

توسعه منحنی‌های فرمان بهره‌برداری از مخزن‌های کرج و بازفت با برنامه‌ریزی ژنتیک

الهه فلاح مهدی‌پور^۱ و امید بزرگ حداد^{۲*}

چکیده

منحنی‌های فرمان بهره‌برداری مخزن رابطه‌هایی هستند که می‌توانند با استفاده از تجربه‌های قبلی سامانه میان پارامترهای سامانه و نیاز در هر دوره نوعی تعادل برقرار کنند. این رابطه‌ها شامل متغیرهایی مانند جریان ورودی، ظرفیت ذخیره و مقدار رهاسازی از مخزن هستند که به طور معمول به وسیله ضریب‌های ثابت با الگوهای خطی و غیرخطی از پیش تعیین شده، با یکدیگر ارتباط دارند. در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های تکاملی به شکل عام و الگوریتم ژنتیک به شکل خاص در توسعه منحنی‌های فرمان بهره‌برداری بهینه با الگوی از پیش تعیین شده به کار رفته‌اند. برنامه‌ریزی ژنتیک یک الگوریتم تکاملی بر پایه الگوریتم ژنتیک است که قادر به محاسبه منحنی‌های فرمان بهره‌برداری بدون استفاده از الگوی بهره‌برداری بهینه از پیش تعیین شده است. در این مقاله، ابتدا، منحنی‌های فرمان درجه یک و دو وابسته به جریان ورودی و حجم مخزن‌های کرج و بازفت به ترتیب با هدف‌های بهره‌برداری تأمین نیازهای پایین‌دست و تولید انرژی برقابی استخراج شده است. سپس، منحنی‌های فرمان بهره‌برداری حاصل از برنامه‌ریزی ژنتیک بدون قالب از پیش تعیین شده، ریاضی به دست آمده و با نتایج قسمت قبل، مقایسه شده است. تابع‌های هدف منحنی‌های حاصل از برنامه‌ریزی ژنتیک در مقایسه با منحنی‌های فرمان درجه یک و دو حاصل از الگوریتم ژنتیک در تأمین نیازهای پایین‌دست به ترتیب ۱۲/۳۹ و ۷/۲۹ درصد بهبود داشته است. به طور مشابه، در تولید انرژی برقابی به ترتیب ۵۱/۶۲ و ۴۷/۷۶ درصد بهبود در تابع‌های هدف منحنی‌های فرمان درجه یک و دو ایجاد شده است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی ژنتیک، سامانه مخزن، منحنی‌های فرمان.

ارجاع: فلاح مهدی‌پور ا. و بزرگ حداد ا. ۱۳۹۳. توسعه منحنی‌های فرمان بهره‌برداری از مخزن‌های کرج و بازفت با برنامه‌ریزی ژنتیک. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۴):۲۹-۳۸.

۱- دانش‌آموخته دکتری منابع آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۲- دانشیار گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: OBHaddad@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۷/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۱۹

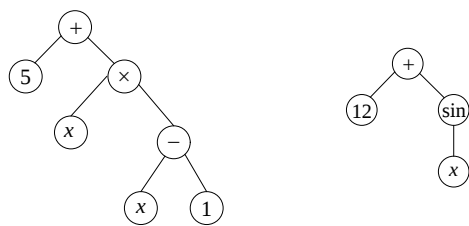
مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش جمعیت، تغییر و ارتقا استانداردهای زندگی و گسترش منطقه‌های شهری و صنعتی سبب رشد روزافزون تقاضای آب در منطقه‌های مختلف دنیا شده است. روند رو به رشد تقاضا در حالی است که محدودیت منابع به خصوص منابع آب شیرین به‌ویژه در منطقه‌های خشک و نیمه‌خشک دنیا افزایش یافته است. منابع آب سطحی و رودخانه‌ها که تمرکز و شدت جریان‌های سطحی در آن‌ها بیش از سایر مناطق است، به‌عنوان مهم‌ترین گزینه‌های مطرح برای بهره‌برداری و مصرف در این مناطق هستند. اما توزیع زمانی جریان موجود در این رودخانه‌ها در برخی موارد با توزیع نیازهای موجود در تضاد است و یا گاه این جریان‌ها به صورت فصلی و سیلابی اتفاق می‌افتد. گاهی ساخت و استفاده از مخزن‌های سطحی به‌خصوص سدها به‌عنوان سازه‌هایی جهت ذخیره و استفاده مناسب از آب گسترش یافته است. این سازه آبی با ذخیره آب در دوره‌های پرآب امکان استفاده از این منبع محدود را در دوره‌های نیاز فراهم می‌کند. منحنی‌های فرمان بهره‌برداری از سدها، یک ابزار مدیریتی هستند که می‌توان با آن‌ها زمان و مقدار رهاسازی مناسب از مخزن را تعیین کرد. در سال‌های اخیر انواع سیاست‌های بهره‌برداری مانند سیاست بهره‌برداری استاندارد، انواع قواعد جیره‌بندی و منحنی‌های فرمان خطی و غیرخطی رواج یافته است.

در استخراج این منحنی‌ها می‌توان از دو تکنیک شبیه‌سازی و یا بهینه‌سازی استفاده کرد. اگرچه امکان استخراج جواب مناسب با استفاده از انواع مدل‌های شبیه‌سازی وجود دارد، اما این امر با سعی و خطا همراه است؛ در حالیکه با انواع تکنیک‌های بهینه‌سازی به خصوص الگوریتم‌های تکاملی امکان ارائه جواب بهینه و یا نزدیک به آن وجود دارد. الگوریتم ژنتیک^۱ (GA) یکی از این الگوریتم‌های تکاملی است که کاربردهای گسترده‌ای در خصوص استفاده از آن و یا نسخه‌های اصلاح شده و توسعه یافته آن وجود دارد. اولیویرا و لاکس (۱۹۹۷)، واردلاو و شریف (۱۹۹۹) و چنگ و همکاران (۲۰۰۵) نمونه‌هایی از این پژوهش‌ها هستند که تأکید آن‌ها بر استفاده از GA در بهره‌برداری مخزن و استخراج منحنی فرمان بهره‌برداری از آن بوده است. اما در تمامی

پژوهش‌هایی که در خصوص استخراج منحنی فرمان بهره‌برداری انجام شده است، نوعی تابع خطی و یا غیرخطی با قالب ریاضی درجه یک، دو و یا سه به صورت از پیش تعیین شده به‌عنوان منحنی فرمان بهره‌برداری در نظر گرفته شده و فقط ضریب‌های معادله با روش‌های بهینه‌سازی استخراج شده است. بلوری یزدلی و همکاران (۱۳۹۰) میزان کارایی انواع منحنی فرمان‌های درجه یک، دو و سه وابسته به آبدهی ورودی و حجم ذخیره مخزن را رتبه‌بندی کردند. در حالیکه ممکن است امکان ارائه منحنی فرمان مناسب‌تر در قالب یک رابطه ریاضی دیگر وجود داشته باشد. بدین منظور استفاده از یک ابزار بهینه‌سازی که بتواند یک رابطه مناسب و بهینه بهره‌برداری را داشته باشد، ضروری به نظر می‌رسد. GA با توجه به ثابت در نظر گرفتن طول کروموزوم‌ها و قبول فقط عددها و نه متغیرها و تابع‌ها و عملگرهای ریاضی، به تنهایی قادر به ارائه یک رابطه ریاضی به‌عنوان رابطه‌ای مناسب برای بهره‌برداری نیست.

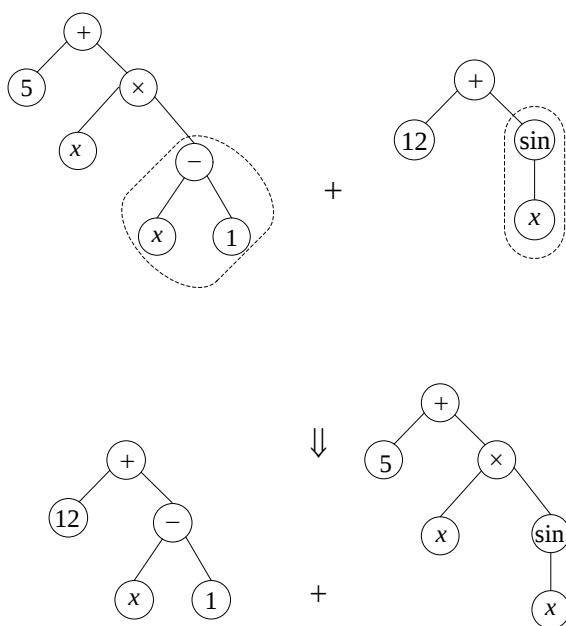
برنامه‌ریزی ژنتیک^۲ (GP) گزینه‌ای است که قابلیت اشاره شده در خصوص ارائه رابطه مناسب ریاضی حاکم بر سامانه را دارد. پژوهش‌های زیادی در خصوص استفاده از GP در حوزه منابع‌های آب وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به سویک و همکاران (۱۹۹۹)، رابونال و همکاران (۲۰۰۷)، سیواپراگاسام و همکاران (۲۰۰۸)، کیسی و گوون (۲۰۱۰) و ایزدی‌فر و الشورباجی (۲۰۱۰) به‌ترتیب در استخراج مدل بارش- رواناب، تعیین هیدروگراف واحد حوضه شهری، روندیابی جریان در کانال‌های طبیعی، مدل‌سازی مقدار تبخیر و ترق و پیش‌بینی تبخیر اشاره کرد. سلطانی و همکاران (۱۳۸۹) رابطه دبی- اشل را در رودخانه‌ها با استفاده از سیستم‌های هوشمند از جمله GP مدل‌سازی کردند. داندنمه‌ر و مجدزاده طباطبایی (۱۳۸۹) تأثیر توالی دبی روزانه در پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک را بررسی کردند. داندنمه‌ر و همکاران (۱۳۸۹) بار معلق رودخانه‌ها بر مبنای دبی جریان را با GP پیش‌بینی کردند. همچنین آزاماتولا و همکاران (۲۰۱۱) منحنی دبی- اشل را در رودخانه پاهنگ با استفاده از GP استخراج کرده و با روش‌های رگرسیونی پیش‌بینی این منحنی مقایسه کردند که نتایج نشان از برتری GP در ارائه این منحنی داشته



$$y(x) = x^2 - x + 5 \quad y(x) = \sin(x) + 12$$

شکل ۱- نمایش عبارتهای ریاضی با ساختار درختی در GP

همان طور که مشاهده می شود، طول درختان مختلف با توجه به رابطه‌ای که ارائه می دهند، متفاوت است. از دیگر تفاوت‌های GP و GA می توان به چگونگی اعمال عملگرهای تزویج و جهش اشاره کرد. با توجه به ساختار درختی موجود در GP، برای اعمال عملگر تزویج یکی از ارتباطات شبکه درختی بین دو درخت والد به صورت تصادفی انتخاب شده و با یکدیگر جابجا می شوند. چگونگی اعمال عملگر تزویج در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- نمایش اعمال عملگر تزویج در GP

در خصوص اعمال عملگر جهش نیز امکان تولید تصادفی هر کدام از اعداد، عملگرها و تابع‌های ریاضی مشابه شکل ۳ وجود دارد. در حالیکه در GA فقط عددها به عنوان متغیرهای تصادفی حین جهش تولید می شوند.

است. آزمایشاتولا و قانی (۲۰۱۱) کاربرد GP در تخمین ضریب پخشیدگی طولی در جریان طبیعی را بررسی کردند.

کشور ایران در ناحیه خشک جهان قرار دارد و میزان بارندگی آن یک سوم متوسط جهانی است با این حال همزمان با توسعه شهرها میزان تقاضای آب در بسیاری منطقه‌های آن افزایش یافته است. پس براساس این ویژگی‌ها، استفاده هرچه مناسب‌تر از مخزن‌های آب سدها به عنوان مجموعه‌های بزرگی از ذخیره‌های آب، باید در نظر گرفته شود. GP ابزاری دارای انعطاف برای تطبیق هرچه بیشتر و بهینه‌تر میزان استفاده از منابع‌های آب برای اختصاص به مصارف، بهره‌برداری زمان حقیقی است. در این پژوهش، با توجه به کاربردهای موفق GP در استخراج انواع روابط پیش‌بینی از این ابزار برای یافتن منحنی فرمان بهره‌برداری در دو مورد مطالعاتی (مخزن) به ترتیب با اهداف تأمین نیاز پایین دست و تولید انرژی برقایی استفاده می شود. جهت مقایسه مناسب‌تر، منحنی‌های فرمان متداول درجه یک و دو با برنامه‌ریزی غیرخطی و GA به دست آمده و کارایی منحنی فرمان حاصل از GP با آن‌ها مقایسه خواهد شد.

برنامه‌ریزی ژنتیک

GP یک روش محاسباتی است که با وجود شباهت‌های زیاد مانند فرآیند جستجوی تصادفی و تکراری، همچنین وجود عملگرهایی مانند عملگرهای تکاملی و ژنتیکی با GA، تفاوت‌هایی نیز با آن دارد. در GA متغیرهای تصمیم در قالب کروموزوم‌هایی با متغیرهای تصمیم عددی در فرآیند جستجو وارد می شوند. اما در مسائل بهینه‌سازی این امکان وجود دارد که فقط عددها به عنوان متغیرهای تصمیم معرفی نشده و عملگرهای ریاضی یا منطقی نیز به عنوان متغیرهای تصمیم در فرآیند بهینه‌سازی شرکت کنند. به طور معمول هنگامی که روابط ریاضی به عنوان مجهول هستند، مجموعه‌ای از عددها و عملگرها وارد فرآیند جستجو می شوند. امکان ارائه رابطه‌های ریاضی با ساختار درختی و نه کروموزومی وجود دارد. شکل ۱ ساختار درختی را برای دو رابطه مختلف نمایش می دهد.

$$R_t = a \times Q_t^3 + b \times S_t^3 + c \times Q_t^2 + d \times S_t^2 + e \times Q_t + f \times S_t + g \quad (۴)$$

اما در تمامی معادلات ۲ تا ۴ رابطه‌های بهره‌برداری در قالب تابع‌های مشخص ریاضی ارائه شده است. متغیرهایی مانند a, b, c, d, e, f, g ضریب‌های ثابت بدون بعد در رابطه‌های خطی و غیرخطی (متغیرهای تصمیم) هستند که با استفاده از بهینه‌سازی استخراج می‌شوند. اما ممکن است، رابطه بهره‌برداری مناسب‌تری در قالب سایر معادلات ریاضی، بدون ساختار خطی و غیرخطی از پیش تعیین شده، وجود داشته باشد. پس استفاده از یک ابزار مناسب بهینه‌سازی که قادر به ارائه منحنی فرمان بدون هیچ پیش‌شرط خطی و غیرخطی باشد، ضروری است. در این پژوهش امکان ارائه این رابطه با GP در دو حالت بهره‌برداری با هدف تأمین نیاز پایین‌دست و تولید انرژی برقی بررسی خواهد شد.

بهره‌برداری با هدف تأمین نیاز پایین‌دست

در این پژوهش، در بهره‌برداری با هدف تأمین نیاز پایین‌دست تابع هدف به صورت کمینه‌سازی مجموع مربعات انحرافات رهاسازی از نیاز به صورت معادله ۵ در نظر گرفته شده است.

$$\text{Min. } Z_1 = \sum_{t=1}^T \left(\frac{R_t - D_t}{D_t} \right)^2 \quad (۵)$$

که در آن Z_1 تابع هدف تأمین نیاز پایین‌دست، T تعداد دوره‌های بهره‌برداری و D_t نیاز پایین‌دست در دوره t (میلیون مترمکعب) هستند. مهم‌ترین معادله بهره‌برداری از مخزن معادله پیوستگی به صورت زیر است:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - SP_t - \text{Loss}_t \quad (۶)$$

که در آن S_{t+1} حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره $t+1$ (میلیون مترمکعب)، SP_t سرریز از مخزن در دوره t (میلیون مترمکعب) و Loss_t حجم تلفات از مخزن در دوره t (میلیون مترمکعب) هستند. سایر رابطه‌های بهره‌برداری به شرح زیر است:

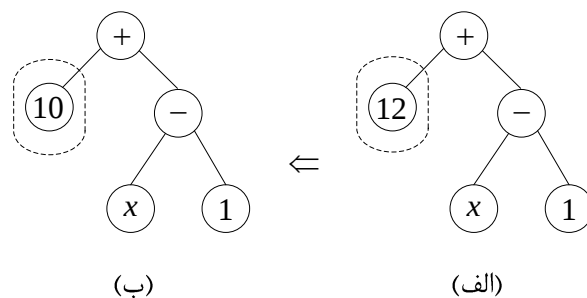
$$\text{Loss}_t = F_1(Ev_t, \bar{A}_t) \quad (۷)$$

$$\bar{A}_t = (A_t + A_{t+1})/2 \quad (۸)$$

$$A_t = F_2(S_t) \quad (۹)$$

$$R_{\text{Min.}} \leq R_t \leq R_{\text{Max.}} \quad (۱۰)$$

$$S_{\text{Min.}} \leq S_t \leq S_{\text{Max.}} \quad (۱۱)$$



شکل ۳- نمایش اعمال عملگر جهش در GP (الف) قبل و (ب) بعد از جهش

مواد و روش‌ها

بهره‌برداری از سامانه مخزن‌ها

مخزن سطحی به‌عنوان دریاچه‌ای مصنوعی است که تلاش در برقراری تعادل میان جریان ورودی در دوره‌های پرآب و استفاده از آن در دوره‌های مورد نیاز براساس نوع هدف بهره‌برداری از سد را دارد. به طور معمول، در بهره‌برداری از مخزن‌ها مقدار رهاسازی از مخزن به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود. اما اگر بهره‌برداری برای استخراج منحنی فرمان انجام شود، هدف یافتن رابطه‌ای مانند معادله ۱ بوده و متغیرهای تصمیم، انواع ضریب‌ها و رابطه‌های این منحنی فرمان بهره‌برداری است.

$$R_t = F(S_t, Q_t) \quad (۱)$$

که در آن R_t مقدار رهاسازی در دوره t (میلیون مترمکعب)، S_t حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره t (میلیون مترمکعب)، Q_t جریان ورودی به مخزن در دوره t (میلیون مترمکعب) و F تابع خطی و یا غیرخطی محاسبه مقدار رهاسازی از مخزن با استفاده از حجم ذخیره و جریان ورودی به آن هستند.

معادله‌ای که به‌صورت معمول به‌عنوان منحنی فرمان بهره‌برداری در نظر گرفته می‌شود، به‌صورت معادله ۲ است که در پژوهش‌های زیادی مانند موسوی و همکاران (۲۰۰۷) و بزرگ‌حداد و همکاران (۲۰۰۸) به کار رفته است.

$$R_t = a \times Q_t + b \times S_t + c \quad (۲)$$

بلوری یزدلی (۱۳۸۷) انواع منحنی درجه یک، دو و سه را طبق معادلات ۳ و ۴ برای بهره‌برداری از سامانه مخزن‌ها با هدف‌های تأمین نیاز پایین‌دست و تولید انرژی برقی استفاده کرد.

$$R_t = a \times Q_t^2 + b \times S_t^2 + c \times Q_t + d \times S_t + e \quad (۳)$$

GP که قادر به یافتن کل رابطه بهره‌برداری صرف‌نظر از نوع رابطه ریاضی آن هستند، استفاده خواهد شد. در این قسمت، ابزارهای اشاره شده معرفی خواهند شد.

لینگو (Lingo)

Lingo یک نرم‌افزار بهینه‌سازی بر پایه جستجوی گرادینانی است که با استفاده از گزینه‌های موجود در آن می‌توان به حل خطی، غیرخطی و مطلق مسئله پرداخت. در این پژوهش، با توجه به ماهیت غیرخطی مسئله باید از برنامه‌ریزی غیرخطی^۱ (NLP) استفاده شود. این نرم‌افزار به صورت پیش‌فرض از برنامه‌ریزی خطی پی در پی^۲ (SLP) برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی غیرخطی استفاده می‌کند. SLP یک روش بهینه‌سازی است که با تقریب‌های خطی درجه یک متوالی به بهینه‌سازی مسائل غیرخطی می‌پردازد. توضیحات تکمیلی در خصوص معرفی این روش توسط بازارا و همکاران (۱۹۹۳) ارائه شده است.

کاربرد برنامه‌ریزی ژنتیک در بهره‌برداری سامانه مخزن‌ها

همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، در این پژوهش به منظور بررسی کارایی GP در ارائه منحنی فرمان مناسب بهره‌برداری، دو مورد مطالعاتی که به ترتیب با اهداف تأمین نیاز پایین‌دست و تولید انرژی برقی بهره‌برداری می‌شوند، در نظر گرفته شده‌اند. در هر دو مورد ابتدا منحنی فرمان درجه یک و دو با برنامه‌ریزی غیرخطی (نرم‌افزار Lingo) و GA به دست آمده و در ادامه با GP منحنی فرمان ارائه شده است. لازم به ذکر است چهار عملگر ریاضی شامل $\{\pm, \times, \div\}$ و چهار تابع ریاضی شامل $\{\sin, \cos, \text{power}(x^y), \sqrt{\quad}\}$ در GP استفاده شده است.

نتایج و بحث

مورد مطالعاتی اول

اولین مورد مطالعاتی مخزن کرج با حجم فعال ۱۷۶ میلیون مترمکعب با میانگین آورد ۴۱۵/۲۳ میلیون مترمکعب روی رودخانه کرج قرار دارد. این رود بخشی از نیازهای شهر تهران و کرج را تأمین کرده و بقیه نیازها از آب زیرزمینی تأمین می‌شود. داده‌های ورودی این مخزن شامل آورد و نیاز پایین‌دست به دو دسته آموزش (نه سال) و آزمون (سه سال) تقسیم شده است. شکل ۴ سد کرج و

که در آن F_1 تابع محاسبه حجم تبخیر در دوره t ، Ev_t عمق تبخیر در دوره t (متر)، $\bar{A}_t$ میانگین سطح دریاچه مخزن در دوره t (کیلومتر مربع)، A_t و A_{t+1} سطح دریاچه در ابتدای دوره‌های t و $t+1$ (کیلومتر مربع)، F_2 تابع خطی محاسبه سطح از روی حجم، R_{Min} و R_{Max} به ترتیب کمینه و بیشینه حجم مجاز رهاسازی از مخزن (میلیون مترمکعب) و S_{Min} و S_{Max} به ترتیب کمینه و بیشینه حجم مخزن (میلیون مترمکعب) هستند.

بهره‌برداری با هدف تولید انرژی برقی

در این پژوهش، بهره‌برداری با هدف کمینه‌سازی اختلاف توان تولیدی از ظرفیت نصب نیروگاه بر طبق معادله ۱۲ در نظر گرفته شده است.

$$\text{Min. } Z_2 = \sum_{t=1}^T \left(1 - \frac{P_t}{PPC} \right) \quad (12)$$

که در آن Z_2 تابع هدف تولید انرژی برقی، P_t مقدار توان تولید شده در دوره t (مگاوات) و PPC ظرفیت نصب نیروگاه (مگاوات) هستند. در بهره‌برداری با هدف تولید انرژی برقی معادلات ۱۳ تا ۱۷ به معادلات ۶ تا ۱۱ اضافه می‌شود.

$$P_t = F_3(\gamma, e, RP_t, PF, \bar{H}_t, TW_t) \quad (13)$$

$$\bar{H}_t = (H_t + H_{t+1})/2 \quad (14)$$

$$H_t = F_4(S_t) \quad (15)$$

$$TW_t = F_5(R_t) \quad (16)$$

$$RPS_t = R_t - RP_t \quad (17)$$

در این معادلات F_3 تابع تولید انرژی برقی، γ وزن مخصوص آب (نیوتن بر مترمکعب)، e بازده نیروگاه (درصد)، RP_t مقدار رهاسازی برای تولید انرژی برقی در دوره t (میلیون مترمکعب)، PF ضریب کارکرد نیروگاه، $\bar{H}_t$ میانگین هد نیروگاه در دوره t (متر)، H_t و H_{t+1} هد مخزن در ابتدای دوره‌های t و $t+1$ (متر)، TW_t تراز آب پایاب در دوره t (متر)، F_4 تابع غیرخطی تبدیل حجم به ارتفاع، F_5 تابع محاسبه تراز آب پایاب و RPS_t سرریز از نیروگاه در دوره t (میلیون مترمکعب) هستند.

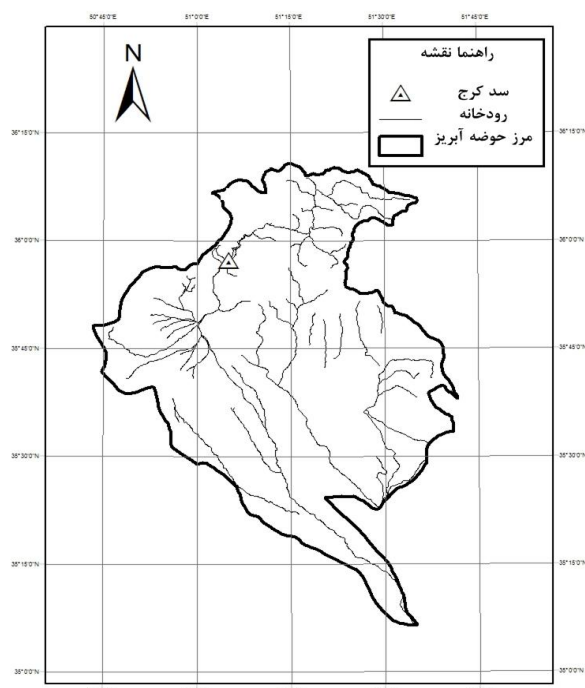
ابزار بهینه‌سازی

از آنجا که در این پژوهش هدف استخراج منحنی‌های فرمان بهره‌برداری از مخزن در قالب رابطه‌های ریاضی است، از ابزار بهینه‌سازی Lingo و GA که قادر به استخراج ضریب‌های بهینه رابطه‌های مشخص ریاضی و

1- Non-linear Programming (NLP)

2- Successive Linear Programming (SLP)

موقعیت قرارگیری آن را در حوضه آبریز کرج نمایش می‌دهد.



شکل ۴- نمایش سد کرج و موقعیت قرارگیری آن در حوضه آبریز کرج

در گام اول بر طبق معادلات ۲ و ۳ منحنی فرمان بهره‌برداری با نرم‌افزار Lingo استخراج شده که مقدار تابع‌های هدف در این دو حالت به‌ترتیب ۶۴/۵۹۱ و ۳۸/۲۰۷ هستند. در ادامه با GA و به وسیله ۵۰ کروموزوم و ۱۰۰ تکرار، پنج اجرای مختلف برای هریک از تابع‌های درجه یک و دو مطابق جدول ۱ به دست آمده است. لازم به ذکر است، با توجه به طبیعت تصادفی الگوریتم‌های

تکاملی به طور عام و GA و GP به طور خاص، امکان تفاوت در نتیجه نهایی تکرار آخر، به‌عنوان مثال ۱۰۰ تکرار در مقاله حاضر، در هر بار اجرای برنامه بهینه‌سازی وجود خواهد داشت. الگوریتمی برای بهینه‌سازی مناسب است که ضریب تغییرات مقدار تابع هدف نهایی اجرای مختلف آن کم باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بهترین (کمینه) مقدار تابع هدف حاصل از GA در منحنی‌های فرمان درجه یک و دو به‌ترتیب ۴۴/۶۳ و ۱۱/۶۱ درصد بهبود (کاهش) نسبت به نتایج مشابه حاصل از Lingo داشته است. از سوی دیگر، بهترین (کمینه) مقدار تابع هدف منحنی فرمان درجه یک ۵/۹۰ درصد بدتر (بیشتر) از مقدار مشابه حاصل از منحنی فرمان درجه دو است. همچنین هرچه انحراف معیار به دست آمده کمتر باشد، نشان از اعتماد بیشتر به نتایج ارائه شده است. به بیان دیگر حتی می‌توان با یک بار اجرای برنامه امیدوار بود که نتیجه حاصل بهترین مقدار مورد انتظار تابع هدف خواهد بود. همچنین نرم‌افزار Lingo با وجود صرف زمان بیش از ده ساعت، قادر به ارائه جواب بهینه مطلق نبود. از سوی دیگر، GA به‌عنوان ابزاری که امکان ارائه جواب بهینه و یا نزدیک به آن را دارد، تابع هدفی کمتر (بهتر) از مقدار مشابه حاصل از Lingo یافته است. در گام دوم، با GP و با ۵۰ درخت و ۱۰۰ تکرار که به طور دقیق با دفعات ارزیابی تابع هدف GA برابر است، پنج اجرای مختلف از برنامه بر طبق جدول ۲ گرفته شده است.

جدول ۱- نتایج منحنی‌های فرمان بهره‌برداری درجه یک و دو در مورد مطالعاتی اول

پارامترهای آماری					شماره اجرا					
ضریب تغییرات	انحراف معیار	بیشینه	میانگین	کمینه	۵	۴	۳	۲	۱	
۳۵/۷۶۳	۳۶/۰۵۹	۳۶/۳۲۸	۰/۲۸۲	۰/۰۰۸	۳۵/۷۶۳	۳۵/۷۶۹	۳۶/۰۱۱	۳۶/۳۲۷	۳۶/۳۲۸	منحنی فرمان درجه یک
۳۳/۷۷۰	۳۴/۷۸۳	۳۵/۶۹۸	۰/۸۸۱	۰/۰۲۵	۳۳/۷۷۰	۳۴/۵۹۱	۳۵/۶۹۸	۳۵/۶۸۹	۳۴/۱۶۷	منحنی فرمان درجه دو

جدول ۲- نتایج منحنی‌های فرمان بهره‌برداری GP در مورد مطالعاتی اول

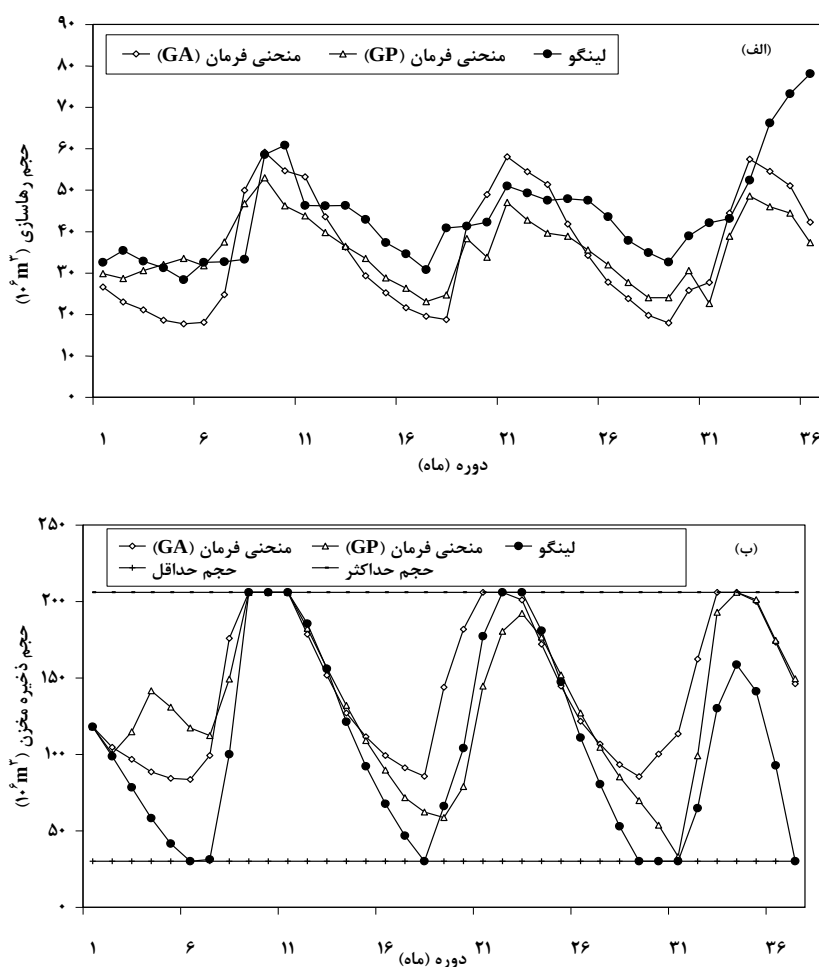
پارامترهای آماری					شماره اجرا					
ضریب تغییرات	انحراف معیار	بیشینه	میانگین	کمینه	۵	۴	۳	۲	۱	
۳۱/۳۳۳	۳۱/۸۵۹	۳۲/۲۳۴	۰/۳۲۹	۰/۰۱۰	۳۱/۳۳۳	۳۲/۲۳۴	۳۱/۹۳۰	۳۱/۸۳۳	۳۱/۹۴۸	

منحنی فرمان GP به ترتیب ۸/۰۳، ۷/۷۱ و ۶/۷۶ به دست آمده است. شکل ۵ مقادیر رهاسازی و حجم ذخیره مخزن را برای کمترین (بهترین) نتیجه GA و GP، همچنین بهره‌برداری بدون در نظر گرفتن منحنی فرمان بهره‌برداری حاصل از Lingo با تابع هدف ۳/۵۷ نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به ترتیب Lingo و GP آب بیشتری نسبت به GA برای تأمین نیازهای پایین دست استفاده کرده‌اند و لذا تراز آب مخزن در غالب دوره‌ها با Lingo و GP پایین‌تر از GA است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بهترین نتیجه حاصل از GP (۳۱/۳۳۳)، ۷/۲۲ درصد کمتر (بهتر) از مقدار مشابه حاصل از GA است. معادله ۱۸ منحنی فرمان بهره‌برداری معادل با حداقل مقدار تابع هدف حاصل از GP را ارائه می‌دهد.

$$R_t = \sqrt{11.351Q_t + (8.693 + \sin(S_t))S_t} + 6.7042 \quad (18)$$

در گام سوم، منحنی‌های فرمان حاصل از GA و GP برای یک دوره سه ساله امتحان شده است. بر این اساس تابع هدف برای منحنی‌های درجه یک و دو حاصل از GA و

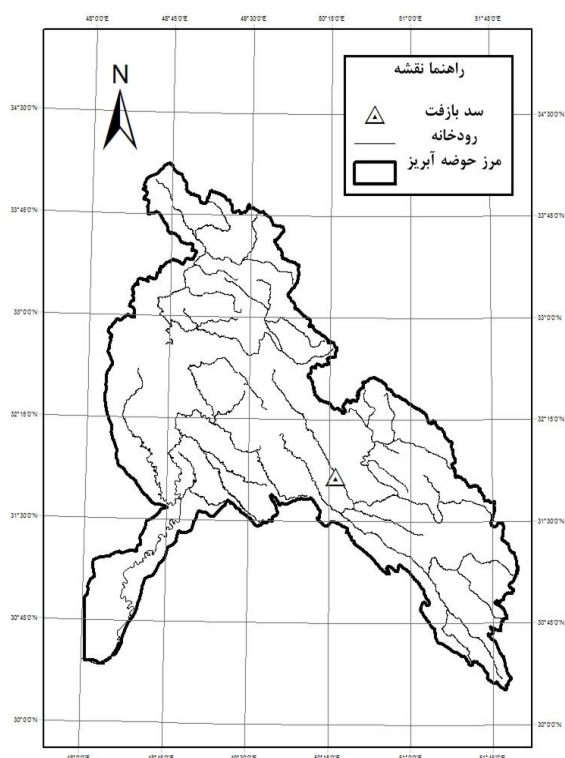


شکل ۵- نمایش (الف) رهاسازی و (ب) حجم ذخیره مخزن در مورد مطالعاتی اول

در این مثال نیز مانند مسئله قبل، ابتدا منحنی‌های فرمان بهره‌برداری درجه یک و دو با Lingo و GA استخراج شده و سپس با نتایج GP مقایسه می‌شود. بر این اساس مقادیر تابع‌های هدف Lingo به ترتیب منحنی‌های درجه یک و دو برابر ۴۵/۸۴۰ و ۴۰/۰۷۴ است. همچنین نتایج پنج بار اجرای برنامه برای منحنی‌های درجه یک و دو براساس جدول ۳ با استفاده از ۵۰ کروموزوم و ۱۰۰ تکرار

مورد مطالعاتی دوم

مورد مطالعاتی دوم، مخزن بازفت است که بر روی رودی با همین نام با هدف تولید انرژی برقابی قرار دارد. این سد با حجم فعال ۳۰۸/۱۵ میلیون مترمکعب و میانگین آورد ۲۰۱۲/۶۰ میلیون مترمکعب دارای نیروگاهی با ظرفیت نصب ۲۹۰ مگاوات است. شکل ۶ سد بازفت و موقعیت قرارگیری آن را در حوضه آبریز کارون نمایش می‌دهد.



شکل ۶- سد بازفت و موقعیت قرارگیری آن را در حوضه آبریز کارون

به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت نیز مانند مورد مطالعاتی اول، بهترین (کمینه) مقدار تابع هدف در منحنی فرمان درجه دو ۷/۳۹ درصد بهتر (کمتر) از مقدار مشابه با منحنی فرمان درجه یک است. همچنین بهترین (کمینه) مقدار تابع هدف با GA در منحنی‌های فرمان درجه دو و دو به ترتیب ۲۴/۶۱ و ۲۴/۱۴ درصد بهتر (کمتر) از جواب بهینه Lingo بوده است. در ادامه منحنی‌های فرمان حاصل از GP با ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد تکرار به دست آمده است. جدول ۴ این مقادیر را گزارش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمترین (بهترین) مقدار تابع هدف حاصل از GP تفاوت زیادی نسبت به کمترین (بهترین) مقدار حاصل از GA داشته است.

جدول ۳- نتایج منحنی‌های فرمان بهره‌برداری درجه یک و دو در مورد مطالعاتی دوم

شماره اجرا		پارامترهای آماری					ضریب تغییرات		
۱	۲	۳	۴	۵	کمینه	میانگین	بیشینه	انحراف معیار	ضریب تغییرات
۳۵/۶۰۰	۳۵/۴۱۸	۳۴/۵۵۸	۳۸/۵۲۴	۳۸/۷۴۸	۰/۰۵۳	۱/۹۲۹	۳۸/۷۴۸	۳۶/۵۶۹	۳۴/۵۵۸
۳۲/۹۳۴	۳۵/۰۳۲	۳۳/۲۸۰	۳۲/۴۱۶	۳۲/۰۰۵	۰/۰۳۵	۱/۱۶۸	۳۵/۰۳۲	۳۳/۱۳۳	۳۲/۰۰۵

جدول ۴- نتایج منحنی‌های فرمان بهره‌برداری GP در مورد مطالعاتی دوم

شماره اجرا		پارامترهای آماری					ضریب تغییرات		
۱	۲	۳	۴	۵	کمینه	میانگین	بیشینه	انحراف معیار	ضریب تغییرات
۲۱/۵۲۰	۲۵/۲۴۵	۲۱/۴۲۴	۲۰/۹۷۶	۱۶/۲۵۷	۰/۱۴۳	۳/۰۲۷	۲۵/۲۴۵	۲۱/۱۷۶	۱۶/۷۱۸

رابطه بهره‌برداری برای کمترین (بهترین) مقدار تابع هدف به صورت معادله ۱۹ خواهد بود:

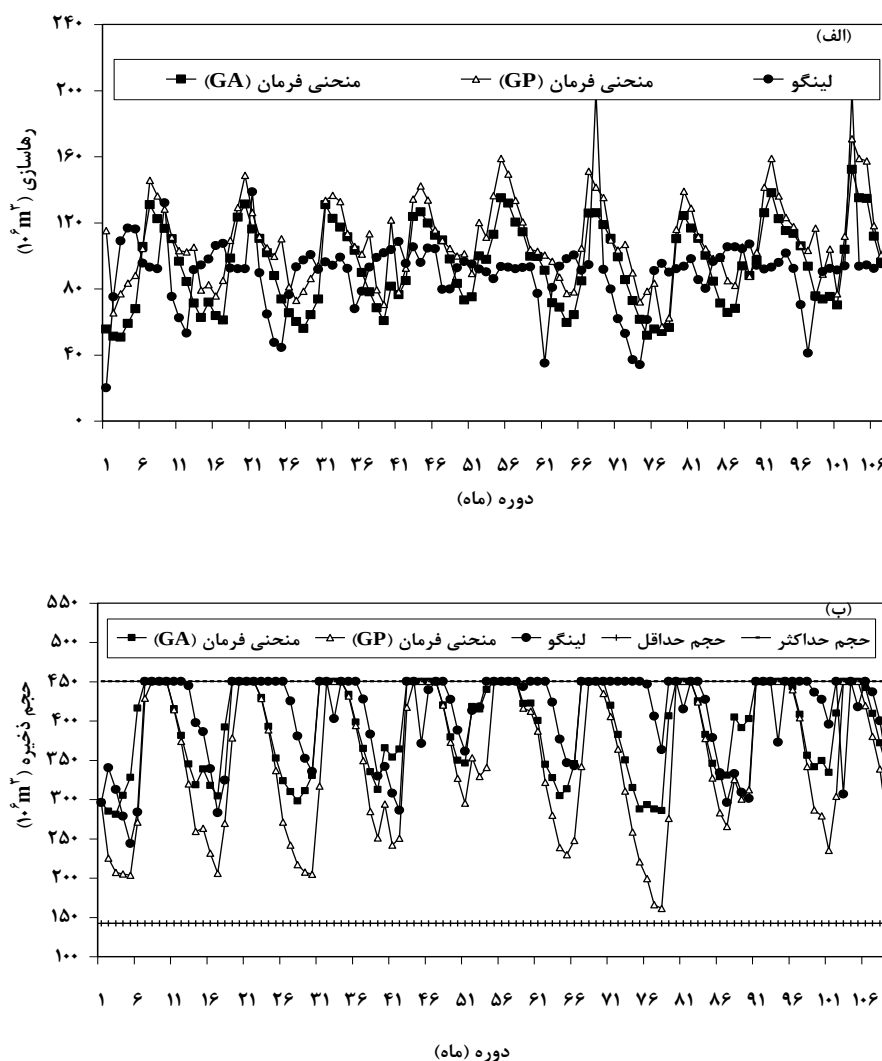
$$R_t = 2(\sqrt{Q_t} + \sqrt{S_t}) + \sqrt{2Q_t - S_t + (S_t^2 + S_t Q_t)^{\sin(\sqrt{S_t})}} + \sqrt{(S_t Q_t - Q_t + S_t)^{\sin(\sqrt{Q_t})} + (S_t^3)^{\sqrt{\sin(Q_t)}}} + \sqrt{Q_t} + Q_t \quad (19)$$

$$+ \sqrt{2Q_t - S_t + (2S_t^2 + 2S_t Q_t)^{\sin(\sqrt{S_t})}} + \sqrt{2S_t} + \sqrt{Q_t + S_t}$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، رابطه ۱۹ یک رابطه غیرخطی است. بر این اساس اگر بهترین نتایج GP و GA برای یک دوره نه ساله مدل امتحان شود، مقدار تابع هدف برای منحنی‌های درجه یک و دو GP و GA به ترتیب برابر

همان‌طور که مشاهده می‌شود، رابطه ۱۹ یک رابطه غیرخطی است. بر این اساس اگر بهترین نتایج GP و GA برای یک دوره نه ساله مدل امتحان شود، مقدار تابع هدف برای منحنی‌های درجه یک و دو GP و GA به ترتیب برابر

حالت حاصل از GA، منحنی GP و نتایج Lingo را نمایش می‌دهد.



شکل ۷- نمایش (الف) رهاسازی و (ب) حجم ذخیره مخزن در مورد مطالعاتی دوم

نتیجه‌گیری

روند صعودی افزایش جمعیت و به دنبال آن افزایش تقاضای آب، سبب استفاده روزافزون از منابع‌های آب سطحی شده که تلاش‌های زیادی را برای ذخیره، تنظیم و مدیریت منابع‌های آب با روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای در پی داشته است. سدها از جمله سازه‌هایی هستند که می‌توانند با اهداف تأمین نیازهای پایین‌دست، تولید انرژی برقی و کنترل سیلاب بهره‌برداری شوند. اما چگونگی بهره‌برداری نیز می‌تواند در بازده و کارایی استفاده از این سازه تأثیرگذار باشد. به‌عنوان مثال، اگر در بهره‌برداری با هدف تأمین نیازهای پایین‌دست، فقط نگاه بهره‌بردار به دوره حاضر باشد، گرچه ممکن است نیازهای این دوره

حاضر تأمین شود، اما می‌تواند سبب عدم تأمین نیاز و بروز کمبودهای شدید در دوره‌های آینده شود. پس بهره‌برداری بهینه از مخزن که با در نظر گرفتن تمامی دوره‌های بهره‌برداری اقدام به تأمین نیاز می‌کند، متداول شده است. در این حالت ممکن است اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری تأمین نیاز کم شود. بنابراین کمبودهای زیاد در طول دوره بهره‌برداری رخ نمی‌دهد. اما این بهره‌برداری بهینه نیز به تنهایی نمی‌تواند کمک‌چندانی به بهره‌بردار برای برآورد میزان رهاسازی در دوره حاضر و آینده کند. پس استفاده از منحنی‌های فرمان و قواعد بهره‌برداری متداول شده است. با استفاده از این قواعد، دستور مشخصی برای محاسبه میزان رهاسازی آب از مخزن با در نظر گرفتن

- applications. (2nd ed.), John Wiley & Sons, p. 432, ISBN.
9. Bozorg Haddad O. Afshar A. and Mariño M.A. 2008. Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm in deriving optimal operation rules for reservoirs. *Journal of Hydroinformatics*. 10(3):257-264.
 10. Chang F. J. Chen L. and Chang L. C. 2005. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological Process*. 19(11):2277-2289.
 11. Izadifar Z. and Elshorbagy A. 2010. Prediction of hourly actual evapotranspiration using neural network, genetic programming, and statistical models. *Hydrological Processes*. 24(23):3413-3425.
 12. Kisi O. and Guven A. 2010. Evapotranspiration modeling using linear genetic programming technique. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*. 136(10):715-723.
 13. Mousavi S. J. Ponnambalam K. and Karray F. 2007. Inferring operating rules for reservoir operations using fuzzy regression and ANFIS. *Fuzzy Sets and Systems*. 158(10):1064-1082.
 14. Oliveira R. and Loucks D. P. 1997. Operating rules for multireservoir systems. *Water Resources Research Journal*. 33(4):839-852.
 15. Rabunal J. R. Puertas J. Suarez J. and Rivero D. 2007. Determination of the unit hydrograph of a typical urban basin genetic programming and artificial neural networks. *Hydrological Processes*. 21(4):476-485.
 16. Savic D. A. Walters G. A. and Davidson J. W. 1999. A genetic programming approach to rainfall-runoff modeling. *Water Resources Management Journal*. 13(3):219-231.
 17. Sivapragasam C. Maheswaran R. and Venkatesh V. 2008. Genetic programming approach for flood routing in natural channels. *Hydrological Processes*. 22(5):623-628.
 18. Wardlaw R. and Sharif M. 1999. Evaluation of genetic algorithm for optimal reservoir system operation. *Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE)*. 125(1):25-33.

پارامترهایی نظیر حجم ذخیره مخزن و جریان ورودی به مخزن، که قاعده بهره‌برداری می‌تواند به آن وابسته باشد استخراج می‌شود. در این پژوهش به نوع و چگونگی ترکیب متغیرهای مختلف در این قواعد بهره‌برداری توجه شده است. بدین منظور ابتدا قواعد بهره‌برداری درجه یک و دو با GA به دست آمده و پس از اثبات برتری این ابزار نسبت به استفاده از Lingo، با GP قواعد بهره‌برداری استخراج شده است. که در این قسمت نیز GP برتری چشم‌گیری نسبت به GA داشته است. با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان GP را به‌عنوان ابزاری توانمند در استخراج منحنی قواعد بهره‌برداری مخزن پیشنهاد کرد.

منابع

۱. بلوری یزدلی ی. ۱۳۸۷. تأثیر استخراج منحنی فرمان سامانه‌های چند مخزنی با اهداف مختلف در بازده کلی طرح. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران.
۲. بلوری یزدلی ی. بزرگ‌حداد ا. قاجارنیا ن. فلاح مهدی‌پور ا. و خیاط‌خلقی م. ۱۳۹۰. رتبه‌بندی روش‌های بهره‌برداری ماهانه زمان حقیقی در مخزن‌ها. نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری- دانشکده فنی. ۴۵(۵):۵۰۵-۵۱۵.
۳. سلطانی ع. علیایی ا. و قربانی م. ۱۳۸۹. مدل‌سازی رابطه دی- اشل در رودخانه‌ها با استفاده از سیستم‌های هوشمند. مجله دانش آب و خاک. ۲۰(۴):۱۵-۲۵.
۴. داندنمهر ع. علیایی ا. و قربانی م. ۱۳۸۹. پیش‌بینی بار معلق رودخانه‌ها بر مبنای دی جریان با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک. پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی). ۲۳(۳):۴۴-۵۴.
۵. داندنمهر ع. و مجدزاده طباطبایی م. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر توالی دی روزانه در پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک. پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی). ۲۴(۲):۳۲۵-۳۳۳.
6. Azamathulla H. M. and Ghani A. A. 2011. Genetic programming for predicting longitudinal dispersion coefficients in streams. *Water Resources Management Journal*. 25(6):1537-1544.
7. Azamathulla H. M. Ghani A.A. Leow C. S. Chang C. K. and Zakaria N. A. 2011. Gene-expression programming for the development of a stage-discharge curve of the Pahang River. *Water Resources Management Journal*. 25(11): 2901-2916.
8. Bazaraa M. S. Sheraly H. D. and Shetty C. M. 1993. Nonlinear programming, theory and