

## بهره‌وری بهینه از سامانه‌ی تلفیقی آبخوان – سد: رویکرد برنامه‌ریزی ژنتیک

الهه فلاح مهدی‌پور<sup>۱\*</sup>، امید بزرگ‌حداد<sup>۲</sup> و سعید علی‌محمدی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۸

### چکیده

در سال‌های اخیر، به علت رشد صعودی تقاضای آب، استفاده بیش از پیش از منابع محدود آب، اعم از سطحی و زیرزمینی، و در برخی مناطق استفاده‌ی توأمان از این منابع، افزایش یافته است. همزمان با این رشد استفاده، شبیه‌سازی بهره‌برداری، شامل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، بخصوص در نحوه‌ی برخورد با آب زیرزمینی، توسعه یافته است. قواعد بهره‌برداری یکی از ابزارهای مناسب در برنامه‌ریزی منابع آب می‌باشند که با استفاده از مقادیر متغیرهای حالت متفاوت، در گذشته و حال سامانه، نحوه‌ی و مقدار برداشت از منابع مختلف را در زمان حاضر برآورد می‌کنند. در این تحقیق، نحوه‌ی بهره‌برداری زمان واقعی از منابع متفاوت و تخصیص آب به نیازهای مختلف سامانه‌ی آبخوان- سد در محدوده‌ی کرج مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، کارایی الگوریتم ژنتیک<sup>۴</sup> (GA) در استخراج قاعده‌ی بهره‌برداری خطی و برنامه‌ریزی ژنتیک با موقعیت ثابت ژن<sup>۵</sup> (FLGGP) در یافتن روابط ریاضی بدون قالب از پیش تعیین شده خطی یا غیرخطی، با هدف کمینه‌سازی مجموع مربعات انحرافات مقادیر بهنجار شده تخصیص از نیاز، مقایسه شده‌اند. نتایج حاکی از آن هستند که تابع هدف حاصل از FLGGP، ۳۲/۵۸ درصد کمتر (بهتر) از مقدار مشابه حاصل از GA می‌باشد. به این ترتیب، کارایی و انعطاف‌پذیری FLGGP، به علت استفاده از توابع و متغیرهای مختلف در جستجوی فضای تصمیم برای سامانه‌ی تلفیقی، بیشتر از GA است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی ژنتیک با موقعیت ثابت ژن، سامانه‌ی تلفیقی

<sup>۱</sup> - دکتری منابع آب، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> - دانشیار گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> - استادیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

\*- نویسنده مسوول مقاله: Falah@ut.ac.ir

<sup>۴</sup> - genetic algorithm

<sup>۵</sup> - fixed location gene genetic programming

## مقدمه

ذخیره و بهره‌برداری مطلوب از منابع آب موجود، اعم از سطحی و زیرزمینی، هدف اصلی هر طرح بهره‌برداری تلفیقی می‌باشد. تصمیم‌گیران و بهره‌برداران سامانه‌ی تلفیقی، از اصلیت‌ترین ارکان این سامانه‌ی می‌باشند که از یک سو با منابع آب و اهدافی جهت حفاظت و ذخیره‌ی آنها، و از سوی دیگر با مصرف‌کنندگان مختلف که بایستی نیازهای آنها به بهترین حالت ممکن تأمین گردد، ارتباط دارند. در ابتدا، به منظور معرفی مناسب‌تر بهره‌برداری تلفیقی، به مطالعات انجام شده در این خصوص با کاربرد بهینه‌سازی اشاره خواهد شد.

جهت تأمین بهینه‌ی هدف یا اهداف مطرح شده در بهره‌برداری تلفیقی مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است. خاره و همکاران (۲۰۰۶) شبیه بهره‌برداری تلفیقی را از منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق کشاورزی جهت استفاده بهینه از منابع آبی موجود با هدف افزایش میزان سود حاصل از کشت محصولات مختلف توسعه دادند. در شبیه تدوین شده، جنبه‌های اجتماعی- اقتصادی به صورت محدودیت بوده، و تابع هدف به صورت اقتصادی ارائه شده است. در نهایت، با استفاده از برنامه‌ریزی خطی<sup>۱</sup> (LP)، و به وسیله‌ی نرم‌افزار LINGO<sup>۲</sup> میزان تخصیص از منابع سطحی و زیرزمینی تعیین شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی افزایش منافع حاصل از کشت محصولات مختلف با استفاده از این برنامه‌ریزی بوده‌اند. پولیدو- ولزکوئز و همکاران (۲۰۰۸) شبیه بهره‌برداری تلفیقی را از منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از تابع پاسخ آبخوان در نظر گرفتند. مؤلفه‌های در نظر گرفته شده در این سامانه‌ی تلفیقی شامل سد، آبخوان و رود بوده‌اند. سای و همکاران (۲۰۰۹) مسأله‌ی بهره‌برداری تلفیقی بزرگ مقیاس را در یک منطقه‌ی نیمه‌خشک با تأکید بر مدیریت چاه‌های آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک موازی<sup>۳</sup> (PGA) و روش وزن‌دهی حل کردند. علیمحمدی و همکاران (۲۰۰۹) مدیریت

یکپارچه‌ی منابع آبی را به عنوان عامل کلیدی بهره‌برداری تلفیقی از سامانه‌های سطحی و زیرزمینی معرفی کرده و ذخیره تناوبی را در بیشینه نمودن بازدهی استفاده از منابع آبی با کمترین هزینه، موثر دانسته‌اند. در این راستا، آنها یک شبیه بهینه‌سازی را طراحی، و بهره‌برداری برای سامانه‌ی پیشنهادی ذخیره تناوبی ارائه کرده و از ماتریس پاسخ اصلاح شده به عنوان شبیه‌ساز آبخوان استفاده نمودند.

مارکوئز و همکاران (۲۰۱۰) شبیه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی را بر اساس تصمیمات کشاورزی با استفاده از برنامه‌ریزی درجه‌ی دو تصادفی دو مرحله‌ای<sup>۴</sup> با هدف افزایش سود مورد انتظار کشاورزان انجام داده و مقادیر بهینه تغذیه و تخلیه را به دست آوردند. آنها انواع محصولات قابل کشت را به مجموعه‌های ثابت و متغیر در سالهای مختلف (سالانه) تقسیم نمودند. با توجه به نتایج این تحقیق، و با استفاده از شبیه پیشنهادی، تنش‌های آبیاری و کاهش محصولات ناشی از سناریوهای خشک‌سالی آبشناسی کاهش می‌یابد.

در مطالعاتی که به عنوان نمونه‌هایی در خصوص کاربرد روش‌های بهینه‌سازی مختلف در بهره‌برداری تلفیقی ارائه شده‌اند، بهره‌برداری برای یک گروه زمانی مشخص انجام شده که ممکن است قابلیت استفاده را جهت بهره‌برداری زمان حقیقی نداشته باشد. بهره‌برداری زمان حقیقی به معنای بهره‌برداری در هر دوره با توجه به منابع و امکانات موجود است. در این روش، مقادیر برداشت از منابع مختلف با توجه به مقادیر فراسنج‌هایی نظیر حجم ذخیره‌ی مخزن و تراز آب زیرزمینی در ابتدای دوره‌ی بهره‌برداری، و مقادیر پیش‌بینی شده‌ی آبدهی در طول دوره بهره‌برداری مشخص می‌شوند. تحقیقات گسترده‌ای در خصوص بهره‌برداری زمان حقیقی از مخزن وجود دارد، اما در مورد بهره‌برداری تلفیقی را زمان حقیقی تحقیقات به صورت محدودتر انجام شده است. علیمحمدی (۱۳۸۴) بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی با رویکرد سامانه‌های ذخیره‌ی تناوبی<sup>۵</sup> و با استفاده از ماتریس پاسخ آبخوان و به صورت

<sup>۱</sup> - linear programming

<sup>۲</sup> - language for interactive general optimization

<sup>۳</sup> - parallel genetic algorithm

<sup>۴</sup> - two-stage stochastic quadratic programming

<sup>۵</sup> - cyclic storage systems

است که با استفاده از عملگرهای GA، و ضمن بهره‌گیری از توابع، متغیرها و عملگرهای ریاضی مختلف به ارائه‌ی رابطه‌ی ریاضی برای داده‌های متفاوت در بسیاری از زمینه‌های علوم پرداخته است. در مهندسی آب نیز تحقیقاتی نظیر ساویک و همکاران (۱۹۹۹)، خو و همکاران (۲۰۰۱)، ربونال و همکاران (۲۰۰۷)، گاون و گانل (۲۰۰۸)، سیواپراگاسام (۲۰۰۹)، گاون و کیسی (۲۰۱۰) و عروجی و همکاران (۲۰۱۳) صورت پذیرفته است. در GP، به علت امکان ایجاد تنوع در ارائه‌ی روابط ریاضی با ساختار درختی، همچنین، امکان طولانی شدن برخی روابط حاصل از آن، امکان استفاده عملی از روابط کمتر می‌باشد. از سوی دیگر، GP، به علت در نظر گرفتن ساختار درختی برای استخراج رابطه‌ی ریاضی، تنها قادر به ارائه‌ی یک رابطه میان مجموعه‌های ورودی و خروجی می‌باشد، در حالی که در سامانه‌هایی با بیش از یک مجموعه، نظیر آبخوان و سد، نیاز به استخراج بیش از یک رابطه‌ی ریاضی وجود دارد. FLGGP یکی از انواع روشهای GP است که با استفاده از کروموزومهایی با طول ثابت و عملگرها و توابع ریاضی، امکان ارائه‌ی یک یا چند رابطه‌ی ریاضی را میان متغیرهای مختلف به صورت خطی یا غیرخطی فراهم می‌آورد؛ لذا، استفاده از FLGGP، با هدف استفاده از قابلیت‌های GA، و کاهش معایب GP با بهره‌گیری از کروموزومهایی با طول ثابت پیشنهاد می‌گردد. مورد مطالعاتی این تحقیق، سامانه‌ی سد-آبخوان کرج، است. محمدرضاپور طبری و سلطانی (۲۰۱۳) شبیه بهره‌برداری بهینه چندهدفه با اهداف: (۱) بیشینه نمودن کمینه‌ی اعتمادپذیری سامانه‌ی و (۲) کمینه کردن هزینه‌ی تأمین آب تلفیقی را با استفاده از GA متوالی<sup>۶</sup> (SGA) و NSGA-II<sup>۷</sup> در سامانه‌ی سد-آبخوان کرج اجرا نمودند؛ به این ترتیب، منحنی تبادل اهداف حاصل از NSGA-II، و وزن‌دهی حاصل از SGA استخراج گردید. در تحقیق حاضر، ابتدا بهره‌برداری بلندمدت از سامانه‌ی سد-آبخوان کرج بدون در نظر گرفتن قاعده‌ی بهره‌برداری، و با استفاده از NLP با کاربرد نرم‌افزار LINGO انجام شده است. سپس یک قاعده‌ی

فراسنج گسترده، شبیه‌سازی نمود. او سیاست‌های بهینه‌ی طراحی و بهره‌برداری را با استفاده از سه روش مختلف درون‌گذاری<sup>۱</sup> ضرایب در روابط شبیه، رابطه‌ی حاصل از گروه تاریخی،<sup>۲</sup> و هم‌چنین رابطه‌ی حاصل از گروه‌های مصنوعی<sup>۳</sup> استخراج نمود. افشار و همکاران (۲۰۰۸) شبیه طراحی و بهره‌برداری تلفیقی آبهای سطحی و زیرزمینی را با رویکرد ذخیره‌ی تناوبی در یک شبیه بزرگ مقیاس با استفاده از شبیه توده‌ای و شبیه پیشنهادی نیمه توزیعی مقایسه کردند. آنها با استفاده از درون‌گذاری یک رابطه‌ی خطی در شبیه بهره‌برداری بهینه، مقدار برداشت مناسب را از منابع سطحی و زیرزمینی مشخص نمودند. افشار و همکاران (۲۰۱۰) یک مسأله بزرگ مقیاس نیمه‌توزیعی بهره‌برداری تلفیقی را با استفاده از یک الگوریتم تجزیه<sup>۴</sup> حل کردند. آنها با استفاده از رویکرد ذخیره‌ی تناوبی، و با استفاده از ماتریس پاسخ آبخوان اقدام به شبیه‌سازی رفتار سامانه‌ی سد، رود و آبخوان نمودند. در این الگوریتم، ابتدا با استفاده از خطی‌سازی، ماتریس ضرایب پاسخ آبخوان استخراج شده است. سپس، به علت بزرگ مقیاس بودن مسأله و مشکلات ناشی از آن جهت یافتن جواب بهینه، در هر مرحله جستجو دو روش LP و GA با استفاده از الگوریتم تجزیه به‌کار رفته است. هم‌چنین، مقادیر برداشت از منابع مختلف با استفاده از روابط خطی میان حجم ذخیره‌ی مخزن، آبدهی ورودی به سد، و مقدار افت آبخوان در هر دوره تعیین شده بود.

در تمامی تحقیقات اشاره شده، روابط بهره‌برداری درون‌گذاری شده در شبیه، به صورت رابطه‌ای خطی شامل: مقدار تخصیص، حجم ذخیره‌ی مخزن، آبدهی ورودی به سد و مقدار افت یا تراز آب زیرزمینی فرض شده است. حال آن‌که به سبب وجود تنها رابطه‌ی خطی، امکان وجود سایر روابطی که به هر شکل ریاضی دیگر ارتباط میان منابع و مصارف را برقرار کنند، وجود ندارد. برنامه‌ریزی ژنتیک<sup>۵</sup> (GP) یک روش محاسباتی تکاملی

1- embedding

2- historical

3- synthetic

4- decomposition algorithm

5- genetic programming

6- sequential GA

7- nondominated sorting GA

بهنجار شده مقادیر نیاز از مقادیر آب تخصیص یافته مطابق رابطه‌ی (۱) در نظر گرفته شده است:

$$\text{Min. } Z = \sum_{i=1}^I w_i \sum_{t=1}^T \left( \frac{D_{i,t} - R_{i,t}}{D_{i,t}} \right)^2 \quad (1)$$

که در آن  $I$  و  $T$  به ترتیب تعداد نیازها و دوره‌های بهره‌برداری و  $D_{i,t}$  و  $R_{i,t}$  به ترتیب مقادیر حجم نیاز و تخصیص به  $i$ امین مصرف‌کننده در دوره  $t$  و  $w_i$  ضریب وزنی مصرف‌کنندگان می‌باشند. مهمترین رابطه‌ی بهره‌برداری از مخزن سطحی رابطه‌ی پیوستگی به صورت زیر می‌باشد:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - RS_t - SP_t - Loss_t \quad (2)$$

که در آن  $S_t$  و  $S_{t+1}$  به ترتیب حجم ذخیره‌ی مخزن در ابتدا و انتهای دوره‌ی  $t$ ،  $Q_t$  حجم جریانهای ورودی به مخزن در دوره‌ی  $t$  اعم از بارش و آبدهی رود،  $RS_t$  حجم رهاسازی از مخزن در دوره‌ی  $t$ ،  $SP_t$  حجم سرریز از مخزن در دوره‌ی  $t$  و  $Loss_t$  حجم مجموعه‌ی تلفات تبخیر از مخزن در دوره‌ی  $t$  می‌باشند. سایر روابط بهره‌برداری به شرح زیرند:

$$Loss_t = F_1(Ev_t, \bar{A}_t) \quad (3)$$

$$\bar{A}_t = (A_t + A_{t+1})/2 \quad (4)$$

$$A_t = F_2(S_t) \quad (5)$$

$$S_{Min.} \leq S_t \leq S_{Max.} \quad (6)$$

که در آنها  $F_1$  تابع محاسبه‌ی حجم تبخیر در دوره‌ی  $t$ ،  $Ev_t$  ارتفاع تبخیر در دوره‌ی  $t$ ،  $\bar{A}_t$  میانگین سطح دریاچه مخزن در دوره‌ی  $t$  و  $A_t$  و  $A_{t+1}$  سطح دریاچه در ابتدای و انتهای دوره‌ی  $t$ ،  $F_2$  تابع خطی محاسبه‌ی سطح مخزن از روی حجم، و  $S_{Min.}$  و  $S_{Max.}$  به ترتیب کمینه و بیشینه‌ی حجم مخزن می‌باشند.

در تحقیقات مختلف شبیه‌سازی آبخوان به صورت توده‌ای مدنظر قرار گرفته است. بر این اساس، تغییرات تراز آب در تمامی قسمت‌های آبخوان یکسان، و تغییرات حجم آن به صورت رابطه‌ی (۷) می‌باشد:

$$\Delta V_t = In_t - Out_t + \alpha \times River_t + P_t - RG_t + \sum_{i=1}^I \beta_i (RG_{i,t} + RS_{i,t}) \quad (7)$$

بهره‌برداری خطی با متغیرهای مستقل آبدهی، حجم ذخیره‌ی مخزن، تراز آبخوان و نیاز و متغیر وابسته مقدار برداشت از سد و آبخوان، با استفاده از GA، با رعایت اولویت برداشت برای مصارف مختلف استخراج شده است. در ادامه، با استفاده از درون‌گذاری روابط بهره‌برداری بهینه به صورت روابطی بدون قالب از پیش تعیین شده‌ی ریاضی با استفاده از FLGPP، قواعد بهره‌برداری بهینه از منابع آبی محدوده کرج استخراج شده‌اند. با توجه به مقایسه‌ی نتایج حاصل از GA و FLGPP به عنوان الگوریتم‌های تکاملی، می‌توان امکان استفاده از هر یک از این ابزارهای بهینه‌سازی را در استخراج قواعد بهره‌برداری بخصوص در سامانه‌هایی که به علت وجود زیرسامانه‌ی‌های مختلف، به‌رغم ارتباط میان آنها به قواعد بهره‌برداری جداگانه احتیاج دارند، بررسی کرد.

### شبیه بهره‌برداری سامانه‌ی تلفیقی آبخوان-سد

شبیه‌های بهره‌برداری تلفیقی به انواع شبیه‌های ریاضی استفاده همزمان از منابع آب سطحی و زیرزمینی گفته می‌شود که به نحوی ارتباط بین این منابع و مصرف‌کننده را اعم از ارتباط آبی، ترتیب اولویت‌های مصرف‌کنندگان مختلف از منابع و یا محدودیت‌ها، و فراسنج‌های کمی و کیفی را در نظر گرفته باشند. نیاز به استفاده از روش بهره‌برداری تلفیقی غالباً در مناطقی احساس می‌شود که تأمین مصارف از یکی از منابع آب سطحی یا بخصوص زیرزمینی به واسطه‌ی مشکلات اجرایی، و یا محدودیت‌های فیزیکی، که جهت استحصال این منابع وجود دارد، به تنهایی توجیه اقتصادی نداشته، و یا امکان‌پذیر نمی‌باشد. با توجه به موارد مطرح شده، بایستی ابتدا شبیه و روابط حاکم بر منابع آب سطحی و زیرزمینی شناخته شده، سپس ارتباط بین آنها و مصرف‌کننده مشخص گردد. در نهایت، توجیه بهره‌برداری تلفیقی نسبت به استفاده‌ی مجزا از منابع آب سطحی و زیرزمینی بررسی شود. در این بخش، با توجه به وجود سد و آبخوان به عنوان اجزای سامانه‌ی تلفیقی، به تبیین روابط حاکم بر آنها، همچنین تابع هدف و قیودات بهینه‌سازی پرداخته خواهد شد.

با توجه به نیازهای مختلف موجود در منطقه‌ی مطالعاتی، هدف کمینه‌سازی مجموع مربعات اختلاف

مطابق رابطه‌ی (۱۲)، در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، تراز ابتدایی دوره‌ی بهره‌برداری ( $H_1$ ) برابر با تراز مشاهداتی گزارش شده در دوره‌ی اول در نظر گرفته شده است.

$$H_1 - H_{T+1} \leq \gamma \quad (12)$$

هم‌چنین، می‌توانند قواعد بهره‌برداری میزان برداشت از منابع با استفاده از توابع کلی به شکل روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه شوند:

$$RS_t = Z_1(S_t, Q_t, H_t, D_t) \quad (13)$$

$$RG_t = Z_2(S_t, Q_t, H_t, D_t) \quad (14)$$

توابع  $Z_1$  و  $Z_2$  به ترتیب قواعد بهره‌برداری از سد و آبخوان می‌باشند که با کاربرد GA به صورت خطی و به‌وسیله‌ی FLGGP به صورت رابطه‌ای ریاضی، اما بدون قالب خطی و یا غیرخطی مشخص و از پیش تعیین شده، به‌دست می‌آیند. لازم به ذکر است، گرچه بایستی مقادیر تخصیص از هر یک از منابع به مصارف مختلف مشخص شود، اما قواعد بهره‌برداری برای منابع استخراج شده است. بر این اساس، پس از مشخص شدن برداشتها از منابع سطحی و زیرزمینی، مجموع آب در دسترس، یعنی  $RS_t + RG_t$ ، برآورد می‌گردد. در ادامه، مصارف شهری و کشاورزی با توجه به اولویت تأمین نیاز آنها از آب موجود برداشت خواهند کرد. نکته‌ی حائز اهمیت آن است که چنانچه هر یک از مصارف امکان استفاده از یکی از منابع سطحی و یا زیرزمینی را نداشته باشد، مقدار تخصیص از این منبع به نیاز مربوطه صفر خواهد بود. هم‌چنین، می‌توان برخی متغیرهای مستقل موجود را در روابط (۱۳) و (۱۴) در رابطه‌ی بهره‌برداری در نظر گرفت. چنانچه روابط بهره‌برداری به صورت خطی و مطابق روابط (۱۵) و (۱۶) در نظر گرفته شوند، مقادیر مجموعه‌ی ضرایب بهینه،  $\{a_1, \dots, a_{10}\}$ ، به عنوان متغیرهای تصمیم به‌وسیله‌ی NLP و GA محاسبه خواهند شد:

$$RS_t = a_1 Q_t + a_2 S_t + a_3 H_t + a_4 D_t + a_5 \quad (15)$$

$$RG_t = a_6 Q_t + a_7 S_t + a_8 H_t + a_9 D_t + a_{10} \quad (16)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار برداشت از سد و آبخوان به صورت ضرایبی از مقدار حجمیابی از جریانهای ورودی به مخزن و ذخیره‌ی مخزن در ابتدای دوره‌ی  $t$  به عنوان شاخصه‌های شرایط موجود سد، و تراز آبخوان در

که در آن  $\Delta V_t$  تغییرات حجم آبخوان در دوره‌ی  $t$ ،  $In_t$  و  $Out_t$  به ترتیب حجم جریان زیرزمینی ورودی به و خروجی از آبخوان در دوره‌ی  $t$ ،  $\alpha$  جزء میزان نفوذ از رود به آبخوان،  $River_t$  حجم جریان رود در دوره‌ی  $t$ ،  $P_t$  حجم بارش نفوذ یافته به آبخوان در دوره‌ی  $t$ ،  $RG_t$  حجم برداشت از آبخوان در دوره  $t$ ،  $\beta_i$  جزء آب برگشتی به آبخوان از مقادیر آب تخصیص یافته با نیاز  $i$ ،  $RS_{it}$  و  $RG_{it}$  به ترتیب مقادیر آب تخصیص یافته از منابع سطحی و زیرزمینی به نیاز  $i$  می‌باشند. بر اساس رابطه‌ی (۷)، درصدی از مقادیر تخصیص به نیازها در هر دوره، در همان دوره به سامانه‌ی آبخوان بازمی‌گردد. در شرایط واقعی، مدت زمان بازگشت آب به آبخوان و تأثیر آب بر تغییرات حجم آبخوان در همان دوره‌ی برداشت اتفاق نمی‌افتد؛ لذا، در این تحقیق، جهت شبیه‌سازی آبخوان در شرایطی نزدیک به واقعیت، و در نظر گرفتن فرصت مناسب جهت بازگشت آب به سامانه‌ی آبخوان، تغییرات حجم با یک گام زمانی (یک ماه) تأخیر برای برگشت آب به سامانه‌ی آبخوان مطابق رابطه‌ی (۸) در نظر گرفته شده است:

$$\Delta V_t = \begin{cases} In_t - Out_t + \alpha \times River_t + P_t - RG_t & t = 1 \\ In_t - Out_t + \alpha \times River_t + P_t - RG_t + \sum_{i=1}^I \beta_i (RG_{i,t-1} + RS_{i,t-1}) & t > 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$R_{i,t} = RG_{i,t} + RS_{i,t} \quad (9)$$

تغییرات و بار آبی ناشی از این تغییرات حجم در آبخوان در هر دوره به ترتیب با استفاده از روابط زیر استخراج می‌شوند:

$$\Delta H_t = \frac{\Delta V_t}{A.S_G} \quad (10)$$

$$H_{t+1} = H_t + \Delta H_t \quad (11)$$

که در آنها  $A$  میانگین سطح آبخوان،  $S_G$  ضریب ذخیره‌ی آبخوان و  $H_t$  و  $H_{t+1}$  به ترتیب تراز آبخوان در ابتدا و انتهای دوره‌ی  $t$  می‌باشند.

جهت حفظ پایداری آبخوان در انتهای یک افق برنامه‌ریزی منابع آب، و جلوگیری از افت بیش از حد تراز آن بر اثر برداشت بی‌رویه، اختلاف تراز آبخوان در ابتدا و انتهای افق بهره‌برداری کمتر از یک مقدار آستانه‌ی ( $\gamma$ )،

### برنامه‌ریزی غیرخطی

در ریاضیات، NLP فرایند حل یک شبیه بهینه‌سازی غیرخطی است. شبیه بهینه‌سازی غیرخطی، شبیهی است که در آن تابع هدف یا محدودیت‌های شبیه خطی نباشند. این روش حل با استفاده از نرم‌افزارهای مختلفی نظیر GAMS LINGO<sup>۱</sup> قابل ارائه می‌باشد. در این تحقیق، از LINGO، و به عنوان ابزار حل مسأله NLP جهت استخراج جواب بهینه بدون قاعده‌ی بهره‌برداری استفاده شده است. این نرم‌افزار به صورت پیش‌فرض از برنامه‌ریزی خطی پی در پی<sup>۲</sup> (SLP) برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی غیرخطی استفاده کند. SLP یک روش بهینه‌سازی است که با تقریب‌های خطی درجه‌ی یک متوالی به بهینه‌سازی مسائل غیرخطی می‌پردازد. توضیحات بیش‌تر در خصوص معرفی این روش به‌وسیله‌ی بازارا و همکاران (۱۹۹۳) ارائه شده‌اند.

### برنامه‌ریزی ژنتیک با موقعیت ثابت ژن

GA یک الگوریتم بهینه‌سازی بر پایه‌ی جستجوی تصادفی است که قادر به یافتن متغیرهای عددی به عنوان متغیرهای عددی می‌باشد. از سوی دیگر، روابط حاصل از GP با ساختار درختی دارای پیچیدگیهای بسیاری است که از کاربردی بودن این روابط می‌کاهد. لذا، در این تحقیق، با استفاده از مزایای GA، و به منظور کاستن مشکلات ناشی از استفاده‌ی GP، روشی با نام FLGGP توسعه داده شده است که امکان استخراج قواعد بهره‌برداری را از سامانه‌ی سد-آبخوان فراهم می‌آورد.

FLGGP یک روش محاسباتی است که به‌رغم وجود شباهت‌های بسیار زیاد با GA مانند فرایند جستجوی تصادفی و تکراری، هم‌چنین وجود عملگرهای تزویج و جهش، تفاوت‌هایی را نیز با آن دارد. در GA متغیرهای تصمیم در قالب ژن‌های کروموزوم‌ها تنها به صورت متغیرهای تصمیم عددی در فرایند جستجو وارد می‌شوند. اما چنانچه هدف استخراج یک رابطه‌ی ریاضی و نه تنها ضرایب آن باشد، این امکان وجود دارد که به غیر از اعداد، عملگرها و توابع ریاضی نیز به عنوان متغیرهای تصمیم در فرایند بهینه‌سازی شرکت جویند. در این

ابتدای دوره‌ی  $t$  به عنوان شاخصه‌های شرایط موجود آبخوان در نظر گرفته می‌شود.

در صورتی که روابط بهره‌برداری با قواعد حاصل از FLGGP، دو رابطه بهره‌برداری بدون ساختار ریاضی خطی و یا غیرخطی از پیش تعیین شده باشند، علاوه بر ضرایبی که همانند روابط خطی امکان وجود آنها در قاعده‌ی بهره‌برداری وجود دارد، نوع عملگرها و توابع ریاضی این رابطه نیز به عنوان متغیرهای تصمیم می‌باشند. به عنوان مثال، دو رابطه‌ی (۱۷) و (۱۸) نمونه‌هایی از روابط بهره‌برداری حاصل از FLGGP می‌باشند:

$$RS_t = \left( b_1 \sin(Q_t) \times b_2 \cos(S_t) + \right)^{b_5} \quad (17)$$

$$RG_t = \left( \frac{b_5 \exp(Q_t) \times b_6 \cos(S_t)}{b_7 \sin(H_t) + D_t - b_8} \right)^{b_9} \quad (18)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مجموعه‌ای از اعداد، عملگرها و توابع ریاضی به ترتیب شامل مجموعه‌های  $\{b_1, \dots, b_9\}$ ،  $\{+, -, \times, \div\}$  و  $\{\sin, \cos, \exp\}$  در قواعد بهره‌برداری ظاهر شده است. در این روابط، وجود عملگرها و توابع ریاضی انعطاف‌پذیری بیشتری را نسبت به روابط خطی به وجود می‌آورد که امکان برآورد مناسب‌تری میان مقادیر برداشت از منابع با توجه به  $Q_t$ ،  $S_t$ ،  $H_t$  و  $D_t$  وجود خواهد داشت.

### ابزار بهینه‌سازی

از آن‌جا که در این تحقیق هدف استخراج قواعد بهره‌برداری از مخزن در قالب روابط ریاضی می‌باشد، از دو ابزار بهینه‌سازی NLP به عنوان یک روش بر پایه‌ی جستجوی شیب و GA و FLGGP بر پایه الگوریتم تکاملی استفاده شده است. GA و FLGGP به ترتیب قادر به استخراج ضرایب بهینه‌ی روابط مشخص ریاضی، و یافتن کل رابطه‌ی بهره‌برداری صرف‌نظر از نوع رابطه‌ی ریاضی با استفاده از عملگرها و توابع ریاضی مختلف می‌باشند. به این منظور، به تفکیک معرفی هرچند اجمالی از روش‌های مورد استفاده در این تحقیق ارائه خواهد شد.

<sup>۱</sup>-general algebraic modeling system

<sup>۲</sup>-successive linear programming

### مطالعه‌ی موردی

توسعه و رشد گروه شهرهای تهران و کرج در دهه‌های اخیر منجر به افزایش قابل توجه نیازهای شهری، و عدم توازن بین منابع آبی موجود و مصارف مختلف شده است. به منظور تأمین نیاز شرب شهر تهران، تاکنون تلاشهای زیادی برای استفاده از توان‌های سطحی منطقه نظیر انتقال آب از سد کرج به تهران صورت گرفته است. در محدوده‌ی تهران و کرج، مهمترین منبع سطحی تأمین آب سد کرج (امیرکبیر) می‌باشد که در ۶۳ کیلومتری شهر تهران و بر روی رود کرج واقع شده است. مساحت حوضه‌ی آبخیز سد امیرکبیر ۸۴۶ کیلومترمربع، و متوسط آورد سالانه‌ی آن در حدود ۴۱۵ میلیون مترمکعب می‌باشد. از آنجا که سهم قابل توجهی از آب سد کرج- در حدود ۳۴۰ میلیون مترمکعب - سالانه به تهران منتقل می‌گردد، به این ترتیب این سد، به عنوان تنها منبع سطحی منطقه به تنهایی جواب‌گوی تأمین سایر نیازها شامل نیاز شهری و کشاورزی کرج نبوده، و مخزن آب زیرزمینی نیز بایستی به صورت همزمان جهت تأمین نیازهای مختلف مورد بهره‌برداری قرار گیرد. اولویت برداشت آب از این سد به ترتیب برای نیاز شهری (شرب) تهران، شهری کرج و کشاورزی محدوده‌ی کرج می‌باشد. اما متوسط آورد سالانه‌ی این سد، در حدود ۵۴ درصد متوسط سالانه‌ی نیازهای محدوده مطالعاتی که برابر با ۷۶۷ میلیون مترمکعب است، می‌باشد. این نیازها به ترتیب ۳۴۰، ۲۰۰ و ۲۲۷ میلیون مترمکعب برای نیازهای شهری تهران، شهری کرج و کشاورزی کرج است. لذا، جهت تأمین نیازهای مختلف استفاده از منابع آب زیرزمینی ضروری می‌باشد. آبخوان کرج به عنوان تنها منبع آب زیرزمینی موجود در منطقه، در محدوده‌ی نیازهای شهری و کشاورزی کرج قرار داشته و امکان تأمین بخشی از این مصارف از آن وجود دارد، بنابراین، در محدوده‌ی مطالعاتی، بهره‌برداری تلفیقی آبخوان- سد جهت تأمین نیازهای شهری تهران و کرج و کشاورزی کرج در نظر گرفته شده است. شکل ۲ نقشه‌ای را از منابع و مصارف محدوده مطالعاتی نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شهر تهران به علت قرار گرفتن در خارج از محدوده‌ی آبخوان، امکان استفاده از آب

حالت، می‌توان از FLGGP جهت استخراج رابطه مناسب استفاده نمود که در آن هر ژن یک کروموزوم معرف یک عضو از مجموعه‌هایی با نام انتهایی<sup>۱</sup> شامل اعداد و متغیرها و توابع<sup>۲</sup> شامل عملگرها و توابع ریاضی می‌باشد. در FLGGP، کروموزوم‌هایی با تعداد ژنهای ثابت، که هر بخش از آن معرف یک عبارت ریاضی مرتبط به یک متغیر است، بر اساس نوع مسأله در نظر گرفته می‌شود.

به عنوان مثال، چنانچه یک متغیر ورودی و خروجی به ترتیب  $x$  و  $y$  مدنظر باشد، عبارتی همانند  $y = [a(\sin((x)^b)) + c]^d$  در هر یک کروموزوم تولید خواهد شد. شکل ۱ موقعیت ژن‌های مختلف را در یک کروموزوم در FLGGP نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شش ژن از مجموعه‌ی ضرایب  $\{a, b, c, d\}$ ، تابع  $\sin$  و عملگر  $+$ ، در این کروموزوم وجود دارند. رابطه‌ی فوق یک عبارت دوجمله‌ای است که می‌تواند با توجه به انواع اعداد و توابع خطی، غیرخطی، نمایی و توانی را ارائه دهد؛ بنابراین، حتی قالب خطی را که در GA در نظر گرفته می‌شود، و تنها ضرایب آن بهینه خواهد شد نیز در برمی‌گیرد. چنانچه استخراج رابطه با بیش از یک متغیر مدنظر باشد، طول کروموزوم بیشتر، و امکان قرارگیری یک عبارت دیگر مانند  $a(\sin((x)^b))$  فراهم می‌گردد.

سایر کروموزوم‌های جمعیت اولیه نیز روابط دیگر ریاضی را معرفی کرده و به این ترتیب، مجموعه‌ای شامل روابط مختلف تشکیل خواهد شد. مطابق هر رابطه‌ی ریاضی یا کروموزوم، یک تابع هدف محاسبه می‌شود. از این مرحله به بعد مراحل جستجوی تکاملی FLGGP دقیقاً مطابق GA می‌باشد. به بیان دیگر، با استفاده از انتخاب، تزویج و جهش جمعیت جدید برای نسل بعدی تشکیل خواهد شد. سپس کروموزوم‌های ساخته شده در نسل بعدی روابط جدیدی را معرفی نموده و فرایند جستجویی که توضیح داده شد آن قدر ادامه می‌یابد تا به بیشینه‌ی تعداد تکرار مورد نظر حاصل گردد.

<sup>1</sup>- terminal

<sup>2</sup>- functions

برابر ۰/۵ متر بوده است. افق برنامه‌ریزی شامل ۱۵ سال، و به صورت ماهانه مطابق با آمار سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۵ می‌باشد، که تراز اولیه‌ی آبخوان مطابق شرایط گزارش شده سال ۱۳۷۰، و برابر با ۱۱۶۳ متر در نظر گرفته شده است.

زیرزمینی این منطقه را نداشته و از سد کرج جهت تأمین بخشی از نیاز خود استفاده می‌کند. جدول ۱ نیازهای مختلف موجود در محدوده‌ی مطالعاتی را ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که درصد آب برگشتی به آبخوان از مصارف شهری و کشاورزی کرج به ترتیب برابر با ۵۰ و ۴۰ درصد در نظر گرفته شده است. هم‌چنین، مقدار  $\gamma$

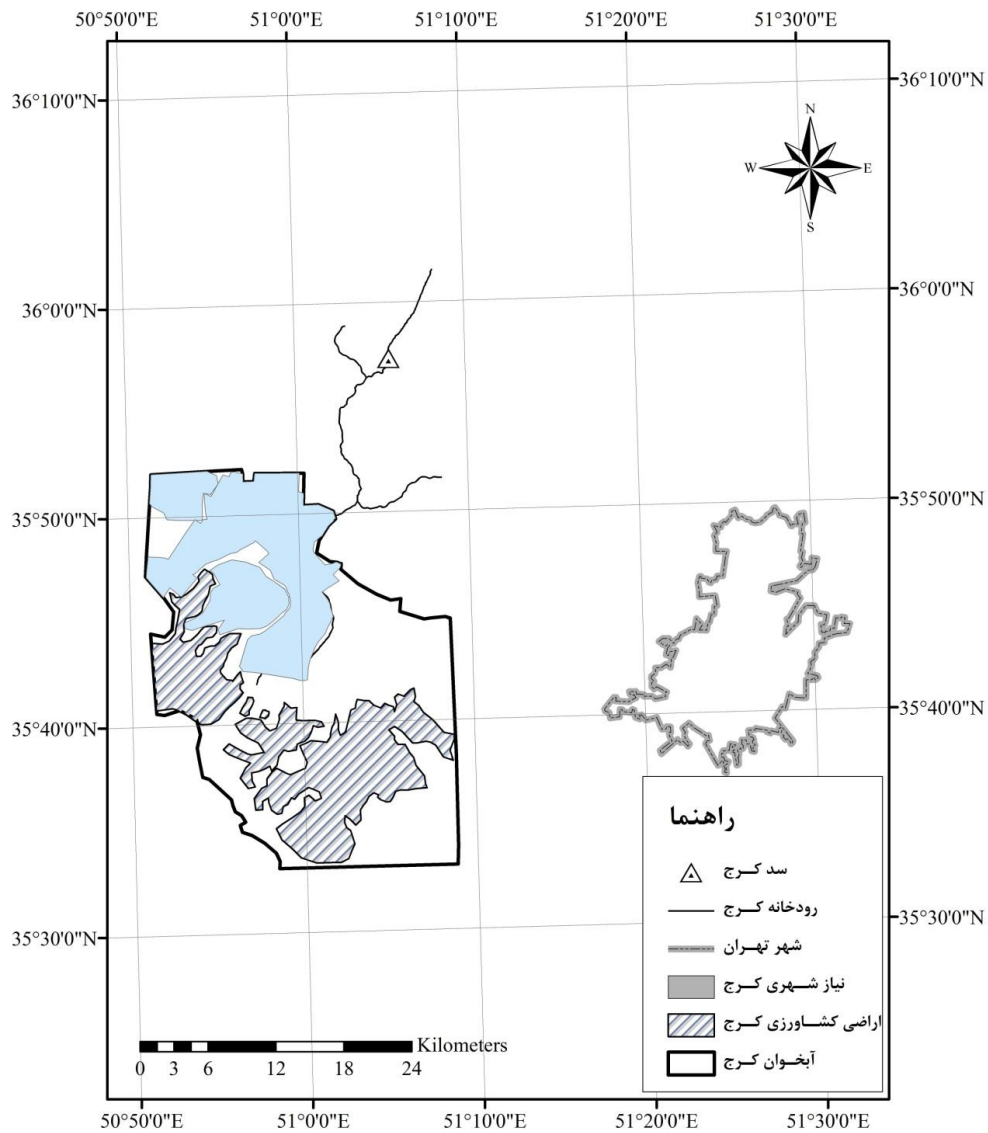
جدول ۱- حجم نیاز ماهانه‌ی مورد مطالعه (میلیون مترمکعب) (مهندسین مشاوره‌ی آب، ۱۳۸۶).

ماه	شرب تهران	شرب کرج	کشاورزی کرج	مجموع
مهر	۳۸/۷۵	۸/۷۶	۵۵/۱۷	۹۲/۶۸
آبان	۲۷/۷۲	۱۶/۳۲	۲۴/۷۶	۶۸/۸۰
آذر	۲۶/۴۱	۱۸/۱۶	۹/۰۳	۵۳/۶۰
دی	۲۷/۲۰	۱۹/۲۶	۰/۶۳	۴۷/۰۹
بهمن	۲۴/۱۲	۱۶/۰۰	۰/۰۰	۴۰/۱۸
اسفند	۲۵/۷۷	۱۹/۹۵	۱/۴۹	۴۷/۲۱
فروردین	۲۷/۴۹	۱۸/۲۸	۱/۶۴	۴۷/۴۱
اردیبهشت	۲۸/۵۸	۱۷/۴۰	۲/۲۰	۴۸/۱۸
خرداد	۳۰/۳۶	۱۴/۴۳	۱۴/۹۶	۵۹/۷۵
تیر	۳۱/۴۳	۱۸/۰۹	۲۸/۶۹	۷۸/۲۱
مرداد	۳۱/۲۶	۱۶/۴۰	۴۰/۷۵	۸۸/۴۱
شهریور	۳۰/۹۱	۱۶/۷۵	۴۷/۴۹	۹۵/۱۵
مجموع	۳۴۰/۰۰	۱۹۹/۸۰	۲۲۶/۸۱	۷۶۶/۶۷

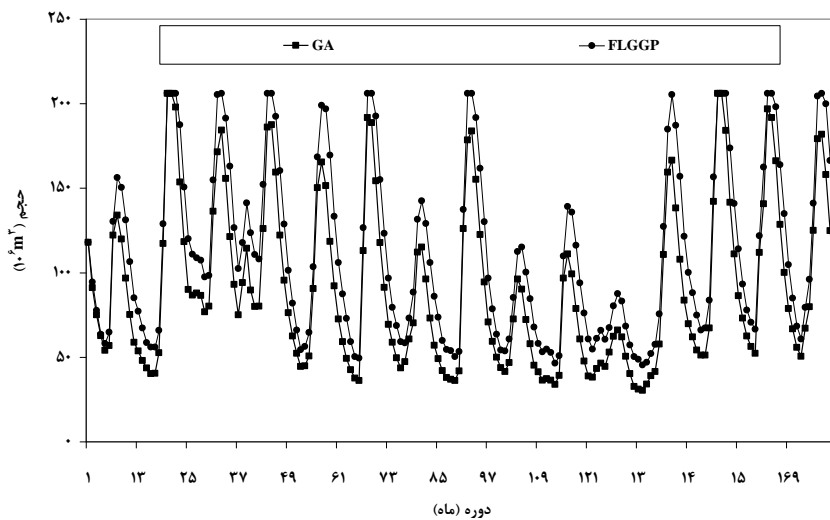
1	2	3	4	5	6
$a$	$\sin$	$b$	$+$	$c$	$d$

شکل ۱- نمایش رابطه‌ی ریاضی  $y = [a(\sin((x)^b)) + c]^d$  در قالب کروموزوم FLGGP.

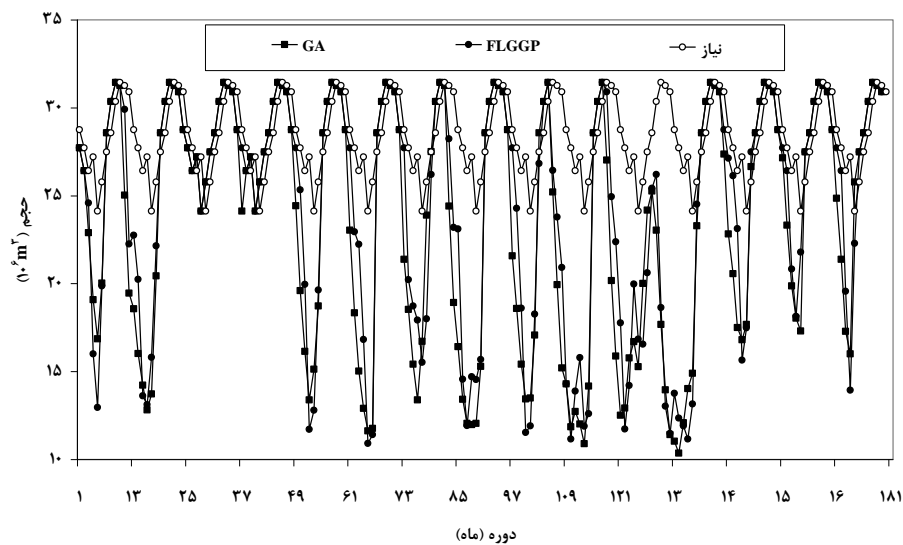




شکل ۲- محدوده‌ی مورد مطالعاتی سامانه‌ی تلفیقی.



شکل ۳- حجم ذخیره‌ی مخزن با استفاده از قواعد بهره‌برداری GA و FLGGP.



شکل ۴- مقدار تخصیص از سد کرج به نیاز شهر تهران.

می‌باشد؛ به این ترتیب، ده متغیر تصمیم، شامل ضرایب این روابط بایستی به صورت بهینه به دست آید. با استفاده از این قواعد بهره‌برداری، پس از استخراج مقدار رهاسازی از مخزن در هر دوره ( $RS_t$ )، ابتدا آب به نیاز شهر تهران تخصیص می‌یابد، و در صورت وجود آب مازاد این مقدار جهت استفاده به کرج منتقل خواهد شد. از سوی دیگر، در هر دوره مقدار برداشت از آب زیرزمینی ( $RG_t$ ) هم وجود دارد. لذا، این مقدار با مازاد آب سطحی جمع شده، و در ابتدا مصرف شرب کرج را تأمین کرده، و در صورت تأمین ۱۰۰ درصدی و وجود مازاد بر نیاز شرب، آب به نیاز کشاورزی نیز تخصیص می‌یابد.

با توجه به ماهیت جستجوی تصادفی GA، و جهت استخراج جواب مناسبتر، ده بار اجرای مختلف از برنامه با ۱۰ کروموزوم و ۱,۰۰۰ نسل گرفته شده است که نتایج توابع هدف و فراسنج‌های آماری آن مطابق جدول ۲ می‌باشند. بر اساس نتایج به دست آمده، بهترین (کمترین) مقدار تابع هدف برابر با ۱,۱۳۸/۵۱ بوده که می‌توان در آن مقادیر برداشت در دوره‌های مختلف را با قواعد زیر محاسبه کرد:

$$RS_t = 0.260(Q_t) + 0.282(S_t) + 0.023(H_t - 1000) + 0.036(D_t) + 1.960 \quad (19)$$

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

## کاربرد GA و FLGPP در بهره‌برداری تلفیقی سامانه‌ی آبخوان-سد

در این قسمت ابتدا بهره‌برداری بلندمدت از سامانه‌ی آبخوان-سد بدون در نظر گرفتن قاعده‌ی بهره‌برداری به عنوان بهترین حالت ممکن موجود برای بهره‌برداری سامانه‌ی تلفیقی، با استفاده از NLP و نرم‌افزار LINGO صورت خواهد گرفت.

چنانچه بهره‌برداری بلندمدت، بدون در نظر گرفتن قاعده‌ی بهره‌برداری از سد و آبخوان، و با استفاده از NLP و نرم‌افزار LINGO انجام شود، مقدار تابع هدف برابر با ۱,۰۰۱/۸۹ خواهد شد.

هرچند استفاده از NLP و بهره‌برداری بلندمدت بدون قاعده بهره‌برداری با استفاده از گروه زمانی، برآورد مناسبی از مقادیر برداشت و تغییرات منابع را در بهترین حالت خود گزارش می‌دهد، جهت بهره‌برداری زمان واقعی بایستی یک قاعده‌ی بهره‌برداری، که بتواند به صورت یک رابطه درون شبیه قرار داده شود، در حین بهینه‌سازی استخراج گردد. در ادامه، به بررسی کارایی دو ابزار برنامه‌ریزی تکاملی، GA و FLGPP، در ارائه‌ی قاعده بهره‌برداری پرداخته خواهد شد.

در استفاده از GA، باز هم هدف استخراج دو قاعده‌ی خطی بهره‌برداری مطابق روابط (۱۵) و (۱۶)

به منظور مقایسه مناسب‌تر نتایج، در جدول ۴، مقادیر تابع هدف و معیارهای کارایی بهره‌برداری بلندمدت فاقد قاعده‌ی بهره‌برداری، بهره‌برداری با قواعد خطی و ساختار از پیش تعیین نشده به ترتیب با استفاده از NLP، GA و FLGGP ارائه شده‌اند.

بر اساس نتایج به‌دست آمده، اعتمادپذیری زمانی تأمین نیاز شهر تهران با قاعده‌ی FLGGP، ۱۰/۳۵ درصد بیش‌تر (بهتر) از همین مقدار با استفاده از GA می‌باشد، اما اعتمادپذیری حجمی این دو قاعده تفاوت کمتری با یکدیگر دارند، بطوری‌که FLGGP تنها ۳/۳۷ درصد بهتر از GA بوده است. به بیان دیگر، گرچه تعداد دوره‌هایی که نیاز شهر تهران به صورت کامل تأمین شده است در FLGGP بیش‌تر از GA می‌باشد، اما مقدار این اختلاف چشم‌گیر نیست. در خصوص شهر کرج نیز، FLGGP با یافتن قاعده‌ی منعطف‌تر توانسته است ۱۹/۰۲ درصد اعتمادپذیری حجمی بیش‌تری (بهتری) را ارائه نماید، گرچه این حجم بیش‌تر آب، با تأمین صددرصدی نیاز در دوره‌های کمتری همراه بوده که سبب کاهش ۱۰/۰۰ درصدی اعتمادپذیری زمانی FLGGP نسبت به GA شده است. نکته‌ی قابل توجه دیگر، آسیب‌پذیری کمتر FLGGP نسبت به GA می‌باشد که در شکل ۵ نیز قابل مشاهده است. اما نیاز کشاورزی کرج با اعتمادپذیری حجمی ۵۱/۳۲ درصد، حجم آب را به صورت مناسب‌تری در دوره‌های مختلف توزیع نموده است. همان‌طور که در شکل ۶ نیز نمایش داده شده، GA در برخی دوره‌ها میزان نیاز را به صورت کامل تأمین نموده، حال آن‌که با کمبود بیشتری در سایر دوره‌ها همراه بوده است، اما FLGGP گرچه در هیچ دوره‌ای نیاز را به صورت ۱۰۰ درصدی تأمین نکرده است (چنان‌که مقدار اعتمادپذیری زمانی آن صفر شده است)، اما متوسط درصد تأمین بیش‌تری و در واقع اعتمادپذیری حجمی بیش‌تری را ارائه کرده است.

$$RG_t = 0.003(Q_t) + 0.059(S_t) + 0.013(H_t - 1000) + 0.097(D_t) + 0.033 \quad (20)$$

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

گرچه ضرایب روابط خطی (۱۹) و (۲۰) به صورت بهینه با استفاده از GA به‌دست آمده‌اند، اما این رابطه قالب از پیش تعیین شده و مشخص خطی را برای بهره‌برداری در نظر گرفته است، در صورتی‌که امکان کاهش (بهبود) تابع هدف با استفاده از سایر روابط ریاضی در قالب قواعد بهره‌برداری وجود دارد، لذا، نتایج ۱۰ اجرای مختلف برنامه با استفاده از FLGGP استخراج گردید. جدول ۳ نتایج پنج بار اجرای برنامه با ۱۰ کروموزوم و ۱,۰۰۰ تکرار را گزارش می‌کند.

بر اساس نتایج جدول ۳، کمترین (بهترین) مقدار تابع هدف برابر با ۲'۱۱۵/۸۵ بوده که ۳۲/۵۸ درصد کمتر (بهتر) از مقدار متناظر حاصل از GA بوده است. همچنین، به دلیل تنوع روابطی که به‌وسیله‌ی FLGGP نسبت به GA تولید می‌شود، ضریب تغییرات توابع هدف به‌دست آمده با استفاده از GA، ۴۳/۴۸ درصد کمتر (بهتر) از مقدار متناظر FLGGP می‌باشد. قواعد متناظر با کمترین مقدار تابع هدف به شرح زیراند:

$$RS_t = \left\{ \begin{array}{l} 0.524 \cos[(Q_t)^{0.380}] + \\ 0.888(S_t)^{0.655} \\ -1.222(H_t - 1000)^{1.381} \\ + 0.009 \sin[(D_t)^{0.86}] + 1.965 \end{array} \right\}^{1.215} \quad (21)$$

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

$$RG_t = \left\{ \begin{array}{l} 0.361 \cos[(Q_t)^{0.695}] - \\ 1.800 \sin[(S_t)^{0.421}] \\ + 1.372(H_t - 1000)^{0.149} \\ + 0.201 \cos[(D_t)^{1.850}] + 1.599 \end{array} \right\}^{1.514} \quad (22)$$

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

جدول ۲- نتایج توابع هدف GA در بهره‌برداری تلفیقی.

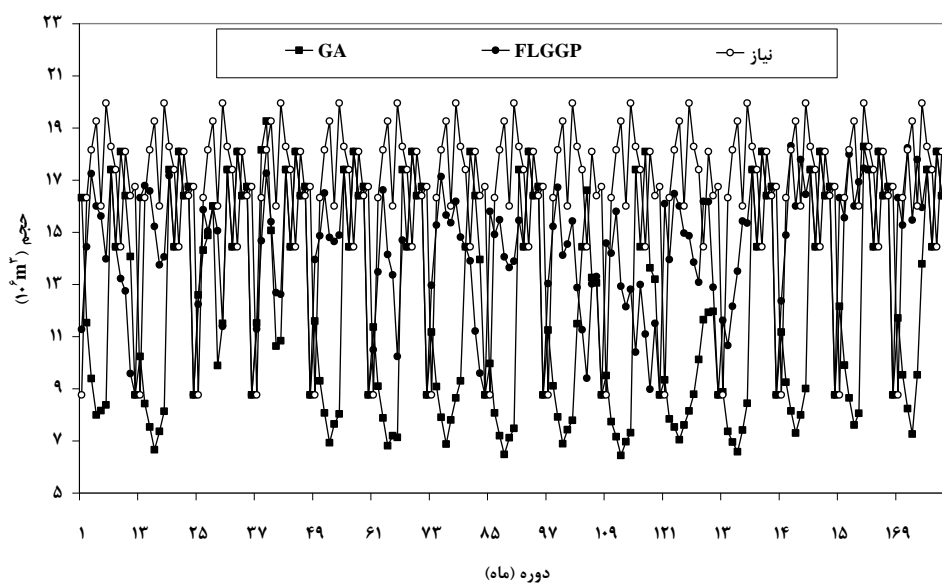
شماره‌ی اجرا	۱	۲	۳	۴	۵
تابع هدف	۳,۱۳۸/۵۱	۴,۳۷۳/۴۹	۳,۳۷۲/۹۷	۳,۷۷۰/۳۶	۳,۷۲۰/۶۹
فراسنج‌های آماری	کمینه	میانگین	بیشینه	انحراف معیار	ضریب تغییرات
	۳,۱۳۸/۵۱	۳,۶۷۵/۲۱	۴,۳۷۳/۴۹	۴۶۸/۵۴	۰/۱۳

جدول ۳- نتایج توابع هدف FLGGP در بهره‌برداری تلفیقی.

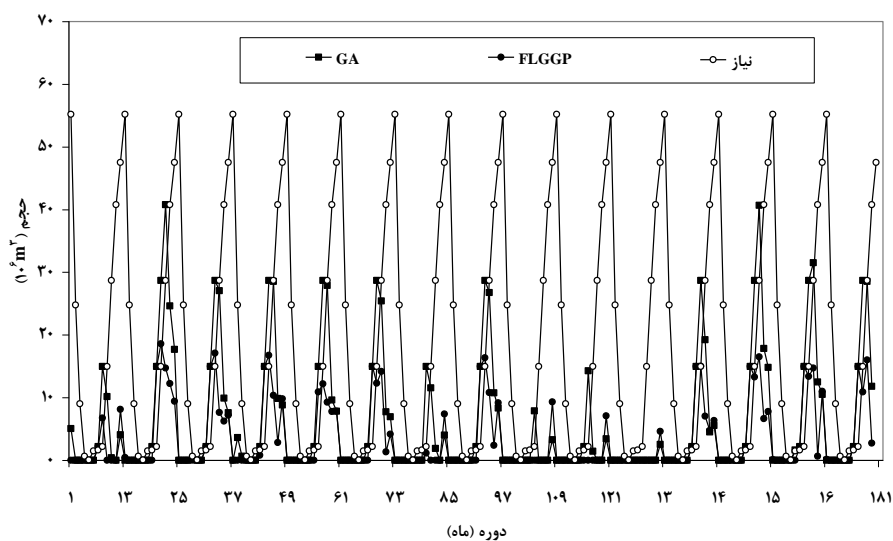
شماره‌ی اجرا	۱	۲	۳	۴	۵
تابع هدف	۲,۱۱۵/۸۵	۳,۵۳۴/۴۶	۲,۷۶۴/۸۹	۳,۴۰۰/۶۸	۲,۲۱۵/۷۶
فراسنج‌های آماری	کمینه	میانگین	بیشینه	انحراف معیار	ضریب تغییرات
	۲,۱۱۵/۸۵	۲,۸۰۶/۳۳	۳,۵۳۴/۴۶	۶۵۳/۹۶	۰/۲۳

جدول ۴- مقایسه‌ی بهترین نتایج حاصل از بهره‌برداری بلندمدت و زمان حقیقی برای شبیه‌سازی توده‌ای.

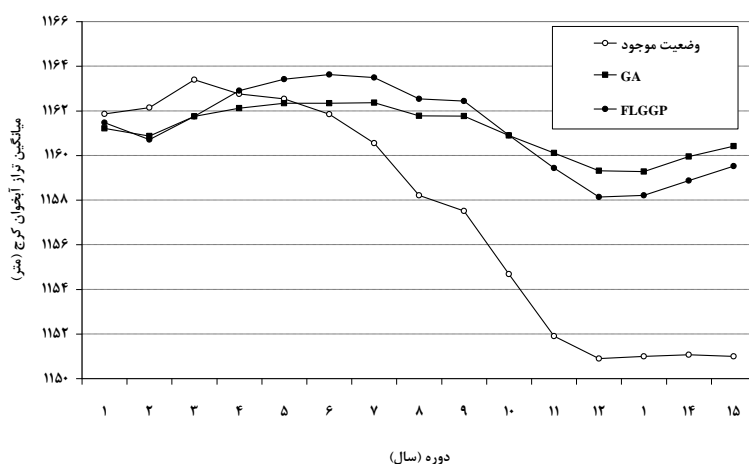
روش بهره‌برداری	تابع هدف	مصرف‌کننده	اعتماد‌پذیری زمانی	اعتماد‌پذیری حجمی	برگشت‌پذیری	آسیب‌پذیری
NLP	۱,۰۰۱/۸۹	شهر تهران	۹۳/۸۵	۹۵/۳۴	۰/۴۵	۳۰/۹۱
		شهر کرج	۹۶/۰۹	۹۶/۰۹	۱/۰۰	۱۹/۹۵
		کشاورزی کرج	۴/۴۷	۵۳/۹۸	۰/۰۱۱	۵۵/۱۷
GA	۳,۱۳۸/۵۱	شهر تهران	۴۸/۶۰	۸۲/۰۸	۰/۱۴۱	۱۷/۳۵
		شهر کرج	۴۴/۶۹	۷۳/۹۶	۰/۲۱۲	۱۲/۹۹
		کشاورزی کرج	۲۱/۲۳	۲۸/۸۵	۰/۱۰۶	۵۲/۶۶
FLGGP	۲,۱۱۵/۸۵	شهر تهران	۵۳/۶۳	۸۵/۱۳	۰/۱۴۶	۱۷/۸۸
		شهر کرج	۴۰/۲۲	۸۸/۰۳	۰/۲۰۶	۸/۶۹
		کشاورزی کرج	۰/۰۰	۵۱/۳۲	۰/۰۰	۵۱/۰۱



شکل ۵- مقدار تخصیص از سد و آبخوان کرج به نیاز شهر کرج.



شکل ۶- مقدار تخصیص از سد و آبخوان کرج به نیاز کشاورزی کرج.



شکل ۷- مقایسه‌ی متوسط سالانه‌ی تراز آبخوان در شرایط موجود و بهره‌برداری بهینه.

رهاسازی آن، چنانچه مقدار رهاسازی بیش‌تر از نیاز تهران بوده تمامی، و اگر کمتر بوده به اندازه‌ی رهاسازی نیاز شهر تهران تأمین می‌شود؛ به این ترتیب، اولویت برداشت اول تهران از سد که امکان برداشت از آبخوان را ندارد، رعایت خواهد شد. در ادامه، آب مازاد بر نیاز تهران با آب برداشت شده از آب زیرزمینی جمع شده و در ابتدا نیاز شرب، و در صورت وجود آب مازاد بر این نیاز، کشاورزی کرج را تأمین خواهد کرد. نوآوری این تحقیق، استفاده از FLGGP برای اولین بار جهت استخراج قاعده‌ی بهره‌برداری می‌باشد که با ساختار غیرمشخص بر

## نتیجه‌گیری

یکی از انواع روش‌های تکاملی است که با بهره‌گیری از کروموزوم‌هایی با طول ثابت، همانند GA و عدم تولید روابط ریاضی پیچیده، بر خلاف GP به جستجوی جواب یا رابطه‌ی بهینه بین مقادیر مختلف می‌پردازد. در این مقاله، از خاصیت اشاره شده FLGGP جهت استخراج روابط بهره‌برداری از سد و آبخوان کرج جهت تخصیص به نیازهای شهری تهران و کرج و کشاورزی کرج استفاده شده است. به این منظور، پس از استخراج رابطه‌ی بهره‌برداری از سد و تعیین میزان

6. Bazaraa, M.S., H.D. Sheraly, and C.M. Shetty. 1993. Nonlinear programming, theory and applications. 2nd ed. John Wiley & Sons, p. 432, ISBN 0-471-55793-5.
7. Guven, A., and M. Gunal. 2008. Genetic programming approach for prediction of local scour downstream of hydraulic structure. *J. Irrig. Drain. E-ASCE*. 134: 241-249.
8. Guven, A., and O. Kisi. 2010. Estimation of suspended sediment yield in natural rivers using machine-coded linear genetic programming. *Water Resour. Manag.* 25: 691-704.
9. Holland, J. H. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
10. Khare, D., M.K. Jat, and K. Ediwahyunan. 2006. Assessment of conjunctive use planning options: A case study of Sapon irrigation command area of Indonesia. *J. Hydrol.* 328: 764-777.
11. Khu, S.T., S.Y. Liong, V. Babovic, H. Madsen, and N. Muttil. 2001. Genetic programming and its application in real-time runoff forecasting. *J. Am. WATER Works. Ass.* 37: 439-451.
12. Marques, G.F., J.R. Lund, and R. Howit. 2010. Modeling conjunctive use operations and farm decisions with two-stage stochastic quadratic programming. *J. Water Res. PL-ASCE*. 136: 386-394.
13. Orouji, H., O. Bozorg Haddad, E. Fallah-Mehdipour, and M.A. Marino. 2013. Modeling of water quality parameters using data-driven models. *J. Environ. Eng-ASCE*. 139: 947-957.
14. Pulido-Velazquez, D., D. Ahlfeld, J. Andreu, and A. Sahuquillo. 2008. Reducing the computational cost of unconfined groundwater flow in conjunctive-use models at basin scale assuming linear behaviour: The case of Adra-Campo de Dalías. *J. Hydrol.* 353:159-174.
15. Rabunal, J.R., J. Puertas, Suarez, J., and D. Rivero. 2007. Determination of the unit hydrograph of a typical urban basin genetic programming and artificial neural networks. *Hydrol. Process.* 21: 476-485.
16. Savic, D.A., G.A. Walters, and J.W. Davidson. 1999. A genetic programming قاعده‌ی بهره‌برداری با ساختار مشخص خطی برتری دارد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، تابع هدف حاصل از FLGGP، ۳۲/۵۸ درصد کمتر (بهتر) از مقدار مشابه حاصل از GA می‌باشد. در مقاله‌ی حاضر، از الگوریتم‌های GP و FLGGP به صورت تک‌هدفه استفاده شده است. توسعه‌ی الگوریتم‌های نامبرده در تحقیقات آتی به صورت چندهدفه، بخصوص با در نظر گرفتن اهداف متضاد، می‌تواند بر کارایی این الگوریتم‌ها بیفزایند. هم‌چنین سامانه‌ی تلفیقی مورد بررسی شامل دو زیرسامانه‌ی آبخوان و سد بوده است. بررسی عملکرد و کارایی قواعد بهره‌برداری در سامانه‌ای که دارای زیرسامانه‌های متعدد، بطور مثال انواع سدها با اهداف تأمین نیازهای پایین‌دست، تولید کارمایه‌ی برق آبی و مهار کردن سیلاب، هم‌چنین تفکیک جزئی‌تر انواع نیازها و مصارف در محدوده‌ی مطالعاتی، پیشنهاد می‌گردد. به این منظور می‌توان گام زمانی برنامه‌ریزی را از ماهانه به روزانه، و در صورت لزوم حتی ساعتی تغییر داد.

## منابع

۱. علیمحمدی، س. ۱۳۸۴. "طراحی و بهره‌برداری بهینه تلفیقی از سیستم آب‌های سطحی و زیرزمینی- رویکرد ذخیره تناوبی". رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده عمران.
۲. مهندسین مشاور ری‌آب. ۱۳۸۶. "طرح تأمین آب درازمدت غرب استان تهران". مطالعات هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی محدوده مطالعاتی تهران- کرج، جلد ۲۰.
3. Afshar, A., L. Ostadrahimi, A. Ardeshir, and S. Alimohammadi. 2008. Lumped approach to a multi-period-multi-reservoir cyclic storage system optimization. *Water Resour. Manag.* 22: 1741-1760.
4. Afshar, A., A. Zahraei, and M.A. Mariño. 2010. Large-scale nonlinear conjunctive use optimization problem: decomposition algorithm. *J. Water Res. PL-ASCE* 136: 59-71.
5. Alimohammadi, S., A. Afshar, and M.A. Mariño. 2009. Cyclic storage systems optimization: Semidistributed parameter approach. *J. Am. WATER Works. Ass.* 101: 90-103.

- approach to rainfall-runoff modeling. *Water Resour. Manag.* 13: 219-231.
17. Sivapragasam, C., G. Vasudevan, J. Maran, C. Bose, S. Kaza, and N. Ganesh. 2009. Modeling evaporation-seepage losses for reservoir water balance in semi-arid regions. *Water Resour. Manag.* 23: 853-867.
  18. Tsai, F.T.C., V. Katiyar, D. Toy, and R.A. Goff. 2009. Conjunctive management of large-scale pressurized water distribution and groundwater systems in semi-arid area with parallel genetic algorithm. *Water Resour. Manag.* 23: 1497-1517.

