



دانشگاه گواران کشاورزی و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و سوم، شماره سوم، ۱۳۹۵

<http://jwsc.gau.ac.ir>

بیشینه‌سازی تولید انرژی برقابی در سیستم مخازن چندمنظوره (سیستم ۶ سدی حوضه کارون بزرگ)

*مهرداد تقیان^۱ و عظیم شیردلی^۲

^۱عضو سازمان آب و برق خوزستان، استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان

تاریخ دریافت: ۹۳/۹/۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۵

چکیده

سابقه و هدف: در سیستم‌های منابع آب با مخازن چندمنظوره، معمولاً برخی اهداف در تضاد با یکدیگر قرار دارند. یکی از رایج‌ترین موارد، تقابل هدف برقابی با سایر اهداف تأمین آب است. در این شرایط، بالا نگه داشتن تراز حداقل بهره‌برداری، سبب افزایش ارتفاع آب (هد مؤثر) و تولید انرژی برقابی بیش‌تر می‌شود. اما این سیاست بهره‌برداری، منجر به محدود شدن دامنه تغییرات ذخیره و کاهش حجم فعال مخزن می‌شود که ممکن است با افزایش خسارت در تأمین نیازهای پایاب توأم باشد. بر این اساس، یکی از اهداف اصلی در این پژوهش، حداکثر نمودن انرژی برقابی تولیدی در سیستم‌های پیچیده چندمنظوره و چندهدفه است به طوری که نیازهای پایاب نیز با اعتمادپذیری مورد نظر تأمین گردند. جهت نیل به این هدف، تراز بهینه حداقل بهره‌برداری مخازن برآورد می‌گردد. در این زمینه می‌توان به مدل‌های ترکیبی بهینه‌سازی ریاضی کلاسیک و فراکوشی، مدل‌های ترکیبی دو الگوریتم فراکوشی و مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه اشاره نمود.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، به توسعه یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در حوضه آبریز کارون بزرگ با در نظر گرفتن سیستم ۶ سدی وضع موجود پرداخته شده است. در این مدل ترکیبی، بیشینه‌سازی مجموع انرژی تولیدی در سدهای مخزنی به‌عنوان تابع هدف تعریف شده است که قیود و محدودیت‌های آن شامل بیلان آب و اعتمادپذیری است. این مدل، قادر به بررسی دقیق جزئیات سیستم منابع آب و اولویت‌بندی تخصص آب به نیازهای مختلف خواهد بود. در این راستا، مقادیر انرژی برقابی تولید شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک و طی یک فرآیند تکامل تدریجی حداکثر شده و انحراف از اعتمادپذیری مطلوب برای تأمین نیازهای پایاب نیز با اعمال جریمه در تابع هدف، به‌طور هم‌زمان کنترل می‌گردد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که سیستم ضمن تأمین نیازها با اعتمادپذیری مطلوب ۷۵ درصد، قادر به مجموع تولید انرژی برقابی با میانگین سالانه ۱۸۱۹۳ گیگاوات ساعت بوده است که بیشترین سهم مربوط به سد کارون ۱ با ۳۴۸۳ و کم‌ترین آن مربوط به سد کارون ۴ با ۲۰۰۷ گیگاوات ساعت در سال است. علاوه بر آن، شبکه‌های کشاورزی رودخانه دز و شبکه گرگر بر روی رودخانه گرگر از انشعابات رودخانه کارون، نقاط مرزی بهینه‌سازی برای تأمین حداقل اعتمادپذیری قابل قبول هستند و به‌عنوان شبکه‌های بحرانی تأمین آب شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری: با توجه به این که الگوریتم‌های فراکوشی در حالت معمول قادر به پذیرش قید نیستند و بایستی برای اعمال محدودیت‌ها چاره‌جویی گردد، پژوهش پیش‌رو نشان داد که استفاده از اعمال جریمه در تابع هدف متناسب با میزان

*مسئول مکاتبه: mehرداد.taghian@gmail.com

انحراف از اعتمادپذیری مطلوب (فید) دارای کارایی مطلوب در سیستم‌های پیچیده است. علاوه بر آن، استفاده از مدل ترکیبی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی کمک قابل‌ملاحظه‌ای به وارد کردن جزئیات سیستم منابع آب در مدل شبیه‌سازی نموده است. این در حالی است که در شرایط استفاده معمول از مدل‌های بهینه‌سازی، نیاز به ساده‌سازی زیاد مسأله است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، انرژی برقابی، بهینه‌سازی، چندمنظوره، مخازن

مقدمه

امروزه به دلیل محدودیت سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از آن، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی برقابی مورد توجه بیش‌تری قرار گرفته است. از آن‌جا که در سدهای مخزنی، معمولاً تولید انرژی برقابی در کنار سایر اهداف تأمین آب مطرح است، بهره‌برداری از سدهای مخزنی چندمنظوره بایستی به گونه‌ای باشد تا ضمن تولید حداکثر انرژی برقابی، تأمین سایر نیازها و اهداف را به مخاطره نیاندازد. از دیدگاه تولید انرژی برقابی، بهره‌برداران تمایل به حفظ تراز سطح آب در سطوح بالای مخزن را دارند. در این وضعیت با افزایش هد مؤثر، امکان تولید انرژی برقابی افزایش می‌یابد. این در حالی است که در بسیاری از دوره‌های زمانی بهره‌برداری از جمله دوره خشکسالی، ناگزیر به استفاده از ذخیره مخزن تا پایین‌ترین سطح ممکن جهت تأمین نیازهای کشاورزی، شرب و صنعت، زیست‌محیطی و ... هستیم. بنابراین، اهداف تولید انرژی برقابی و تأمین آب نیازهای مصرفی پایاب در بسیاری از بازه‌های زمانی بهره‌برداری در تقابل با یکدیگر قرار دارند. در سیستم‌های منابع آبی که دارای مخازن سری و موازی با شبکه‌های متعدد نیاز آبی هستند، حل مسأله فوق با پیچیدگی‌های فراوانی توأم خواهد بود. بنابراین، در چنین شرایطی ناگزیر به استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی به منظور تجویز بهترین سیاست بهره‌برداری هستیم. تلاش پژوهشگران برای حل این گونه مسائل، ابتدا بر روش‌های بهینه‌سازی ریاضی کلاسیک مانند

برنامه‌ریزی خطی^۱ (۱۲، ۱۳)، برنامه‌ریزی پویا^۲ (۲، ۱۹) و برنامه‌ریزی غیرخطی^۳ (۶، ۱۶) متمرکز بوده است. در دو دهه اخیر، با توسعه الگوریتم‌های فراکاوشی^۴، افق و چشم‌انداز جدیدی برای حل این گونه مسائل گشوده شده است. با کاربرد مناسب این الگوریتم‌ها می‌توان بر مشکلات مربوط به ساده‌سازی روابط در مسائل خطی، گرفتار شدن در پاسخ‌های بهینه محلی^۵ و عدم دستیابی به پاسخ بهینه مطلق^۶ در مسائل غیرخطی، تعداد زیاد متغیرها و مشکلات ابعادی^۷ در مسائل برنامه‌ریزی پویا غلبه نمود. اولیویرا و لاکس (۱۹۹۷) از پیشگامان کاربرد این نوع الگوریتم‌ها در سیستم بهره‌برداری از سدهای مخزنی بوده‌اند (۱۰) و برای اولین بار الگوریتم ژنتیک را برای بهینه‌سازی سیاست بهره‌برداری یک سیستم منابع آب چندمنظوره به کار بردند. به دنبال آن، کاربرد وسیع انواع مختلف این الگوریتم‌ها را در حل مسائل بهره‌برداری از مخازن را شاهد بوده‌ایم که از آن جمله می‌توان به الگوریتم ژنتیک^۸ (۳، ۵، ۹، ۱۸، ۲۰)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۹ (۷، ۱۱، ۱۵)، بهینه‌سازی جامعه مورچگان^۱ (۱۷، ۲۱)، مدل‌های ترکیبی بهینه‌سازی ریاضی کلاسیک و فراکاوشی (۱۴، ۲۲)، مدل‌های ترکیبی دو الگوریتم فراکاوشی (۴) و مدل‌های بهینه‌سازی چند هدفه (۱، ۸) اشاره نمود.

- 1- Linear Programming
- 2- Dynamic Programming
- 3- Non-linear Programming
- 4- Evolutionary Algorithms
- 5- Local Optimum
- 6- Global Optimum
- 7- Curse of dimensionality
- 8- Genetic Algorithm (GA)
- 9- Particle Swarm Optimization (PSO)

از محدوده کوهستان در پهنه دشت خوزستان جریان یافته و پس از تلاقی با یکدیگر کارون بزرگ را تشکیل می‌دهند. حوضه آبریز کارون بزرگ به‌عنوان پرآب‌ترین حوضه آبریز کشور در شرایط وضع موجود شامل سدهای کارون ۳، کارون ۴، دز، شهید عباسپور، گدارلندر و گتوند علیا است. اهمیت پتانسیل آبی موجود در این حوضه و پیچیدگی‌های شبکه منابع و مصارف آن، بهره‌برداری از این سیستم و برنامه‌ریزی برای توسعه آن را با دشواری‌های زیادی همراه ساخته است. بر این اساس، سیستم منابع آب کارون بزرگ در شرایط موجود برای پیاده‌سازی مدل توسعه شده در این پژوهش مد نظر قرار گرفته است. موقعیت حوضه در شکل ۱، پیکربندی شماتیک آن در شکل ۲ و مشخصات سدهای مخزنی موجود در جدول ۱ ارائه شده است. این پیکربندی شامل ۷ منبع آب ورودی به سیستم، ۱۴ گره شبکه آبیاری، ۵ آبراهه انحرافی آب جهت تامین نیازهای شرب و صنعت و دو بازه حفظ حداقل جریان در سراب و پایاب شهر اهواز است. اطلاعات مورد نیاز از گزارش برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب سد کارون ۲ استخراج گردید (۲۳).

هدف اصلی در این پژوهش تعیین تراز بهینه حداقل بهره‌برداری هر مخزن در سیستم ۶ سدی کارون بزرگ است به طوری که حداکثر انرژی برقایی تولید گردد و از سوی دیگر تامین نیازهای کشاورزی، شرب و صنعت و زیست‌محیطی پایاب با اعتمادپذیری مورد نظر تامین گردد. بدین منظور در این پژوهش، یک مدل شبیه‌سازی مجهز به برنامه‌ریزی خطی توسعه داده شده و الگوریتم ژنتیک به آن متصل گردیده است. این مدل ترکیبی قادر به بررسی دقیق جزئیات سیستم منابع آب و اولویت‌بندی تخصص آب به نیازهای مختلف خواهد بود و طی یک فرآیند تکامل تدریجی مقادیر تابع هدف (تولید انرژی برقایی) را حداکثر و میزان انحراف از اعتمادپذیری مورد نظر در تامین نیازهای آبی را با محاسبه جریمه متناسب با میزان انحراف و اعمال آن در تابع هدف، حداقل گردد. در طی این فرآیند، مقادیر تراز بهینه حداقل بهره‌برداری نیز برآورد می‌گردد.

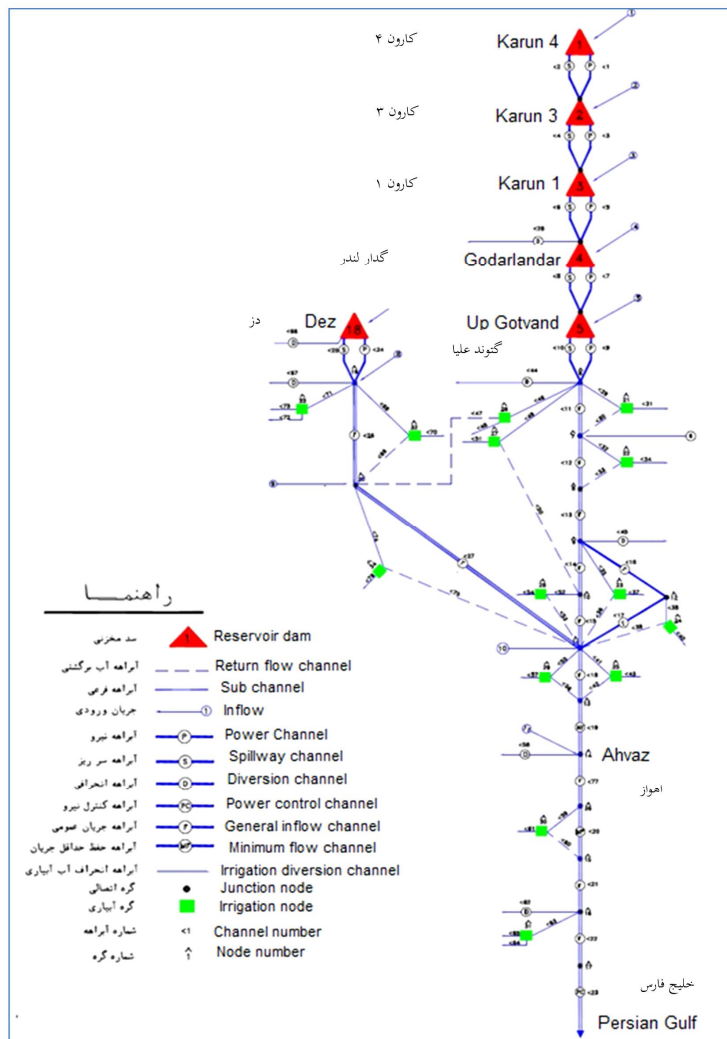
مواد و روش‌ها

حوضه آبریز کارون و دز: رودخانه‌های پرآب کارون و دز از دامنه‌های غربی رشته کوه زاگرس در غرب ایران سرچشمه می‌گیرند. این رودخانه‌ها پس از خروج



شکل ۱- نقشه موقعیت کلی حوضه آبریز کارون.

Figure 1. General location map for the Karun basin.



شکل ۲- پیکربندی شماتیک سیستم منابع آب کارون.

Figure 2. Schematic configuration of the Karun water resource system.

جدول ۱- مشخصات سدهای مخزنی مورد بررسی.

Table 1. Characteristics of the studied reservoir dams.

راندمان نیروگاه	ظرفیت نصب نیروگاه	حجم مخزن	تراز نرمال	حداقل تراز امکان پذیر	سد مخزنی
Power plant Efficiency (%)	Power plant installed capacity (MW)	Storage Capacity (MCM)	Normal level (M)	Possible minimum level (M)	Reservoir dam
92	1000	2190	1025	980	کارون ۴ (Karun 4)
94	2000	2970	845	790	کارون ۳ (Karun 3)
90	2000	2997	530	490	کارون ۱ (Karun 1)
92	2000	211	370.2	360	گدار لندر (Godarlandar)
93	2000	4097	230	180	گتوند علیا (UP Gotvand)
89	520	2864	352.5	290	دز (Dez)

(۴) محدودیت ذخیره

$$S_{\min-n} \leq S_{t,n} \leq S_{\max-n}$$

(۵) محدودیت اعتمادپذیری

$$Re_i \geq Re_{req-i}$$

(۶) پارامترهای شمارنده

$$i = 1, 2, 3, \dots, M \quad t = 1, 2, 3, \dots, T \quad n = 1, 2, 3, \dots, N$$

که در آن، Z مجموع انرژی تولیدی (تابع هدف)، N تعداد مخازن در سیستم، T تعداد دوره‌های زمانی شبیه‌سازی بر حسب ماه، M تعداد گره‌های مصرفی در سیستم، x_N رقوم حداقل بهره‌برداری برای هر کدام از N مخزن است، در حقیقت، حداقل تراز بهره‌برداری شامل N متغیر تصمیم‌گیری است که بایستی بهینه گردد. η_n راندمان نیروگاه در مخزن n ، γ وزن مخصوص آب، $R_{t,n}$ میزان رهاسازی جریان از مخزن n برای تولید نیرو در گام زمانی t ، H هد ذخیره مخزن، S حجم ذخیره مخزن، Q جریان ورودی به مخزن، E تبخیر مخزن، O سرریز از مخزن، $S_{\min-n}$ ، $S_{\max-n}$ حداکثر و حداقل ظرفیت مخزن است. دوره زمانی مدل‌سازی در این مطالعات، یک بازه زمانی درازمدت آینده ۴۱ ساله (۴۹۲ ماه) را در بر می‌گیرد که مشتمل بر دوره‌های خشکسالی، ترسالی و نرمال بوده است.

اعتمادپذیری^۴ از قدیمی‌ترین و در عین حال پرکاربردترین شاخص‌ها در مسائل مدیریت منابع آب است که تعریف اولیه آن عبارت است از احتمال (p) این که وضعیت سیستم (S) در شرایط مطلوب^۵ (NF)

روابط و معادلات: در شرایط عادی بهره‌برداری، تراز سطح آب مخزن می‌تواند بین تراز نرمال بهره‌برداری^۱ (NWL) و تراز حداقل بهره‌برداری^۲ (MWL) تغییر نماید. حجم مخزن بین تراز آب موجود^۳ (CWL) و MWL است. در این حالت اگر CWL بزرگ‌تر از NWL باشد، مخزن سرریز خواهد نمود و اگر CWL کوچک‌تر از MWL گردد، رهاسازی از مخزن تا زمانی که تراز سطح آب به MWL برسد، برابر صفر خواهد بود. هدف اصلی این پژوهش حداکثر نمودن تولید انرژی برقایی در سیستم پیچیده منابع آب ۶ سدی کارون بزرگ است به طوری که سایر نیازها و مصارف سیستم نیز با اعتمادپذیری مورد نظر تامین گردد. بدین منظور مقادیر بهینه تراز حداقل بهره‌برداری مخازن محاسبه شده تا ضمن بالا نگه داشتن تراز سطح آب جهت تولید انرژی برقایی، تبعات ناشی از کاهش حجم آب قابل برنامه‌ریزی برای تامین نیازها مد نظر قرار گیرد. بر اساس فرضیات فوق، معادلات اساسی مدل ریاضی توسعه داده شده به شرح زیر است:

(۱) تابع هدف

$$\text{Maximize } Z(x_N) = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T (\eta_n \gamma R_{t,n} H_{t,n})$$

و محدودیت‌های مربوط به این تابع هدف محدود به روابط زیر است:

(۲) محدودیت بیلان

$$S_{t+1,n} = S_{t,n} + Q_{t,n} - E_{t,n} - R_{t,n} - O_{t,n}$$

(۳) محدودیت سرریز

$$O_{t,n} = \max\{0, (S_{t+1,n} - S_{\max-n})\}$$

- 1- Normal Water Level
- 2- Minimum Water Level
- 3- Current Water Level

- 4- Reliability
- 5- Not Failure

آن پرداخته شد، توسعه یافته و از الگوریتم ژنتیک نیز به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی بهره‌برداری شده است. در این راستا، ابتدا یک جمعیت از راه‌حل‌های کاندید به نام کروموزوم با استفاده از فرآیندهای تصادفی تولید شده است. هر کروموزوم شامل ترازهای رقوم حداقل بهره‌برداری مخازن (x_N) است. به‌ازای هر کروموزوم، مدل شبیه‌سازی یک بار اجرا می‌شود و تابع هدف متناظر با آن و انحراف از اعتمادپذیری محاسبه می‌شود. بدین ترتیب در یک فرآیند تکامل تدریجی، با استفاده از عملگرهای انتخاب^۳، تزویج^۴ و جهش^۵ به تولید مجدد نسل پرداخته می‌شود و جمعیت جدیدی از کروموزوم‌ها تولید می‌گردد. سپس، دوباره به ارزیابی تابع هدف و انحراف از اعتمادپذیری پرداخته می‌شود. این فرآیند چرخشی تا رسیدن به همگرایی ادامه می‌یابد. الگوریتم این مدل ترکیبی و فرآیند چرخشی در شکل ۳ نشان داده شده است.

عملگرهای منتخب الگوریتم ژنتیک در این مطالعات شامل اندازه جمعیت=۴۰، احتمال تزویج ۰/۵، احتمال جهش از ۰/۰۵ در ابتدای تولید نسل تا ۰/۰۰۵ در زمان همگرایی متغیر بوده است. به‌منظور پیاده‌سازی این مدل از کد نویسی در نرم‌افزار متلب^۶ استفاده شده است.

قرار گیرد. در این حالت اگر T کل گام‌های زمانی، J شمارنده رویداد شکست^۱ (عدم تأمین کامل نیاز)، M تعداد رخداد‌های شکست و d_J مدت زمانی که سیستم برای بار J ام در یک دوره شکست قرار می‌گیرد باشد، اعتمادپذیری با استفاده از رابطه زیر برآورد می‌گردد:

$$Re = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M d_J}{T} \quad (7)$$

با توجه به تعاریف فوق، اگر Re_i اعتمادپذیری تامین آب شبکه i در کل دوره شبیه‌سازی، Re_{req-i} اعتمادپذیری مورد نیاز (مطلوب) برای تامین آب شبکه i ، V_{req-i} میزان انحراف از اعتمادپذیری مورد نیاز شبکه i و $V_{req-total}$ مجموع انحرافات همه شبکه‌ها باشد، خواهیم داشت:

$$V_{req-i} = \begin{cases} 0 & Re_i \geq Re_{req-i} \\ Re_{req-i} - Re_i & Re_i < Re_{req-i} \end{cases} \quad (8)$$

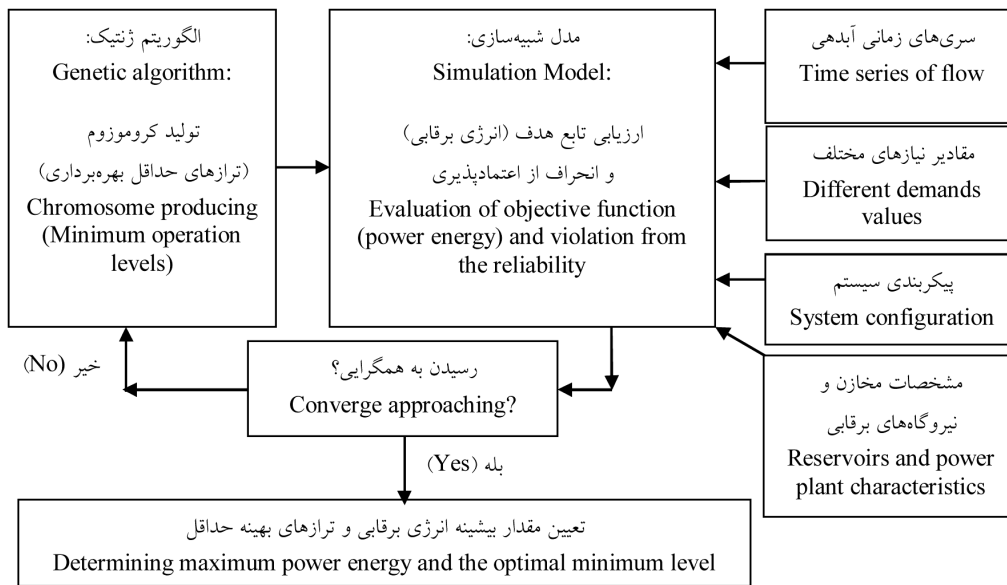
$$V_{req-total} = \sum V_{req-i} \quad (9)$$

در این مطالعات برای به حداقل رساندن میزان انحرافات از اعتمادپذیری مطلوب، از روش تابع جریمه^۲ استفاده گردید که در بخش بعدی به تفصیل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

شرح روش‌های مورد استفاده: در این مطالعات به‌منظور بهینه‌سازی تولید انرژی برقابی ضمن حفظ اعتمادپذیری تأمین نیازها، از یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده شده است. در این مدل ترکیبی، مدل شبیه‌سازی بر مبنای معادلات بیلان آب و سایر محدودیت‌ها که در بخش مواد و روش‌ها به کلیت

3- Elitism
4- Crossover
5- Mutation
6- Matlab

1- Failure
2- Penalty Function



شکل ۳- فرآیند کلی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در مدل ترکیبی.

Figure 3. General process of the simulation and optimization in the combined model.

$$Aim = Maximize \left[\frac{Z}{\Psi_s} \right] \quad (12)$$

در این رابطه ε تحت عنوان ضریب اهمیت شناوری^۱ نام‌گذاری می‌شود که در حقیقت ضریبی برای تنظیم اهمیت تأمین قطعی نیازها با اعتمادپذیری مطلوب در مقابل حداکثرسازی انرژی است. ضریب ε شامل مقادیر بزرگ‌تر از صفر می‌باشد که با توجه به شکل تابع هدف و اعمال جریمه در این مطالعات، عدد یک ($\varepsilon = 1$) در نظر گرفته شده است. این تکنیک برنامه‌ریزی علاوه بر آن‌که سبب ساده‌سازی مسأله و دستیابی به یک مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی نامقید^۲ شده است، فضای جستجوی روش حل بهینه‌سازی را نیز بارزتر و منعطف‌تر ساخته که به این ترتیب امکان یافتن پاسخ بهینه مطلق^۳ در مجاورت مرزها بسیار محتمل‌تر خواهد بود.

در حالت کلی، موقعی که از الگوریتم‌های فراکاوشی مانند الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود، جهت اعمال محدودیت‌ها مانند کنترل اعتمادپذیری، نیاز به یافتن راه‌حلی متناسب با نوع مسأله داریم. در این مطالعه، از روش تابع جریمه استفاده شده است که به صورت زیر محاسبه و اعمال می‌گردد.

$$\Psi_i = \begin{cases} 1 & Re_i \geq Re_{req-i} \\ (Re_{req-i} - Re_i) + \varepsilon & Re_i < (Re_{req-i}) \end{cases} \quad (10)$$

$$\Psi_s = \sum \Psi_i \quad (11)$$

بنا بر توضیحات فوق، اگر Aim تابع هدف اصلاح شده بهینه‌سازی باشد که بایستی ضمن تأمین قیدهای مسأله (اعتمادپذیری مطلوب در تأمین نیازها) برای کل دوره بیشینه‌سازی شود، به شکل رابطه زیر در مدل اعمال می‌گردد.

- 1- Floating Importance Coefficient
- 2- Unconstraint Nonlinear Programming
- 3- Global Optimum

نتایج و بحث

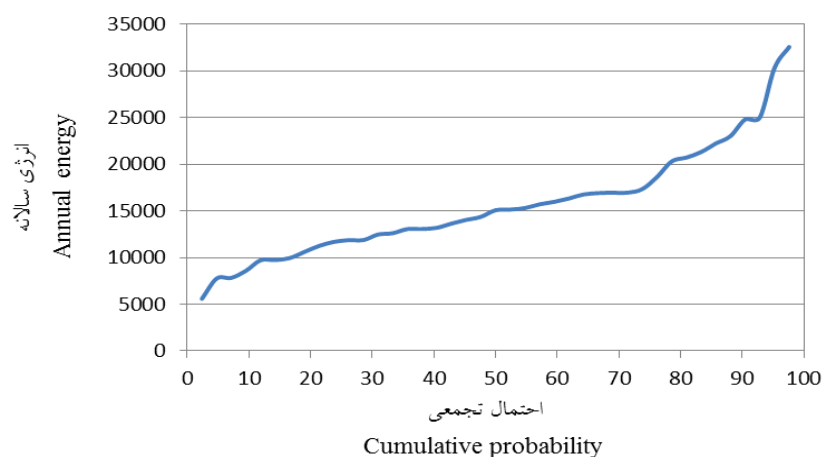
پس از پیاده‌سازی و اجرای مدل، مقدار تابع هدف بهینه‌سازی (Z) که بیشینه‌سازی تولید انرژی برقابی در کل دوره آماری ۴۱ ساله را مد نظر قرار داشته است، ۷۴۵۹۱۳ گیگا وات ساعت برآورد شده است. نتایج انرژی برقابی، دبی عبوری از نیروگاه‌ها و تراز حداقل بهره‌برداری در هر یک از سدهای مخزنی به شرح جدول ۲ برآورد شده است. بر این اساس، میانگین سالانه انرژی تولیدی در سیستم ۱۸۱۹۳ گیگا وات ساعت در سال برآورد شده است که سد شهید عباسپور

بیش‌ترین سهم را در تولید نیرو داراست و سدهای گدارلندر، کارون ۳ و گتوند علیا با فاصله اندکی از آن قرار دارد. به همین ترتیب، سدهای دز و کارون ۴ در رتبه‌های بعدی تولید انرژی سیستم قرار می‌گیرند. به‌منظور ارائه جزئیات بیشتر از نتایج خروجی مدل، منحنی تداوم انرژی تولیدی سالانه در کل دوره مدل‌سازی و میانگین ماهانه انرژی تولیدی مطابق نمودارهای ۴ تا ۷ به تصویر کشیده است.

جدول ۲- نتایج کلی خروجی از مدل توسعه‌یافته.

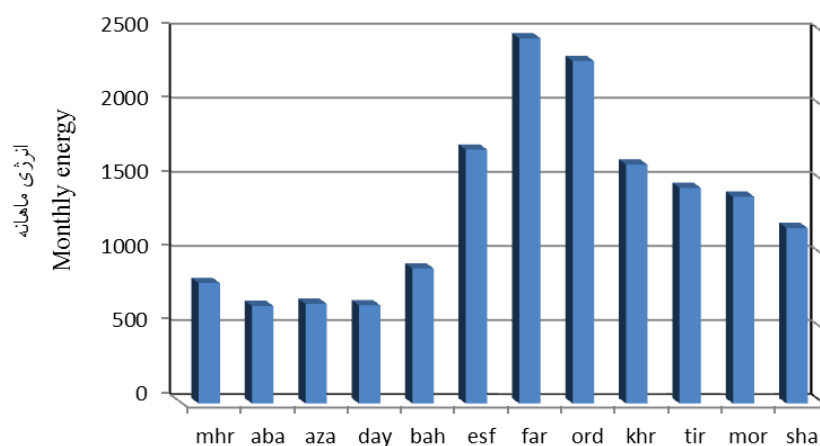
Table 2. General results of developed model.

دبی عبوری از نیروگاه Flow through power plant (CMS)	انرژی بیشینه سالانه Maximum annual energy (GWH)	تراز حداقل بهینه Optimal minimum level (M)	سد مخزنی Reservoir dam
153.99	2007.5	993.8	کارون ۴ (Karun 4)
256.43	3382.9	806.14	کارون ۳ (Karun 3)
307.58	3483.1	502.1	کارون ۱ (Karun 1)
332.79	3477.1	366.6	گدارلندر (Godarlandar)
365.69	3273.5	185.3	گتوند علیا (Up Gotvand)
204.23	2568.9	307.6	دز (Dez)



شکل ۴- منحنی تداوم انرژی سالانه در رودخانه کارون- گیگا وات ساعت در سال.

Figure 4. Flow duration curve of annual energy in Karun river (GWH per year).

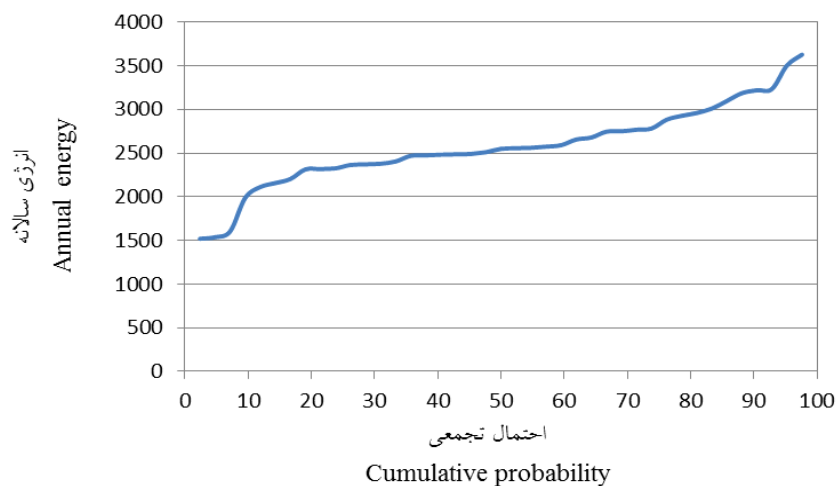


شکل ۵- مقادیر انرژی ماهانه در رودخانه کارون- گیگا وات ساعت در ماه.

Figure 5. Monthly energy values in Karun river (GWH per month).

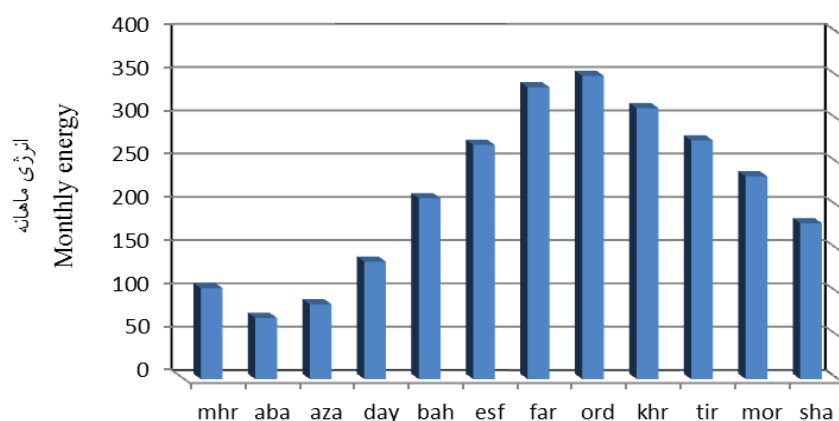
مربوط به شاخه دز شامل سد مخزنی دز در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. طبق شکل ۴ حدود ۸۰ درصد انرژی تولید شده کارون در حد فاصل ۱۰۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ گیگا وات ساعت در سال قرار دارد و در ۵۰ درصد مواقع حدود ۱۵۰۰۰ گیگا وات ساعت در سال است که توزیع ماهانه آن مطابق شکل ۵ است.

لازم به توضیح است از آن‌جا که روند تغییرات ماهانه و سالانه تولید انرژی در سدهای مخزنی شاخه کارون تقریباً یکسان بوده و جهت خلاصه‌سازی، موارد مربوطه به شاخه کارون شامل سدهای کارون ۴، کارون ۳، شهید عباسپور، گدارلندر و گتوند علیا به صورت تجمعی و در شکل‌های ۴ و ۵ و موارد



شکل ۶- منحنی تداوم انرژی سالانه در رودخانه دز- گیگا وات ساعت در سال.

Figure 6. Flow duration curve of annual energy in Dez river (GWH per year).



شکل ۷- مقادیر انرژی ماهانه در رودخانه دز- گیگا وات ساعت در ماه.

Figure 7. Monthly energy values in Dez river (GWH per month).

مدیریت و برنامه‌ریزی کشور و وزارت نیرو (نشریه شماره ۲۷۲، ۲۰۰۴) معمولاً ۷۵ درصد است. در این مطالعات تابع جریمه به گونه‌ای تعریف شده است که اعتمادپذیری تامین نیازها در همه ماه‌ها و شبکه‌ها بالغ بر ۷۵ درصد گردد (جدول ۳).

همان‌طور که اشاره گردید مدل توسعه داده شده قادر به حفظ اعتمادپذیری مطلوب برای تامین نیازها خواهد بود. بر این اساس، اعتمادپذیری مورد نیاز برای تامین نیازهای کشاورزی در مطالعات بهره‌برداری از سدها، با توجه به توصیه سازمان

جدول ۳- مقادیر اعتمادپذیری ماهانه تامین نیاز شبکه‌های کشاورزی- بر حسب درصد.

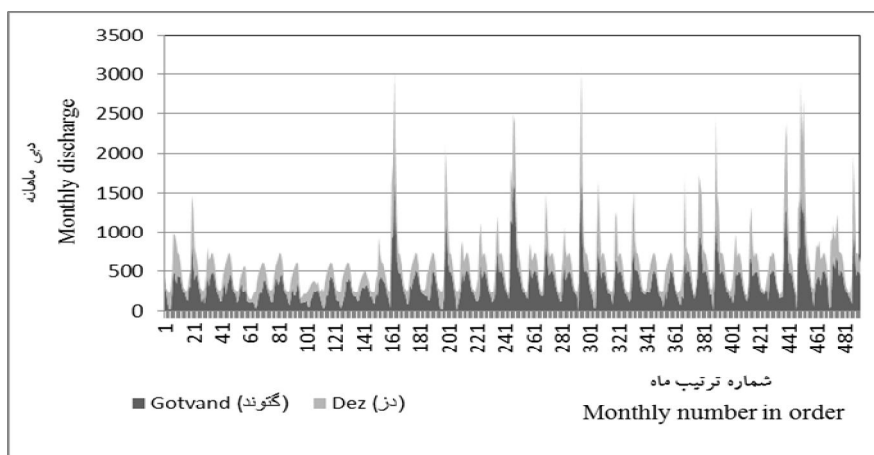
Table 3. Monthly reliability values for satisfying demand of the agricultural networks- in percent.

گره	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
Node	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
22	90.2	90.2	100	100	100	100	100	100	100	100	92.7	90.2
23	90.2	90.2	92.7	100	100	100	100	100	100	100	92.7	90.2
24	100	100	100	100	75.6	80.5	82.9	92.7	100	100	100	100
25	90.2	90.2	92.7	100	100	100	100	100	100	92.7	92.7	90.2
26	90.2	90.2	92.7	100	100	100	100	100	100	92.7	92.7	90.2
27	90.2	90.2	92.7	100	100	100	100	100	100	92.7	92.7	90.2
28	90.2	90.2	92.7	100	100	100	100	100	100	92.7	92.7	90.2
29	90.2	90.2	92.7	100	100	100	100	100	100	100	100	90.2
30	90.2	90.2	92.7	100	100	100	100	100	100	92.7	92.7	90.2
31	90.2	90.2	92.7	100	100	100	100	100	100	100	92.7	92.7
32	75.6	82.9	100	100	100	100	100	100	100	100	90.2	90.2
33	75.6	82.9	92.7	100	100	100	100	100	100	100	92.7	85.4
34	75.6	82.9	92.7	100	100	100	100	100	100	100	92.7	90.2

هستند و به‌عنوان شبکه‌های بحرانی تامین آب شناسایی شدند. لازم به توضیح است تامین نیازهای شرب و صنعت و زیست‌محیطی به‌ترتیب در اولویت اول و دوم قرار گرفته‌اند و با اعتمادپذیری نزدیک به ۱۰۰ درصد تامین شده‌اند.

در ادامه دبی‌های خروجی از سد گتوند به‌عنوان آخرین سد از سیستم منابع آب کارون و دبی‌های خروجی از سد دز در شکل ۸ ارائه شده است.

در جدول ۳، مقادیر اعتمادپذیری ماهانه در همه شبکه کشاورزی سیستم بر اساس پیکربندی (شکل ۲) ارائه شده است. نقاط بحرانی در سیستم که دارای حداقل اعتمادپذیری بوده است در این جدول مشخص شده است. بر این اساس، شبکه‌های کشاورزی رودخانه دز و شبکه گرگر بر روی رودخانه گرگر از انشعابات رودخانه کارون، نقاط مرزی بهینه‌سازی برای تامین حداقل اعتمادپذیری قابل قبول



شکل ۸- دبی‌های خروجی از سد گتوند و دز- مترمکعب در ثانیه.

Figure 8. Output discharges of Gotvand and Dez dams (CMS).

میزان انحراف از اعتمادپذیری مطلوب استفاده گردید. در این حالت، تراز حداقل بهره‌برداری سدهای مخزنی به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری مدل قرار داده شده است. بالا نگه داشتن تراز حداقل بهره‌برداری، از یک‌سو میزان انرژی برقابی را افزایش می‌دهد و از سوی دیگر با کاهش ذخیره مفید و نوسانات مخزن، اعتمادپذیری تامین نیازها را کاهش می‌دهد. بنابراین مقادیر بهینه آن، در مدل ترکیبی برآورد گردیده است. علاوه بر آن، استفاده از مدل ترکیبی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی کمک قابل‌ملاحظه‌ای به وارد کردن جزئیات سیستم منابع آب در مدل شبیه‌سازی نموده است. این در حالی است که در شرایط استفاده معمول از مدل‌های بهینه‌سازی، نیاز به ساده‌سازی زیاد مسأله است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به توسعه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در سیستم چندمخزنه و چندمنظوره کارون و دز شامل ۶ سد کارون ۳، کارون ۴، شهید عباسپور، گذارلندر، گتوند علیا و دز پرداخته شده است. تابع هدف این مدل ترکیبی، بیشینه‌سازی تولید انرژی برقابی است مشروط بر آن‌که اعتمادپذیری مطلوب برای تامین نیازها نیز فراهم گردد و مقادیر ماهانه اعتمادپذیری در کل شبکه‌ها همواره بالغ بر ۷۵ درصد گردد. با توجه به این‌که الگوریتم‌های فراکوشی در حالت معمول، قادر به پذیرش قیدهای مسأله نیستند و بایستی برای اعمال این محدودیت‌ها چاره‌جویی گردد، در مطالعات پیش‌رو از اعمال جریمه در تابع هدف متناسب با

سالانه ۱۸۱۹۳ گیگاوات ساعت بوده است. بر این اساس، شبکه‌های کشاورزی رودخانه دز و شبکه گرگر بر روی رودخانه کارون به‌عنوان شبکه‌های بحرانی تامین آب شناسایی شدند.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی هم‌زمان منابع آب ۶ سدی کارون و دز نشان داد که سیستم ضمن تأمین آب نیازها با اعتمادپذیری مطلوب ۷۵ درصد، قادر به تولید انرژی برقی با میانگین

منابع

1. Ahmadi, M., Bozorg Hadad, O., and Marino, M.A. 2014. Extraction of flexible multi-objective real time reservoir operation rules. *Water Resource Management*. 28: 131-147.
2. Allen, R.B., and Bridgeman, S.G. 1986. Dynamic programming in hydropower scheduling. *Water Resource Planning and Management*. 112: 3. 339-353.
3. Chen, L., McPhee, J., and Yeh, G.W.W. 2007. A diversified multi-objective GA for optimizing reservoir rule curves. *Advance in Water Resources*. 30: 1082-1093.
4. Chang, J.X., Bai, T., Huang, Q., and Yang, D.W. 2013. Optimization of Water Resource Utilization by PSO-GA. *Water Resource Management*. 27: 3525-3540.
5. Dariane, A.B., and Momtahan, Sh. 2009. Optimization of multi-reservoir system operation using modified direct search genetic algorithm. *Water Resource Planning and Management*. 135: 3. 141-148.
6. Erlon, C., and Edson, L. 2005. Solving the commitment problem of hydropower plants via Lagrangian relaxation and sequential quadratic programming. *Computational and Applied Mathematics*. 24: 3. 317-341.
7. Fallah-Mehdipour, E., Bozorg Hadad, O., and Marino, M.A. 2011. MOPSO algorithm and its application in multipurpose multi-reservoir operation. *Hydro informatics*. 13: 4. 794-811.
8. Guo, X., Hu T., Wu, C., Zhang, T., and Lv, Y. 2013. Multi-objective optimization of the proposed multi-reservoir operating policy using improved NSPSO. *Water Resource Management*. 27: 2137-2153.
9. Hincal, O., Altan-Sakarya, A.B., and Metin Ger, A. 2011. Optimization of multi-reservoir systems by genetic algorithms. *Water Resource Management*. 25: 1465-1487.
10. Oliveira, R., and Loucks, D. 1997. Operating rules for multi-reservoir systems. *Water Resource Research*. 33: 4. 839-852.
11. Ostadrahimi, L., Marino, M.A., and Afshar, A. 2012. Multi-reservoir operation rule: multi-swarm PSO based optimization approach. *Water Resources Management*. 26: 407-427.
12. Palmer, R.N., and Holmes, K.J. 1988. Operational guidance during drought: Expert system approach. *Water Resource Planning and Management*. 114: 6. 647-666.
13. Randall, D., Houck, M.H., and Wright, J.R. 1990. Drought management of existing water supply system. *Water Resource Planning and Management*. 116: 1. 1-20.
14. Reis, L.F.R., Walter, G.A., Savic, D., and Chaudry, F.H. 2005. Multi-reservoir operation planning using hybrid genetic algorithm and linear programming (GA-LP): an alternative stochastic approach. *Water Resource Management*. 19: 831-848.
15. Shourian, M., Mousavi, S.J., and Tahershamsi A. 2008. Basin-wide water resource planning by integrated PSO algorithm and Modsim. *Water Resource Management*. 22: 1347-1366.
16. Siminovic, S.P., and Marino, M.A. 1980. Reliability programming in reservoir management: 1. single multiple reservoir. *Water Resource Research*. 16: 5. 844-848.
17. Jalali, M.R., Afshar, A., and Marino, M.A. 2007. Multi-colony ant algorithm for continuous multi-reservoir operation optimization problem. *Water Resource Management*. 21: 9. 1429-1447.
18. Jothiprakash, V., Shanthi, G., and Arunkumar, R. 2011. Development of operational policy for a multi-reservoir system in India using genetic algorithm. *Water Resource Management*. 25: 2405-2423.

19. Karamouz, M., and Houck, M.H. 1987. Comparison of stochastic and deterministic dynamic programming for reservoir operating rule generation, *Water Resource Bulletin*. 23: 1. 1-9.
20. Louati, M.H., Benabdesh, S., Lebadi, F., and Milutin, D. 2011. Application of a genetic algorithm for the optimization of a complex reservoir system in Tunisia. *Water Resource Management*. 25: 2387-2404.
21. Madadgar, S., and Afshar, A. 2009. An improved continuous ant algorithm for optimization of water resources problems. *Water Resource Management*. 23: 2119-2139.
22. Taghian, M., Rosbjerg, D., Haghghi, A., and Madsen, H. 2014. Optimization of conventional rule curve coupled with hedging rule for reservoir operation. *Water Resource Planning and Management*. 140: 3. 365-374.
23. Water Resource Development and Iran Power Company 2010. Water resource management and planning report, Karun 2 dam. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(3), 2016
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Maximizing the hydropower generation in multi-objective reservoir system (The 6 dams system of Karun)

***M. Taghian¹ and A. Shirdeli²**

¹Member of Khuzestan Water and Power Authority,

²Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Zanjan

Received: 11/22/2014; Accepted: 04/24/2016

Abstract

Background and Objectives: The multi-objective water resource reservoir systems are generally composed of conflict purposes. In this study, keeping the minimum water level at above elevations increases hydropower generation through the water effective head. However, this operating policy results in decreasing the potential of storage variation and active storage capacity, which may be caused some deficits for meeting downstream demands. Accordingly, one of the major aims in this research is to maximize the hydropower generation in complicated multiple and multi-objective reservoir systems in which the desired reliability is kept to meet downstream demands. To reach this aim, the optimal minimum water level is calculated. In this area of research, it can be pointed to the hybrid optimization model; classical mathematical models and evolutionary algorithms, hybrid evolutionary algorithms and the multi-objective optimization model.

Materials and Methods: In this research, a simulation-optimization model is developed for the Karun basin included the 6 dams system of the current condition. In this hybrid model, maximizing of the total produced energy is defined as objective function constrained to water balance and reliability. This model is capable to investigate the water resource system in details with allocating priority to different demands. In this way, the hydropower generation is maximized using the genetic algorithm and via evolutionary process, in which desired reliability for meeting demands is kept using penalty in the objective function.

Results: The results indicate that the system reliability for meeting demands is kept in the level of 75% in which the annual average of hydropower energy produced by the system is 18193 GWH. The most portions is related to Karun 1 reservoir with 3483GWH and the less one is related to Karun 4 with 2007 GWH per year. Additionally, agriculture networks of Dez river and Gargar network on Gargar river, that is one of the Karun branches, are the boundary area of the optimization for satisfying minimum acceptable reliability. In other words, these networks have been identified as critical networks for meeting demands.

Conclusion: In the common states, evolutionary algorithms are unable to consider the constraint and should be found a remedy to impose constraints. However, this research showed that using penalty in objective function accordance with the violation values of target reliability makes desired performance in the complicated system. Moreover, applying of the simulation-optimization model helps significantly to input more details of the water resource systems in the simulation model. This is more efficient than applying the single optimization model made simplifying of the problems.

Keywords: Hydropower, Genetic algorithm, Multi-objective, Optimization reservoirs

* Corresponding Author; Email: mehrdad.taghian@gmail.com