

استخراج قواعد ایستا و پویای بهره‌برداری مخزن توسط برنامه‌ریزی ژنتیک

حبیب اکبری الاشتی^{۱*} - امید بزرگ‌حداد^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۴/۲

چکیده

با توجه به نقش بارز سدها در کنترل و بهره‌برداری از آب‌های سطحی، اهمیت استخراج قواعد بهره‌برداری مناسب در جهت بهره‌برداری بهینه و پایدار نمایان می‌گردد. در تحقیق حاضر، با استفاده از روش‌های بهره‌برداری برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP)، الگوریتم ژنتیک (GA)، برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) و GP با موقعیت ثابت ژن (FLGGP) در بهره‌برداری به‌هنگام و در دو رویکرد استخراج قواعد بهره‌برداری ایستا و پویا با هدف تأمین برق‌آبی سامانه تک‌مخزنه کارون ۳ پرداخته شده است. در رویکرد استخراج قواعد بهره‌برداری ایستا، برای تمامی ماه‌های سال در دوره‌های مختلف بهره‌برداری تنها یک منحنی فرمان برای کلیه ماه‌ها استخراج می‌شود. در حالی که در رویکرد استخراج قواعد بهره‌برداری پویا برای هر یک از ماه‌های سال (۱۲ ماه) منحنی فرمان‌های مختص به همان ماه استخراج می‌شود. همچنین از قواعد بهره‌برداری غیرخطی (NLDR) در استخراج منحنی فرمان استفاده شده و تابع کل کمبود نسبی به عنوان تابع هدف برای ارزیابی عملکرد هر یک از روش‌ها و رویکردها مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاکی از کارایی مناسب روش‌های GP و FLGGP در استخراج قواعد بهره‌برداری در هر دو رویکرد مورد بحث می‌باشد و برتری این دو روش نسبت به روش‌های بهره‌برداری NLP و GA به طور متوسط ۵ درصد می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج می‌توان اظهار داشت که در مسائلی که به علت محدودیت‌های روش GP نمی‌توان از این روش استفاده نمود، روش FLGGP جایگزین مناسبی برای روش GP به شمار می‌رود. در مقایسه دو رویکرد استخراج قواعد بهره‌برداری ایستا و پویا، نتایج حاکی از برتری ۱۰ درصد رویکرد استخراج قواعد بهره‌برداری پویا نسبت به رویکرد قواعد بهره‌برداری ایستا بوده است و این رویکرد از توانایی‌های بیشتری در بهره‌برداری به‌هنگام از سامانه مخازن برخوردار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی ژنتیک با موقعیت ثابت ژن، برنامه‌ریزی غیرخطی

مقدمه

مخازن همواره مورد توجه پژوهش‌گران بوده است. از جمله این روش‌ها، روش برنامه‌ریزی غیرخطی^۳ (NLP) و الگوریتم ژنتیک^۴ (GA) می‌باشند. به (۱۵) برخی الگوریتم‌های برنامه‌ریزی غیرخطی و کارایی این روش‌ها را در مدیریت مخزن مورد بررسی قرار داده است. چن (۶) نیز با استفاده از GA، منحنی‌های فرمان بهره‌برداری از مخزن را استخراج نموده است و بر اساس آن استفاده از این الگوریتم را در حل مسائل غیرخطی بسیار کارآمد دانست. در استخراج قواعد بهره‌برداری بهینه با استفاده از روش‌های NLP و GA، باید رابطه‌ای ریاضی برای وابسته کردن حجم رهاسازی مخزن به دیگر پارامترهای بهره‌برداری مانند حجم ذخیره مخزن و حجم آب‌دهی رودخانه تعریف شود. به همین دلیل، برای پیدا کردن رابطه بهینه بهره‌برداری مخزن، باید تمامی روابط ممکن مورد بررسی قرار گیرند. این امر باعث صرف وقت بسیار می‌شود. از این رو،

در دهه‌های اخیر، با توجه به افزایش روز افزون جمعیت جوامع بشری و رشد تقاضای آب و همچنین محدودیت منابع آب، مدیریت و استفاده بهینه از منابع آبی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. با در نظر گرفتن نقش سدها در کنترل آب‌های سطحی و تأمین نیازهای آبی بخش‌های مختلف نظیر شرب، کشاورزی، صنعت، برق‌آبی و محیط زیست، بهره‌برداری بهینه از این مخازن از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. به همین منظور اتخاذ سیاست‌های بهره‌برداری بهینه به منظور استفاده از مخازن سدها از مهمترین وظایف مدیران و برنامه‌ریزان منابع آبی می‌باشد. ارائه روش‌هایی برای استخراج سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از

۱ و ۲- کارشناسی ارشد و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

(Email: H.Akbari@ut.ac.ir)

*- نویسنده مسئول:

3- Non-Linear Programming

4- Genetic Algorithm

لذا، هدف از این مطالعه، بهره‌برداری از سامانه تک‌مخزنه کارون^۳ با روش‌ها و رویکردهای مختلف با هدف کاهش میزان کمبود در تأمین نیاز برق‌آبی می‌باشد. از این رو در این تحقیق از روش‌های بهره‌برداری GA، NLP، GP و FLGGP و قواعد تصمیم‌گیری غیرخطی^۴ (NLDR) در بهره‌برداری به‌هنگام^۵ و با دو رویکرد استخراج قواعد بهره‌برداری ایستا و پویا استفاده می‌شود. برای ارزیابی نتایج حاصل از هر یک از روش‌های مذکور، از تابع کل کمبود نسبی به عنوان تابع هدف استفاده می‌شود. سپس به مقایسه عملکرد هر یک از دو رویکرد مورد بررسی پرداخته خواهد شد.

مواد و روش‌ها

در این بخش، چگونگی مدل‌سازی بهره‌برداری از سامانه تک‌مخزنه با هدف تأمین نیاز برق‌آبی، بیان مفاهیم NLDR، ارائه روش‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن و تشریح منطقه مورد مطالعه پرداخته می‌شود.

مدل‌سازی بهره‌برداری از سامانه مخزن

یکی از مهمترین معادلات در مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن، معادله پیوستگی بر اساس حفظ پایایی جرم می‌باشد که عبارتست از:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t + Re_t + Sp_t - Ev_t \left(\frac{A_t + A_{t+1}}{2} \right) \quad (1)$$

($\forall t=1, \dots, T$)

که در این رابطه، اندیس t شماره دوره مورد نظر که در این رابطه ممکن است ساعتی، روزانه، هفتگی، ماهانه و یا فصلی باشد که به طبیعت و هدف مسئله بهینه‌سازی بستگی دارد و در این تحقیق به صورت ماهانه در نظر گرفته شده است. T = تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری، S_t = حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره t ام برحسب متر مکعب، S_{t+1} = حجم ذخیره مخزن در انتهای دوره t ام برحسب متر مکعب، Q_t = جریان ورودی رودخانه به مخزن (که در این مقاله مقدار آن قطعی^۶ در نظر گرفته شده است) در طول دوره زمانی t ام برحسب متر مکعب، Re_t = حجم رهاسازی از مخزن در دوره t ام برحسب متر مکعب (متغیر تصمیم^۷)، Sp_t = مقدار سرریز از مخزن در دوره t ام برحسب متر مکعب، Ev_t = ارتفاع خالص تبخیر از مخزن در طول دوره t ام برحسب متر، A_t = سطح مخزن در ابتدای دوره t ام برحسب متر مربع، A_{t+1} = سطح مخزن $t+1$ ام در انتهای دوره t ام برحسب متر مربع می‌باشد.

توسعه روش‌هایی که بر خلاف روش‌های قبلی، خود اقدام به استخراج رابطه بهینه بهره‌برداری می‌نماید ضروری است. از جمله این روش‌ها، روش‌های برنامه‌ریزی تکاملی می‌باشند.

برنامه‌ریزی تکاملی از زیرمجموعه الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد و توسط لارنس فوگل (۸ و ۹) در دهه ۱۹۶۰ و در زمینه شبیه‌سازی معرفی شد. از جمله این روش‌ها، برنامه‌ریزی ژنتیک^۱ (GP) می‌باشد. با توجه به استفاده از GP در علوم مختلف و از جمله منابع آب، گزارش‌ها حاکی از آن است که روش GP از دقت کافی برخوردار بوده به عنوان یک روش کاربردی مطرح می‌باشد (۴ و ۵). عروجی و همکاران (۱۳) برای مسیریابی سیلاب رودخانه از روش‌های هیدرولوژیکی همچون مدل توسعه یافته روش ماسکینگام و GP استفاده کردند و نتایج حاصل از آن‌ها را با معادلات سنت-ونانت^۲ که یک روش هیدروگراف عددی مبتنی بر خصوصیات هیدرولوژیکی می‌باشند، مقایسه نمودند. نتایج حاکی از برتری روش GP نسبت به دیگر مدل هیدرولوژیکی بود و همچنین نشان داد که اگرچه GP از متغیرهای ورودی کمتری نسبت به معادلات سنت-ونانت استفاده نموده است، ولی اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین نتایج آن‌ها وجود ندارد. فلاح مهدی‌پور و همکاران (۷) برای اولین بار از GP در استخراج منحنی فرمان بهره‌برداری از سامانه تک‌مخزنه جهت تأمین نیاز کشاورزی استفاده نمودند و استفاده از این روش را در بهره‌برداری مخزن موثر دانستند.

با توجه به ساختار درختی روش GP، این روش قادر به ارائه تنها یک رابطه میان مجموعه‌های ورودی و خروجی می‌باشد. به همین دلیل از این روش می‌توان تنها در سامانه‌های تک‌مخزنه و استخراج قاعده بهره‌برداری ایستا استفاده نمود و امکان استفاده از آن در استخراج قاعده بهره‌برداری پویا و یا سامانه‌های چندمخزنه نمی‌باشد. به این دلیل که در این مسائل نیاز به استخراج بیش از یک رابطه ریاضی وجود دارد.

در این مطالعه، به جهت رفع محدودیت‌های موجود در روش GP، اقدام به توسعه روش GP شده است. این روش، GP با موقعیت ثابت ژن^۳ (FLGGP) نام‌گذاری شده است و هدف اصلی از توسعه آن، استفاده در استخراج قاعده بهره‌برداری پویا می‌باشد. در این مطالعه، از روش FLGGP، در هر دو رویکرد بهره‌برداری استفاده شده است. علت استفاده از این روش در رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری ایستا، مقایسه قابلیت‌های آن با روش GP می‌باشد، تا در صورت موفقیت آمیز بودن استفاده از روش FLGGP بتوان از آن به عنوان جایگزینی شایسته برای روش GP در استخراج قاعده بهره‌برداری پویا و بهره‌برداری سامانه‌های چندمخزنه استفاده نمود.

4- Non-Linear Decision Rule

5- Real-Time Operation

6- Deterministic

7- Decision Variable

1- Genetic Programming

2- Saint-Venant

3- Fixed Location Gene Genetic Programming

جدول ۲- مشخصات نیروگاه و مخزن

۸۴۰	رقوم نرمال مخزن (متر از سطح دریا)
۸۰۰	رقوم کمینه مخزن (متر از سطح دریا)
۲,۵۲۲/۵۸	حجم مخزن در رقوم نرمال (میلیون مترمکعب)
۱,۱۰۱/۱۲	حجم مخزن در رقوم کمینه (میلیون مترمکعب)
۱,۰۰۰	بیشینه ظرفیت خروجی مخزن (میلیون مترمکعب در ماه)
۲,۰۰۰	ظرفیت نصب (مگاوات)
۲۵	ضریب کارکرد (درصد)
۹۲	بازده نیروگاه (درصد)

تابع هدف برای بهینه‌سازی بهره‌برداری سامانه مخزن برق‌آبی، به صورت کمینه‌سازی اختلاف توان تولیدی نیروگاه از بیشینه توان تولیدی آن (ظرفیت نصب) تعریف شده است:

$$Min \text{ Def} = \sum_{t=1}^T \left(1 - \frac{P_t}{PPC} \right) \quad (۵)$$

که در آن Def = شاخص کل کمبود نسبی و PPC = ظرفیت نصب نیروگاه برحسب مگاوات می‌باشند. لازم به ذکر است که زیان کمبود در ماه‌های مختلف برابر می‌باشد.

در مدل بهینه‌سازی قیدها عبارتند از:

$$(S_{max} - S_{t+1}) \cdot Sp_t = 0 \quad (t=1, \dots, T) \quad (۶)$$

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad (t=1, \dots, T) \quad (۷)$$

$$Re_{min} \leq Re_t \leq Re_{max} \quad (t=1, \dots, T) \quad (۸)$$

$$S_1 = S_{average} \quad (t=1, \dots, T) \quad (۹)$$

$$0 \leq P_t \leq PPC \quad (t=1, \dots, T) \quad (۱۰)$$

در روابط فوق، S_{max} = حجم بیشینه مخزن، S_{min} = حجم کمینه مخزن، Re_{min} = کمینه حجم رهاسازی از مخزن، Re_{max} = بیشینه حجم رهاسازی از مخزن (ظرفیت دریاچه‌ها)، S_1 = حجم مخزن در ابتدای اولین دوره بهره‌برداری و $S_{average}$ = متوسط حجم مفید مخزن می‌باشند.

قواعد تصمیم‌گیری غیرخطی (NLDR)

حجم رهاسازی در قواعد تصمیم‌گیری غیرخطی تابعی از پارامترهای تصمیم‌گیری همچون حجم جریان ورودی به مخزن و حجم ذخیره مخزن خواهد بود و این تابع می‌تواند به صورت غیرخطی باشد. رابطه ۱۱، این تابع را برای قاعده بهره‌برداری ایستا و رابطه ۱۲ این رابطه را برای قاعده بهره‌برداری پویا نشان می‌دهد.

$$Re_t = f(S_t, Q_t, D_t) \quad (\forall t=1, \dots, T) \quad (۱۱)$$

$$Re_{m,n} = f'(S_{m,n}, Q_{m,n}, D_{m,n}) \quad (\forall m=1, \dots, M \text{ and } n=1, \dots, N) \quad (۱۲)$$

در رابطه فوق، $f(\dots)$ و $f'(\dots)$ می‌تواند هر نوع تابعی باشد، D_t

در این مطالعه، مخازن به منظور تأمین هدف برق‌آبی بهره‌برداری می‌شوند. در بهره‌برداری با هدف تأمین نیاز برق‌آبی، بر خصوصیات غیرخطی مدل به شدت افزوده شده و پیچیدگی‌های حل مسئله افزایش می‌یابد. توان تولیدی نیروگاه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_t = g \times e_t \times \frac{Qp_t}{PF} \times \frac{\overline{H}_t - TW_t}{1000} \quad (۲)$$

$$(\forall t=1, \dots, T)$$

که در این رابطه، P_t = توان تولیدی نیروگاه مخزن در دوره t ام برحسب مگاوات، g = شتاب جاذبه زمین برحسب متر بر مجذور ثانیه، e_t = بازده نیروگاه مخزن در دوره t ام، Qp_t = دبی آب رهاسازی شده از مخزن در دوره t ام برحسب متر مکعب بر ثانیه، PF = ضریب کارکرد نیروگاه مخزن، TW_t = متوسط تراز آب پایاب مخزن در ابتدا و انتهای دوره t ام برحسب متر و \overline{H}_t = متوسط تراز آب مخزن در ابتدا و انتهای دوره t ام برحسب متر می‌باشد.

سایر روابط مورد استفاده عبارتند از:

$$Qp_t = \frac{Re_t}{Mul_t} \quad (\forall t=1, \dots, T) \quad (۳)$$

$$TW_t = c_0 + c_1 \times Qp_t + c_2 \times Qp_t^2 \quad (۴)$$

$$(\forall t=1, \dots, T)$$

که در این روابط، $Mul_t = 10^6$ برابر تعداد ثانیه‌های دوره t ام، c_0 ، c_1 و c_2 = ضرایب ثابت تبدیل دبی آب خروجی از نیروگاه i ام به تراز پایاب در دوره t می‌باشد که از منحنی دبی-اشل پایاب نیروگاه بدست می‌آید. تغییرات دبی-اشل نیروگاه نیز جهت تعیین تراز آب پایاب نیروگاه در جدول ۱ و مشخصات نیروگاه و مخزن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- تغییرات دبی-اشل نیروگاه در سامانه مخزن

رقوم	دبی
متر از سطح دریا	مترمکعب بر ثانیه
۶۶۰/۰	۰
۶۶۱/۰	۱۶۰
۶۶۲/۵	۳۲۰
۶۶۴/۷	۶۴۰
۶۶۷/۸	۱,۲۸۰
۶۶۸/۰	۱,۳۶۰
۶۷۰/۹	۲,۰۰۰

جستجوی تصادفی و تکراری، وجود عملگرهای انتخاب، تزویج، جهش و تعریف مجموعه‌های T و F اشاره نمود. تفاوت این روش با روش GP در ساختار آن می‌باشد. در FLGGP، تعداد ژن‌های هر کروموزوم به تعداد متغیرهای ورودی مسئله وابسته می‌باشد و هر بخش از این کروموزوم با یکی از متغیرهای ورودی مرتبط خواهد بود. در این روش نیز همانند GP هر ژن معرف یک عضو از مجموعه‌های T و F می‌باشد.

تعداد ژن‌های هر کروموزوم در این روش را می‌توان مطابق رابطه ۱۵ بدست آورد:

$$(15) \quad 3 + (\text{تعداد متغیر ورودی}) \times 4 = \text{تعداد ژن}$$

به عنوان مثال، چنانچه برای یک تابع همچون h دو متغیر ورودی x و y مدنظر باشد، با توجه به رابطه ۱۵ تعداد ژن‌های هر کروموزوم برابر با ۱۱ خواهد بود و در هر کروموزوم عبارتی همانند $h = [a_1(\sin((x)^{b_1})) + a_2(\cos((y)^{b_2})) - \exp(c)]^d$ تولید خواهد شد. در FLGGP برخلاف NLP و GA، علاوه بر ثابت‌ها و ضرایب، توابع و عملگرها نیز تغییر خواهند نمود. همان‌طور که در این رابطه مشاهده می‌شود، ۱۱ ژن از مجموعه ضرایب $\{a_1, b_1, a_2, b_2, c, d\}$ ، توابع $\{\sin, \cos, \exp\}$ و عملگرهای $\{+, -\}$ ، در این کروموزوم وجود دارد. رابطه فوق یک عبارت چندجمله‌ای است که می‌تواند با توجه به انواع اعداد و توابع خطی، غیرخطی، نمایی و توانی را ارائه دهد. بنابراین حتی قالب خطی که در GA در نظر گرفته می‌شود و تنها ضرایب آن بهینه خواهد شد را نیز دربر می‌گیرد.

شکل ۲ موقعیت ژن‌های مختلف را در یک کروموزوم در FLGGP نمایش می‌دهد. در شکل ۲، ژن‌های ۱ تا ۴ مربوط به عبارت اول رابطه یعنی $a_1(\sin((x)^{b_1}))$ ، ژن‌های ۵ تا ۸ مربوط به عبارت دوم رابطه یعنی $a_2(\cos((y)^{b_2}))$ ، ژن‌های ۹ و ۱۰ مربوط به عبارت سوم رابطه، یعنی $\exp(c)$ و ژن ۱۱ مربوط به توان (d) می‌باشد. همچنین، شماره ژن‌های ۱، ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ که شامل متغیرهای $\{a_1, b_1, a_2, b_2, c, d\}$ می‌باشند از اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت تشکیل خواهند شد و در طی مراحل تزویج و جهش نیز تنها می‌تواند به اعداد تصادفی دیگر تغییر یابند. همچنین ژن‌های شماره ۲، ۶ و ۱۰ از مجموعه F می‌باشد که در مراحل تزویج و جهش می‌تواند به توابعی دیگر همچون $\{\sin, \cos, \exp, \phi\}$ تغییر نمایند. تابع ϕ به مفهوم این می‌باشد که ژن مذکور هیچ تابعی را اختیار نمی‌نماید. ژن شماره ۴ و ۸ از مجموعه T تشکیل شده است که در مراحل تزویج و جهش تنها می‌تواند به دیگر اعضای مجموعه T همچون $\{+, -, *, /, \}$ تغییر نماید. جایگاه متغیرهای ورودی x و y در رابطه FLGGP ثابت و بدون تغییر خواهد بود.

= نیاز پایین‌دست در طول دوره t ام، M = تعداد ماه‌های سال که برابر با ۱۲ می‌باشد، N = تعداد سالهای بهره‌برداری و در این مطالعه ۱۰ سال می‌باشد.

از جمله قواعد تصمیم‌گیری غیرخطی می‌توان به قاعده S2Q2 اشاره نمود (۲) که در روابط ۱۳ و ۱۴ به ترتیب برای قواعد بهره‌برداری ایستا و پویا نشان داده شده است.

$$Re_t = a_1(S_t - S_{\min})^2 + a_2(S_t - S_{\min}) + a_3Q_t^2 + a_4Q_t + a_5 \quad (13)$$

$$Re_{m,n} = a_{m,1}(S_{m,n} - S_{\min})^2 + a_{m,2}(S_{m,n} - S_{\min}) + a_{m,3}Q_{m,n}^2 + a_{m,4}Q_{m,n} + a_{m,5} \quad (14)$$

در رابطه فوق، a_m ها ضرایب ثابتی هستند که از مدل بهینه‌سازی استخراج می‌شوند.

در این مطالعه از NLDR جهت بهره‌برداری به‌هنگام و در هر دو رویکرد استخراج قواعد بهره‌برداری ایستا و پویا استفاده شده است.

برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)

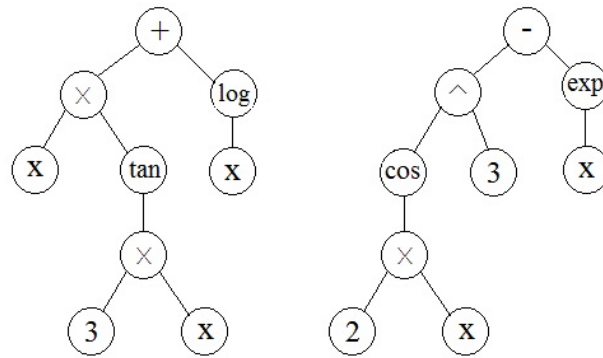
GP از روش‌های جدید الگوریتم جستجوی تکراری می‌باشد. مبنای تمامی این روش‌ها بر اساس نظریه تکاملی داروین استوار می‌باشد که اولین بار توسط کزا (۱۰ و ۱۱) و بنزاف و همکاران (۳) ارائه شده است.

فرآیند گام به گام GP به صورت مراحل زیر است (۱): ابتدا مجموعه‌هایی که می‌توانند جهت انتخاب متغیرها و عملگرها در فرآیند جستجو بکار روند، معرفی شوند. این مجموعه‌ها با نام‌های مجموعه‌های اتصال (T) و توابع (F) شناخته می‌شوند. به عنوان مثال این مجموعه‌ها می‌تواند به صورت $T = \{x, 1, 2, -1, -2, \dots\}$ و $F = \{+, \times, -, \exp, \sin, \cos, \log, \dots\}$ باشند، (۲) انتخاب یک مجموعه جواب اولیه تصادفی از مجموعه‌های T و F (ایجاد کروموزوم‌ها). شکل ۱ نمونه‌ای از دو کروموزوم مستخرج از مجموعه‌های T و F می‌باشد، (۳) تابع هدف متناظر با هر کروموزوم محاسبه می‌گردد و در صورت نیاز، توابع جریمه بر روی مقادیر تابع هدف اعمال می‌شود، (۴) اعمال عملگرهای ژنتیک (تزویج و جهش) و تولید فرزندان و (۵) اعمال فرآیند توسعه‌ای تکراری بر روی فرزندان تا در نهایت پس از تعداد تکرار مشخصی که روند تغییرات تابع هدف در آن تقریباً ثابت گردید، مقدار بهینه یا نزدیک به بهینه به عنوان جواب مسأله استخراج گردد.

برنامه‌ریزی ژنتیک با موقعیت ثابت ژن (FLGGP)

روش FLGGP یک مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده بر اساس روش GP است و به همین دلیل می‌توان آن را زیرمجموعه روش بهینه‌سازی GP دانست. بر همین اساس، روش FLGGP شباهت‌های بسیاری با روش GP دارد. از جمله می‌توان به فرآیند

- 1- Terminal Set
- 2- Function Set



$$y = x * \tan 3x + \log x$$

(ب)

$$y = (\cos 2x)^3 - e^x$$

(الف)

شکل ۱ - نمایش روابط ریاضی در GP: (الف) کروموزوم اول و (ب) کروموزوم دوم

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
a_1	\sin	b_1	+	a_2	\cos	b_2	-	c	\exp	d

شکل ۲ - نمایش رابطه ریاضی $h = [a_1(\sin(x)^{b_1}) + a_2(\cos(y)^{b_2}) - \exp(c)]^d$ در قالب کروموزوم FLGGP

دوم نشان می‌دهد.

در این تحقیق برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن و ارزیابی نتایج حاصل از بهینه‌سازی با روش‌ها و رویکردهای مختلف، از تابع کل کمبود نسبی (رابطه ۵) استفاده شده است.

معرفی منطقه مطالعاتی

در این مطالعه و برای استخراج قاعده بهره‌برداری، مخزن کارون ۳ انتخاب شده است. ساختگاه سد و نیروگاه کارون ۳ در رودخانه کارون و بعد از تلاقی این رودخانه به خراسان واقع شده است. از نظر موقعیت جغرافیایی در مختصات $31^{\circ}48'$ عرض شمالی و $50^{\circ}05'$ طول شرقی قرار گرفته است. هدف احداث سد بتنی دو قوسی کارون ۳ با ارتفاع ۲۰۵ متر، احداث نیروگاه به ظرفیت اسمی ۲،۲۸۰ مگاوات جهت تولید سالیانه ۴،۱۷۲ گیگاوات ساعت انرژی برق و کنترل فرکانس و افزایش پایداری شبکه برق سراسری می‌باشد.

در شکل ۳ متوسط ۱۰ ساله (سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۷۰) جریان ماهانه ورودی به مخزن و همچنین ارتفاع متوسط تبخیر از سطح مخزن (دریاچه سد) در ماه‌های مختلف و در شکل ۴ تغییرات سالانه جریان ورودی به مخزن ارائه شده‌اند.

به همین ترتیب در صورت افزایش تعداد متغیرهای ورودی عبارتهایی مشابه به رابطه اولیه اضافه می‌شود و بر اساس رابطه ۱۵ بر تعداد متغیرهای تصمیم (ژن‌ها) افزوده می‌شود.

توسعه روش‌های به کار رفته در این تحقیق

در این تحقیق بهینه‌سازی بهره‌برداری به‌هنگام سامانه تک‌مخزنه کارون ۳ در دو رویکرد استخراج قواعد بهره‌برداری ایستا و پویا انجام می‌شود. همچنین به منظور استخراج منحنی فرمان در هر دو رویکرد، از قاعده بهره‌برداری NLDR استفاده می‌شود.

در رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری ایستا، برای تمامی ماه‌های سال در دوره‌های مختلف بهره‌برداری تنها یک منحنی فرمان استخراج می‌شود. در حالی که در رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری پویا برای هریک از ماه‌های سال (۱۲ ماه) منحنی فرمان‌های مختص به همان ماه استخراج می‌شود.

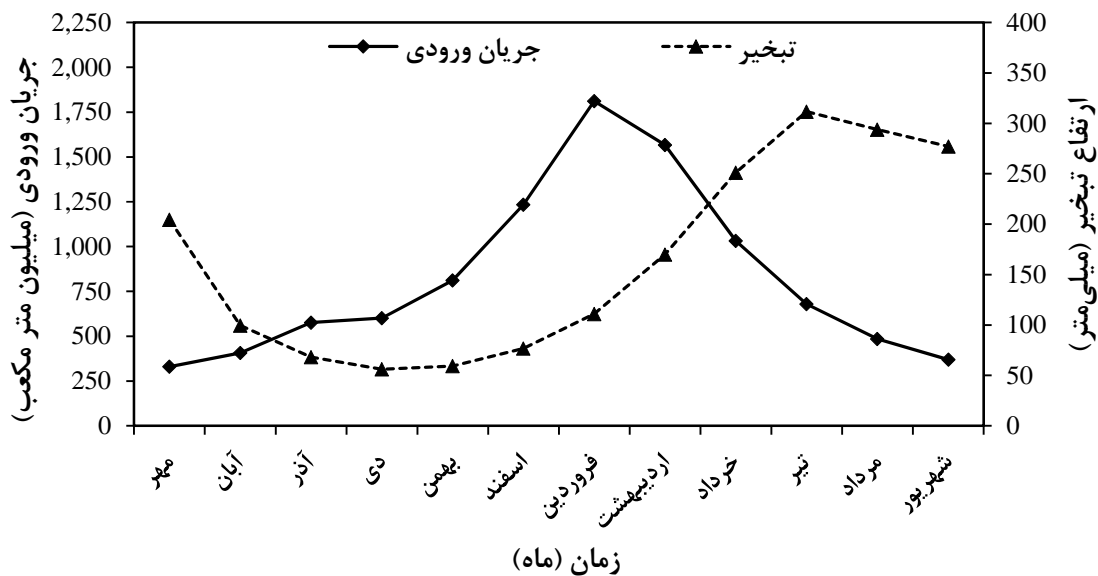
در قاعده بهره‌برداری به‌هنگام از روش‌های بهینه‌سازی NLP، GA، GP و FLGGP استفاده می‌شود.

توابع مربوط به میزان نرخ رهاسازی و برای هریک از رویکردها در روابط زیر آمده است.

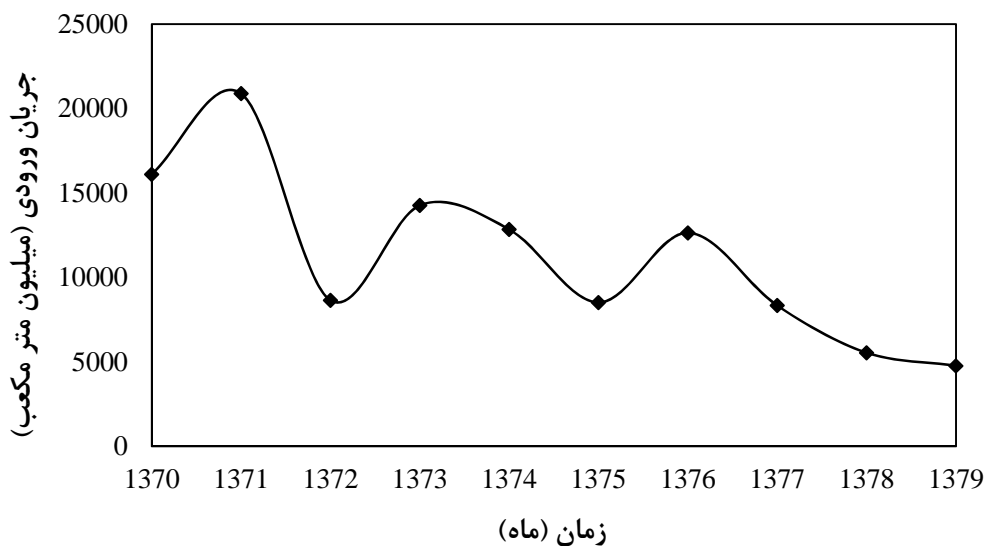
$$Re_t = h(S_t, Q_t) \quad (\forall t=1, \dots, T) \quad (16)$$

$$Re_{m,n} = k(S_{m,n}, Q_{m,n}) \quad (\forall m=1, \dots, M \ \& \ n=1, \dots, N) \quad (17)$$

روابط ۱۶ و ۱۷ تابع حجم رهاسازی را به ترتیب در رویکردهای اول و



شکل ۳- متوسط جریان ماهانه ورودی به مخزن و متوسط ارتفاع تبحیر از سطح مخزن



شکل ۴- تغییرات جریان سالانه ورودی به مخزن

نحوه اجرای روش‌های بهره‌برداری از مخزن (۱۴) Matlab (R۲۰۰۹a) در بهره‌برداری مخزن با این روش استفاده گردیده است. جدول ۳ مشخصات بکار گرفته شده برای این روش را نشان می‌دهد. همچنین در قاعده بهره‌برداری به‌هنگام به روش NLP و GA، از منحنی فرمان S2Q2 استفاده شده است. در این مطالعه برای کد نویسی و اجرای برنامه‌های مربوطه در روش‌های GP و FLGGP از نرم‌افزار Matlab (R۲۰۰۹a) استفاده شده است. جدول ۳ مشخصات بکار گرفته شده برای این روش‌ها را نشان می‌دهد.

نحوه اجرای روش‌های بهره‌برداری از مخزن

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، در این تحقیق، روش‌های NLP، GA، GP و FLGGP برای بهره‌برداری از مخازن بکار گرفته شده است. در این قسمت به بررسی نحوه اجرای هر یک از این روش‌ها پرداخته می‌شود. در روش NLP، از نرم‌افزار لینگو (LINGO) (۱۲) استفاده شده است. در بهره‌برداری با روش GA از جعبه ابزار GA در نرم‌افزار

جدول ۳- مشخصات روش‌های GA، GP و FLGGP در بهره‌برداری مخزن

نخبه‌گرایی	نرخ جهش	نرخ تزویج	تعداد کروموزوم	تعداد تکرار	روش
۱	۰/۸	۰/۸	۵۰	۲۵،۰۰۰	GA
۱	۰/۸	۰/۸	۱۰۰	۵،۰۰۰	GP
۱	۰/۸	۰/۸	۵۰	۱۰،۰۰۰	FLGGP

در این مطالعه از توابع $\{x, \div, +, -, \sin, \cos\}$ برای مجموعه F استفاده شده است.

بهره‌برداری ایستا و پویا با یکدیگر، می‌توان به وضوح برتری رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری پویا را نسبت به دیگری در تمامی روش‌ها مشاهده نمود. برای نمونه، عملکرد روش NLP در رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری پویا با تابع هدف برابر با ۰/۲۳۸ نسبت به رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری پویا با تابع هدف برابر با ۰/۲۶۱ برتری داشته است. برتری رویکرد قاعده بهره‌برداری پویا نسبت به قاعده بهره‌برداری ایستا به این علت می‌باشد که در رویکرد قاعده بهره‌برداری پویا ۱۲ رابطه استخراج می‌شوند که هر رابطه مختص به یک ماه از سال می‌باشد. در حالی که در قاعده بهره‌برداری ایستا تنها یک رابطه استخراج می‌شود و برای تمامی ماه‌های سال از این رابطه استفاده می‌شود. این مسئله باعث افزایش دقت در نتایج حاصل از قاعده بهره‌برداری پویا شده است.

در شکل‌های ۵ و ۶ تغییرات توان تولیدی نیروگاه سامانه تک-مخزنه کارون ۳ به ترتیب در دو رویکرد استخراج قواعد بهره‌برداری ایستا و پویا ارائه شده است.

با توجه به شکل ۵، دو روش FLGGP و GP نسبت به سایر روش‌ها از قابلیت‌های بالاتری در استخراج قاعده بهره‌برداری ایستا برخوردار می‌باشند. همچنین با توجه به شکل ۶، توان تولیدی با روش FLGGP نسبت به دو روش دیگر بیشتر بوده و کمبود کمتری را در دوره‌های مختلف دارا می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از روش‌های NLP، GA، GP و FLGGP در استخراج قاعده بهره‌برداری مخزن کارون ۳ با دو رویکرد استخراج قواعد بهره‌برداری ایستا و پویا استفاده شد و نتایج زیر حاصل گشت: با توجه به نتایج حاصل از بهره‌برداری به‌هنگام با رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری ایستا، می‌توان اظهار داشت که روش GP با تابع هدفی برابر با ۰/۲۴۹ نسبت به روش FLGGP با ۰/۲۵۲، روش NLP با ۰/۲۶۱ و روش GA با ۰/۲۶۷ برتر می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از بهره‌برداری به‌هنگام با رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری ایستا، می‌توان روش FLGGP را به دلیل ارائه عملکردی قابل قبول و نزدیک به روش GP، به عنوان

در این تحقیق، مجموعه F برای روش GP از توابع $\{x, \div, +, -, \sin, \cos, \exp\}$ و برای روش FLGGP از توابع $\{x, \div, +, -, \sin, \cos, \exp\}$ استفاده می‌شود.

نتایج و بحث

در این مطالعه از روش‌های NLP، GA، GP و FLGGP جهت بهره‌برداری به‌هنگام و در دو رویکرد استخراج قواعد بهره‌برداری ایستا و پویا استفاده شده است. در این قسمت، به بررسی نتایج حاصل از استخراج منحنی فرمان در سامانه تک مخزنه کارون ۳ پرداخته می‌شود. در جدول ۴ مقادیر تابع هدف (تابع کل کمبود نسبی) ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر تابع هدف در بهره‌برداری به‌هنگام کارون ۳

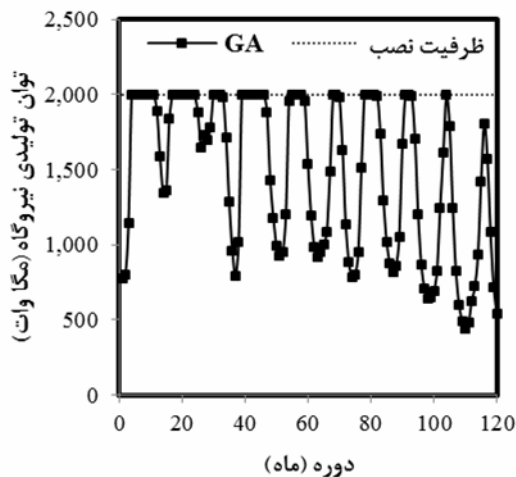
روش	رویکرد قاعده ایستا	رویکرد قاعده پویا
NLP	۰/۲۶۱	۰/۲۳۸
GA	۰/۲۶۷	۰/۲۴۶
GP	۰/۲۴۹	-----
FLGGP	۰/۲۵۲	۰/۲۲۰

با توجه به جدول فوق می‌توان نتیجه گرفت که در رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری ایستا، روش GP با تابع هدفی برابر با ۰/۲۴۹ و سپس روش FLGGP با تابع هدفی برابر با ۰/۲۵۲ بهترین عملکرد را دارا می‌باشند. همچنین در رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری پویا، روش FLGGP با تابع هدفی برابر با ۰/۲۲۰ از مطلوبیت بیشتری برخوردار می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد که از روش GP در رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری پویا به دلیل محدودیت‌های این روش استفاده نشده است. برتری روش GP و FLGGP می‌تواند مربوط ساختار این دو مدل باشد که متغیرهای تصمیم در آن‌ها علاوه بر ضرایب شامل توابع و عملگرها نیز می‌باشند. این موضوع باعث افزایش انعطاف‌پذیری آن‌ها شده است. با توجه به جدول ۴ و در مقایسه دو رویکرد استخراج قواعد

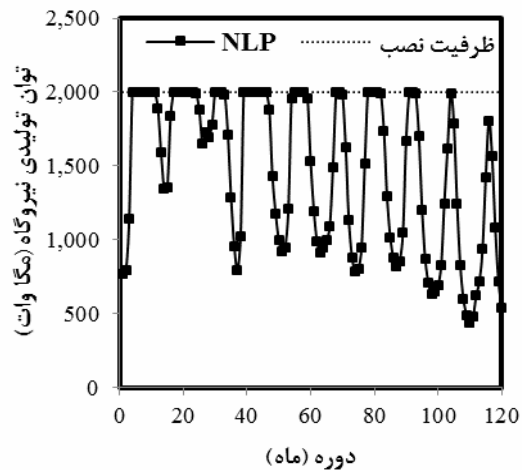
برتر می‌باشد. در مقایسه دو رویکرد استخراج قواعد بهره‌برداری ایستا و پویا، نتایج حاصل از رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری پویا نسبت به رویکرد دیگر از برتری قابل توجهی برخوردار می‌باشد. بر همین اساس می‌توان پیشنهاد نمود که در بهره‌برداری از سامانه مخازن از رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری پویا استفاده شود.

جایگزینی شایسته در رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری پویا و یا سامانه‌هایی با بیش از یک زیر مجموعه (همچون سامانه چندمخزنه) مطرح نمود.

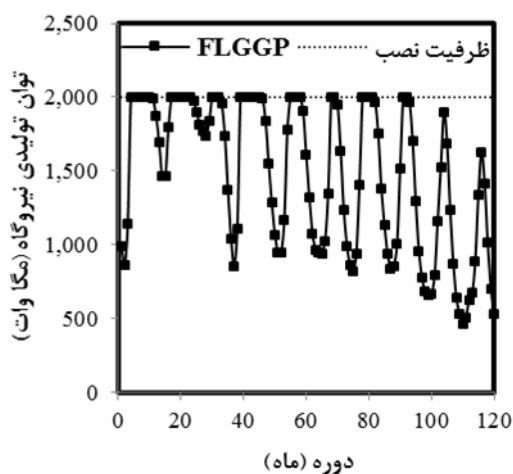
نتایج حاصله از بهره‌برداری به‌هنگام با رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری پویا نشان می‌دهد که روش FLGGP با تابع هدفی برابر با $0/22$ نسبت به روش‌های NLP با $0/238$ و GA با $0/246$ روش



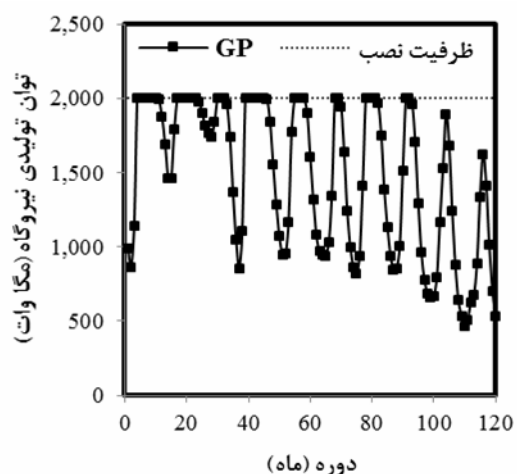
(ب)



(الف)

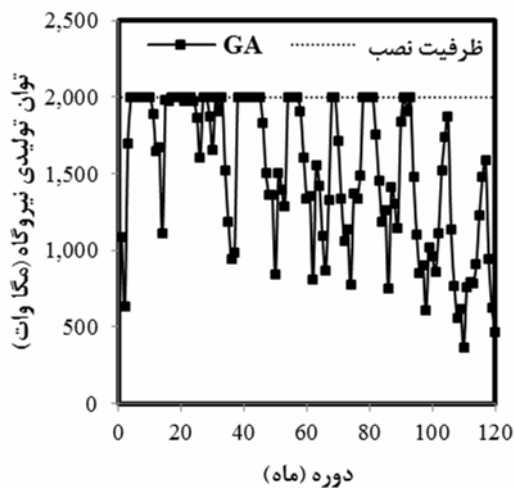


(ت)

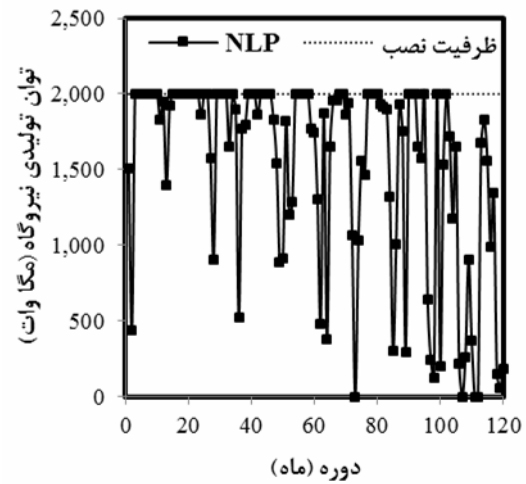


(پ)

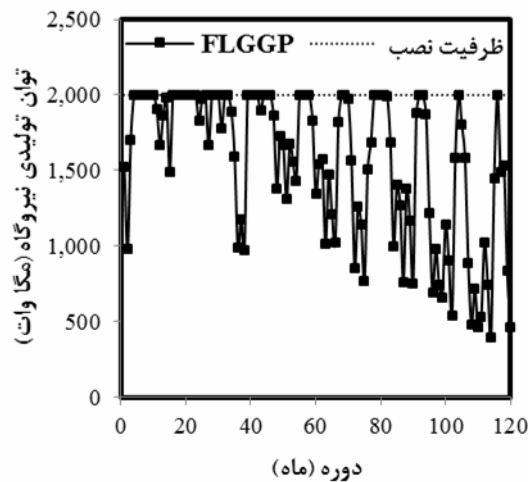
شکل ۵- تغییرات توان تولیدی نیروگاه کارون ۳ در بهره‌برداری به‌هنگام با رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری ایستا: (الف) روش NLP، (ب) روش GA، (پ) روش GP و (ت) روش FLGGP



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۶- تغییرات توان تولیدی نیروگاه کارون ۳ در بهره‌برداری به‌هنگام با رویکرد استخراج قاعده بهره‌برداری پویا: (الف) روش NLP، (ب) روش GA و (پ) روش FLGGP

منابع

- ۱- اکبری الاشتی ح.، و بزرگ‌حداد ا. ۱۳۹۱. مقایسه‌ی شبیه‌ها و روش‌های مختلف پیش‌بینی ماهانه‌ی جریان مبتنی بر هوش مصنوعی. فصل‌نامه مهندسی منابع آب. ۱۳(۵): ۴۳-۲۹.
- ۲- بلوری یزدلی ی. ۱۳۸۷. تأثیر استخراج منحنی فرمان سیستم‌های چندمخزنی با اهداف مختلف در بازده کلی طرح. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.
- 3- Banzhaf W., Nordin P., Keller R. and Francone F.D. 1998. Genetic programming: an introduction, Morgan Kaufmann Publishers Inc, San Fransisco, CA, USA.
- 4- Chen L. 2003a. A study of applying genetic programming to reservoir trophic state evaluation using remote sensor data, International Journal of Remote Sensing, 24(11): 2265-2275.
- 5- Chen L. 2003b. A study of applying macro-evolutionary genetic programming to concrete strength estimation, Journal of Computing in Civil Engineering, 17(4): 290-294.
- 6- Chen L. 2003c. Real coded genetic algorithm optimization of long term reservoir operation, Journal of American Water Resources Association, 39(5): 1157-1165.
- 7- Fallah-Mehdipour E., Bozorg Haddad O. and Marino M.A. 2012. Real-time operation of reservoir system by

- genetic programming, *Water Resources Management*, 26(14): 4091-4103.
- 8- Fogel L.J. 1964. On the organization of intellect. Ph.D. Thesis, University of California Los Angeles, Los Angeles, CA, USA.
 - 9- Fogel L.J., Owens A.J. and Walsh M.J. 1966. Artificial intelligence through simulated evolutions, John Wiley, Michigan, MI, USA.
 - 10- Koza J.R. 1992. Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection, MIT Press, Cambridge, MA, USA.
 - 11- Koza J.R. 1994. Genetic programming II: Automatic discovery of reusable programs, MIT Press, Cambridge, MA, USA.
 - 12- LINDO. 2004. LINGO user's manual, LINDO System INC, <http://www.lindo.com/>.
 - 13- Orouji H., Bozorg Haddad O., Fallah-Mehdipour E. and Marino M.A. 2013. Flood routing in branched river by genetic programming, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, DOI: 10.1680/wama.12.00006.
 - 14- Overman E. 2011. A MATLAB tutorial. Department of Mathematics, The Ohio State University, Columbus, OH, USA, 180 p.p.
 - 15- Yeh W.W.G. 1985. Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review, *Water Resources Research*, 21(12): 1797-1818.

Extraction of Static and Dynamic Reservoir Operation Rules by Genetic Programming

H. Akbari Alashti^{1*} - O. Bozorg Haddad²

Received:09-05-2013

Accepted:23-06-2014

Abstract

Considering the necessity of desirable operation of limited water resources and assuming the significant role of dams in controlling and consuming the surface waters, highlights the advantageous of suitable operation rules for optimal and sustainable operation of dams. This study investigates the hydroelectric supply of a one-reservoir system of Karoon3 using nonlinear programming (NLP), genetic algorithm (GA), genetic programming (GP) and fixed length gen GP (FLGGP) in real-time operation of dam considering two approaches of static and dynamic operation rules. In static operation rule, only one rule curve is extracted for all months in a year whereas in dynamic operation rule, monthly rule curves (12 rules) are extracted for each month of a year. In addition, nonlinear decision rule (NLDR) curves are considered, and the total deficiency function as the target (objective) function have been used for evaluating the performance of each method and approach. Results show appropriate efficiency of GP and FLGGP methods in extracting operation rules in both approaches. Superiority of these methods to operation methods yielded by GA and NLP is 5%. Moreover, according to the results, it can be remarked that, FLGGP method is an alternative for GP method, whereas the GP method cannot be used due to its limitations. Comparison of two approaches of static and dynamic operation rules demonstrated the superiority of dynamic operation rule to static operation rule (about 10%) and therefore this method has more capabilities in real-time operation of the reservoirs systems.

Keywords: NLP, GA, GP, Fixed length gene GP (FLGGP), Static and dynamic operation rules

1,2- M.Sc. Student and Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Tehran, Iran

(* - Corresponding Author Email: h.akbari@ut.ac.i)