

Reliability-based Optimal Design and Operation of Cascade Hydraulically-Coupled Hydropower Reservoir Systems

N. Afsharian Zadeh¹ and S.J. Mousavi^{2*}

Abstract

Optimal design and operation of a cascade hydropower reservoir system accounting for the reliability level of the system's firm energy is a complex, difficult-to-solve problem in terms of both the problem formulation and its solution approach. This study dealt with the reliability-based optimal design and operation of cascade hydropower reservoirs considering hydraulic coupling between the tail-race of the upstream powerplant and the water elevation at downstream reservoir. The formulation of the resulting optimization model was a nonlinear, nonconvex program (NLP) which by accounting for the reliability level of energy production and the hydraulic coupling it became a mixed integer NLP (MINLP). The resulted MINLP, which was an NP-hard (nonpolynomial deterministic-hard) problem, was solved by both classical and evolutionary optimization algorithms and their performances were tested in Karoon2-Karoon3 cascade hydropower system as a real case study. Since the number of binary variables was large and the nonlinear part of the MINLP was nonconvex, classical gradient-based algorithms were unable to solve the problem. However, particle swarm optimization (PSO) algorithm, a metaheuristic optimization algorithm, fulfilled to find near optimal good solutions to the problem. This was made possible by the help of incremental generating of feasible solutions, which satisfy the equality constraints of balance equations and the system operation characteristics during the low-flow periods.

Keywords: Optimization, Cascade hydropower systems, PSO algorithm, Hydraulic coupling.

Received: May 23, 2016
Accepted: January 4, 2017

طراحی و بهره‌برداری بهینه بر مبنای اعتمادپذیری از مخازن سدهای برقابی پیایی با احتساب اثرات متقابل هیدرولیکی

نوید افشاریان زاده^۱ و سید جمشید موسوی^{۲*}

چکیده

بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری از مخازن سدهای برقابی پیایی همراه با کنترل اعتمادپذیری تولید انرژی یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده از منظر فرمول‌بندی و روش حل آن می‌باشد. در این مطالعه بهینه‌سازی بر مبنای اعتمادپذیری طراحی و بهره‌برداری از سدهای برقابی پیایی با احتساب تأثیرات هیدرولیکی سراب مخزن پایین‌دست بر تراز پایاب نیروگاه بالادست مورد توجه قرار گرفت. فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی فوق از نوع برنامه‌ریزی غیرخطی غیرمحدب (NLP) می‌باشد که در شرایط اعمال کنترل بر روی قید اعتمادپذیری تولید انرژی و همچنین مدل‌سازی تأثیرات متقابل هیدرولیکی، متغیرهای دو مقدره نیز به ساختار مدل اضافه شده و مدلی از نوع برنامه‌ریزی غیرخطی غیرمحدب عدد صحیح (MINLP) نتیجه شد. حل این مدل که در زمره مسائل NP-hard می‌باشد، توسط روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک و تکاملی مدنظر قرار گرفت و عملکرد این روش‌ها در مسئله طراحی و بهره‌برداری از سیستم برقابی کارون ۲- کارون ۳ آزمایش گردید. با توجه به تعداد زیاد متغیرهای گسسته و دومقداره در ساختار مدل بهینه‌سازی و نامحدب بودن بخش غیرخطی آن، امکان حل مدل با روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک میسر نشد. علیرغم آن الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO)، همراه با ملاحظات تولید جواب‌های شدنی مرحله به مرحله یا نموی (incremental) و همچنین استفاده از ساختار مسئله در تشخیص دوره‌های شکست و موفقیت در تأمین نیاز انرژی پایدار سیستم، به جواب‌های قابل قبول و نه ضرورتاً بهینه سراسری منتهی گردید.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، سیستم‌های برقابی پیایی، الگوریتم PSO، ارتباط هیدرولیکی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۸/۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۰/۱۵

1- Former MSc. Student of Water Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. Email: jmosavi@aut.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

*- نویسنده مسئول

در مقایسه‌ی روش‌های مختلف حل مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی بهره‌برداری از سیستم‌های برقایی اشاره کرد.

استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی به عنوان ابزاری کارآمد در حل مدل‌های بهینه‌سازی غیرخطی و ترکیباتی در دهه اخیر رو به گسترش بوده است. رویکرد عمومی این الگوریتم‌ها جست‌وجوی تصادفی در فضای جواب و هدایت جواب‌ها به سمت جواب‌های بهتر با استفاده از یک فرآیند سیستماتیک مبتنی بر ترکیبی از شانس و بازخورد از جواب‌های قبلی است. این الگوریتم‌ها از جمله الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) و الگوریتم‌های ژنتیک (GA) در حل دسته متنوعی از مسائل منابع آب به طور عام و سیستم‌های برقایی به طور خاص مورد استفاده قرار گرفته اند. برای نمونه (Bozorg Haddad et al. (2008) از الگوریتم زنبور عسل به عنوان الگوریتم فرا ابتکاری برای تعیین قوانین بهره‌برداری بهینه مخازن استفاده کردند. (Mousavi et al. (2010) الگوریتم PSO را در حل مسئله‌ی طراحی و بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های برقایی مورد استفاده قرار دادند. (Mahor et al. (2010) با استفاده از الگوریتم PSO مسئله تولید بهینه انرژی برقایی در نیروگاه‌های برقایی را مدنظر قرار دادند. (Cai et al. (2001) از الگوریتم ترکیبی GA-LP برای حل مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی مسائل مدیریت منابع آب استفاده کردند. همچنین (Ndiritu (2005) کارایی روش‌های شبیه‌سازی- بهینه‌سازی را در مسائل طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های منابع آب با اهداف تأمین آب و انرژی برقایی بررسی کردند. (Sharif et al. (2000) با ارائه مدل بهینه‌سازی برای یک سیستم چندمخزنه با اهداف تولید انرژی و آبیاری و حل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نتایج آن را با روش DDDP مقایسه کردند. (Orero et al. (1998) نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک، به حل مدل بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه ساعتی یک سیستم برقایی چندمخزنه پیاپی پرداختند. (Baohong et al. (2013) الگوریتم‌های GA و PSO را در حل مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم تک‌مخزنه برقایی در چین با تابع هدف حداقل کردن مقدار حجم آب خروجی برای تولید انرژی بهینه مقایسه کردند.

در سیستم‌های چندمخزنه برقایی با مخازن پیاپی، علاوه بر ارتباط از منظر پیوستگی جریان بین مخازن و به عبارتی تأمین تمام یا بخشی از جریان ورودی به مخزن پایین‌دست از طریق رهاسازی جریان از مخزن و نیروگاه بالادست، تراز پایاب نیروگاه بالادست ممکن است از نظر هیدرولیکی تحت تأثیر تراز آب در مخازن پایین‌دست قرار

امروزه با توجه به افزایش جمعیت، نیاز روزافزون جوامع بشری به مهم‌ترین عامل حیات یعنی آب افزایش پیدا کرده و این افزایش تقاضا و به دنبال آن افزایش نرخ مصرف به حدی بوده است که پیش‌بینی می‌شود تا ۱۰ سال آینده ۵۰ کشور با بحران جدی کم‌آبی مواجه خواهند شد. توزیع نامناسب زمانی و مکانی بارش‌ها در نقاط مختلف، مصارف بی‌رویه، افزایش فعالیت‌های انسانی و در پی آن افزایش آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی نیاز هرچه بیشتر به مدیریت صحیح از منابع آب را به‌عنوان اولین و جدی‌ترین راه مقابله با مشکلات پیش رو را آشکارتر ساخته است. در همین زمینه، تولید انرژی برقایی از سدها به دلیل استفاده از یک سوخت پاک می‌تواند یکی از روش‌های مؤثر در جهت حفاظت از محیط زیست به شمار رود. انرژی برقایی به‌عنوان یک انرژی تجدیدپذیر در مقابل انرژی‌های تجدیدناپذیر که با استفاده از سوخت‌های فسیلی تولید می‌شوند، قرار می‌گیرد که آلودگی‌های زیادی را به محیط زیست وارد می‌کنند. در این راستا طراحی و بهره‌برداری از سدها و نیروگاه‌های برقایی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل تحلیل سیستمی منابع آب می‌تواند در قالب مدل‌های ریاضی نظیر مدل‌های بهینه‌سازی با هدف به‌گزینی پارامترهای مخزن و نیروگاه و همچنین برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری فرمول‌بندی گردند.

این مدل‌ها تاکنون در بسیاری از مسائل طراحی و بهره‌برداری از سدهای برقایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در همین زمینه می‌توان به مطالعات (Gablinger & Loucks (1970) و (Kim & Palmer (1997) و (Barros et al. (2003) اشاره کرد. (Yeh et al. (1979) و (Grygier and Stedinger (1985) استفاده از مدل‌های SLP و Powell (1983) و Diaz & Fontane (1989) با استفاده از مدل‌های SQP مطالعاتی را بر روی تحلیل سیستم‌های برقایی انجام دادند. (Simonovic and Reznicek (1990) با توسعه‌ی مدل GEMSLP، مدل بهینه‌سازی با هدف حداقل سازی هزینه‌ی تولید انرژی پرداختند. (Mousavi et al. (2004a) از روش نقاط داخلی برای بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنه با تابع هدف تولید انرژی و تأمین آب استفاده کردند. (Mousavi et al. (2004b) روش برنامه‌ریزی پویا و مدل شبیه‌سازی HEC5 را در بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه با اهداف تولید انرژی و تأمین آب مقایسه کردند. همچنین از مطالعات دیگر در این زمینه می‌توان به پژوهش‌های (Arnold et al. (1994)

کلاسیک و تکاملی استفاده و کارایی آن‌ها ارزیابی شده است. در ادامه مقاله ضمن ارائه اجزاء مدل پیشنهادی، مطالعه موردی و فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی، نتایج کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی عرضه و مقایسه خواهد شد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- الگوریتم (PSO)

الگوریتم PSO در ابتدا توسط Kennedy and Eberhart (1995) به عنوان یک الگوریتم تکاملی بر پایه جمعیت و برای حل مسائل بهینه‌سازی پیشنهاد شد. در این الگوریتم که از رفتار پرندگان و ماهی‌ها الهام گرفته شده است، هر ذره بیانگر یک جواب در فضای D بعدی مسئله بوده که شامل دو بردار سرعت و وضعیت می‌باشد. حرکت هر ذره در فضای جست‌وجو با توجه به دو پارامتر بهترین وضعیت ملاقات شده توسط ذره (pbest) و بهترین وضعیت ملاقات شده در تمامی ذرات (gbest)، تعیین می‌شود. در هر تکرار الگوریتم، بردارهای سرعت و وضعیت با توجه به دو معادله‌ی اصلی زیر به روز می‌شوند:

$$v_{id}^{n+1} = \chi(\omega v_{id}^n + c_1 r_1^n (p_{id}^n - x_{id}^n) + c_2 r_2^n (p_{gd}^n - x_{id}^n)) \quad (1)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (2)$$

که در این معادلات، $d = (1, 2, \dots, D)$ برابر تعداد ابعاد بردار هر ذره و $i = (1, 2, \dots, N)$ که N برابر تعداد ذرات در فضای جست‌وجو و همچنین r_1 و r_2 اعداد تصادفی در بازه $[0, 1]$ است. پارامترهای c_1 و c_2 دو ثابت به نام‌های ضرایب شناختی و اجتماعی هستند. همچنین ω معرف وزن اینرسی و X فاکتور انقباض نامیده می‌شوند. در هر تکرار پارامتر وزن اینرسی بر اساس رابطه‌ی زیر به روز می‌گردد:

$$\omega^n = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{n_{\max}} \times n \quad (3)$$

که در رابطه‌ی فوق ω^n مقدار ضریب اینرسی در تکرار n ، ω_{\min} مقدار حد پایین برای ضریب اینرسی، ω_{\max} مقدار اولیه‌ی ضریب اینرسی و n_{\max} تعداد تکرارهای تعیین شده برای الگوریتم است.

شروع الگوریتم با تولید تصادفی جواب در فضای موجه مسئله بوده که در ادامه با توجه به مقادیر pbest و gbest بدست آمده از

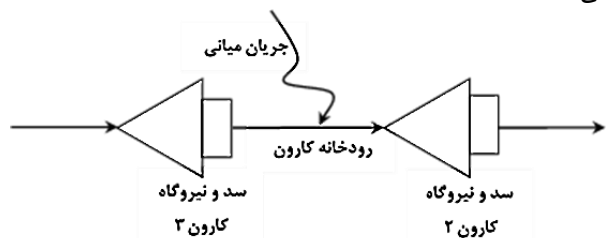
گیرند. در این سیستم‌ها، تغییرات تراز آب در مخزن پایین‌دست، می‌تواند موجب غرقاب شدن تراز پایاب نیروگاه بالادست گردد. بنابراین، تعیین مقادیر تراز پایاب نیروگاه بالادست در هر دوره‌ی شبیه‌سازی، تنها وابسته به دبی جریان خروجی از این نیروگاه نیست، بلکه متأثر از تغییرات تراز در مخزن پایین‌دست نیز خواهد بود. در حقیقت افزایش تراز آب در مخزن پایین‌دست ممکن است موجب افزایش تراز پایاب نیروگاه بالادست و کاهش بلندای خالص آب روی توربین آن و در نتیجه کاهش تولید انرژی در مجموعه سیستم گردد. بنابراین به‌گزینی تغییرات تراز مخزن پایین‌دست و به دنبال آن بهینه‌سازی تراز پایاب در نیروگاه بالادست علاوه بر تولید مقادیر بهینه برای رهاسازی از هریک از مخازن برقایی، در تحلیل سیستم‌های چندمخزنه برقایی پیایی به‌منظور افزایش انرژی تولیدی در کل سیستم و سود حاصل از آن حائز اهمیت خواهد بود. در این رابطه Hawary and Christensen (1979) موضوع ارتباط هیدرولیکی بین مخازن و نیروگاه‌ها را در بهره‌برداری از سیستم‌های برقایی، با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا مورد توجه قرار دادند. همچنین Lyra and Ferreira (1995) با استفاده از روش DDDP مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری زمان واقعی از یک سیستم برقایی را با در نظر گرفتن اثر تبادلات هیدرولیکی حل کردند. Simonovic et al. (2000) بهینه‌ساز بهره‌برداری از یک سیستم چهارمخزنه‌ی برقایی پیایی با گام‌های روزانه و در افق زمانی به طول یک هفته را همراه با مدل‌سازی تأثیر تغییرات تراز در مخازن پایین‌دست بر تراز پایاب نیروگاه بالادست در قالب یک برنامه غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح (MINLP) فرمول‌بندی نمودند. در این کار با تعریف دسته منحنی‌های دبی - اشل پایاب مخازن در ترازهای مختلف مخازن پایین‌دست، انتخاب منحنی مورد نظر برای تعیین تراز پایاب نیروگاه بالادست با استفاده از متغیرهای صفر و یک ممکن شده است. در واقع استفاده از متغیرهای دومقداره به این دلیل بوده است که تشخیص ترازهای پایاب نیروگاه‌ها بر اساس تراز مخازن پایین‌دست آن‌ها، از جنس محدودیت‌های اگر-درغیر این صورت (if-else) می‌باشد که در فرایند جبری کردن مجموعه قیود مدل‌های بهینه‌سازی کلاسیک، با متغیرهای دو مقداره قابل مدل‌سازی است.

در این مطالعه یک مدل بهینه‌سازی برمبنای اعتمادپذیری تولید انرژی مطمئن به منظور طراحی و بهره‌برداری از مجموعه سیستم برقایی کارون ۳- کارون ۲ با احتساب اثرات تبادل هیدرولیکی بین اجزاء توسعه داده شده است. با توجه به فرمول‌بندی این مدل که از نوع MINLP می‌باشد، در حل مدل از الگوریتم‌های بهینه‌سازی

معادلات (۱) و (۲)، ذرات به سمت جواب بهینه هدایت می‌گردند. این روند تا زمان همگرا شدن به یک جواب و یا رسیدن تعداد تکرارهای الگوریتم به عدد تعیین شده می‌تواند ادامه داشته باشد.

۲-۲- مطالعه موردی

مطالعه‌ی موردی در نظر گرفته شده برای این تحقیق سیستم سد و نیروگاه‌های کارون ۲ و کارون ۳ می‌باشند که بر روی رودخانه‌ی کارون قرار گرفته‌اند. در این سیستم، سد و نیروگاه کارون ۳ در حال بهره‌برداری است و سد و نیروگاه کارون ۲ در حال مطالعه می‌باشد. با توجه به ۵۴ سال آمار آبدهی ماهانه موجود، میانگین بلندمدت دبی جریان ورودی به مخزن سد کارون ۳، برابر با ۲۶۸ مترمکعب بر ثانیه و همچنین مقادیر حداقل و حداکثر آن برابر با ۱۶۰ و ۵۲۶ مترمکعب بر ثانیه بوده است. همچنین مقدار دبی نیاز زیست‌محیطی در رودخانه کارون برابر ۲۳ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. سایر مشخصات سیستم کارون ۲ و کارون ۳ در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. مقادیر فوق برآمده از مطالعات شرکت مهندسی مشاور طرح کارون ۲ می‌باشد که جهت اطلاع و مقایسه حدود جواب بدست آمده در این مطالعه با سوابق قبلی ارایه شده است. با توجه به این مطالعات و این که دبی طراحی نیروگاه کارون ۳، ۱۳۷۶ مترمکعب در ثانیه است و با فرض ۶ ساعت کارکرد مطمئن روزانه این نیروگاه با ظرفیت کامل، حجم جریان خروجی روزانه از این نیروگاه حدود ۳۰ میلیون مترمکعب خواهد بود. بنابراین گزینه‌های تراز حداقل بهره‌برداری و تراز نرمال به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که در صورت عدم همزمانی کارکرد دو نیروگاه کارون ۲ و ۳، مخزن سد کارون ۲ گنجایش ذخیره و تنظیم روزانه جریان خروجی از نیروگاه کارون ۳ را داشته باشد (Dezab Consulting Engineers ۲۰۱۴). جداول ۳ و ۴ نیز هزینه‌های ساخت سد و نیروگاه کارون ۲ را با توجه به مقادیر و ظرفیت تولید نیروگاه و تراز نرمال مخزن سد نشان می‌دهند. همچنین شکل ۱ شماتیکی از سیستم برقایی ذکر شده را نشان می‌دهد:



شکل ۱- شماتیک سیستم برقایی کارون ۲- کارون ۳

جدول ۱- مشخصات سد و نیروگاه کارون ۲
(Dezab Consulting Engineers ۲۰۱۴)

حد پایین تعیین تراز حداقل بهره‌برداری	۶۶۰ Masl
حد بالای تعیین تراز نرمال	۶۷۲ Masl
راندمان کل نیروگاه	٪۹۳
مجموعه افت‌های اصطکاکی و موضعی و افت در تونل خروجی	۲/۲۵ متر

جدول ۲- مشخصات سد و نیروگاه کارون ۳
(Dezab Consulting Engineers ۲۰۱۴)

تراز حداقل بهره‌برداری	۸۰۰ Masl
تراز نرمال	۸۴۵ Masl
ظرفیت تولید نیروگاه	۲۰۰۰ Mw
راندمان کل نیروگاه	٪ ۹۲/۴
مجموعه افت‌های اصطکاکی و موضعی و افت در تونل خروجی	۴/۵ متر

جدول ۳- هزینه‌های الکترومکانیکال برآورد شده بر اساس

مقادیر ظرفیت تولید نیروگاه کارون ۲
(Dezab Consulting Engineers ۲۰۱۴)

ظرفیت تولید (مگاوات)	هزینه (میلیون ریال)
۵۹۰	۳۰۵۶۲۳۹
۶۱۸	۳۱۳۰۴۹۴
۶۳۳	۳۱۸۷۳۶۸
۶۴۸	۳۲۴۳۷۰۳
۶۹۴	۳۲۵۰۴۶۳

جدول ۴- هزینه‌های ساختمانی برآورد شده بر اساس رقوم نرمال سد کارون ۲ (Dezab Consulting Engineers ۲۰۱۴)

تراز نرمال	هزینه (میلیون ریال)
۶۶۴	۱۰۳۶۴۹۱
۶۶۶	۱۰۶۸۱۰۴
۶۶۸	۱۰۸۸۲۶۳
۶۷۰	۱۱۱۱۸۱۴
۶۷۲	۱۱۳۶۰۰۷

در این سیستم نیروگاه کارون ۳ در صورت قرار گرفتن تراز آب کارون ۲ بالاتر از تراز مشخص و بسته به دبی خروجی از نیروگاه کارون ۲ غرقاب شده و بنابراین از تراز مخزن کارون ۲ متأثر خواهد

شکل ۲ مجموعه منحنی‌های دبی-اشل پایاب نیروگاه کارون ۳ در حالات مختلف تراز مخزن سد کارون ۲ که با استفاده از مدل سازی هیدرولیکی رودخانه کارون در پایین دست کارون ۳ تا مخزن کارون ۲ با استفاده از نرم افزار MIKE11 محاسبه شده است را نشان می‌دهد (۲۰۱۴ Dezab Consulting Engineers):

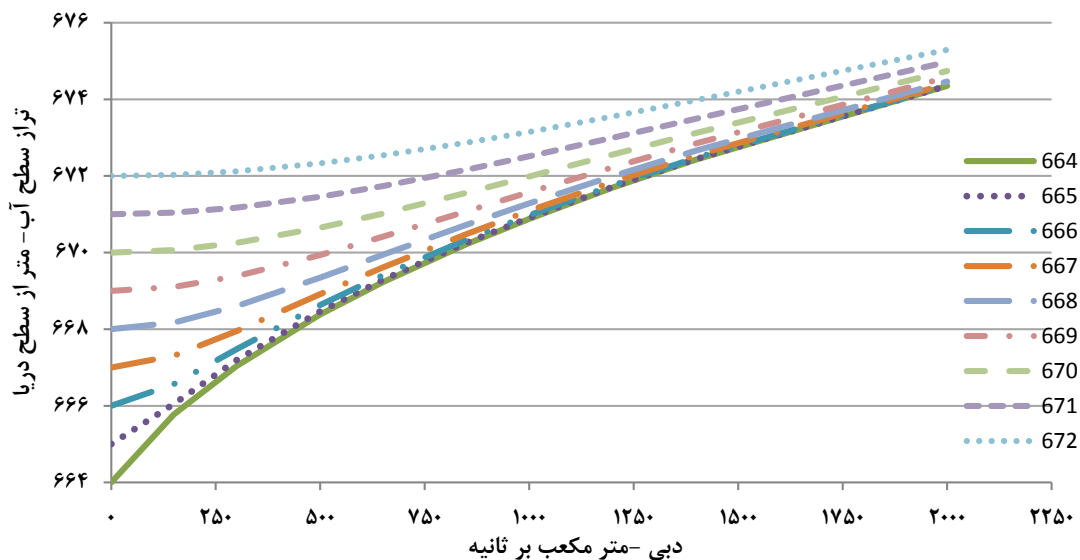
طراحی از منظر برنامه‌ریزی منابع آب سیستم کارون ۲ و به عبارتی به‌گزینی رقوم نرمال (ارتفاع سد) و ظرفیت نیروگاه کارون ۲، ضمن توجه به بهره‌برداری هماهنگ و سیستمی از مجموعه مخازن و نیروگاه‌ها همراه با کنترل معیار اعتمادپذیری تولید انرژی، موضوع اصلی این تحقیق است. این مسئله در قالب یک مسئله مهندسی طراحی و بهره‌برداری بهینه قابل فرمول‌بندی است که در ادامه بدان پرداخته می‌شود.

۳-۲- فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی

فرمول‌بندی مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن برقایی، به دلیل ماهیت غیرخطی معادلات تولید انرژی و همچنین سایر قیود، به شکل مدل‌های غیرخطی است. علاوه بر آن، در صورتی که برای کنترل سطوح اعتمادپذیری تولید انرژی، متغیرهای تصمیم صفر و یک به منظور تبدیل قیود احتمالاتی صریح مربوط به تولید انرژی به قیود احتمالاتی ضمنی و تعیین حالت‌های شکست و موفقیت در

تأمین انرژی مطمئن سیستم، به مدل اضافه گردد، مدل بهینه‌سازی از برنامه‌ریزی غیرخطی به برنامه‌ریزی غیرخطی غیرمحدب عدد صحیح (MINLP) که در رده‌ی مدل‌های دشوار-برای-حل یا NP-hard قرار می‌گیرد، تبدیل خواهد شد. در واقع این مدل شکل معین (Deterministic) و قطعی شده از یک مدل احتمالاتی است که با استفاده از یک سری زمانی آورد ورودی به مخزن در افق بلندمدت، به‌عنوان نماینده‌ای از فرآیند استوکستیک آورد رودخانه، نمایندگی می‌شود.

به دلیل وابستگی تراز آب در مخزن پایین دست سیستم و تراز پایاب نیروگاه بالادست و ضرورت احتساب تأثیرات هیدرولیکی بین سراب مخزن پایین دست بر تراز پایاب نیروگاه بالادست، لازم است از دسته‌ای دیگر از متغیرهای صفر و یک استفاده شود که بر دشواری حل مدل MINLP مسئله خواهد افزود. اضافه کردن این متغیرهای تصمیم گسسته در تعیین و شناسایی منحنی دبی-اشل پایاب کارون ۳ از میان دسته منحنی‌های پروفیل سطح آب برآمده از تحلیل هیدرولیکی بازه بین نیروگاه کارون ۳ و مخزن کارون ۲ (شکل ۲) ضروری است. بر این اساس فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری از این سیستم با تابع هدف حداکثرسازی تولید انرژی مطمئن کل سیستم و حداقل ساختن هزینه‌های ساخت سد و نیروگاه پایین دست به شرح زیر می‌باشد:



شکل ۲- نمودار رابطه دبی-اشل پایاب نیروگاه کارون ۳ در حالات مختلف تراز مخزن سد کارون ۲

$$\sum_{i=1}^2 E_i(t) \geq FE \times Z(t) \quad \forall t=1, \dots, T \quad (17)$$

$$\sum_{t=1}^T \frac{Z(t)}{T} \geq \alpha \quad (18)$$

$$S_{\min i} \leq S_i(t) \leq S_{\max i} \quad \forall t=1, \dots, T \quad \forall i=1, 2 \quad (19)$$

$$\forall t=1, \dots, T \quad \forall i=1, 2 \quad (20)$$

$$Q_{\min i} \leq Q_i(t) \leq Q_{\max i}$$

در این فرمول‌بندی، i شمارنده سد و t نشان‌دهنده‌ی شماره ماه از تعداد کل ماه‌های مورد بررسی (T) است. تابع هدف تعریف‌شده در معادله‌ی (۴) به منظور بیشینه‌سازی انرژی مطمئن کل سیستم و کمینه کردن هزینه‌ی ساخت سد و نیروگاه کارون ۲ می‌باشد. در این معادله، پارامترهای w_1 و w_2 ضرایب وزنی تابع هدف می‌باشند که در یک فرایند مبتنی بر سعی و خطا تعیین شده‌اند. جزئیات بیشتر پیرامون تعیین این ضرایب در بخش بعد ارایه شده است.

بر اساس روابط (۵) و (۶)، هزینه احداث سد و هزینه‌ی ساخت نیروگاه به ترتیب تابعی از تراز نرمال مخزن کارون ۲ ($h_{\max 2}$) و ظرفیت تولید نیروگاه کارون ۲ ($P_{cap 2}$) خواهند بود که با استفاده از توابع خطی بیان شده‌اند. این توابع براساس جدول هزینه‌های ناشی از افزایش تراز نرمال ظرفیت تولید سد و نیروگاه کارون ۲ که در جدول نمایش داده شد، توسعه داده شده‌اند. در این روابط a , b , c و d ثابت‌های بدست آمده از منحنی‌های خطی برازش داده شده را نشان می‌دهند.

روابط (۷) و (۸) معرف بیلان حجمی آب در هریک از مخازن سیستم است که در آن $S_1(t)$ و $S_2(t)$ به ترتیب حجم ابتدایی مخازن کارون ۳ و ۲، $I_1(t)$ حجم ورودی به مخزن کارون ۳، $Q_1(t)$ و $Q_2(t)$ به ترتیب حجم جریان عبوری از توربین نیروگاه‌های کارون ۳ و کارون ۲ و $Spill_1(t)$ و $Spill_2(t)$ حجم سرریز شده از هریک از مخازن کارون ۳ و ۲ در دوره‌ی t و بر حسب میلیون مترمکعب می‌باشند. از آن جا که سد و نیروگاه کارون ۲، در پایین دست قرار دارد، بنابراین مقدار ورودی به مخزن برابر با مجموع جریان خروجی از مخزن بالادست به همراه جریان بین حوضه‌ی $(J_{1,2}(t))$ در نظر گرفته شده است. معادله (۹) معادله‌ی تولید انرژی برقایی در هر یک از نیروگاه‌ها بوده که در آن $E_i(t)$ انرژی تولید

$$\text{Max } w_1 \times FE - (PC + DC) - w_2 \times \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^T spill_i(t) \right) \quad (4)$$

Subject to:

$$DC = a \times h_{\max 2} + b \quad (5)$$

$$PC = c \times P_{cap 2} + d \quad (6)$$

$$\forall t=1, \dots, T \quad (7)$$

$$S_1(t+1) = S_1(t) + I_1(t) - Q_1(t) - Spill_1(t)$$

$$S_2(t+1) = S_2(t) + Q_1(t) + Spill_1(t) + J_{1,2}(t) - Q_2(t) - Spill_2(t) \quad (8)$$

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

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

$$E_i(t) = 2.725 \times Q_i(t) \times \left(\frac{h_i(t) + h_i(t+1)}{2} - htw_i(t) - hf_i \right) \times e_i \quad (9)$$

$$h_i(t) = f_i(S_i(t)) \quad \forall t=1, \dots, T \quad \forall i=1, 2 \quad (10)$$

$$h_2(t) \leq \sum_{m=1}^M h_{up m} \times Z_{tail m}(t) \quad \forall t=1, \dots, T \quad (11)$$

$$h_2(t) \geq \sum_{m=1}^M h_{dn m} \times Z_{tail m}(t) \quad \forall t=1, \dots, T \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^M Z_{tail m}(t) = 1 \quad \forall t=1, \dots, T \quad (13)$$

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

$$htw_1(t) = \sum_{m=1}^M g_{1m}(Q_1(t)) \times Z_{tail m}(t) \quad (14)$$

$$htw_2(t) = g_2(Q_2(t)) \quad \forall t=1, \dots, T \quad (15)$$

$$E_i(t) \leq P_{cap i} \times n_{hours} \quad \forall t=1, \dots, T \quad \forall i=1, 2 \quad (16)$$

شده در نیروگاه i در دوره t برحسب مگاوات ساعت، $h_i(t)$ تراز ابتدایی آب در مخزن i و $htw_i(t)$ تراز ابتدایی پایاب نیروگاه i در دوره t برحسب متر می‌باشند. همچنین در این معادله، hf_i بیانگر میزان افت طولی و اصطکاکی در مسیر تونل آب بر نیروگاه i برحسب متر و e_i معرف راندمان نیروگاه i است. معادله‌ی (۱۰) رابطه‌ی حجم- ارتفاع هر یک از مخازن را بر اساس یک معادله چند جمله‌ای معرفی می‌کند.

در فرمول‌بندی فوق، روابط (۱۱) تا (۱۴) به منظور تعریف اثرات غرقاب شدن تراز پایاب نیروگاه کارون ۳ به وسیله‌ی تراز در مخزن کارون ۲ بیان شده‌اند. در این روابط ابتدا با توجه به تراز مشخص در سد کارون ۲، یک منحنی دبی- اشل پایاب برای نیروگاه کارون ۳ تعریف می‌گردد که M نشان‌دهنده‌ی تعداد معادلات تعریف شده است. در هر گام زمانی، انتخاب منحنی مناسب m از میان تمامی دسته منحنی‌های تعریف شده، با استفاده از متغیرهای صفر و یک $(Ztail_m)$ و محدوده‌های تعریف شده برای هر تراز مشخص در مخزن کارون ۲ $(hup_m$ و $hdn_m)$ صورت می‌گیرد. سپس با استفاده از معادله‌ی (۱۴) مقدار تراز پایاب نیروگاه کارون ۳ محاسبه می‌گردد. همچنین معادله (۱۳) تضمین می‌کند که تنها یک معادله دبی- اشل پایاب برای تعیین تراز پایاب نیروگاه کارون ۳ در هر بازه زمانی انتخاب گردد. پیش‌تر عنوان شد که هر یک از یک منحنی‌های دبی- اشل پایاب مذکور بر اساس مدل‌سازی هیدرولیکی بازه بین نیروگاه کارون ۳ و مخزن کارون ۲ تعیین می‌شود. معادله‌ی (۱۵) به منظور تعیین تراز پایاب نیروگاه کارون ۲ با توجه به مقدار دبی خروجی از نیروگاه تعریف شده است. قید (۱۶) تضمین‌کننده‌ی حداکثر مقدار انرژی تولیدشده در هریک از نیروگاه‌های سیستم با توجه به ظرفیت هر نیروگاه و حداکثر تعداد ساعت کارکرد در هر دوره (nhours) می‌باشد.

ملاحظات مربوط به مقدار انرژی مطمئن کل سیستم در سطح اعتمادپذیری مورد نظر توسط قیود (۱۷) و (۱۸) در نظر گرفته می‌شود. در این قیود $Z(t)$ متغیر دومقداره صفر و یک می‌باشد که در شرایط تأمین انرژی مطمئن برابر ۱ و در غیر این صورت برابر با صفر خواهد بود. همچنین نامعادله‌ی (۱۸) به منظور کنترل حداکثر تعداد ماه‌های عدم تأمین انرژی مطمئن کل سیستم با توجه به سطح اعتمادپذیری مورد نظر (α) اعمال شده است. قیود (۱۹) و (۲۰) نیز به ترتیب برآورده شدن مقادیر کمینه و بیشینه احجام ذخیره مخازن و

جریان‌های خروجی از تونل آب بر نیروگاه‌های سیستم را کنترل می‌کنند.

۲-۴- حل مدل بهینه‌سازی

در این بخش روند حل مدل بهینه‌سازی ارائه شده در بخش قبل با استفاده از دو روش بهینه‌سازی کلاسیک و بهینه‌سازی تکاملی با استفاده از الگوریتم PSO شرح داده می‌شود. در روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک، حل مسئله و تعیین جواب بهینه متغیرهای پیوسته در فضای جست‌وجوی مسئله بر اساس مشتق‌گیری و بررسی پیوستگی توابع صورت می‌پذیرد. بنابراین، مقدار متغیرهای تصمیم پیوسته توسط روش‌های گرادیان- پایه و متغیرهای تصمیم گسسته توسط الگوریتم‌های کلاسیک بهینه‌سازی نظیر شاخه و حد تعیین خواهند شد. از جمله بسته‌های نرم‌افزاری با قابلیت حل مدل‌های بهینه‌سازی بر اساس روش‌های فوق، می‌توان به نرم‌افزارهای LINGO و GAMS اشاره کرد. حل مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح (MINLP) در این نرم‌افزارها با به‌کارگیری ترکیبی از یک روش گرادیان- پایه مانند روش برنامه‌ریزی خطی متوالی (SLP) و یا گرادیان کاهش عمومی (GRG) برای تعیین متغیرهای پیوسته و یک الگوریتم جست‌جو در فضای متغیرهای گسسته مانند الگوریتم شاخه و حد یا شاخه و برش انجام می‌گیرد. الگوریتم شاخه و حد یک الگوریتم مؤثر در حل مسائل مختلف بهینه‌سازی گسسته و ترکیباتی است. این الگوریتم با شمارش تمامی راه‌حل‌های مسئله و با حذف بسیاری از آن‌ها از طریق تخمین مرزهای بالا و پایین جواب، مقدار بهینه را برای مسئله‌ی بهینه‌سازی تعیین می‌کند. الگوریتم شاخه و برش نیز که برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی و گسسته به کار می‌رود، شامل اجرای یک الگوریتم شاخه و حد و استفاده از سطوح برش به منظور دستیابی سریع‌تر به جواب بهینه مسئله است.

در ارتباط با نحوه انتخاب وزن‌ها در تابع هدف باید گفت که مقادیر انتخاب شده بر اساس سعی و خطا به گونه‌ای تعیین شده‌اند که بزرگ یا کوچک شدن عبارتهای مختلف متوازن باشد و نتایج نسبت به تغییر آن‌ها حساسیت نشان دهد. به عبارت دیگر وزن هر یک از عبارات باید مقداری باشد که وجود یا عدم وجود آن عبارت بلاموضوع نشود و مدل حساسیت خود نسبت به تغییرات نسبی آن عبارت را از دست ندهد. در این فرایند جواب‌های مساله ابتدا برای شرایط ساده شده و با تعداد گام‌های زمانی کمتر تحلیل حساسیت شد. پارامتر $w1$ تعادل بین مقدار انرژی مطمئن تولیدی و هزینه‌های احداث سد و نیروگاه را و پارامتر $w2$ نیز احجام سرریز از هریک از

مخازن را کنترل می‌نمایند. در سیستم‌های پیاپی با قابلیت و ظرفیت تولید قابل ملاحظه نیروگاه بالادست، هماهنگی بهره‌برداری و کنترل حجم سرریز و احتراز از هدررفت انرژی در قالب کمینه‌سازی سرریز در دوره‌های پرآب حائز اهمیت است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که اگر مقدار مجموع جریان‌های سرریزی جریمه نشوند، مدل با افزایش سرریز و عدم استفاده کامل از آب رهاشده، انرژی تولیدی و ظرفیت تولید کمی را برای نیروگاه کارون ۲ نتیجه خواهد داد. همچنین در صورت انتخاب اعدادی بزرگتر برای ضریب جریمه سرریز، مقدار ذرات (متغیرها) در الگوریتم PSO و عملکرد سیستم صرفاً به سمت کاهش مقدار سرریز (افزایش انرژی کل) متمایل می‌شود که این موضوع از منظر انرژی مطمئن تولیدی و ظرفیت نصب نیروگاه کارون ۲ مناسب نخواهد بود. براین اساس مقادیر نهایی پارامترهای w_1 و w_2 به ترتیب برابر با ۳۱,۵ و ۶۵۰ در نظر گرفته شدند.

با توجه به معادلات ارائه‌شده و در نظر گرفتن ۵۴ سال آمار آبدهی ماهانه، مدل بهینه‌سازی دارای ۳۸۸۸ متغیر پیوسته شامل متغیرهای رهاسازی ماهانه از توربین $(Q_i(t))$ ، متغیرهای جریان‌های سرریزی ماهانه $(Spill_i(t))$ و متغیرهای تراز ماهانه آب در مخازن $(h_i(t))$ می‌باشد. همچنین با توجه به تعریف ۹ متغیر دبی اشل پایاب در حالت‌های مختلف تراز سراب کارون ۲، تعداد متغیرهای دومقداره مربوط به آدرس‌دهی و تعیین مقدار تراز پایاب نیروگاه کارون ۳ $(Ztail_m(t))$ ، برابر با ۵۸۳۲ می‌باشند. علاوه بر این، متغیرهای ظرفیت تولید، رقوم نرمال و حداقل بهره‌برداری سد و نیروگاه کارون ۲ به‌عنوان متغیرهای طراحی مسئله و ۱۲۹۶ متغیر صفر و یک قید اعتمادپذیری تولید انرژی $(Z(t))$ نیز می‌بایست تعیین شوند. این تعداد از متغیرهای پیوسته و گسسته بیانگر دشواری فرایند حل مدل است.

از آن جا که در الگوریتم PSO با شبیه‌سازی روابط هیدرولیکی بین سراب کارون ۲ و تراز پایاب نیروگاه کارون ۳ با استفاده از دستورات if-else به راحتی قابل اجرا تعریف است، در فرایند حل با این روش نیازی به تعریف متغیرهای صفر و یک نیست. به بیان دیگر مدل فوق با استفاده از PSO می‌تواند در قالب بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی حل شود. این خاصیت یکی از مزایای اصلی استفاده از الگوریتم‌های فراکوشی است. در این روش پس از تعیین متغیرهای تصمیم مسئله در فضای موجه، تعیین حجم انتهای هر دوره و انرژی تولید شده از هریک از نیروگاه‌ها و سایر متغیرهای وابسته با استفاده

از روش روندیابی متوالی جریان (SSR) در شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخازن و نیروگاه‌های برقایی انجام می‌شود.

در SSR، مقادیر رهاسازی از مخازن و انرژی تولیدی به شکل متوالی برای هر بازه‌ی زمانی در دوره تحلیل محاسبه می‌شود. در این روش از معادله پیوستگی در هر دوره استفاده شده و تغییرات ارتفاع مخزن ناشی از تنظیم مخزن مورد توجه قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است، مقدار جریان رهاسازی از هریک از مخازن سیستم می‌بایست به صورت دوره به دوره تولید شده و با توجه به حجم مخازن در ابتدای دوره‌ی بعد، انتخاب مقادیر رهاسازی برای دوره‌ی آتی انجام شود. چنانچه تمامی این متغیرها به‌صورت یکجا و به شکل تصادفی تولید گردند، امکان ارضای قیود بیان حجمی آب مسئله در تمامی دوره‌ها و به عبارت دیگر تولید جواب‌های موجه و شدنی در نسل اول امکان پذیر نخواهد بود. به عبارتی فرایند ساخت و تولید جواب‌های شدنی خصوصاً از منظر ارضای قیود از نوع تساوی (معادلات پیوستگی جریان) بایستی به شکل نموی (incremental) و نه یکجا صورت پذیرد. در این فرایند حدود بالا و پایین متغیر رهاسازی از مخزن در هر دوره که باید به شکل تصادفی تولید شود، بر اساس مقدار تصادفی تولید شده از این متغیر در گام زمانی قبل و حدود بالا و پایین حجم ذخیره مخزن و بر اساس معادله بیان به گونه‌ای تعیین می‌شود که نهایتاً مقدار تصادفی تولید شده این متغیر از منظر معادله بیان شدنی باشد. این ملاحظه نیز از دیگر نکات مهم در تضمین موفقیت و کارایی استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی تصادفی نظیر PSO در حل مسئله پیش رو می‌باشد.

پس از تعیین سری زمانی انرژی تولیدشده در یک تکرار از الگوریتم و پس از شروع تکرارهای الگوریتم PSO و برای تشخیص حالت‌های شکست و موفقیت در تأمین انرژی مطمئن، از یک شرط کنترلی دیگر استفاده شد که بر اساس آن اگر مقدار انرژی کل سیستم در دوره‌ی t ، یعنی $E(t)$ ، از α درصد مقدار انرژی در کل دوره در تکرار قبل کمتر باشد، حالت شکست در تأمین انرژی مطمئن کل سیستم در نظر گرفته شد؛ در غیر این صورت حالت موفقیت در تأمین انرژی مطمئن کل سیستم برقایی منظور گردید. در دوره‌هایی که مدل متحمل شکست در تأمین انرژی مطمئن می‌شود، باید تا جای ممکن (حفظ شرایط موجه ماندن مسئله) رهاسازی از مخازن را کاهش داد تا با ذخیره آب در مخزن، بتوان در ماه‌هایی خشک آتی به افزایش میزان رهاسازی برای تولید انرژی مطمئن کمک کرد. در واقع از این طریق علاوه بر ارضای قید اعتمادپذیری تولید انرژی مطمئن در

نبودند. اگرچه روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی مانند شاخه و حد در تعیین متغیرهای تصمیم دو مقدره کارایی بالایی در حذف بسیاری از جواب‌های زیربهبینه دارند، در مواجهه با تعداد زیاد از این متغیرها در مسئله‌ی پیش رو ناتوان عمل می‌کنند. به طوری که حتی با گذشت زمان بیش از یک روز جواب موجهی برای مسئله در نرم افزار GAMS پیدا نشد. در روش حل با استفاده از الگوریتم PSO پارامترهای الگوریتم مطابق با اعداد جدول ۵ در نظر گرفته شد.

گرچه تضمینی بر بهینه سراسری بودن جواب‌ها وجود ندارد، الگوریتم PSO همراه با تمهیدات و ملاحظات پیش‌گفته قادر بوده است به جواب‌های قابل قبول همگرا شود. بهترین جواب نتیجه شده در قالب مقادیر انرژی مطمئن قابل استحصال از هر نیروگاه، انرژی مطمئن کل سیستم، ظرفیت تولید نیروگاه کارون ۲، رقوم نرمال و رقوم حداقل بهره‌برداری سد کارون ۲ در دو سطح اعتمادپذیری ۸۰ و ۹۰ درصد در جدول ۶ ارائه شده است. شکل ۴ منحنی‌های همگرایی مقدار تابع هدف بهترین ذره PSO را در سطح اعتمادپذیری ۹۰ درصد نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های ۵ تا ۷ به ترتیب منحنی‌های تداوم انرژی در نیروگاه کارون ۳، نیروگاه کارون ۲ و کل سیستم کارون ۲-کارون ۳ را در سطح اعتمادپذیری ۹۰ درصد نشان می‌دهند. علاوه بر آن شکل‌های ۸ و ۹ مقادیر توزیع ماهانه میانگین‌های بلندمدت متغیرهای رهاسازی و شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقادیر حجم ذخیره هریک از مخازن را در سطح اعتمادپذیری ۹۰ درصد به تصویر می‌کشند.

سطح α ، می‌توان به روند دستیابی به یک جواب مطلوب سرعت بخشید. ضمناً از دیگر عواملی که می‌تواند منجر به تسریع در همگرایی الگوریتم به سمت جواب بهینه گردد افزایش مقدار حد پایین انتخاب مقدار رهاسازی از مخازن در دوره‌هایی با قابلیت تأمین انرژی بالاتر از انرژی مطمئن است. مجموعه ملاحظات فوق در فرایند حل مدل با روش PSO لحاظ گردید. در شکل ۳ روند حل مسئله بهینه‌سازی براساس الگوریتم PSO و روش روندیابی متوالی جریان نشان داده شده است. با توجه به این شکل، n در این الگوریتم بیانگر شماره‌ی تکرار الگوریتم PSO می‌باشد. روند حل مسئله به گونه ای طراحی شده است که بدون نیاز به استفاده از متغیرهای صفر و یک و با کمک دستورات شرطی، ارتباط هیدرولیکی بین تراز پایاب نیروگاه کارون ۳ و سراب مخزن کارون ۲ برقرار گردد. همچنین در این روش برخلاف روش گرادیان پایه، مقدار جریان سرریز از هریک از مخازن، با توجه به مقادیر حداکثر جریان عبوری از توربین و ظرفیت تولید نیروگاه تعیین می‌گردند.

۳- نتایج

در این بخش نتایج حل مدل بهینه‌سازی برای یک دوره زمانی ۵۴ سال با گام‌های زمانی ماهانه و در سطح اعتمادپذیری ۹۰٪ و ۸۰٪ ارائه می‌شود. همان طور که انتظار می‌رفت روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک به دلیل وجود متغیرهای دومقداره مربوط به کنترل سطح اعتمادپذیری تولید انرژی مطمئن سیستم و منحنی‌های هیدرولیکی پایاب و همچنین نامحدب بودن مدل غیرخطی قادر به حل مسئله

جدول ۵- پارامترهای الگوریتم PSO

تعداد تکرارهای الگوریتم PSO	تعداد ذرات در هر جمعیت	c_1	c_2	ω_{max}	ω_{min}	X
۵۰۰	۵۰	۲٫۱	۱٫۸	۱٫۲	۰٫۳	۱

جدول ۶- نتایج حل مدل بهینه‌سازی در سطح اعتمادپذیری ۸۰٪ و ۹۰٪ از تولید انرژی مطمئن با الگوریتم PSO

روش حل	انرژی مطمئن کل سیستم (Mwh)	انرژی مطمئن نیروگاه کارون ۳ (Mwh)	انرژی مطمئن نیروگاه کارون ۲ (Mwh)	تراز حداقل بهره‌برداری کارون ۲ (masl)	تراز حداکثر بهره‌برداری کارون ۲ (masl)	ظرفیت تولید نیروگاه کارون ۲ (Mw)	سطح اعتمادپذیری	زمان اجرای مدل
الگوریتم PSO	۳۹۰۵۷۸	۲۱۶۹۱۵	۱۵۲۶۸۱	۶۶۴٫۵	۶۶۷	۶۹۴	۸۰٪	کمتر از ۳ ساعت
الگوریتم PSO	۳۳۲۰۵۸	۱۸۷۳۶۰	۱۳۲۲۵۱	۶۶۱	۶۶۶	۵۹۳	۹۰٪	کمتر از ۳ ساعت

تولید تصادفی بردارهای سرعت و وضعیت متغیرهای حداقل تراز بهره برداری ($h min^n$)، تراز نرمال ($h max^n$) و ظرفیت تولید سد و نیروگاه کارون ۲ ($Pcap2^n$) در تکرار اول

$$S min 2^n = f_2(h min 2^n), S max 2^n = f_2(h max 2^n)$$

تولید تصادفی بردارهای سرعت و وضعیت متغیرهای رهاسازی از هریک از مخازن کارون ۳ و کارون ۲ ($Q_i^n(t)$) با توجه به مقادیر حداقل و حداکثر ظرفیت مخازن در تکرار اول

$n=1 \downarrow$

محاسبه‌ی مقادیر حجم مخازن و انرژی تولیدی نیروگاه‌های سیستم برقایی با استفاده از روش SSR و متغیرهای تولید شده توسط الگوریتم PSO در هر گام زمانی در تکرار n ام

For $t=1:T$

$$h_1^n(t) = f_1(S_1^n(t)) \quad S_1^n(t+1) = S_1^n(t) + I_1^n(t) - Q_1^n(t) \Rightarrow$$

$$h_2^n(t) = f_2(S_2^n(t)) \quad S_2^n(t+1) = S_2^n(t) + Q_1^n(t) + J_{1,2}^n(t) - Q_2^n(t) \Rightarrow$$

$$\text{if } Q_i^n(t) \Rightarrow Q_i \max \Rightarrow Spil_i^n(t) = Q_i \max - Q_i^n(t), Q_i^n(t) = Q_i \max$$

$$htw_2^n(t) = g_2(Q_2^n(t)) \text{ if } h_2^n \geq hdn_m, h_2^n \leq hup_m \Rightarrow htw_1^n(t) = g_{1m}(Q_1^n(t))$$

$$E_i^n(t) = 2.725 \times Q_i^n(t) \times \left(\frac{h_i^n(t) + h_i^n(t+1)}{2} - htw_i^n(t) - hf_i \right) \times e_i$$

$$\text{if } E_i^n(t) \geq E \max_i^n \Rightarrow Spil_i^n(t) = (E \max_i^n - E_i^n(t)) / \left(\frac{h_i^n(t) + h_i^n(t+1)}{2} - htw_i^n(t) - hf_i \right) \times e_i + Spil_i^n(t)$$

$$E^n(t) = E_1^n(t) + E_2^n(t)$$

End

$n=n+1 \rightarrow$

تعیین انرژی مطمئن کل سیستم براساس سطح اعتمادپذیری مورد نظر و سری زمانی انرژی کل به دست آمده ($E^n(t)$) (شناسایی دوره‌های شکست و موفقیت در تامین انرژی مطمئن)

برنامه‌ریزی برای رهاسازی مناسب از مخازن به صورت کاهش رهاسازی در دوره‌های شکست براساس شناسایی دوره‌های شکست و پیروزی در تعیین انرژی مطمئن
 $\text{if } E^n(t) \leq FE^n \Rightarrow E_i^n(t) = Q \min_1$

ارزیابی تابع هدف مدله بهینه‌سازی و تعیین pbest و gbest

اگر شرط اتمام الگوریتم PSO فراهم شود

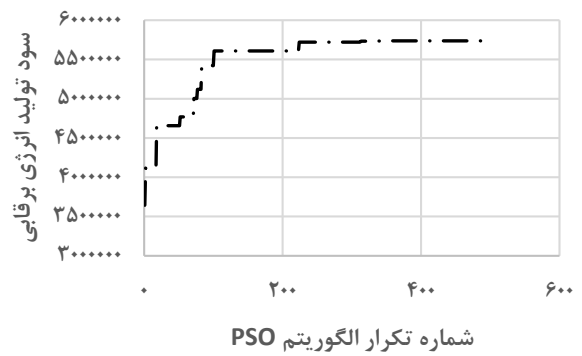
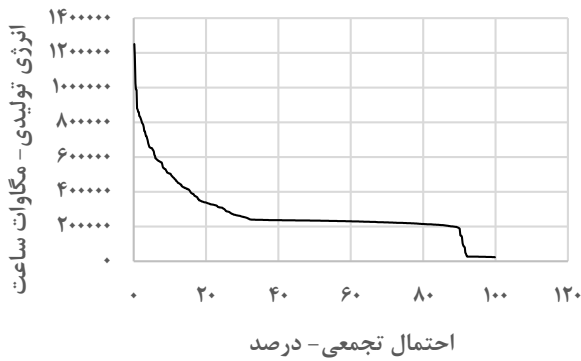
خیر

بلی

پایان

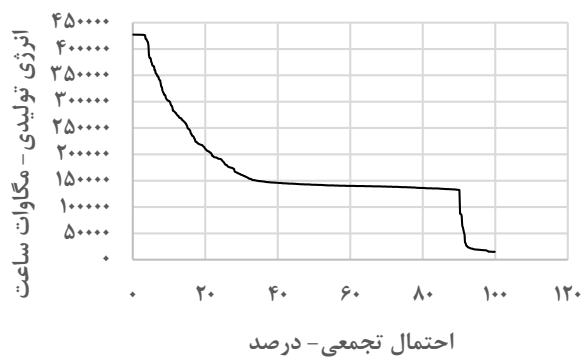
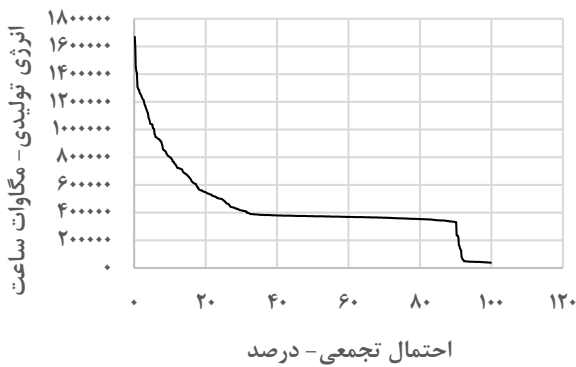
به روزرسانی بردارهای سرعت و وضعیت متغیرهای تصمیم با استفاده از معادلات اصلی PSO

شکل ۳- روندنمای حل مدل بهینه‌سازی توسط الگوریتم PSO و روش روندیابی متوالی جریان (SSR)



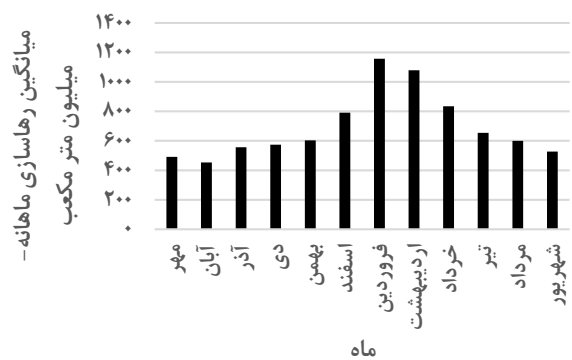
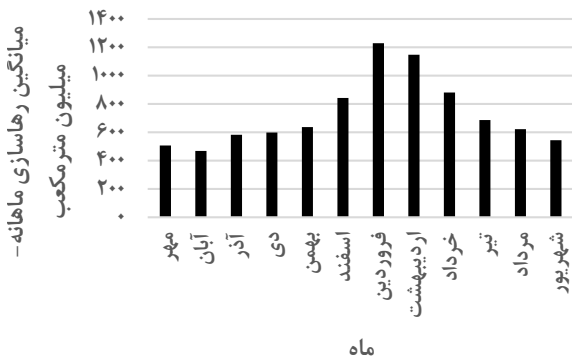
شکل ۳- منحنی تداوم انرژی کل تولیدی نیروگاه کارون ۳ در سطح اعتمادپذیری ۹۰٪

شکل ۴- روند همگرایی بهترین مقدار تابع هدف در هر نسل (gbest) در سطح اعتمادپذیری ۹۰٪



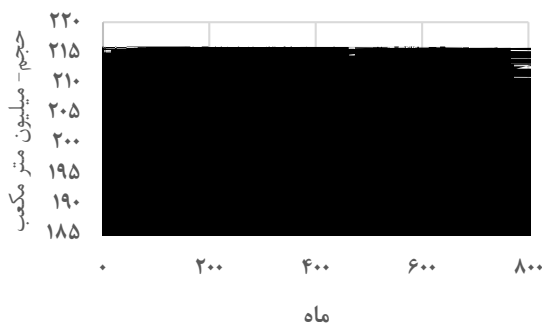
شکل ۵- منحنی تداوم انرژی کل تولیدی نیروگاه کارون ۲ در سطح اعتمادپذیری ۹۰٪

شکل ۶- منحنی تداوم انرژی کل تولیدی نیروگاه کارون ۲ در سطح اعتمادپذیری ۹۰٪

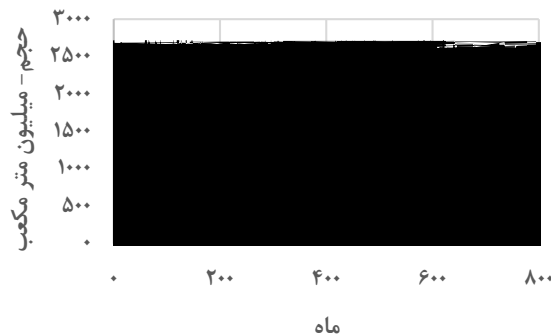


شکل ۷- متوسط توزیع ماهانه جریان خروجی از مخزن کارون ۳ حاصل از اجرای حل مدل بهینه‌سازی در سطح اعتمادپذیری ۹۰٪

شکل ۸- متوسط توزیع ماهانه جریان خروجی از مخزن کارون ۲ حاصل از اجرای حل مدل بهینه‌سازی در سطح اعتمادپذیری ۹۰٪



شکل ۱۱- سری زمانی حجم مخزن سد کارون ۲ در سطح اعتمادپذیری ۹۰٪



شکل ۱۰- سری زمانی حجم مخزن سد کارون ۳ در سطح اعتمادپذیری ۹۰٪

به بیان حجمی آب در تمام دوره‌های زمانی را برآورده می‌کنند، و همچنین استفاده از اطلاعات حالت سیستم در تعیین دوره‌های شکست سیستم در تأمین نیاز انرژی توانست با تلاش محاسباتی قابل اداره توسط امکانات پردازش متعارف و موجود به جواب‌های قابل قبول منتهی شود. در این رابطه گرچه نیل به جواب بهینه سراسری مسئله قبل تضمین نیست، نزدیکی جواب‌های حاصل از اجزای مختلف در دفعات متعدد برای حالت‌های ساده‌تر و کوچکتر از مسئله با تعداد گام‌های زمانی کمتر در فرایند برآورد پارامترهای الگوریتم PSO، بیانگر احتمال بالا برای نزدیک به جواب بهینه سراسری بودن نتایج است.

در خاتمه یادآور می‌شود که به منظور ارزیابی دقیق‌تر اثر تغییرات وزن‌ها در تابع هدف بهتر است مساله در قالب یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه فرمول‌بندی و جواب‌های پارتو تولید و ارزیابی شوند که این مهم بایستی در قالب کارهای آتی مد نظر قرار گیرد.

۵- تقدیر و تشکر

این مقاله نسخه تکمیل و داوری شده مقاله ارائه شده در ششمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران می‌باشد. این کنفرانس در اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۵ در شهر سمنان برگزار شد.

۶- مراجع

Afsharian Zadeh N, Mousavi SJ (2016) Optimal operation of hydraulically coupled hydropower reservoirs system. In: Proc. of 3th International Congress on Civil Engineering, Architecture and

۴- خلاصه و جمع‌بندی

در این تحقیق مسئله‌ی طراحی و بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های برقایی پیاپی کارون ۲- کارون ۳ با اعمال کنترل بر روی سطح اعتمادپذیری تولید انرژی مطمئن و احتساب اثر غرقاب شدن تراز پایاب نیروگاه بالادست توسط سراب مخزن پایین‌دست، در قالب یک برنامه غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح (MINLP) بهینه‌سازی فرمول‌بندی شد. تأثیرات متقابل هیدرولیکی بین پایاب نیروگاه کارون ۳ و سراب مخزن کارون ۲ با استفاده از مدل‌سازی هیدرولیکی بازه‌فی‌مابین که منجر به تولید دسته‌منحنی‌های پایاب کارون ۳ شده بود (شکل ۲)، با استفاده از متغیرهای دو مقداره برای تعیین منحنی پایاب صحیح از بین دسته‌منحنی‌های فوق در هر گام زمانی در درون مدل بهینه‌سازی لحاظ شد. در ادامه حل این مدل بهینه‌سازی توسط روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک و الگوریتم فراکاوشی اجتماع ذرات (PSO) بررسی شد. در حل مساله با الگوریتم بهینه‌سازی PSO شبیه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخازن و نیروگاه‌ها با استفاده از روش روندیابی متوالی جریان (SSR) در قالب ماجول شبیه‌ساز و در قالب رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی پیگیری شد. با توجه به تعداد متغیرهای دو مقداره مدل بهینه‌سازی که برای کنترل سطح اعتماد تولید انرژی مطمئن و احتساب تأثیرات هیدرولیکی بین پایاب نیروگاه کارون ۳ و سراب مخزن کارون ۲ استفاده شدند، و همچنین نامحدب بودن بخش غیرخطی مدل بهینه‌سازی با توجه به روابط و قیود تولید انرژی برقایی، ترکیب روش کلاسیک گرادیان- پایه با الگوریتم جستجوی شاخه و حد در فضای متغیرهای گسسته مسئله منجر به یافتن جواب‌های موجه نگردید. علیرغم آن الگوریتم PSO با دو تمهید ناظر به ساخت و تولید گام به گام و نمود جواب‌های موجه و شدنی که قیود و معادلات از نوع تساوی مربوط

- Kennedy J, Eberhart RC (1995) Particle swarm optimization. In: Proc. of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks. IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 1942-1948
- Kim YO, Palmer RN (1997) Value of seasonal flow forecasts in bayesian stochastic programming. *Journal of Water Resources Planning and Management* 123(6):327-335
- Lyra C, Ferreira LR (1995) A Multiobjective approach to the short-term scheduling of a hydropower system. *IEEE Transactions on Power Systems* 10(4):1750-1755
- Mousavi SJ, Shourian M (2010) Capacity optimization of hydropower storage project using particle swarm optimization algorithm. *Journal of Hydroinformatics* 12(3):275-291
- Mousavi SJ, Shokrvand K, Seifi A (2004a) Application of an interior-points algorithm for optimization of a large-scale reservoir system. *Water Resources and Management* 18:519-540
- Mousavi SJ, Gholami-Zanousi A, Afshar A (2004b) Optimization and simulation of a multiple reservoir system operation. *Journal of Water Supply: Research and Technology- Aqua* 56(6):409-424
- Ndiritu JG (2005) Maximizing water supply system yield subject to multiple reliability constraints via simulation-optimization. *Water SA* 31(4):423-433
- Powell D (1983) Variable metric methods for constrained optimization. In *Mathematical Programming: The State of the Art*. Springer-Verlag, New York, 228-311
- Reznick K, Simonovic SP (1990) An improved algorithm for hydropower optimization. *Water Resources Research* 26(2):189-198
- Teegavarapu R, Simonovic S (2000) Short-term operation model for coupled hydropower reservoirs. *Journal of Water Resources Planning and Management* 126(2):98-106
- Yeh WG, Becker GL, Chu W.S (1979) Real-time hourly reservoir operation. *Journal of Water Resources Planning and Management* 105(2):187-203
- Urban Development, 29-31 December 2015, Shahid Beheshti University , Tehran , Iran (In Persian)
- Afsharian Zadeh N, Mousavi SJ, Jahani E, Kim JH (2016) Optimal design and operation of hydraulically coupled hydropower reservoirs system. In: Proc. of 12th International Conference on Hydroinformatics, 21-26 August 2016, Songdo convensia, Incheon, South Korea
- Arnold E, Tatjewski P, Wolchowicz P (1994) Two methods for large-scale nonlinear optimization and their comparison on a case study of hydropower optimization. *Journal of Optimization: Theory and Applications* 81(2):221-248
- Barros MTL, Tsai F, Yang S, Lopes J, Yeh W (2003) Optimization of large-scale hydropower system operations. *Journal of Water Resources Planning and Management* 129(3):178-188
- Bozorg Haddad O, Afshar A, Marion MA (2008) Honey-bee matrin optimization (HBMO) algorithm in deriving optimal operating rules for reservoirs. *Journal of Hydroinformatics* 10(3):257-264
- Cai X, Mckinney DC, Lasdon LS (2001) Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach. *Advanced in Water Resources* 24(6):667-676
- Diaz GE, Fontane DG (1989) Hydropower optimization via sequential quadratic programming. *Water Resources Planning and Management* 115(6):715-733
- Dezab Consulting Engineers (2014) First report on karun2 dam and run-of-river powerplant (In Persian)
- Gablinger M, Loucks DP (1970) Markovs models for flow regulatio. *Journal of Hydraulic Division* 96(1):165-181
- Grygier JC, Stedinger JR (1985) Algorithms for optimizing hydropower system operation. *Water Resources Research* 21(1):1-10
- Hawary EL, Christensen C.S (1979) Optimal economic operation of electric power systems academic, New York