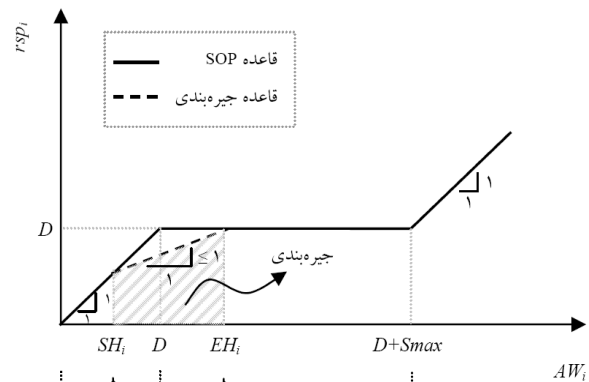
$S_{t+1}$  میزان حجم ذخیره مخزن در انتهای دوره  $t$ ام،  $S_{min}$  حجم مرده مخزن، و  $S_{max}$  حجم بیشینه مخزن است.

در این تحقیق، برای تضمین رضای قیدهای ۵ تا ۷، به ترتیب از توابع جریمه (PF) با رابطه‌های ۹ تا ۱۱ استفاده می‌شود و در صورت تخطی از قیود مربوطه به تابع هدف کمینه‌سازی اضافه می‌شود:

### قاعده جیره‌بندی از مخزن

یکی از راه‌کارهای معمول مدیریت منابع آب محدود کردن تخصیص تقاضای آبی است؛ حتی در مواردی که ذخیره کافی برای تأمین وجود دارد. این رویکرد از طریق روش‌های موسوم به قواعد جیره‌بندی در مدیریت مخازن به کار می‌رود.

هدف قاعده جیره‌بندی کاهش خسارت ناشی از کمبود شدید در ازای پذیرش دوره‌های کمبود بیشتر، با شدت کمتر، است. بنابراین، این قاعده بر این اصل استوار است که وقتی ظرفیت تأمین مخزن، که با آب قابل دسترس مشخص می‌شود، پایین‌تر از حد آستانه قرار گیرد، به منظور حفظ آب برای مصارف آبی، جیره‌بندی آغاز می‌شود. در شکل ۲ منحنی جیره‌بندی به صورت نمایشی ارائه شده است.



شکل ۲. نمایش قاعده SOP و جیره‌بندی

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، وقتی آب قابل دسترس بین دو حد  $SH$  و  $EH$  قرار دارد، جیره‌بندی وجود خواهد داشت. این دو حد اصطلاحاً به ترتیب جیره‌بندی آغازین ( $SH$ ) و جیره‌بندی پایانی ( $EH$ ) نامیده می‌شوند. بین  $SH$  تا  $D$  و  $EH$  بین  $D$  و  $D+S_{max}$  تغییر می‌کند. سیاست بهره‌برداری برای  $SH = EH = D$  همان سیاست SOP است که در این صورت جیره‌بندی وجود نخواهد داشت.

تابع هدف می‌تواند به صورت کمینه‌کردن LSR در تخصیص به متوسط تقاضا در بازه بهره‌برداری باشد. بنابراین، تابع هدف مربوطه می‌تواند مطابق رابطه ۱ در نظر گرفته شود:

$$\text{Minimize } LSR = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |D - RSPH_t| \quad (\text{رابطه ۱})$$

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

LSR تابع هدف به صورت نسبت کمبود بلندمدت و  $RSPH_t$  رهاسازی اضافی (مجموع رهاسازی و جریان سرریز) محاسباتی بر مبنای قاعده جیره‌بندی در دوره  $t$ ام و  $D$  متوسط حجم تقاضا در کل بازه زمانی برنامه‌ریزی است.

(1982) چندین شاخص عملکرد را توسعه دادند. شاخص‌های اطمینان‌پذیری و آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری از این شاخص‌ها هستند که در این تحقیق به منظور بررسی کارایی مخزن از آن‌ها استفاده شد.

#### مورد مطالعاتی و اطلاعات

در این بخش سامانه مخزن، پارامترهای TGP و LGP، تعداد اجراها، و سایر خصوصیات الگوریتم‌ها معرفی می‌شود.

#### سامانه مخزن

سامانه مخزن مورد مطالعه حوضه آیدوغوش است که در استان آذربایجان شرقی (شمال شرقی ایران) قرار دارد (Ashofteh et al, 2013b; 214a,b). ویژگی‌های حوضه و سامانه مخزن در جدول ۱ می‌آید. در این تحقیق از اطلاعات آب‌دهی ۱۴ ساله پایه (بازه ۱۹۸۷-۲۰۰۰) استفاده شد. متوسط ماهیانه تقاضای بلندمدت در کل دوره برنامه‌ریزی در شرایط پایه برابر ۱۱/۹۷ میلیون متر مکعب و متوسط ماهیانه آب‌دهی بلندمدت در کل دوره برنامه‌ریزی در شرایط پایه برابر ۱۲/۷۳ میلیون متر مکعب است.

جدول ۱. خصوصیات و ویژگی‌های حوضه و سامانه مخزن

مشخصات حوضه و مخزن	
وسعت	۱۸۰۲ کیلومتر مربع
آب‌دهی سالیانه رودخانه	۱۹۰ میلیون متر مکعب
طول رودخانه	۸۰ کیلومتر
تراز نرمال سد	۱۳۴۱/۵ متر از سطح دریا
ظرفیت کل	۱۴۵/۷ میلیون متر مکعب
حجم مرده	۸/۷ میلیون متر مکعب
$a$ و $b$	۰/۸ و ۰/۳

#### پارامترهای رویکردهای TGP و LGP

GPLAB جعبه‌ابزار رویکردهای TGP و LGP برای نرم‌افزار MATLAB 9.0 است (Silva, 2007). در مجموعه توابع TGP پنج عملگر حسابی (۸، ×، /، -، +) و در مجموعه توابع LGP علاوه بر پنج عملگر حسابی به کاررفته در TGP شش تابع ریاضی توسعه‌یافته (and، >، <، ≥، ≤) به کار رفته است. مقادیر پارامترهای به کاررفته در رویکردهای TGP و LGP برای قاعده جیره‌بندی از مخزن در جدول ۲ می‌آید.

جدول ۲. پارامترهای TGP و LGP برای قاعده جیره‌بندی از مخزن

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
بیشینه تکرار (اجرا)	۳۵۰۰	عمق بیشینه اولیه درخت	۹
نرخ تزویج	۰/۹	تعداد درخت	۱۰۰
نرخ جهش	۰/۱	نرخ تولید مثل	۰/۱

$$PF1_t = A' \left[ \frac{|S_{min} - S_t|}{S_{max} - S_{min}} \right]^2 + B' \quad (\text{رابطه ۹})$$

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

$$PF2_t = C' \left[ \frac{RSPH_t}{D} \right] + D' \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

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

$$PF3_t = E' \left[ \frac{(RSPH_t - D)}{D} \right]^2 + F' \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

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

PF1<sub>t</sub> تابع جریمه ناشی از تخطی از قید رابطه ۵، PF2<sub>t</sub>

تابع جریمه ناشی از تخطی از قید رابطه ۶، PF3<sub>t</sub> تابع جریمه ناشی از تخطی از قید رابطه ۷، و ضرایب A' تا F' ثابت‌های مثبت توابع جریمه است.

#### سناریوهای تحت بررسی

در تحقیق حاضر حجم رهاسازی اضافی از مخزن تابعی از پارامترهای تصمیم‌گیری همچون میزان موجودیت آب مخزن در شرایط پایه و تغییر اقلیم خواهد بود. بدین منظور، چهار سناریو مطابق رابطه‌های ۱۲ تا ۱۵ در نظر گرفته شد:

$$RSPH_{tb-TGP} = f_{b-TGP}(AW_{tb-TGP}) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

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

$$RSPH_{tb-LGP} = f_{b-LGP}(AW_{tb-LGP}) \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

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

$$RSPH_{tf-TGP} = f_{f-TGP}(AW_{tf-TGP}) \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

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

$$RSPH_{tf-LGP} = f_{f-LGP}(AW_{tf-LGP}) \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

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

$RSPH_{tb-TGP}$  و  $AW_{tb-TGP}$  به ترتیب موجودیت آب مخزن

و حجم رهاسازی اضافی در شرایط پایه و بر اساس رویکرد TGP،  $RSPH_{tb-LGP}$  و  $AW_{tb-LGP}$  به ترتیب موجودیت آب مخزن و حجم رهاسازی اضافی در شرایط پایه و بر اساس رویکرد LGP،  $RSPH_{tf-TGP}$  و  $AW_{tf-TGP}$  به ترتیب موجودیت آب مخزن و حجم رهاسازی اضافی در شرایط تغییر اقلیم و بر اساس رویکرد TGP،  $RSPH_{tf-LGP}$  و  $AW_{tf-LGP}$  به ترتیب موجودیت آب مخزن و حجم رهاسازی اضافی در شرایط تغییر اقلیم و بر اساس رویکرد LGP است.

گفتنی است در تحقیق حاضر، برای شبیه‌سازی و تولید سناریوی اقلیمی در شرایط تغییر اقلیم، از مدل HadCM3 و سناریوی انتشار A2 استفاده شد (Ashofteh et al, 2013a).

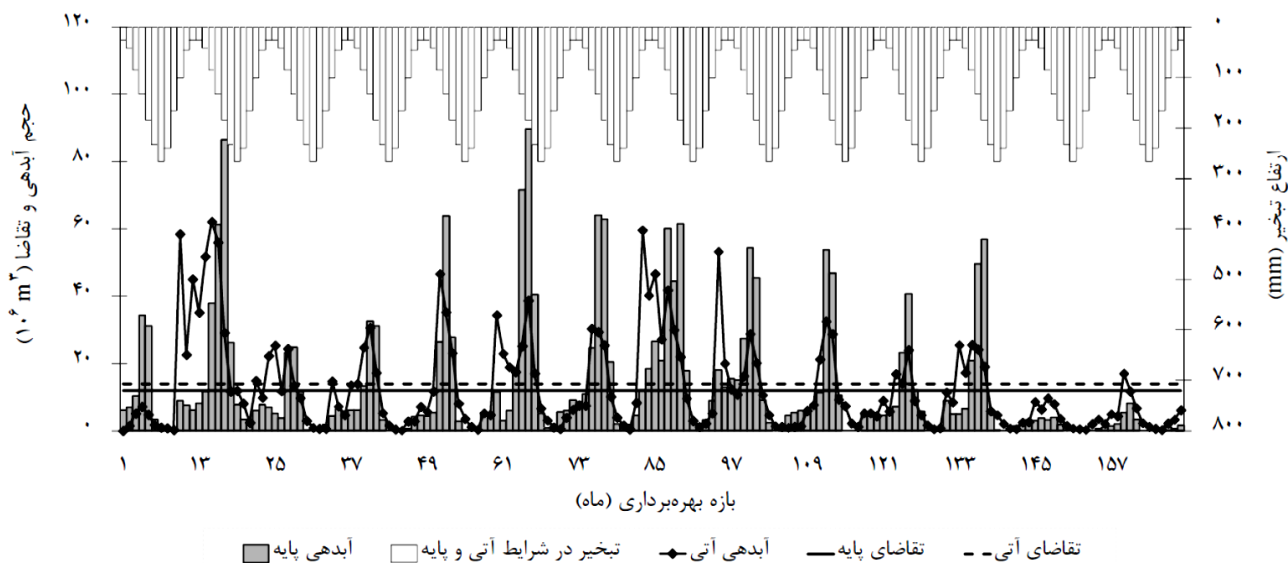
#### شاخص‌های کارایی مخزن

به دلیل پیچیدگی‌ها در عملکرد سامانه‌های آب، هیچ شاخص کارایی به‌تنهایی نمی‌تواند همه ویژگی‌های سامانه را بیان کند. برای ارزیابی عملکرد سامانه تأمین آب Hashimoto et al

## یافته‌ها و بحث

پس از به‌دست‌آوردن سناریوی اقلیمی حوضه، سری زمانی ماهیانه متغیرهای اقلیمی حوضه، با اضافه‌کردن سناریوی اقلیمی به دمای مشاهداتی حوضه و با ضرب کردن سناریوی اقلیمی به بارندگی مشاهداتی حوضه، در دوره آتی محاسبه و به مدل هیدرولوژیکی معرفی می‌شود. سری زمانی آبدهی ۱۴ ساله آتی (بازه ۲۰۲۶-۲۰۳۹) در شکل ۳ می‌آید (Ashofteh *et al.*, 2013a).

انتظار می‌رود دمای حوضه در دوره آتی بین ۰/۵ تا ۲/۷ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش یابد. این در حالی است که حوضه در این دوره شاهد افزایش بارندگی عمدتاً در فصل پاییز و کاهش آن در فصل تابستان خواهد بود. همچنین محدوده تغییرات بارش برای سناریوی انتشار A2 در دوره آتی بین ۳۶- تا ۷۶ درصد نسبت به دوره پایه خواهد بود (Ashofteh *et al.*, 2013a).

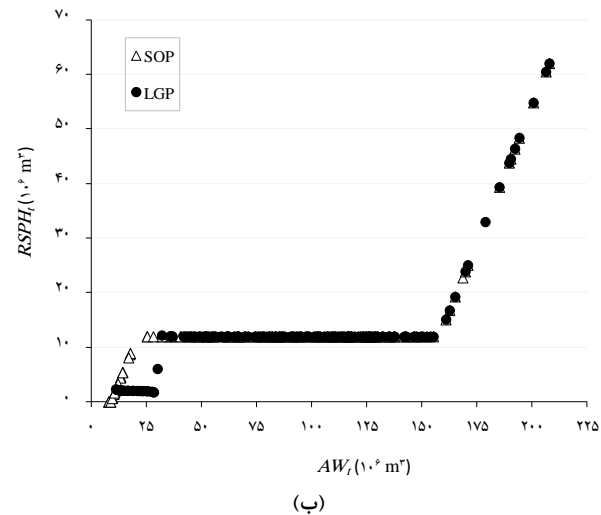
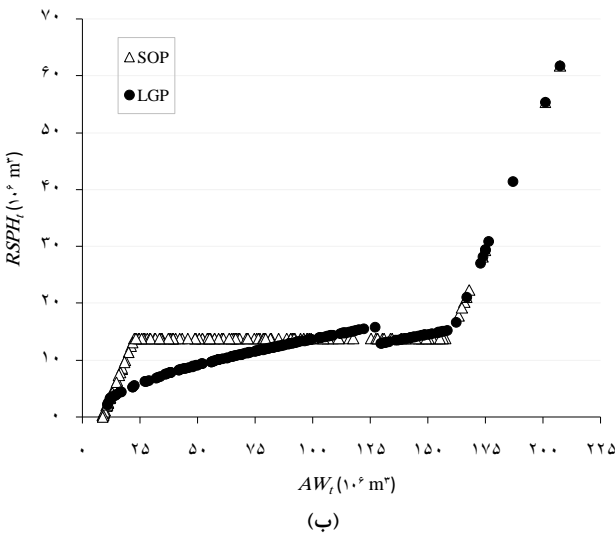
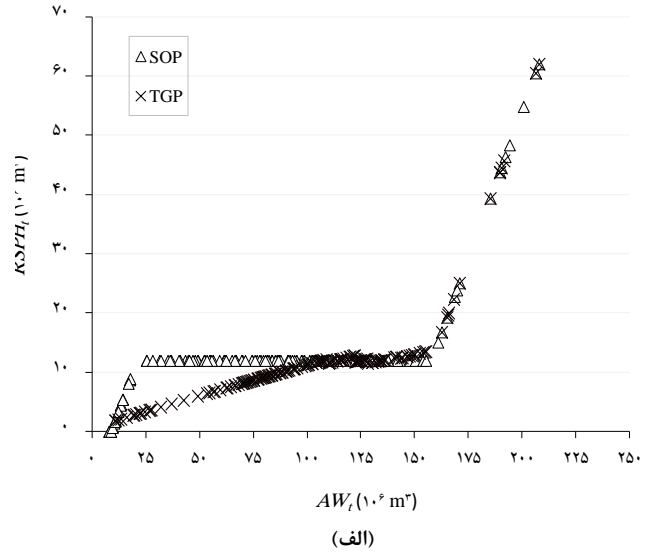
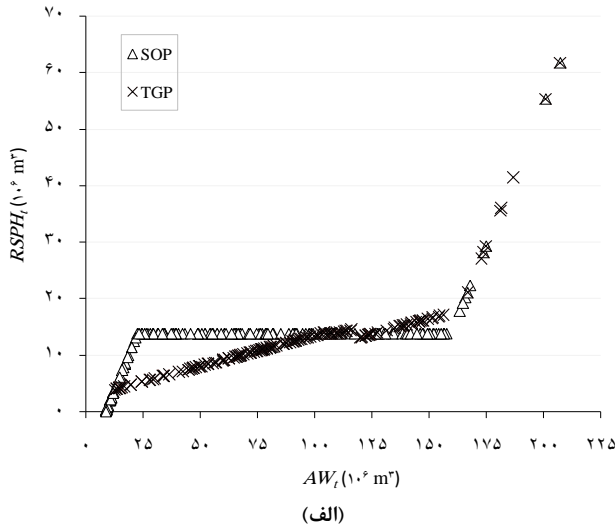


شکل ۳. آب‌دهی به مخزن، متوسط تقاضا، و ارتفاع تبخیر در کل بازه برنامه‌ریزی در شرایط تغییر اقلیم و مقایسه با شرایط پایه

و LGP، موجودیت آب قابل دسترس در شرایط پایه و تغییر اقلیم در منحنی فرمان بهره‌برداری در نظر گرفته شد. نتایج استخراج قاعده جیره‌بندی بر اساس رویکرد TGP در مقایسه با LGP برای شرایط پایه در شکل‌های ۴ الف و ۴ ب و برای شرایط تغییر اقلیم در شکل‌های ۵ الف و ۵ ب می‌آید.

مقایسه داده‌های محاسباتی با رویکرد LGP و داده‌های مشاهداتی SOP (با ضریب تعیین برابر ۹۶ و ۷۷ درصد، به ترتیب در شرایط پایه و تغییر اقلیم) نسبت به داده محاسباتی با رویکرد TGP (با ضریب تعیین برابر ۸۰ و ۷۱ درصد، به ترتیب در شرایط پایه و تغییر اقلیم) نشان می‌دهد LGP عملکرد بهتری نسبت به TGP دارد. این موضوع نشان می‌دهد در بازه آتی میزان تقاضا با میزان رهاسازی از مخزن متعادل‌تر و تابع هدف کمتری حاصل شده است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد همگرایی LGP با تابع هدفی برابر ۳/۸۲ و ۴/۲۲ درصد به ترتیب در شرایط پایه و تغییر اقلیم نسبت به TGP با تابع هدفی برابر ۵/۰۹ و ۴/۴۷ درصد در شرایط مذکور بهتر است.

برای شبیه‌سازی تقاضا در شرایط تغییر اقلیم، پس از تعیین نیاز آبیاری محصولات در بازه آتی، حجم تقاضا در ماه‌های مختلف، بر اساس سطح کشت ثابت، به‌دست می‌آید. در این روش برای تعیین تبخیر و تعرق گیاهی از روش فائو پنمن-مانتیس استفاده شد و میزان بارندگی مؤثر با توجه به شرایط آب‌وهوایی و با استفاده از آمار بارندگی ماهیانه و به روش سازمان حفاظت خاک امریکا (SCS) با نرم‌افزار Cropwat محاسبه شد (Ashofteh *et al.*, 2013a). بنابراین، با شبیه‌سازی سری زمانی ماهیانه متغیرهای اقلیمی، تبخیر، و تعرق پتانسیل تعیین و حجم تقاضای آب بر محصولات مختلف محاسبه می‌شود (Ashofteh *et al.*, 2013a). متوسط ماهیانه تقاضای بلندمدت در کل دوره برنامه‌ریزی در شرایط تغییر اقلیم برابر ۱۳/۸۸ میلیون متر مکعب است که همراه آمار ارتفاع تبخیر در شکل ۳ می‌آید. در گام بعد، نتایج استخراج قاعده جیره‌بندی از مخزن با رویکردهای TGP و LGP در شرایط پایه و تغییر اقلیم، تحت چهار سناریو، بررسی شد. در قاعده استخراج‌شده به کمک TGP



شکل ۵. نتایج استخراج قاعده جیره‌بندی با رویکرد TGP در شرایط تغییر اقلیم (سناریوی سوم) و LGP در شرایط تغییر اقلیم (سناریوی چهارم)

شکل ۴. نتایج استخراج قاعده جیره‌بندی با رویکرد TGP در شرایط پایه (سناریوی اول) و LGP در شرایط پایه (سناریوی دوم)

$$RSPH_i = \begin{cases} AW_i - 145.7 & 159.51 \leq AW_i \\ 11.97 & 30.60 \leq AW_i < 159.51 \\ 5.05 & 29.02 \leq AW_i < 30.60 \\ 2.05 & AW_i < 29.02 \end{cases} \quad (\text{رابطه } 17)$$

$$RSPH_i = 1.504 \cdot AW_i + 0.00097 \cdot AW_i^3 + 3.601 \times 10^{-8} \cdot AW_i^5 - 9.196 - 5.660 \times 10^{-11} \cdot AW_i^6 - 0.054 \cdot AW_i^2 \quad (\text{رابطه } 18)$$

$$RSPH_i = \begin{cases} AW_i - 145.7 & 165.32 \leq AW_i \\ 0.109AW_i & 118.74 \leq AW_i < 165.43 \\ 0.158AW_i + 7.28 & 105.21 \leq AW_i < 118.74 \\ 0.109AW_i + 2.51 & AW_i < 105.21 \end{cases} \quad (\text{رابطه } 19)$$

به منظور بررسی عملکرد مخزن در تأمین تقاضا بر اساس موجودیت آب قابل دسترس، مقادیر شاخص‌های کارایی در چهار سناریوی تحت بررسی در جدول ۳ مقایسه و ارائه می‌شود.

بنابراین، در شرایط پایه استفاده از رویکرد LGP باعث بهبود ۲۵ درصدی تابع هدف نسبت به رویکرد TGP در استخراج قاعده جیره‌بندی (سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول) و همچنین در شرایط تغییر اقلیم استفاده از رویکرد LGP باعث بهبود ۶ درصدی تابع هدف نسبت به رویکرد TGP در استخراج قاعده جیره‌بندی (سناریوی چهارم نسبت به سناریوی سوم) می‌شود.

رابطه‌های ۱۶ و ۱۷ قاعده‌های توسعه‌داده شده برای شرایط پایه به وسیله TGP و LGP با کمترین مقدار تابع هدف و رابطه‌های ۱۸ و ۱۹ قاعده‌های توسعه‌داده شده برای شرایط تغییر اقلیم به وسیله TGP و LGP است:

$$RSPH_i = 3.151 + 8.831 \times 10^{-7} \cdot AW_i^4 + 8.370 \times 10^{-11} \cdot AW_i^6 - 1.538 \times 10^{-13} \cdot AW_i^7 - 1.484 \times 10^{-8} \cdot AW_i^5 \quad (\text{رابطه } 16)$$

در این تحقیق، به منظور بهبود عملکرد TGP، تابع چندضابطه‌ای، توابع عملگر منطقی، و تابع بولین به TGP اضافه شد و رویکرد LGP به وجود آمد. از LGP برای استخراج قواعد جیره‌بندی بهینه در شرایط پایه و تغییر اقلیم برای یک سامانه تک‌مخزنه با هدف کاهش نسبت کمبود بلندمدت استفاده شد.

مقایسه داده محاسباتی با رویکرد LGP و داده مشاهداتی SOP (با ضریب تعیین برابر ۹۶ و ۷۷ درصد، به ترتیب در شرایط پایه و تغییر اقلیم) نسبت به داده محاسباتی با رویکرد TGP (با ضریب تعیین برابر ۸۰ و ۷۱ درصد، به ترتیب در شرایط پایه و تغییر اقلیم) نشان داد عملکرد LGP بهتر از TGP است.

مقایسه مقادیر شاخص‌های کارایی در چهار سناریو نشان دادند استفاده از رویکرد LGP منجر به افزایش ۲۳ درصدی اطمینان‌پذیری، کاهش ۲۹ درصدی آسیب‌پذیری، و افزایش ۱۸ درصدی شاخص برگشت‌پذیری نسبت به کاربرد رویکرد TGP در شرایط پایه می‌شود. این در حالی است که در شرایط تغییر اقلیم استفاده از LGP باعث افزایش ۱۳ درصدی اطمینان‌پذیری و کاهش ۵ درصدی آسیب‌پذیری می‌شود.

همان‌طور که در متن اصلاحی مقاله آمده است، توسعه TGP از طریق توسعه و ادغام توابع و عملگرهای منطقی و ایجاد رویکرد LGP از نوآوری‌های تحقیق حاضر به شمار می‌رود که در تحقیقات قبلی وجود نداشت. LGP از طریق مسئله SOP صحت‌سنجی شد و به دلیل داشتن قابلیت حل مسائل چندشرطی در استخراج قاعده جیره‌بندی از مخزن به کار رفت که در تحقیقات قبلی این امکان وجود نداشت. برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود کاربرد این رویکرد در حل مسائل چندشرطی دیگر ارزیابی شود.

### سپاس‌گزاری

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

### 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.

جدول ۳. مقایسه شاخص‌های کارایی در چهار سناریوی تحت بررسی

سناریو	اطمینان‌پذیری (%)	آسیب‌پذیری (%)	برگشت‌پذیری (%)
اول	۳۶	۱۷	۱۴
دوم	۴۷	۱۲	۱۷
سوم	۲۷	۲۰	۱۲
چهارم	۳۱	۱۹	۱۲

مقایسه سناریوهای اول و دوم در جدول ۳ نشان می‌دهد استفاده از رویکرد LGP منجر به افزایش ۲۳ درصدی اطمینان‌پذیری، کاهش ۲۹ درصدی آسیب‌پذیری، و افزایش ۱۸ درصدی شاخص برگشت‌پذیری نسبت به کاربرد رویکرد TGP در شرایط پایه می‌شود. این در حالی است که در شرایط تغییر اقلیم (سناریوهای سوم و چهارم) استفاده از LGP باعث افزایش ۱۳ درصدی اطمینان‌پذیری و کاهش ۵ درصدی آسیب‌پذیری می‌شود.

همچنین نتایج نشان می‌دهد در صورت استفاده از رویکرد LGP (سناریوهای دوم و چهارم)، شاخص‌های اطمینان‌پذیری و آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه به ترتیب ۳۴ درصد کاهش، ۳۷ درصد افزایش، و ۲۹ درصد کاهش می‌یابند. در حالی که در TGP (سناریوهای اول و سوم) شاخص‌های فوق به ترتیب ۲۵ درصد کاهش، ۱۵ درصد افزایش، و ۱۴ درصد کاهش می‌یابند. به عبارت دیگر، وضعیت شاخص‌های کارایی مخزن در هر دو رویکرد در شرایط تغییر اقلیم بدتر از شرایط پایه می‌شوند.

### نتیجه‌گیری

استخراج قواعد جیره‌بندی می‌تواند در مدیریت مخزن به برنامه‌ریزان و بهره‌برداران کمک کند؛ به گونه‌ای که با اعمال قواعد جیره‌بندی در تخصیص آب در مواقعی که مثلاً شاخص‌های موجود نشان‌دهنده وقوع پدیده خشک‌سالی است خسارات و ریسک دوره‌های خشک‌سالی را کمینه کنند.

- shofteh, P.-S., Bozorg Haddad, O., and Mariño, M. A., (2014a). "Risk analysis of water demand for agricultural crops under climate change", *Journal of Hydrological Engineering*, DOI: 10.1061 / (ASCE)HE. 1943 - 5584. 0001053, 04014060.
- Ashofteh, P.-S., Bozorg Haddad, O., and Mariño, M. A., (2014b). "Determination of irrigation allocation policy under climate change by genetic programming", *Journal of Irrigation and*

- Drainage Engineering*, DOI: 10.1061 / (ASCE) IR.1943-4774.0000807, 04014059.
- Fallah-Mehdipour, E., Bozorg Haddad, O., and Mariño, M. A., (2012). "Real-time operation of reservoir system by genetic programming", *Water Resources Management*, 26 (14), 4091-4103.
- Fallah-Mehdipour, E., Bozorg Haddad, O., and Mariño, M. A., (2013). "Extraction of optimal operation rules in aquifer-dam system: A genetic programming approach", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000628.
- Hashimoto, H., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation", *Water Resources Research*, 18 (1), 14-20.
- Karamouz, M. and Houck, M. H. (1982). "Annual and monthly reservoir operating rules generated by deterministic optimization", *Water Resources Research*, 18 (5), 1337-1344.
- Taghian, M., Rosbjerg, D., Haghghi, A., and Madsen, H. (2013). "Optimization of conventional rule curves coupled with hedging rules for reservoir operation", *Journal of Water Resources and Management*, Doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000355.
- Tu, M. Y., Hsu, N. Sh., and Yeh, W. W. G. (2003). "Optimization of reservoir management and operation with hedging rules", *Journal of Water Resources and Management*, 129 (2), 86-97.
- Tu, M. Y., Hsu, N. Sh., Tsai, F. T. C., and Yeh, W. W. G. (2008). "Optimization of hedging rules for reservoir operations", *Journal of Water Resources and Management*, 134 (1), 3-13.
- 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.