

ارزیابی روش برنامه‌ریزی ژنتیک با موقعیت ثابت ژن در تدوین قواعد و رویکردهای بهره‌برداری به‌هنگام در سامانه سه مخزنه

حبیب اکبری الاشتی^۱ امید بزرگ حداد^۲

(دریافت ۹۱/۱۲/۱ پذیرش ۹۲/۸/۱۳)

چکیده

در پژوهش حاضر، به منظور تأمین برق آبی سامانه سه مخزن (مخازن کارون ۴، خراسان ۱ و کارون ۳)، به بررسی روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی ژنتیک با موقعیت ثابت ژن در استخراج سیاست‌های بهره‌برداری به‌هنگام در دو رویکرد وابسته به پیش‌بینی و مستقل از پیش‌بینی جریان پرداخته شد. همچنین از قاعده بهره‌برداری غیرخطی در استخراج منحنی فرمان استفاده شد و تابع هدف کمبود کل و معیارهای ارزیابی کارایی برای ارزیابی نتایج هر یک از روش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت با استفاده از نتایج حاصل از بهره‌برداری به‌هنگام در سامانه‌های تک‌مخزنه کارون ۴، خراسان ۱ و کارون ۳ به مقایسه عملکرد دو سامانه تک‌مخزنه و سه‌مخزنه پرداخته شد. نتایج حاصل از این مطالعه، حاکی از کارایی مناسب روش FLGGP در استخراج قاعده بهره‌برداری در هر دو رویکرد مورد بحث بود. در مقایسه دو رویکرد وابسته به پیش‌بینی و مستقل از پیش‌بینی، اختلاف زیادی مشاهده نشد و به این ترتیب می‌توان از رویکرد مستقل از پیش‌بینی به‌علت سهولت استفاده از آن، در استخراج قاعده بهره‌برداری سامانه مخازن استفاده نمود.

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

Evaluation of Fixed Length Gene Genetic Programming (FLGGP) Method in Reservoir System Optimal Operation

H. Akbari Alashti¹ O. Bozorg Haddad²

(Received Feb. 19, 2013 Accepted Nov. 4, 2013)

Abstract

This paper employs nonlinear programming (NLP), genetic algorithm (GA), and fixed length gene genetic programming (FLGGP) for the real-time operation of a three-reservoir system (Karoon4, Khersan1, and Karoon3 reservoirs) in which dependent and independent approaches are used to forecast the hydroelectric energy generated by the system. Unlike the forecast-independent approach, in the forecast-dependent approach, the value of release in each period depends on the reservoir in flow of the same period. Moreover, nonlinear decision rule (NLDR) curves are considered, and the total deficiency function as well as efficiency criteria are used to investigate the results of each procedure used. Finally, the performances of real-time operation of single- and three-reservoir systems are investigated and compared. Results indicate that the FLGGP gives the most efficient function for the extraction of reservoir operation rules in both the approaches examined. Comparison of the forecast-dependent and independent approaches revealed no significant differences. Therefore, the forecast-independent approach may be recommended for application in the extraction of reservoir operation rules due to its simplicity and ease of application.

Keywords: GA, Fixed Length Gene Genetic Programming (FLGGP), NLP, Real-time Operation.

1. MSc Student of Water Resources Eng., Dept. of Irrigation and Reclamation Eng., College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Karaj (Corresponding Author) (+98 21) 44075610 akbarihibib@gmail.com

2. Assoc. Prof., Dept. of Irrigation and Reclamation Eng., College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Karaj

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج (نویسنده مسئول) ۴۴۰۷۵۶۱۰ (+۹۸ ۲۱) ۰۲۱) akbarihibib@gmail.com

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

همواره پژوهشگران در تلاش برای معرفی روش‌هایی با کارایی بالا برای استخراج سیاست‌های بهره‌برداری بوده‌اند. از جمله این روش‌ها، روش برنامه‌ریزی غیرخطی^۱ و الگوریتم ژنتیک^۲ است [۴-۱].

از الزامات استخراج قاعده بهره‌برداری مناسب با استفاده از روش‌های کلاسیک مانند NLP و الگوریتم‌های تکاملی مانند GA، تعریف دقیق رابطه‌ای برای وابسته کردن حجم رهاسازی مخزن به دیگر پارامترهای بهره‌برداری مانند حجم ذخیره مخزن و حجم آورد رودخانه است. بر همین اساس، بررسی تمامی روابط ممکن به منظور پیدا کردن رابطه بهینه بهره‌برداری مخزن، امری ضروری است؛ که البته نیازمند صرف وقت بسیار است. به این دلیل، در این مطالعه از روش‌های برنامه‌ریزی تکاملی برای استخراج قاعده بهره‌برداری مناسب استفاده شد. این روش‌ها بر خلاف روش‌های قبلی، خود اقدام به استخراج رابطه بهینه بهره‌برداری می‌نمایند. اواخر دهه ۱۹۸۰ برنامه‌ریزی تکاملی برای استفاده در مسائل بهینه‌سازی توسعه داده شد [۵]. از مهم‌ترین روش‌های برنامه‌ریزی تکاملی می‌توان به برنامه‌ریزی ژنتیک^۳ اشاره کرد.

GP از جمله روش‌هایی است که با استفاده از آن می‌توان قواعد بهره‌برداری از مخزن را استخراج کرد. از نواقص این روش این است که در آن به علت امکان ایجاد تنوع در ارائه روابط ریاضی با ساختار درختی، همچنین امکان طولانی شدن برخی روابط حاصل از آن، امکان استفاده عملی از روابط کمتر است. به علاوه GP به علت در نظر گرفتن ساختار درختی برای استخراج رابطه ریاضی، تنها قادر به ارائه یک رابطه میان مجموعه‌های ورودی و خروجی است. در حالی که در سامانه‌هایی با بیش از یک زیرمجموعه مانند سامانه چندمخزنه، نیاز به استخراج بیش از یک رابطه ریاضی وجود دارد. لذا استفاده از GP در بهره‌برداری به‌هنگام سامانه‌های چندمخزنه وجود ندارد.

در این مطالعه به دلیل محدودیت‌هایی که کاربرد روش GP در بهره‌برداری سامانه سه‌مخزنه دارد، به توسعه این روش پرداخته شد. این روش، بهینه‌سازی روش GP با موقعیت ثابت ژن^۴ است.

هدف از این تحقیق، بررسی و مقایسه قابلیت‌های روش‌ها و رویکردهای مختلف بهره‌برداری از مخزن در سامانه سه‌مخزنه کارون ۴، خراسان ۱ و کارون ۳ با هدف تولید انرژی برق‌آبی و استخراج قاعده بهره‌برداری بهینه مبتنی بر پارامترهایی همچون

ورودی مخزن و حجم ذخیره مخزن بود که با هدف کاهش میزان کمبود در تأمین نیاز برق‌آبی انجام شد. از این رو، بهره‌برداری مخزن با به‌کارگیری قواعد تصمیم‌گیری غیرخطی^۵ و استفاده از روش‌های NLP، GA و FLGGP در بهره‌برداری به‌هنگام و با دو رویکرد وابسته به پیش‌بینی و مستقل از پیش‌بینی انجام شد. برای ارزیابی نتایج حاصله، از تابع کمبود کل به‌عنوان تابع هدف و معیارهای ارزیابی کارایی استفاده شد. همچنین به‌منظور بررسی کارایی روش‌ها و رویکردهای مورد استفاده در این تحقیق، از روش‌های NLP و GA به‌منظور بهره‌برداری بلندمدت استفاده شد و روش برتر در بررسی کارایی روش‌های مختلف بهره‌برداری به‌هنگام به‌کار گرفته شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این قسمت، به بررسی نحوه مدل‌سازی بهره‌برداری از سامانه مخزن با هدف تأمین نیاز برق‌آبی، NLDR، روش‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری، معیارهای ارزیابی کارایی و آشنایی با منطقه مورد مطالعه پرداخته شد.

۲-۱- مدل‌سازی بهره‌برداری از سامانه مخازن

معادله پیوستگی در سامانه به‌صورت زیر است

$$S_{i,t+1} = S_{i,t} + Q_{i,t} + C \cdot Re_{i,t} + C' \cdot Sp_{i,t} - Ev_{i,t} \left(\frac{A_{i,t} + A_{i,t+1}}{2000} \right) \quad (1)$$

($\forall t=1, \dots, T$ & $\forall i=1, \dots, N$)

که در این رابطه

اندیس i شاخص شماره مخزن مورد بهره‌برداری، t شماره دوره مورد نظر، N تعداد مخازن موجود در سامانه، T تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری، $S_{i,t}$ حجم ذخیره مخزن i ام در ابتدای دوره t ام برحسب متر مکعب و $S_{i,t+1}$ حجم ذخیره مخزن i ام در انتهای دوره t ام برحسب متر مکعب است. دوره زمانی (t) مورد استفاده در این روابط ممکن است ساعتی، روزانه، هفتگی، ماهانه و یا فصلی باشد که به طبیعت و هدف مسئله بهینه‌سازی بستگی دارد که در این تحقیق به‌صورت ماهانه در نظر گرفته شد. $Q_{i,t}$ جریان ورودی رودخانه به مخزن i ام در طول دوره t ام برحسب متر مکعب، $Re_{i,t}$ حجم رهاسازی از مخزن i ام و در طول دوره t ام (متغیر تصمیم) برحسب متر مکعب، $Sp_{i,t}$ مقدار سرریز از مخزن i ام در طول دوره t

¹ Non Linear Programming (NLP)

² Genetic Algorithm (GA)

³ Genetic Programming (GP)

⁴ Fixed Location Gene Genetic Programming (FLGGP)

⁵ Non Linear Decision Rules (NLDR)

⁶ Decision Variable

انجام می‌شود. در دسته دوم رهاسازی از مخزن در هر دوره زمانی تابعی از پارامترهایی همچون آب‌دهی رودخانه، حجم ذخیره مخزن و نیاز پایین دست است. انتخاب هر یک از این پارامترها به اهداف مورد نظر و اهمیت هر یک در تعیین مقدار رهاسازی‌ها بستگی دارد. با توجه به ماهیت دسته دوم و مطالعات گذشته، می‌توان دسته دوم را سیاست بهره‌برداری به‌هنگام نامید.

به‌طورکلی قواعد بهره‌برداری از مخازن به دو صورت کلی منحنی‌های فرمان و یا توابع تصمیم‌گیری ارائه می‌شوند. این قواعد با توجه به سیاست بهره‌برداری می‌توانند خطی یا غیرخطی باشند. در قواعد تصمیم‌گیری غیرخطی (NLDR)، میزان رهاسازی تابعی از پارامترهای تصمیم‌گیری همچون حجم ذخیره مخزن و جریان ورودی است و این تابع می‌تواند به صورت غیرخطی باشد. رابطه ۴، این تابع را برای سامانه چندمخزنه نشان می‌دهد

$$Re_{i,t} = g(S_{i,t}, Q_{i,t}, Re_{j,t}, D_{i,t}) \quad (\forall t=1, \dots, T \ \& \ \forall i=1, \dots, N \ \& \ \forall j=1, \dots, N \ \& \ j \neq i) \quad (4)$$

که در این رابطه

$g()$ می‌تواند هر نوع تابع غیرخطی باشد.

از جمله این قواعد می‌توان به قاعده S2Q2 اشاره نمود که در رابطه ۵ برای سامانه چندمخزنه نشان داده شده است.

(۵)

$$Re_{i,t} = a_{1i}.S_{i,t}^2 + a_{2i}.S_{i,t} + a_{3i}.Q_{i,t}^2 + a_{4i}.Q_{i,t} + a_{5i}$$

که در رابطه بالا

a_i ها ضرایب ثابتی هستند که از مدل بهینه‌سازی استخراج می‌شوند.

در این مطالعه از NLDR برای بهره‌برداری به‌هنگام استفاده شد.

۲-۳- برنامه‌ریزی ژنتیک با موقعیت ثابت ژن (FLGGP)

FLGGP یک روش محاسباتی است که در آن همانند GP این امکان وجود دارد که به غیر از اعداد، عملگرها و توابع ریاضی نیز به‌عنوان متغیرهای تصمیم در فرایند بهینه‌سازی شرکت نمایند. در این حالت می‌توان از FLGGP، برای استخراج رابطه مناسب استفاده نمود که در آن هر ژن یک کروموزوم معرف یک عضو از مجموعه‌هایی با نام اتصال^۱ (T) شامل اعداد و متغیرها و توابع^۳ (F) شامل عملگرها و توابع ریاضی است. مهم‌ترین تفاوت FLGGP با GP در ساختار آن است. به‌طوری که ساختار درختی در GP

ام برحسب متر مکعب، $Ev_{i,t}$ ارتفاع خالص تبخیر از مخزن i ام در طول دوره t ام برحسب متر، $A_{i,t}$ سطح مخزن i ام در ابتدای دوره t ام برحسب متر مربع، $A_{i,t+1}$ سطح مخزن i ام در انتهای دوره t ام بر حسب متر مربع، C ماتریس ارتباط یا روندیابی^۱ سامانه که جریان خروجی از هر مخزن را به مخازن دیگر ارتباط می‌دهد و C' ماتریس ارتباط یا روندیابی سامانه برای انتقال مقادیر سرریز مخازن بالا دست به مخازن پایین دست است که مشابه ماتریس C است.

توان تولیدی نیروگاه از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$P_{i,t} = g \times e_{i,t} \times \frac{Q_{p_{i,t}}}{PF_i} \times \frac{\bar{H}_{i,t} - TW_{i,t}}{1000} \quad (\forall t=1, \dots, T \ \& \ \forall i=1, \dots, N) \quad (2)$$

که در این رابطه

$P_{i,t}$ توان تولیدی نیروگاه مخزن i ام در طول دوره t ام برحسب مگاوات، g شتاب جاذبه زمین برحسب متر بر مجذور ثانیه، $e_{i,t}$ بازده نیروگاه مخزن i ام و در دوره t ام، $Q_{p_{i,t}}$ دبی آب رهاسازی شده از مخزن i ام و در طول دوره t ام برحسب متر مکعب بر ثانیه، PF_i ضریب کارکرد نیروگاه مخزن i ام، $TW_{i,t}$ تراز آب پایاب مخزن i ام و در طول دوره t ام برحسب متر و $\bar{H}_{i,t}$ متوسط تراز آب مخزن i ام در ابتدا و انتهای دوره t ام برحسب متر است.

برای بهینه‌سازی سامانه مخازن، می‌توان تابع هدف را به صورت کمینه‌سازی اختلاف توان تولیدی نیروگاه از بیشینه توان تولیدی آن (ظرفیت نصب) در نظر گرفت

$$\text{Min Def} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N P_{i,t}}{\sum_{i=1}^N PPC_i} \right) \quad (\forall t=1, \dots, T \ \& \ \forall i=1, \dots, N) \quad (3)$$

که در آن

Def شاخص کمبود کل و PPC ظرفیت نصب نیروگاه برحسب مگاوات است.

۲-۲- قواعد تصمیم‌گیری غیرخطی

در این مطالعه، مخازن با دو سیاست بهره‌برداری متفاوت بهره‌برداری شدند. در دسته اول، با به‌کارگیری یک سری زمانی طولانی مدت و با فرض تکرار آن در دوره‌های آینده، بهره‌برداری

² Terminal Set
³ Function Set

¹ Connectivity or Routing Matrix

{+, -, *, /} تغییر نماید. لازم به ذکر است که جایگاه متغیر ورودی x در رابطه FLGGP ثابت و بدون تغییر خواهد بود.

1	2	3	4	5	6	7
a	sin	b	+	c	exp	d

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

چنانچه استخراج رابطه با بیش از یک متغیر مد نظر باشد، طول کروموزوم بیشتر و به تبع آن مطابق با رابطه ۶ بر تعداد متغیرهای تصمیم اضافه می شود و امکان قرارگیری یک عبارت دیگر، مشابه با رابطه $(\sin(x)^b)$ فراهم می شود. برای نمونه، در صورتی که متغیرهای ورودی مسئله شامل x و y باشند، تعداد متغیر تصمیم مطابق رابطه ۶ برابر با ۱۱ خواهد بود و همچنین رابطه FLGGP به صورت رابطه ای شش بیه خواهد بود.

$$f = [a_1(\sin(x)^{b_1}) + a_2(\cos(y)^{b_2}) + \exp(c)]^d$$

سایر کروموزوم های جمعیت اولیه نیز روابط ریاضی دیگری را معرفی کرده و به این ترتیب مجموعه ای شامل روابط مختلف به عنوان نسل اول تشکیل خواهد شد. مطابق هر رابطه ریاضی یا کروموزوم، یک تابع هدف محاسبه می شود. از این مرحله به بعد، مراحل جستجوی تکاملی FLGGP (شامل مراحل همچون انتخاب، تزویج و جهش) دقیقاً مطابق GA است. به بیان دیگر، با استفاده از انتخاب، تزویج و جهش جمعیت جدید برای نسل بعدی تشکیل خواهد شد. سپس کروموزوم های ساخته شده در نسل بعدی، روابط جدیدی را معرفی می نمایند و فرایند جستجویی که توضیح داده شد، آنقدر ادامه می یابد تا به تعداد تکرار مورد نظر دست یافته شود.

۲-۴- معیارهای ارزیابی کارایی سامانه چندمخزنه

برای ارزیابی عملکرد روش های مورد استفاده برای بهره برداری از سامانه های منابع آب، می توان از معیارهای کارایی سامانه مخازن^۱ استفاده نمود. مهم ترین و پرکاربردترین این معیارها عبارت اند از: اعتمادپذیری^۲، برگشت پذیری^۳ و آسیب پذیری^۴ [۶].

۳- معرفی منطقه مطالعاتی

در این مطالعه و برای استخراج قاعده بهره برداری سامانه سه مخزنه، از مخازن کارون ۴، خرسان ۱ و کارون ۳ استفاده شد. این سه مخزن

ساختار خطی در FLGGP تغییر یافته است. همچنین هر ژن در ساختار خطی FLGGP به تعداد متغیرهای ورودی مسئله وابسته است.

در FLGGP کروموزوم هایی با تعداد ژن های ثابت که هر بخش از آن معرف یک عبارت ریاضی مرتبط به یک متغیر است بر اساس نوع مسئله در نظر گرفته می شود.

به عنوان مثال، چنانچه برای یک تابع همچون f ، یک متغیر ورودی x مدنظر باشد، عبارتی همانند $f = [a(\sin(x)^b) + \exp(c)]^d$ در هر کروموزوم تولید خواهد شد. همان طور که در این رابطه مشاهده می شود، هفت ژن از مجموعه ضرایب $\{a, b, c, d\}$ ، تابع $\{\sin, \exp\}$ و عملگر $+$ ، در این کروموزوم وجود دارد. رابطه فوق یک عبارت دو جمله ای است که می تواند انواع اعداد و توابع خطی، غیر خطی و نمایی و توانی را ارائه دهد. بنابراین حتی قالب خطی که در GA در نظر گرفته می شود و تنها ضرایب آن بینه خواهد شد را نیز در بر می گیرد. تعداد متغیرهای تصمیم در این روش را می توان مطابق رابطه ۶ به دست آورد

$$(۶) \quad ۳ + (\text{تعداد متغیر ورودی}) \times ۴ = \text{تعداد متغیر تصمیم}$$

برای مثال، در صورتی که همانند مثال بالا، تنها متغیر ورودی مسئله x باشد، آن وقت مطابق رابطه ۶، تعداد متغیرهای تصمیم برابر هفت خواهد بود.

شکل ۱ موقعیت ژن های مختلف را در یک کروموزوم در FLGGP نمایش می دهد. در این شکل، ژن های ۱ تا ۴ مربوط به عبارت اول رابطه یعنی $(\sin(x)^b)$ ، ژن های ۵ و ۶ مربوط به رابطه دوم یعنی $\exp(c)$ و ژن ۷ مربوط به توان رابطه (d) است. همچنین، شماره ژن های ۱، ۳، ۵ و ۷ که شامل متغیرهای $\{a, b, c, d\}$ هستند، از اعداد تصادفی تشکیل خواهند شد و در طی مراحل تزویج و جهش نیز تنها می توانند به اعداد تصادفی دیگر تغییر یابند. همچنین ژن های شماره ۲ و ۶ از مجموعه توابع (F) هستند که در مراحل تزویج و جهش می توانند به توابعی دیگر همچون $\{\sin, \cos, \exp, (\phi)\}$ تغییر نمایند. تابع (ϕ) به مفهوم این است که ژن مذکور، تابع خاصی را اختیار نمی نماید. برای نمونه، در صورتی که ژن شماره ۲ تابع (ϕ) را اختیار نماید، رابطه FLGGP به $f = [a(x)^b + \exp(c)]^d$ تغییر خواهد نمود. ژن شماره ۴ از مجموعه اتصال (T) تشکیل شده است که در مراحل تزویج و جهش تنها می تواند به دیگر اعضای مجموعه اتصال (T) همچون

¹ Performance Indices of Reservoir System

² Reliability

³ Resiliency

⁴ Vulnerability

بر روی رودخانه کارون، تشکیل یک سامانه سه مخزنه سری و موازی را می‌دهند.

ساختمان سد خرسان ۱ در رودخانه خرسان (از سرشاخه‌های رودخانه کارون) و در ناحیه‌ای به عرض شمالی $31^{\circ}30'$ و طول شرقی حدود $50^{\circ}26'$ واقع شده است. متوسط جریان سالانه ورودی به این مخزن ۱،۳۵۱ میلیون مترمکعب است. همچنین موقعیت سد کارون ۴ در رودخانه کارون و قبل از تلاقی این رودخانه به خرسان واقع شده و از نظر موقعیت جغرافیایی در مختصات $31^{\circ}35'$ عرض شمالی و $50^{\circ}24'$ طول شرقی قرار دارد. متوسط جریان سالانه ورودی به این مخزن ۶،۰۴۵ میلیون مترمکعب تخمین زده شده است. ساختمان سد و نیروگاه کارون ۳ در رودخانه کارون و بعد از تلاقی این رودخانه به خرسان واقع شده است. از نظر موقعیت جغرافیایی در مختصات $31^{\circ}48'$ عرض شمالی و $50^{\circ}05'$ طول شرقی قرار گرفته است.

در جدول ۱ متوسط ده ساله جریان ماهانه ورودی به مخازن در ماه‌های مختلف و در جدول ۲ مشخصات مخازن و نیروگاه‌های برق‌آبی آنها ارائه شده است [۷].

همچنین لازم به ذکر است که در این مطالعه عملکرد واحدهای مختلف نیروگاه‌های برق‌آبی به‌طور مجزا در نظر گرفته نشده است.

۳-۱- توسعه روش‌های به‌کار رفته در این تحقیق

در این تحقیق، بهینه‌سازی بهره‌برداری مخازن به دو صورت انجام شد.

بهینه‌سازی بهره‌برداری مخازن در قاعده بهره‌برداری دسته اول، با استفاده از روش‌های NLP و GA انجام شد و هدف از این نوع بهینه‌سازی بررسی دقیق‌تر نتایج حاصل از قاعده بهره‌برداری دسته دوم (بهره‌برداری به هنگام) بود.

جدول ۱- متوسط جریان ماهانه ورودی به مخازن (میلیون متر مکعب)

ماه	کارون ۴	خرسان ۱	کارون ۳
مهر	۱۹۷/۲۳	۱۱۸/۸۹	۳۳۰/۹۰
آبان	۲۴۵/۲۴	۱۳۹/۵۵	۴۰۶/۲۹
آذر	۳۳۷/۹۳	۲۰۹/۱۱	۵۷۶/۹۳
دی	۳۰۳/۸۳	۲۳۲/۶۷	۶۰۱/۵۱
بهمن	۴۳۴/۰۴	۳۴۵/۴۹	۸۱۱/۸۴
اسفند	۶۹۷/۸۵	۴۸۶/۶۰	۱۲۳۳/۹۰
فروردین	۱۱۴۳/۹۴	۶۴۴/۳۳	۱۸۱۱/۲۰
اردیبهشت	۱۰۵۳/۱۰	۴۵۸/۵۵	۱۵۶۷/۵۰
خرداد	۶۷۰/۷۵	۳۰۸/۳۴	۱۰۳۲/۰۰
تیر	۴۲۴/۷۹	۲۲۱/۰۷	۶۸۰/۲۷
مرداد	۲۹۵/۰۵	۱۶۳/۳۹	۴۸۴/۵۷
شهریور	۲۲۸/۰۵	۱۳۰/۵۱	۳۶۹/۳۳
میانگین	۵۰۲/۶۵	۲۸۸/۲۱	۸۲۵/۵۲

در این تحقیق و در قاعده بهره‌برداری به هنگام، برای استخراج منحنی فرمان، از قاعده بهره‌برداری NLDR و همچنین دو رویکرد متفاوت استفاده شد. رویکرد اول، رویکرد وابسته به پیش‌بینی جریان و رویکرد دوم، رویکرد مستقل از پیش‌بینی جریان بود.

در رویکرد وابسته به پیش‌بینی، میزان رهاسازی در هر دوره، تابعی از جریان ورودی به مخزن در آن دوره و دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر حجم رهاسازی، خواهد بود. با توجه به مشخص نبودن جریان ورودی به مخزن در آن دوره، نیاز به استفاده از یک مدل پیش‌بینی برای تخمین جریان ورودی نیز ضروری است. لذا از این رویکرد به‌عنوان رویکرد وابسته به پیش‌بینی نام برده می‌شود. در رویکرد مستقل از پیش‌بینی، برای عدم وابستگی به یک مدل پیش‌بینی، میزان رهاسازی در هر دوره تابعی از جریان ورودی به مخزن در سه دوره قبل که مقداری معلوم است، در نظر گرفته می‌شود. در حقیقت مدل پیش‌بینی در داخل رویکرد مستقل از پیش‌بینی نهفته است و نیازی نیست که به‌طور جداگانه پیش‌بینی جریان انجام شود.

در قاعده بهره‌برداری به هنگام از روش‌های بهینه‌سازی NLP، GA و FLGGP استفاده می‌شود.

توابع مربوط به میزان حجم رهاسازی برای مخازن کارون ۴ و خرسان ۱ در سامانه سه مخزنه و برای هر یک از رویکردها در روابط زیر آمده است

$$Re_{i,t} = f(S_{i,t}, Q_{i,t}) \quad (\forall t=1, \dots, T \ \& \ \forall i=1, \dots, N) \quad (7)$$

$$Re_{i,t} = f(S_{i,t}, Q_{i,t-1}, Q_{i,t-2}, Q_{i,t-3}) \quad (\forall t=1, \dots, T \ \& \ \forall i=1, \dots, N) \quad (8)$$

روابط (۷) و (۸) تابع حجم رهاسازی را به ترتیب در رویکرد اول و رویکرد دوم نشان می‌دهد.

این تابع برای مخزن کارون ۳ و برای رویکرد اول و رویکرد دوم به ترتیب مطابق روابط ۱۳ و ۱۴ است

$$Re_{3,t} = f(S_{1,t}, S_{2,t}, S_{3,t}, Q_{3,t}, Re_{1,t}, Re_{2,t}) \quad (\forall t=1, \dots, T) \quad (9)$$

$$Re_{3,t} = f(S_{1,t}, S_{2,t}, S_{3,t}, Q_{3,t-1}, Q_{3,t-2}, Q_{3,t-3}, Re_{1,t}, Re_{2,t}) \quad (\forall t=1, \dots, T) \quad (10)$$

همان‌طور که در روابط ۹ و ۱۰ نشان داده شده است، با توجه به قرارگیری مخزن کارون ۳ در پایین دست مخازن کارون ۴ و خرسان ۱، در هر رویکرد از بهره‌برداری حجم رهاسازی از کارون ۳

جدول ۲- مشخصات نیروگاه و مخازن در سامانه سه مخزنه

مشخصات مخزن و نیروگاه	کارون ۴	خرسان ۱	کارون ۳
متوسط جریان سالانه ورودی به مخزن (میلیون مترمکعب)	۶۰۴۵	۱۳۵۱	۹۹۰۶
رقوم نرمال مخزن (متر از سطح دریا)	۱۰۲۵	۱۰۱۳	۸۴۰
رقوم کمینه مخزن (متر از سطح دریا)	۹۹۰	۱۰۰۰	۸۰۰
حجم مخزن در رقوم نرمال (میلیون مترمکعب)	۲۱۹۰	۳۳۲/۵۵	۲۵۲۲/۵۸
حجم مخزن در رقوم کمینه (میلیون مترمکعب)	۱۴۴۱/۲۹	۲۶۲/۶۸	۱۱۰۱/۱۲
بیشینه ظرفیت خروجی مخزن (میلیون مترمکعب در ماه)	۴۵۰	۴۰۰	۱۰۰۰
ظرفیت نصب (مگاوات)	۱۰۰۰	۵۸۴	۲۰۰۰
تعداد واحدهای نیروگاهی	۴	۴	۸
ضریب کارکرد (%)	۲۰	۲۵	۲۵
بازده نیروگاه (%)	۸۸	۹۳	۹۲

جدول ۳- مشخصات روش GA و روش FLGGP در بهره‌برداری مخزن

روش	نوع بهره‌برداری	تعداد تکرار	تعداد کروموزوم	نرخ توزیع	نرخ جهش	نخه‌گرایی
GA	دسته اول	۵۰۰۰	۶۰۰	۰/۸	۰/۱	۱
	به‌هنگام	۲۵۰۰۰	۵۰	۰/۸	۰/۱	۱
FLGGP	به‌هنگام	۱۰۰۰۰	۵۰	۰/۸	۰/۱	۱

منحنی فرمان S2Q2 استفاده شده است. روش FLGGP در این مطالعه تنها در استخراج قاعده بهره‌برداری به‌هنگام استفاده شد. در این روش از توابع $\{x, +, -, \sin, \cos, \exp\}$ برای مجموعه توابع (F) استفاده می‌شود.

جدول ۳ مشخصات به‌کار گرفته شده برای این روش‌ها را نشان می‌دهد. در این جدول و برای این مطالعه، تعداد تکرارها با توجه به نمودار همگرایی اختیار شدند؛ به طوری که اطمینان حاصل شود که نرخ تغییرات مقدار تابع هدف در نمودار همگرایی به شدت کم شود و در انتهای این نمودار به صورت خط ثابت در بیاید. همچنین تعداد کروموزوم‌ها با توجه به تعداد متغیرهای تصمیم اختیار شدند. به نحوی که تعداد کروموزوم‌ها بزرگ‌تر یا مساوی تعداد متغیر تصمیم باشد. نرخ توزیع، نرخ جهش و نخه‌گرایی همان پیش‌فرض‌های نرم‌افزار متلب اختیار شدند و تغییری داده نشد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- بهره‌برداری دسته اول

قاعده بهره‌برداری دسته اول سامانه سه مخزنه با بهره‌گیری از دو روش NLP و GA انجام گرفت. در جدول ۴ مقادیر تابع هدف (کمبود کل) و معیارهای ارزیابی کارایی ارائه شد. α سطح تأمین

علاوه بر وابسته بودن به جریان ورودی و حجم ذخیره مخزن کارون ۳ به حجم ذخیره و حجم رهاسازی از دو مخزن بالادست (کارون ۴ و خرسان ۱) نیز وابسته است.

در این تحقیق برای بهینه‌سازی بهره‌برداری مخازن و ارزیابی نتایج حاصل از بهینه‌سازی با روش‌ها و رویکردهای مختلف از تابع کمبود کل و معیارهای ارزیابی کارایی استفاده شد.

۳-۲- نحوه اجرای روش‌های بهره‌برداری از مخزن

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، در این تحقیق، از روش‌های NLP، GA و FLGGP برای بهره‌برداری از مخازن استفاده شد. در روش NLP، از نرم‌افزار لینگو استفاده شده است [۸]. با این نرم‌افزار، سعی شده است که جواب بهینه مطلق حاصل شود ولی در اکثر برنامه‌ها این نرم‌افزار قادر به این امر نبوده و تنها به جواب‌های بهینه موضعی دست پیدا نموده است. در بهره‌برداری با روش GA از جعبه ابزار GA در نرم‌افزار متلب^۱ در بهره‌برداری از مخازن با این روش استفاده شده است [۹]. جدول ۳ مشخصات به‌کار گرفته شده برای این روش را نشان می‌دهد.

همچنین در قاعده بهره‌برداری به‌هنگام به روش NLP و GA، از

^۱ Matlab (R200 9a)

انرژی است که در این تحقیق برابر با ۰/۷۵، ۱ و ۰/۵ بود و معیارهای ارزیابی کارایی با توجه به هریک از این مقادیر محاسبه شد.

با توجه به جدول ۴:

۱- در سامانه سه مخزنه، میزان تابع هدف (کمبود کل) در روش NLP با مقداری برابر با ۰/۱۲۱ از مطلوبیت بیشتری نسبت به روش GA با مقداری برابر با ۰/۱۳ برخوردار است.

۲- معیار اعتمادپذیری زمانی به دست آمده از روش NLP و برای آستانه‌های کارایی مختلف نسبت به روش GA بیشتر (مطلوب‌تر) است. این به آن مفهوم است که توان تولیدی در روش NLP در مقایسه با توان تولیدی با روش GA در تعداد دوره‌های بیشتری برابر با بیشینه ظرفیت نصب بوده است.

۳- معیار اعتمادپذیری مقداری در سطح تأمین انرژی‌های مختلف در روش NLP نسبت به روش GA برتری دارد. که این به مفهوم آن است که مجموع توان تولیدی در تمامی دوره‌های بهره‌برداری در روش NLP بیشتر از روش GA است.

۴- پارامتر برگشت‌پذیری با سطح تأمین انرژی برابر با ۱ در روش NLP با اختلاف کمی، برتر از روش GA است. این پارامتر با سطح تأمین انرژی ۰/۷۵ و ۰/۵ در روش GA نسبت به روش NLP برتری دارد. این پارامتر تعداد سری‌های شکست و وسعت آن را در طول دوره بهره‌برداری نمایان می‌سازد.

۵- شاخص آسیب‌پذیری که نمایانگر شدت شکست‌ها است برای هر دو روش، تقریباً برابر است.

۶- به‌طورکلی با توجه به دو پارامتر برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری می‌توان به تعداد کمبودها و میزان تراکم آن در طول دوره‌های بهره‌برداری دست یافت. روشی که برگشت‌پذیری بیشتر و آسیب‌پذیری کمتری را ارائه می‌دهد، از کمبودهای بحرانی جلوگیری نموده و میزان این کمبودها را در طول دوره‌های بهره‌برداری پخش می‌نماید.

در ادامه، تغییرات توان تولیدی هریک از نیروگاه‌ها مخازن کارون ۴، خرسان ۱ و کارون ۳ در سامانه سه مخزنه، در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به این شکل، میزان توان تولیدی در هر یک از نیروگاه‌ها در روش NLP بیشتر از میزان توان تولیدی در روش GA است. همچنین در این شکل، برتری روش NLP نسبت به روش GA از حیث اعتمادپذیری زمانی و مقداری مشهود می‌باشد.

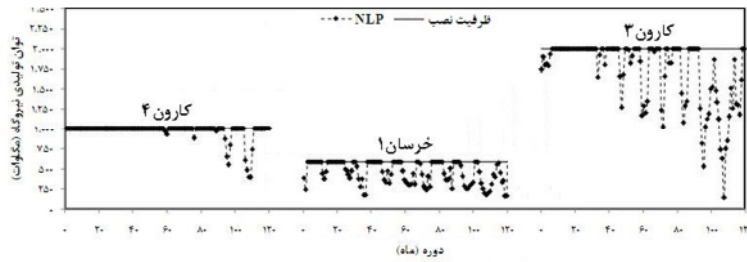
با توجه به نتایج حاصل از بهره‌برداری دسته اول در سامانه تک مخزنه و سامانه سه مخزنه می‌توان استدلال نمود که روش NLP نسبت به روش GA از توانایی بیشتری در جهت بهره‌برداری از مخازن برخوردار است. به همین دلیل در ادامه از نتایج این روش در جهت مقایسه نتایج حاصل از روش‌ها و رویکردهای مختلف بهره‌برداری به‌هنگام استفاده شد.

۴-۲- بهره‌برداری به‌هنگام

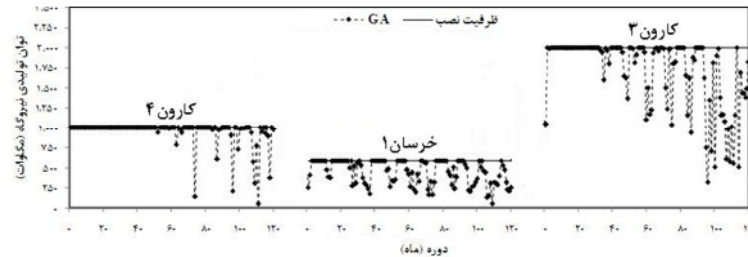
در این قسمت، بهره‌برداری از مخزن با سه روش NLP، GA و FLGGP با رویکرد قواعد وابسته به پیش‌بینی و رویکرد قواعد

جدول ۴- مقادیر تابع هدف و معیارهای ارزیابی کارایی در بهره‌برداری دسته اول

روش		معیارهای کارایی مخزن		
GA	NLP	α		
۰/۱۳	۰/۱۲۱	-		تابع هدف
۳۰/۸۳	۳۱/۶۷	۱		اعتمادپذیری زمانی
۷۷/۵۰	۸۰/۰۰	۰/۷۵		
۹۶/۶۷	۹۵/۰۰	۰/۵		اعتمادپذیری مقداری
۸۷/۰۰	۸۷/۹۴	۱		
۹۵/۳۴	۹۶/۲۰	۰/۷۵		برگشت‌پذیری
۹۸/۶۵	۹۸/۷۴	۰/۵		
۹/۶۴	۹/۷۶	۱		آسیب‌پذیری
۴۸/۱۵	۳۳/۳۳	۰/۷۵		
۱۰۰/۰۰	۳۳/۳۳	۰/۵		
۷۹/۵۰	۷۹/۹۲	۱		
۷۲/۶۶	۷۳/۲۲	۰/۷۵		
۵۸/۹۹	۵۹/۸۳	۰/۵		



(الف)



(ب)

شکل ۲- تغییرات توان تولیدی نیروگاه در سامانه سه مخزنه در بهره‌برداری دسته اول: (الف) روش NLP و (ب) روش GA

با این مقدار، اختلاف به چشم می‌خورد ولی با توجه به اینکه از یک طرف در بهره‌برداری به‌هنگام، منحنی فرمان‌های کاربردی حاصل می‌شود و از طرف دیگر بهره‌برداری دسته اول یک شرایط آرمانی و دست نیافتنی است، این مقدار اختلاف بین این توابع هدف کاملاً طبیعی است.

جدول ۶ مقادیر به‌دست آمده معیارهای ارزیابی کارایی را برای هر دو رویکرد بهره‌برداری نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۶:

۱- مقادیر معیار اعتمادپذیری زمانی در رویکرد اول و در آستانه‌های کارایی برابر با ۱ و ۰/۷۵ در روش NLP بیشترین و در سطح تأمین انرژی برابر با ۰/۵ در روش FLGGP بهترین بودند. همچنین در رویکرد دوم و در تمامی آستانه‌های کارایی، روش NLP بدترین مقادیر را به‌دست آورد و روش‌های GA و FLGGP از عملکردی یکسان برخوردار بودند. در مقایسه مقادیر متناظر از دو رویکرد، رویکرد اول در اکثر موارد از مقادیر بیشتری برخوردار است.

۲- معیار اعتمادپذیری مقداری در هر دو رویکرد و برای آستانه‌های کارایی مختلف در روش FLGGP بیشتر (بهتر) بود. همچنین رویکرد اول در روش‌های مختلف نسبت به مقادیر متناظر آن در رویکرد دوم از مقادیر بیشتری برخوردار بود.

۳- مقدار پارامتر برگشت‌پذیری در هر دو رویکرد و برای سطح تأمین انرژی برابر با ۱ در روش FLGGP بیشترین مقدار را داشت. شاخص برگشت‌پذیری در رویکرد اول برای آستانه‌های کارایی برابر با ۰/۷۵ و ۰/۵ در روش NLP و در رویکرد دوم و

مستقل از پیش‌بینی انجام شد. در جدول‌های ۵ و ۶، مقادیر تابع هدف (کمبود کل) و معیارهای ارزیابی کارایی مربوطه برای هر سه روش و در هر دو رویکرد ارائه شده است.

جدول ۵- مقادیر تابع هدف در بهره‌برداری به‌هنگام در سامانه سه مخزنه کارون ۴، خرسان ۱ و کارون ۳

روش	رویکرد وابسته	رویکرد مستقل
NLP (دسته اول)	۰/۱۹۹	۰/۱۲۱
NLP	۰/۲۰۵	۰/۲۱۰
GA	۰/۱۸۴	۰/۲۲۲
FLGGP	۰/۲۰۱	۰/۲۰۱

با توجه به جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت که روش FLGGP با تابع هدفی برابر با ۰/۱۸۴ در رویکرد وابسته به پیش‌بینی و ۰/۲۰۱۴ در رویکرد مستقل از پیش‌بینی از مطلوبیت بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها برخوردار است. و بعد از روش FLGGP، روش NLP تابع هدف مطلوب‌تری در هر دو رویکرد نسبت به روش GA دارا است.

با نظر به این جدول و در مقایسه دو رویکرد وابسته به پیش‌بینی و مستقل از پیش‌بینی با یکدیگر، می‌توان مشاهده کرد که رویکرد وابسته به پیش‌بینی با اختلافی کم، نسبت به رویکرد مستقل از پیش‌بینی برتر است، میزان این اختلاف برای کلیه روش‌ها کمتر از ۰/۰۲ است که نشان‌دهنده نزدیکی قدرت این دو رویکرد است.

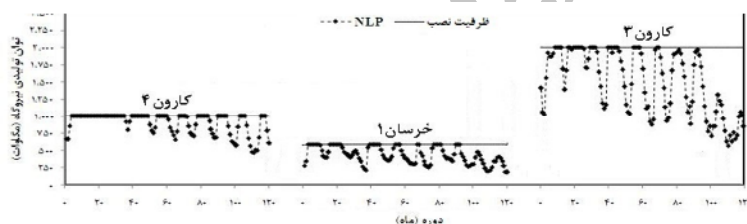
در جدول ۵ میزان تابع هدف برگزیده از بهره‌برداری دسته اول نشان داده شده است. هرچند با مقایسه مقادیر تابع هدف هر یک از روش‌ها در هر دو رویکرد وابسته به پیش‌بینی و مستقل از پیش‌بینی

جدول ۶- معیارهای ارزیابی کارایی در بهره‌برداری به هنگام سامانه سه مخزنه (درصد)

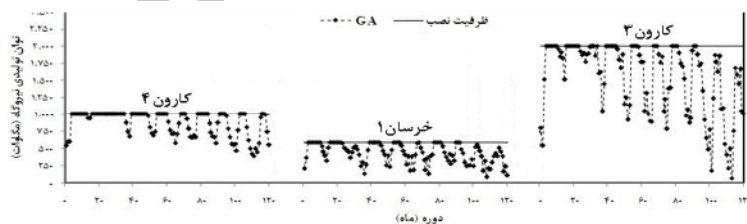
رویکرد مستقل			رویکرد وابسته			معیارهای کارایی مخزن	
FLGGP	GA	NLP	FLGGP	GA	NLP	α	
۱۴/۱۷	۱۹/۱۷	۰	۲۴/۱۷	۱۱/۶۷	۲۶/۶۷	۱	اعتمادپذیری زمانی
۵۹/۱۷	۶۰/۸۳	۲۷/۵۰	۶۵/۸۳	۵۸/۳۳	۶۶/۶۷	۰/۷۵	
۹۵/۸۳	۸۶/۶۷	۷۸/۳۳	۹۳/۳۳	۹۲/۵۰	۸۸/۳۳	۰/۵	
۷۹/۸۶	۷۷/۸۵	۶۴/۳۲	۸۱/۶۰	۷۹/۵۵	۸۰/۱۴	۱	اعتمادپذیری مقداری
۹۲/۲۹	۸۹/۱۴	۸۱/۶۱	۹۲/۶۰	۹۱/۴۱	۹۰/۱۶	۰/۷۵	
۹۹/۳۷	۹۷/۶۶	۹۸/۲۱	۹۹/۰۳	۹۸/۹۴	۹۷/۲۳	۰/۵	
۶/۸۰	۵/۱۵	۰	۱۲/۰۹	۵/۶۶	۷/۹۵	۱	برگشت پذیری
۱۴/۲۹	۱۹/۱۵	۱۰/۳۴	۱۹/۵۱	۱۲/۰۰	۲۰/۰۰	۰/۷۵	
۸۰/۰۰	۵۰/۰۰	۳۴/۶۲	۲۵/۰۰	۲۲/۲۲	۲۸/۵۷	۰/۵	
۵۹/۹۴	۷۱/۹۱	۶۰/۰۰	۶۵/۷۵	۶۴/۲۴	۷۵/۱۴	۱	آسیب پذیری
۴۶/۵۸	۶۲/۵۵	۴۶/۶۷	۵۴/۳۴	۵۲/۳۲	۶۶/۸۵	۰/۷۵	
۱۹/۸۷	۴۳/۸۳	۲۰/۰۰	۳۱/۵۱	۲۸/۴۸	۵۰/۲۸	۰/۵	

۵- با توجه به دو شاخص آسیب پذیری و برگشت پذیری، می‌توان گفت که در هر دو رویکرد، روش FLGGP از کمبودهای بحرانی کمتری در دوره‌های بهره‌برداری برخوردار است و میزان این کمبودها را در طول دوره‌های بهره‌برداری پخش می‌نماید و از این حیث روشی برتر نسبت به دو روش NLP و GA است. در شکل‌های ۳ و ۴، به ترتیب تغییرات توان تولیدی نیروگاه در

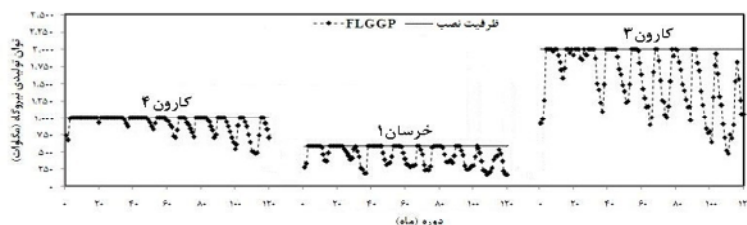
آستانه‌های کارایی ۰/۷۵ و ۰/۵ در روش GA بهتر بود. ۴- شاخص آسیب پذیری در رویکرد مستقل از پیش‌بینی و برای کلیه آستانه‌های کارایی و روش‌های FLGGP و GA از عملکردی تقریباً یکسان برخوردار بود. در رویکرد وابسته به پیش‌بینی، روش‌های NLP و FLGGP نیز عملکردی مشابه با یکدیگر داشتند. همچنین در مقایسه دو رویکرد، رویکرد دوم در بیشتر روش‌ها برتر از رویکرد اول بود.



(الف)

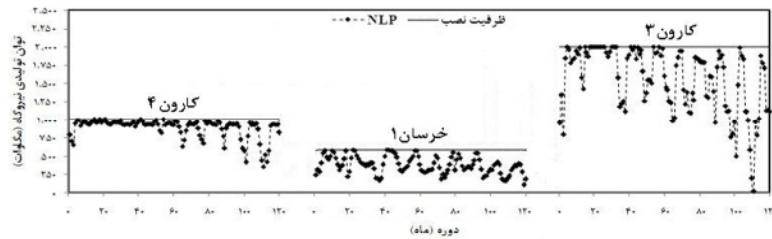


(ب)

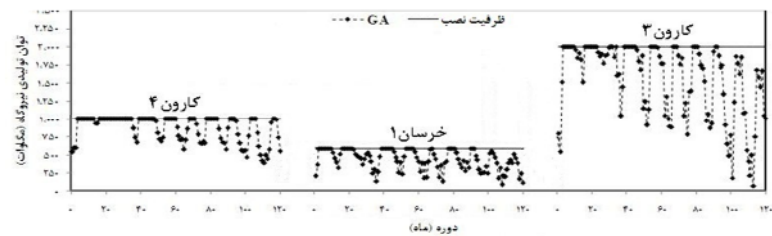


(پ)

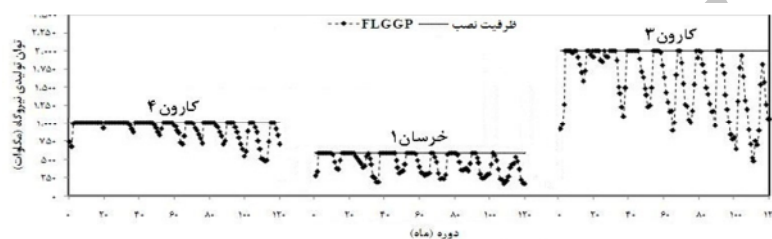
شکل ۳- تغییرات توان تولیدی نیروگاه در سامانه سه مخزنه در بهره‌برداری به هنگام با رویکرد وابسته به پیش‌بینی: (الف) روش NLP، (ب) روش GA و (پ) روش FLGGP



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۴- تغییرات توان تولیدی نیروگاه در سامانه سه مخزنه در بهره‌برداری به‌هنگام با رویکرد مستقل از پیش‌بینی: (الف) روش NLP، (ب) روش GA و (پ) روش FLGGP

هدفی (کمبود کل) برابر با $0/121$ نسبت به GA با تابع هدفی برابر با $0/13$ ، توانایی بالاتری در بهره‌برداری از مخزن داشت. ۲- در بهره‌برداری به‌هنگام و هر دو رویکرد وابسته به پیش‌بینی و مستقل از پیش‌بینی، روش FLGGP به‌عنوان روش برتر انتخاب شد. در رویکرد وابسته به پیش‌بینی، این روش با تابع هدفی برابر با $0/184$ نسبت به روش NLP با تابع هدفی برابر با $0/1986$ و روش GA با تابع هدفی برابر با $0/2045$ از برتری قابل توجهی برخوردار بود. همچنین در رویکرد مستقل از پیش‌بینی، روش FLGGP با تابع هدفی برابر با $0/2014$ نسبت به روش NLP با تابع هدفی برابر با $0/222$ و روش GA با تابع هدفی برابر با $0/222$ کارایی بالاتری داشت.

۳- در مقایسه دو رویکرد وابسته به پیش‌بینی و مستقل از پیش‌بینی، عملکرد هر دو رویکرد بسیار نزدیک به هم بود و رویکرد وابسته به پیش‌بینی با اختلاف کمی (کمتر از 10%) نسبت به رویکرد مستقل از پیش‌بینی برتری داشت. بر همین اساس می‌توان از رویکرد مستقل از پیش‌بینی، به‌علت سهولت در استفاده از آن (نهفته بودن مدل پیش‌بینی جریان در آن)، در استخراج قاعده بهره‌برداری استفاده نمود.

سامانه سه مخزنه کارون ۴، خرسان ۱ و کارون ۳ در رویکرد وابسته به پیش‌بینی و مستقل از پیش‌بینی سامانه نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، برتری روش FLGGP نسبت به دو روش دیگر کاملاً مشهود است.

با توجه به نتایج حاصل از بهره‌برداری به‌هنگام سامانه سه مخزنه کارون ۴، خرسان ۱ و کارون ۳ با سه روش NLP، GA و FLGGP در دو رویکرد قواعد وابسته به پیش‌بینی و مستقل از پیش‌بینی، می‌توان اظهار داشت که روش FLGGP، روشی با قابلیت‌های بالاتر در هر دو رویکرد بهره‌برداری است. همچنین، رویکرد قواعد وابسته به پیش‌بینی نسبت به رویکرد قواعد مستقل از پیش‌بینی با اختلاف کمی برتر است.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که:

۱- روش NLP نسبت به روش GA از قابلیت‌های بالاتری در بهره‌برداری دسته اول برخوردار بود. به‌طوری که روش NLP با تابع

1. Oliveira, R., and Loucks, D. P. (1997). "Operating rules for multi reservoir systems." *Water Resources Research*, 33(4), 839-852.
2. Barros, M. T. L., Yang, S., Lopes, J. E. G., and Yeh, W. W-G. (2001). *Large-scale hydropower system optimization*, IAHR Publication No. 271: Integrated Water Resources Management, Wallingford, U.K.
3. Simonovic, S. P., and Marino, M. A. (1980). "Reliability programming in reservoir management. Single multipurpose reservoir." *Water Resource Research*, 16(1), 844-888.
4. Tung, C., Hsu, S., Liu, C. M., and Li, Jr. Sh. (2003). "Application of the genetic algorithm for optimizing operation rules of the LiYuTan reservoir in Taiwan." *J. of American Water Resources Association*, 39(3), 649-657.
5. Eberbach, E., and Burgin, M. (2009). "Evolutionary automata as foundation of evolutionary computation: Larry fogel was right." *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2009)*, Trondheim, Norway, 2149-2156.
6. Hashimoto, T., Steninger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). "Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." *Water Resources Research*, 18(1), 14-20.
7. Farhangi, M. (2010). "Effect of inflow uncertainty on the performance of multy-reservoir systems." MSc. Thesis, Dept. of Eng. and Agricultural Tech., Tehran University, Tehran. (In Persian)
8. LINDO. (2004). *LINGO user's manual*, LINDO System INC., <<http://www.lindo.com/>>
9. Overman, E. (2011). *A MATLAB tutorial*, Department of Mathematics, The Ohio State University, Columbus, OH., USA.