طراحی بهینه سد برقابی بختیاری با استفاده از الگوریتم COA
(Cuckoo Optimization Algorithm)

تکتم حسین زاده[۱]، مجتبی شوریان[۲]

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران،آب و محیط زیست دانشگاه شهیدبهشتی

۲- استادیار دانشکده عمران،آب و محیط زیست دانشگاه شهیدبهشتی

Toktam.hz۷۰@yahoo.com

خلاصه

با توجه به اینکه ساخت سدهای برقابی مستلزم صرف هزینه های بسیار کلان می باشد، طراحی و بهره برداری بهینه مخازن سدها مورد توجه قرار می گیرد. بهینه سازی طراحی و بهره برداری از مخازن سدهای برقابی با در نظر گیری کنترل سطح اعتمادپذیری تولید انرژی یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده از منظر فرمول‌بندی می‌باشد. در این پژوهش بهینه‌سازی طراحی مخزن سد برقابی بختیاری با استفاده از الگوریتم COA مورد مطالعه قرار گرفته شده است. این مسئله بهینه‌سازی طراحی با سیاست بهره‌برداری مشخص در دو مدل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. درمدل اول متغیرهای ارتفاع نرمال و رقوم حداقل بهره برداری سد و در مدل دوم ارتفاع نرمال، رقوم حداقل بهره برداری سد و ظرفیت نیروگاه به عنوان متغیرهای تصمیم طراحی بهینه‌سازی می‌شوند. نتایج مدل‌های طراحی با سطح اعتمادپذیری مطلوب ۹۰٪ برای تولید انرژی مطمئن نشان می‌دهد که الگوریتم COA در شرایط مختلف دارای توانایی و سرعت بالایی در رسیدن به جواب‌های مطلوب در هر دو مدل می‌باشد.

کلمات کلیدی: مخازن برقابی، طراحی بهینه، بهینه سازی، سد بختیاری، الگوریتم COA

۱. مقدمه

امروزه با توجه به افزایش جمعیت و فعالیت‌های انسانی که منجر به افزایش آلودگی‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی شده‌است استفاده از سوخت پاک انرژی برقابی یکی از روش‌های موثر در جهت حفاظت از محیط‌زیست به شمار می‌رود. نظر به این‌که ساخت سدهای برقابی مستلزم صرف هزینه‌های بسیار کلان می‌باشد، طراحی و بهره‌برداری بهینه مخازن سدها موردتوجه قرار می‌گیرد. دست‌یابی به ساختار بهینه برای سیستم‌های منابع آب با توجه به اهداف مختلف طرح‌های توسعه، همواره از چالش‌های مهم در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب بوده‌است. بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری از مخازن برقابی با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک با مشکلاتی نظیر غیرخطی و غیرمحدب بودن مدل و نیز چگونگی احتساب قیود احتمالاتی مربوط به اعتمادپذیری نیاز انرژی مواجه است. در این زمینه استفاده از روش‌های بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی از نوع الگوریتم‌های جستجوی هوشمند می‌تواند موردتوجه قرار گیرد. رویکرد این الگوریتم‌ها جستجو در فضای جواب و هدایت جواب‌ها به سمت جواب‌های بهتر می‌باشد. از جمله الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توان به الگوریتم اجتماع ذرات (PSO[۱]) و الگوریتم ژنتیک (GA[۲]) اشاره کرد که در زمینه سیستم‌های برقابی به طور خاص مورد استفاده قرارگرفته‌است.

[۱] (BozorHadad et al.,۲۰۰۸) از الگوریتم زنبور عسل به عنوان الگوریتم فراابتکاری برای تعیین قوانین بهره‌برداری بهینه مخازن استفاده کردند. [۲] (Mousavi&Shouriyan,۲۰۱۰) در پژوهشی به بهینه‌سازی ابعاد طراحی نیروگاه سد بختیاری و همچنین یافتن پارامترهای مناسب به منظور بهره‌برداری بهینه با استفاده از الگوریتم PSO پرداختند که نتایج آنها نشان‌دهنده عملکرد خوب این الگوریتم می‌باشد. [۳] (Xin Ma et al.,۲۰۱۱) به بهره‌برداری از ایستگاه‌های برقابی با استفاده از یک الگوریتم توسعه یافته ازدحام ذرات (PSO) پرداختند. [٤] (Jothiprakash et al., ۲۰۱۳) با کمک الگوریتم‌های تکاملی که در فرآیند خود از الگوریتم هرج و مرج به منظور تولید جمعیت اولیه استفاده می‌کردند به بهینه‌سازی مخازن برقابی پرداختند. [٥] (Choong et al.,۲۰۱۷) در تحقیقی از الگوریتم مصنوعی کلونی زنبور عسل به منظور حل کردن مشکل بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن Chenderoh استفاده کردند.[٦] (Mousavi et al.,۲۰۱۷) با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی به بهینه‌سازی مخازن برقابی پرداختند.

---
۱ - Particle Swarm Optimization
۲ - Genetic Algorithm

[۷](افشاریان زاده، ۱۳۹۵) به طراحی و بهره‌برداری بهینه بر مبنای اعتمادپذیری از مخازن سدهای برقابی پیاپی با احتساب اثرات متقابل هیدرولیکی روی مجموعه سیستم برقابی کارون۳-کارون۲ پرداختند که در حل مدل از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک و تکاملی استفاده و کارایی آن‌ها ارزیابی شده‌است. از جمله الگوریتم‌هایی که به تازگی به دلیل توانایی و قدرت بالا در مسائل بهینه‌سازی کاربرد فراوانی در سایر علوم پیدا کرده‌است الگوریتم COA (Cuckoo Otmization Algorithm) می باشد. [۸](گیلانی و افراخته،۲۰۱۲) از الگوریتم فاخته و زنجیره مارکوف به منظور تعیین ظرفیت نیروگاه‌های بادی استفاده کردند. [۹](Bo Ming et al.,۲۰۱۵) ازالگوریتم COA به منظور بهینه کردن بهره‌برداری مخازن چند منظوره استفاده کردند.[۱۰] (Abdollahi et al.,۲۰۱٦) از الگوریتم بهینه‌سازیCOA به منظور حل مسائل غیرخطی سیستم‌ها استقاده کردند.

[۱۱] (Anupama et al.,۲۰۱۷) با استفاده از یکپارچه کردن و عملکرد توام سیستم فازی و الگوریتم COA به بهینه‌سازی هزینه پرداخته‌است. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده با وجود توانایی بالای الگوریتم COA در همگرایی اما تاکنون ازاین الگوریتم در زمینه مخازن برقابی استفاده نشده است. بنابراین در این مطالعه با تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر هوش جمعی (Cuckoo Optimization Algorithm) یا (COA) و مدل شبیه‌سازی برمبنای اعتمادپذیری مسئله طراحی بهینه ابعاد مخزن و نیروگاه سد برقابی بختیاری مورد توجه قرار خواهد گرفت.

۲. متدولوژی

۲-۱. الگوریتم COA

الگوریتم بهینه‌سازی فاخته یکی از جدیدترین و قوی‌ترین روش‌های بهینه‌سازی تکاملی می‌باشد که تاکنون معرفی شده‌است. این الگوریتم که الهام گرفته از روش زندگی پرنده‌ای به نام فاخته است در سال ۲۰۱۱ برای اولین بار توسط رامین رجبیون ابداع شد. نحوه خاص تخم‌گذاری و زادو ولد فاخته، اساس این الگوریتم بهینه‌سازی نوین است. فاخته‌هایی که در این مدل از آن‌ها استفاده می‌شود بر دو نوع‌اند: فاخته‌های بالغ و تخم‌ها. مانند سایر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم نیز با یک جمعیت اولیه از فاخته‌ها شروع می‌شود. این فاخته‌های اولیه تخم‌هایی برای قرار دادن در لانه‌های پرندگان میزبان دارند، بعضی از این تخم‌ها که شباهت زیادی به تخم‌های پرنده میزبان دارند فرصت رشد کردن و تبدیل به فاخته بالغ شدن را داشته و مکانی که تخم‌های بیشتری در آن زنده بمانند چیزی است که COA در پی بهینه‌کردن آن است. فاخته‌ها به دنبال مناسب‌ترین منطقه برای تخم‌گذاری هستند تا نرخ زنده‌ماندن تخم‌هایشان را بیشینه سازند. هر جامعه زیست‌بوم خودش را دارد. بهترین محل زندگی یافت‌شده فاختگان، مقصد فاخته‌ها در جوامع دیگر خواهدبود.[۱] برای حل یک مسئله بهینه‌سازی لازم است تا مقادیر متغیرهای مساله به فرم یک آرایه شکل گیرند. در GA و PSO این آرایه‌ها به نام های "کروموزوم[۱]" و " موقعیت ذرات[۲]" مشخص می‌شوند. ولی در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته این آرایه habitat یا " محل سکونت" نام دارند.

برای شروع الگوریتم بهینه‌سازی یک ماتریس habitat به سایز Npop*Nvar تولید می‌شود سپس برای هر کدام از این habitat ها تعدادی تصادفی تخم تخصیص می‌یابد. دیگر عادت هر فاخته این است که آن‌ها در یک دامنه مشخص تخم‌های خود را می‌گذارند که به آن حداکثر دامنه تخم‌گذاری (ELR) گفته می‌شود.

$$ELR = \alpha \times \frac{\text{تعداد تخم های فاخته}}{\text{تعداد کل تخم ها}} \times (\text{حدپایین متغیر} - \text{حدبالامتغیر})$$

αعدد صحیح است که برای به دست آوردن مقدار ماکزیمم ELR استفاده شده است. پس از چند تکرار تمام جمعیت فاخته‌ها به یک نقطه بهینه با حداکثر شباهت تخم‌ها به تخم‌های پرندگان میزبان و هم‌چنین به محل بیشترین منابع غذایی می‌رسند. این محل بیشترین سود کلی را خواهد داشت و در آن کمترین تعداد تخم‌ها از بین خواهند رفت. بنابراین گام‌های اصلی COA را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

گام ۱: مکان‌های سکونت فعلی فاخته‌ها به صورت تصادفی مشخص می‌شود.

گام ۲: تعدادی تخم به هر فاخته اختصاص می‌یابد.

گام ۳: شعاع تخم‌گذاری هر فاخته تعیین می‌شود.

---

۱ - Chromosome
۲ - Particles Position

گام ۴: فاخته‌ها در لانه‌های میزبانانی که در شعاع تخم‌گذاری آن‌ها قرار دارند، تخم‌گذاری می‌کنند.
گام ۵: تخم‌هایی که توسط پرندگان میزبان شناسایی می‌شوند از بین می‌روند.
گام ۶:تخم فاخته‌هایی که شناسایی نشدند پرورش می‌یابد.
گام ۷: محل سکونت فاخته‌های جدید شناسایی می‌شود.
گام ۸: ماکزیمم تعداد فاخته‌هایی که در هر مکان امکان زندگی دارند مشخص و آن‌هایی که در مکان نامناسب هستند ازبین می‌رود.
گام ۹: فاخته ها با استفاده از روش K-means خوشه‌بندی و بهترین گروه فاخته به عنوان سکونت هدف مشخص می‌شود.
گام ۱۰: جمعیت جدید فاخته‌ها به سمت مکان هدف حرکت می‌کنند.[۱۲]

۲-۲. شبیه‌سازی مخزن برقابی

به منظور محاسبه پتانسیل انرژی سیستم از یک مدل شبیه‌سازی بر مبنای اعتمادپذیری (RBS (Reliability Based Simulation استفاده می‌شود. در مدل RBS ظرفیت نصب نیروگاه و شاخص‌های تولید انرژی به ازای یک تراز معلوم از رقوم نرمال و حداقل بهره‌برداری با استفاده از یک تحلیل تکراری تعیین می‌شود. بنابراین در ابتدا لازم است ظرفیت نصب نیروگاه که یکی از متغیرهای تصمیم مدل هم می‌باشد تخمین زده شده و متناسب با این حدس اولیه سایر مشخصات مورد نیاز استخراج شود.

$$IC = \frac{۲.۷۳ * Q_{ave} * H_{mean} * a}{PF * nhours} \tag{۱}$$

IC حدس اولیه برای ظرفیت نیروگاه (MW)، *Qave* میانگین جریان‌های ماهانه ورودی به مخزن (MCM)، H_{mean} اختلاف تراز نرمال و تراز میانگین پایاب وتراز افت ، PF ضریب کارکرد نیروگاه، a فاکتور کاهش دوره‌های خشک که مقدار آن بین ۰٫۵ تا ۰٫۸ در نظر گرفته می‌شود و nhours تعداد ساعات کار نیروگاه (hr) می‌باشد.

عموما در طراحی مخازن برقابی و در افق بلند مدت از دوره‌های ماهانه استفاده می‌شود و در هر ماه ذخیره مخزن به صورتی تعیین می‌گردد که مقدار نیاز ماهانه انرژی تامین شود. لازم به ذکر است که نیاز انرژی ماهانه چنانچه به طور مشخص و بر اساس بازار برق موجود نباشد، برابر حاصلضرب ظرفیت نصب در ضریب کارکرد نیروگاه در تعداد ساعات هر ماه در نظر گرفته می‌شود.[۱۳] رابطه انرژی مطمئن مطلوب و ظرفیت نیروگاه و نیز رابطه انرژی تولیدی بر اساس جریان خروجی از مخزن به شکل زیر تعریف می شود:

$$EF(t) = IC * nhours * PF(t) \tag{۲}$$

$$E(t) = ۲.۷۳ * R(t) * \left(۰.۵ * \left(h_۱(t) + h_۲(t)\right) - h_{Tail}(t) - h_f(t)\right) * e_p(t) \tag{۳}$$

$EF(t)$: انرژی مطمئن مطلوب در یک ماه (MWh)، $E(t)$انرژی تولیدی طی دوره t (MWh)، $h_۲(t)$ و $h_۱(t)$ تراز آب در مخزن در ابتداو انتهای دوره t ، $h_f(t)$ و $h_{Tail}(t)$ افت انرژی در نیروگاه و تراز پایاب نیروگاه طی دوره t ، $e_p(t)$ راندمان نیروگاه می باشد. $R(t)$ برابر جریان عبوری از بیروگاه می باشد که با استفاده از رابطه(۴) به صورت زیر تعیین می شود :

$$R(t) = \frac{EF(t)}{۲.۷۳ * \left(۰.۵ * \left(h_۱(t) + h_۲(t)\right) - h_{Tail}(t) - h_f(t)\right) * e_p(t)} \tag{۴}$$

از آنجا که بار آب (بارهیدرولیکی) در طول یک گام زمانی متغیر است بنابراین محاسبات انرژی بر اساس بار آب میانگین در هر دوره انجام می‌شود. با استفاده از حجم ذخیره در ابتدا و انتهای هر ماه حجم میانگین به دست آمده و متناظر با این حجم‌ها، میانگین بار آب و سطح‌های متناظر با آن‌ها محاسبه می‌شود.

با توجه به جریان خروجی به دست آمده ، محاسبات روندیابی متوالی جریان (SSR[۱]) در هر گام زمانی و با فرض ناچیز بودن مقدار تبخیر انجام می گیرد. اساس روندیابی متوالی جریان ارضا معادله پیوستگی جریان در ماه های متوالی به قرار زیر است:

$$S(t+۱) = S(t) + Q(t) - R(t) - Spill(t) \qquad (۵)$$

S(t) حجم آب مخزن در ماه t ، Q(t) حجم آب ورودی به مخزن در ماه t ، R(t) حجم آب عبوری ازتوربین نیروگاه در ماه t و Spill(t) سرریز در ماه می باشد. در دوره هایی که جریان ورودی از دبی مورد نیاز برای تولید انرژی بیشتر است در صورت امکان این آب اضافی دخیره می‌شود تا در صورت نیاز در ماه‌های کم آبی مورد استفاده قرار بگیرد. در هر گام زمانی به منظور ارضای معادله پیوستگی در اولین تکرار، ذخیره انتهای ماه نیز برابر ذخیره ابتدای ماه در نظر گرفته شده و حجم جریان خروجی به منظور تعیین میزان انرژی تولیدی مشخص می گردد. اگر پس از تعیین میزان جریان خروجی از رابطه (۴) مقدار S(t+۱) بین حجم حداقل بهره‌برداری و حجم حداکثر مخزن باشد در نتیجه سرریز از مخزن وجود نخواهد داشت. در صورتی که بیشتر از حجم حداکثر شود در نتیجه میزان جریان خروجی و به تبع آن میزان انرژی تولیدی افزایش می‌یابد. با تامین انرژی ثانویه حداکثر متناظر با ظرفیت نصب نیروگاه، مازاد بر جریان به عنوان سرریز در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مانند حالت قبل کمبود نخواهیم داشت و انرژی ثانویه نیز به مقدار انرژی تولیدی افزوده می‌شود. در صورتی که مقدار $S(t+۱$ از حداقل حجم بهره‌برداری کمتر شود در نتیجه میزان انرژی تولیدی کاهش می‌یابد و تامین انرژی برقابی با کمبود مواجه می‌شود که این یک شکست برای سیستم محسوب می گردد. با تکرار این مراحل برای کل دوره زمانی مورد بررسی میزان اعتمادپذیری که برابر است با نسبت ماه‌هایی که انرژی به طور کامل تامین شده است به کل ماه ها، محاسبه می گردد. در صورتی که اعتمادپذیری محاسبه شده از اعتمادپذیری مطلوب کمتر باشد، ظرفیت نیروگاه کاهش می‌یابد در غیر اینصورت مقادیر فوق افزایش می‌یابد. پس از اصلاح مقدار انرژی مطمئن و ظرفیت نیروگاه، تمامی مراحل ذکر شده برای مدل RBS تا آنجا که اعتمادپذیری مورد نظر تامین شود، تکرار می‌شود. با استفاده از این عملکرد ترکیب مختلفی از تراز نرمال، حداقل رقوم بهره برداری و هم چنین ظرفیت نصب نیروگاه مورد تحلیل قرار گرفته و ترکیبی که منجر به کمترین هزینه و در نتیجه بیشترین سود میشود اتخاذ می گردد. [۲]

۲-۳. مدل توام شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مخزن برقابی

فرمول‌بندی مدل های بهینه‌سازی بهره‌برداری و طراحی مخازن برقابی به دلیل ماهیت غیرخطی معادلات تولید انرژی و همچنین سایر قیود، به شکل مدل‌های غیرخطی است. در صورتی که برای کنترل سطح اعتمادپذیری تولید انرژی، متغیرهای تصمیم صفر و یک به مدل اضافه گردد، مدل بهینه‌سازی از برنامه-ریزی غیرخطی به غیرخطی غیرمحدب که در رده مدل‌های دشوار برای حل یا (NP-hard) قرارمی‌گیرد، تبدیل خواهدشد. در این مسئله ازالگوریتم بهینه‌سازی COA استفاده و در قالب دو مدل فرمول‌بندی شده است. در مدل اول متغیرهای تصمیم رقوم نرمال، رقوم حداقل بهره‌برداری به عنوان متغیرهای مستقلی هستند که طی یک فرآیند جستجودر COA محاسبه می‌شوند و ظرفیت نصب نیروگاه متغیر تصمیمی است که وابسته به سایر مشخصات بوده و با استفاده از مدل RBS محاسبه می‌شود.تابع هدف مورد استفاده دراین مدل رابطه شماره (۶) می باشد. در مدل دوم ظرفیت نصب نیروگاه نیز به عنوان متغیرهای تصمیم COA در نظر گرفته‌شده‌است. این امر بدین معنی است که مدل در ابتدا به عنوان جمعیت اولیه مقادیر رندوم برای هریک از متغیرهای تصمیم در نظر می‌گیرد سپس در طی اجرای توام مدل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی و تعیین حجم انتهای هر دوره و انرژی تولید شده در هر دوره و سایر متغیرهای وابسته با استفاده از روش روندیابی متوالی جریان (SSR) در شبیه‌سازی، کلیه متغیرهای تصمیم در مساله (رقوم نرمال، رقوم حداقل بهره‌برداری و ظرفیت نیروگاه) به صورت جستجوی تصادفی در الگوریتم COA و با هدف ماکزیمم کردن تابع هدف (۸) محاسبه می‌شوند. در این مدل به منظور تامین شرط اعتمادپذیری مطلوب، از یک تابع جریمه (۷) در تابع هدف مدل استفاده شده است. این تابع جریمه تفاوت مقادیر اعتمادپذیری به دست آمده در هر مرحله با اعتمادپذیری مطلوب است.

$$NetBenefit۱ = fvalve \times E_{firm} \times lifeyear - svalve \times E_{scnd} \times lifeyear - (DC + PC + PeC) \qquad (۶)$$

$$PNT = |REL - TarREL| \times P \qquad (۷)$$

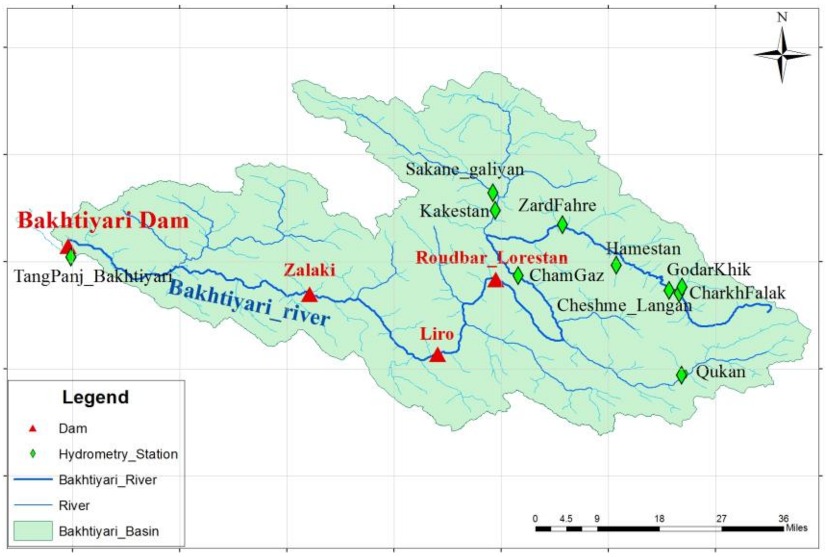
$$NetBenefit۲ = NetBenefit۱ - PNT \qquad (۸)$$

[۱] - Sequential Streamflow Routing

$Cost_{total}$ سود خالص سیستم بر حسب میلیارد ریال، $fvalve$ مقدار ارزش انرژی مطمئن برابر با ۱۶۰ ریال به ازای هرکیلو وات ساعت انرژی تولیدی و $svalve$ مقدار ارزش انرژی ثانویه برابر با ۱۶۰ ریال به ازای هر کیلو وات ساعت انرژی تولیدی، DC هزینه احداث سد بر حسب میلیارد ریال، PC هزینه احداث نیروگاه بر حسب میلیارد ریال، PeC هزینه ثابت ساخت تونل ، REL اعتمادپذیری به دست آمده در هر مرحله، $TarREL$ اعتمادپذیری مطلوب که برابر۹۰٪ در نظر گرفته‌شده است. و P فاکتور پنالتی می‌باشد که باعث همگرایی مدل می‌شود.

۳. مطالعه موردی

سد بختیاری یک سد قوسی در دست ساخت بر روی رودخانه بختیاری، از سرشاخه‌های رود دز، در رشته‌کوه زاگرس واقع‌در استان لرستان است. سد و نیروگاه بختیاری در ۸۰ کیلومتری جنوب شرقی خرم‌آباد و ۵۰۰ کیلومتری بالادست سد دز و پنج کیلومتری تقاطع رودخانه‌های سزار و بختیاری، در شمال غرب ایستگاه تنگ پنج (هشتمین ایستگاه حدفاصل اندیمشک - دورود) (شکل۱). این سد در محدوده جغرافیایی شهرستان الیگودرز قرار دارد. موقعیت جغرافیایی این ساختگاه در مرز بین استان‌های لرستان و خوزستان است. جدول ۲ و ۳ مشخصات پارامترهای ورودی به مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - حوضه آبریز رودخانه بختیاری و محل ساخت سد

مقادیر هزینه و سود ازگزارش های اقتصادی شرکت مشاور مسئول این پروژه (مهاب قدس) استخراج شده است [۱۴]. که بر اساس این گزارشات مقدار نرخ توزیع سالیانه هزینه برابر ۰,۰۷ در نظر گرفته شده است . همچنین هزینه فروش انرژی اولیه و ثانویه برابر در نظر گرفته شده است. جدول شماره ۲ و ۳ هزینه ساخت سد و نیروگاه سد بختیاری را در ظرفیت‌های مختلف نشان می‌دهد. که از این مقادیر در اجرای مدل و به دست آوردن هزینه متناسب با ظرفیت به دست آمده استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات پارامترهای ورودی به مدل

تراز ماکزیمم هد نرمال (Masl)	۸۳۰
تراز حجم مرده (Masl)	۶۶۰
ارتفاع پایاب (Masl)	۵۳۳,۵
راندمان تولید برق	۹۲,۱
تلفات (متر)	۳
فاکتور طراحی	۰,۲۵
اعتمادپذیری نهایی	۹۰٪

جدول ۲- هزینه ساخت سد در ظرفیت های مختلف

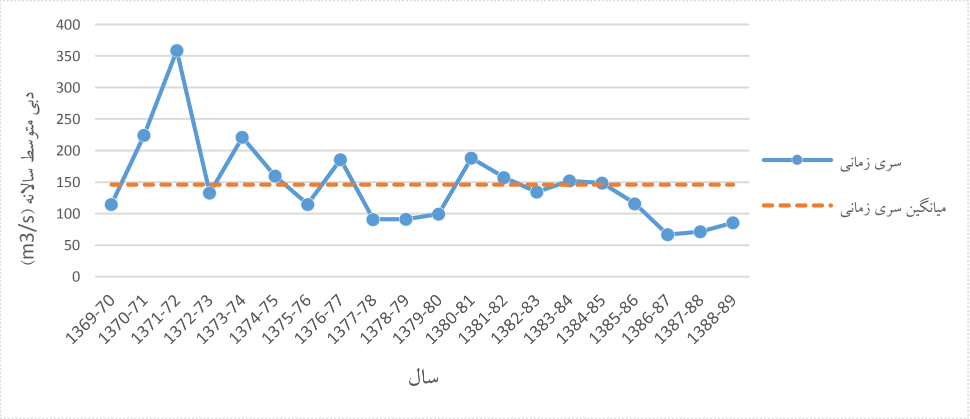
هزینه (۱۰^۹ ریال)	ظرفیت (MCM)
۷۸۱,۴۴	۱۹۴۱,۶۱
۸۹۷,۵۲	۲۶۵,۴۳
۱۰۱۶,۰۷	۳۵۲۶,۳۸
۱۱۳۹,۲	۴۸۸۷,۳۷
۵۵۰۰	۴۵۹۰

جدول ۳- هزینه ساخت نیروگاه در ظرفیت های مختلف

هزینه (۱۰^۹ ریال)	ظرفیت نصب (MW)
۱۵۲,۴۲	۹۱۳
۱۶۲,۴۰	۱۰۱۴
۱۷۳,۲۵	۱۱۱۰
۱۸۹,۳۰	۱۲۲۰
۲۲۵,۰۰	۱۵۰۰

۴. نتایج و بحث

در اجرای مدل‌های بهینه سازی به دلیل کاهش نسبی زمان اجرای مدل از سری زمانی ۲۰ ساله استفاده شده است. هم‌چنین سعی شده است این سری ۲۰ ساله شامل سال‌های پرآبی و خشکسالی باشد بنابراین از داده‌های ثبت شده از سال ۶۹ تا۸۹ در ایستگاه هیدرومتری تنگ پنج که از دفتر مطالعات پایه شرکت مدیریت منابع آب اخذ شده استفاده شده است.



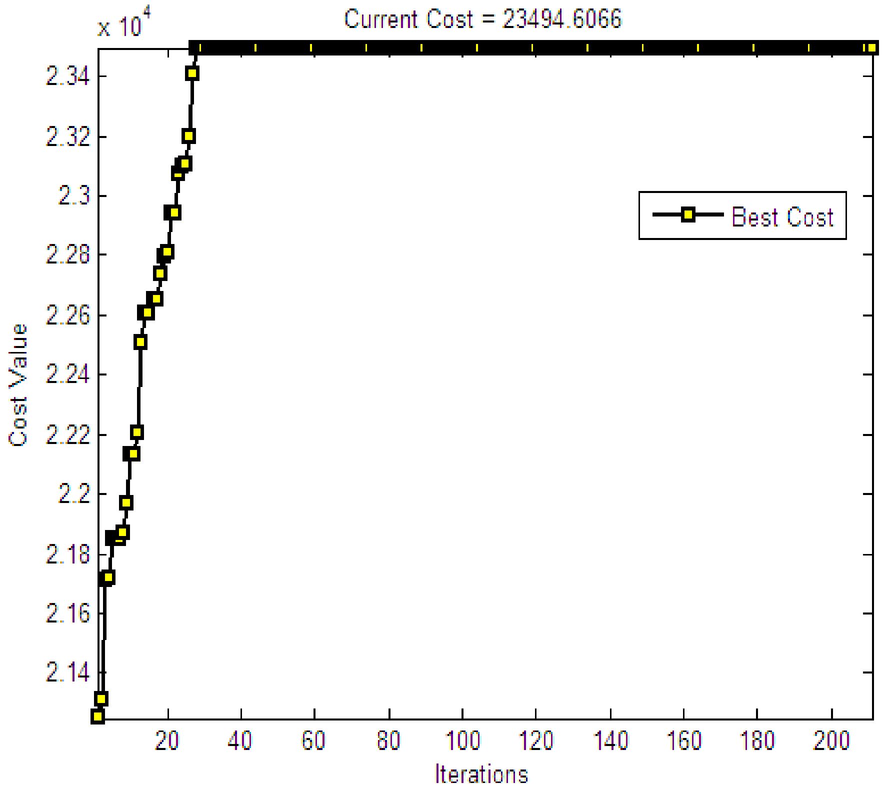
شکل ۲- سری زمانی متوسط سالانه از سال ۶۹ تا ۸۹

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود نسبت سال‌هایی که دارای دبی متوسط سالانه بالاتر از میانگین است و سال‌هایی که دارای دبی متوسط سالانه پایین‌تر از میانگین است تقریبا برابر می‌باشد.لازم به ذکر است از سال ۶۹ تا۸۹ بیشترین دبی متوسط سالانه مربوط به سال آبی (۱۳۷۱-۱۳۷۲)و کمترین مربوط به سال آبی (۱۳۸۶-۸۷) می‌باشد. به منظور طراحی بهینه مدل‌های شماره ۱ و ۲ یک سیاست بهره‌برداری ثابت در نظر گرفته شده که درآن رهاسازی مخزن در هر گام زمانی برابر با میزان لازم برای تامین انرژی مورد نیاز در همان گام می‌باشد. سطح اعتمادپذیری مطلوب تامین انرژی برابر با ۹۰٪ و راندمان و ضریب کارکرد نیروگاه برابر با ۹۲٪ و۲۵٪ در نظر گرفته شده است. از روند سعی و خطا برای مشخص کردن سایر پارامترهای ورودی مورد استفاده در مدل استفاده شده است. در مورد پارامترهای مورد استفاده در COA تعداد کوکوها ۵ و ۱۰ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج تغییر ملموسی نداشت بنابراین به جهت سرعت در اجرای مدل تعداد کوکو نهایی برای هر دو مدل ۵ وارد شده است. تعداد تخم هایی که به هر کوکو اختصاص داده شده است بین ۲ تا ۴ متغیر بوده و ماکزیمم تعداد تخم ها ۱۰ در نظر گرفته شده است. شعاع جستجو و تخم گذاری کوکوها از ۰,۱تا ۱۰ سعی و خطا شده و در نهایت شعاعی

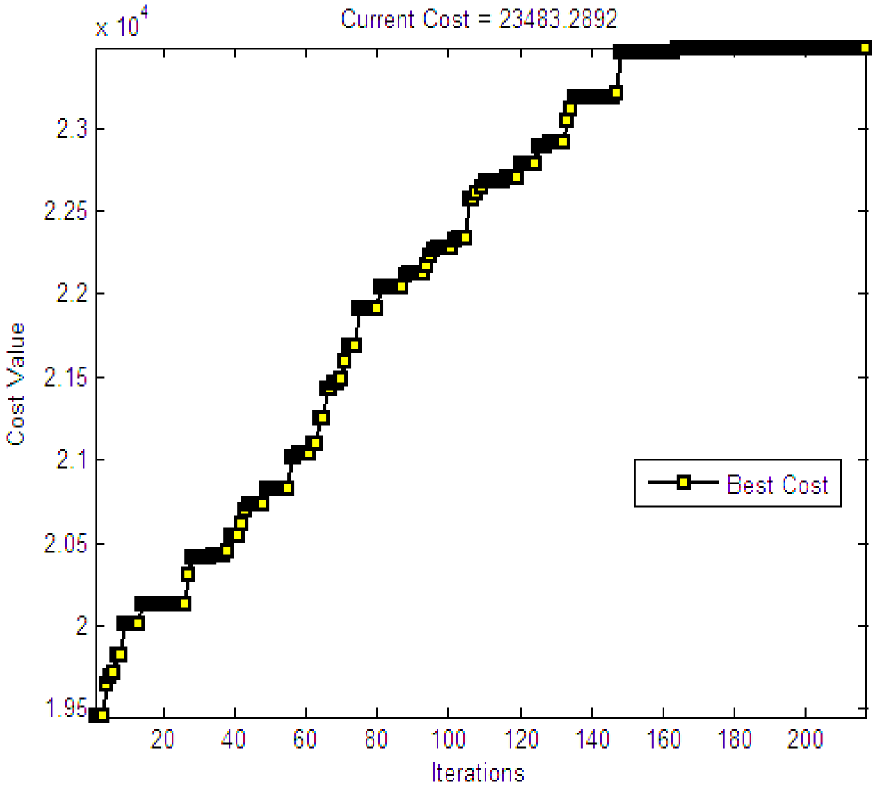
که هم ازجهت سرعت و نتایج بهینه مناسب بود ۰٫۵برای مدل۲ وشعاع ۰٫۳ برای مدل ۱ نتخاب شد. در محاسبه تابع هدف مدل دوم توان فاکتور پنالتی (P) از ۲ تا ۵ سعی و خطا شد. توان ۲و۳ منجر به ایجاد جواب‌های خیلی بزرگ و غیرمعقول شد و همچنین شرط اعتمادپذیری را ارضا نمی‌کرد، توان ۴ و ۵ هردو شرط اعتمادپذیری را تامین کرده و در نهایت چون توان ۴ منجر به سود بیشترشد، انتخاب گردید. نتایج تابع هدف و سایر پارامترهای به دست آمده از هر دو مدل در جدول شماره ۴ آورده شده است. همچنین شکل ۳ و ۴ نشان دهنده نمودار نتایج تابع هدف حاصل از الگوریتم COA می‌باشد.

جدول ٤- نتایج مدل بهینه سازی

آیتم	مدل۱	مدل۲
سود خالص نهایی ($۱۰^۹$ریال)	۲۳۴۹۴	۲۳۴۸۳
اعتمادپذیری (٪)	۹۰	۹۰
رقوم نرمال آب (بالاتر از سطح دریا)	۸۳۰	۸۳۰
تراز مینیمم بهره برداری (Masl)	۸۱۱	۷۹۷
ظرفیت نصب نیروگاه (MW)	۱۰۶۳	۱۱۳۰
انرژی اولیه و ثابت سالیانه (MWh)	۲۱۵۹۷۰۰	۲۳۰۹۷۰۰
انرژی ثانویه سالیانه (MWh)	۹۵۲۹۳۰	۸۰۲۵۵۰



شکل ۳- روند همگرایی و نتایج مدل شماره۱



شکل ۴- روند همگرایی و نتایج مدل شماره۲

شکل ۳و۴ روند همگرایی هر دو مدل و جواب بهینه نهایی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود روند صعودی بوده و زمانی مدل متوقف شده که قید توقف تامین شود. با کمی دقت در توابع هدف مدل‌های توسعه یافته ملاحظه می‌شود که جواب مدل‌های ۱ و ۲ که هردو از سیاست‌های بهره‌برداری معلوم استاندارد در تامین انرژی بهره گرفتند، یک جواب بهینه و بسیار نزدیک بهم می‌باشد. این بدان معنی است که مدل شماره ۲ با یک درجه آزادی بیشتر (ظرفیت نصب) به خوبی توانسته است با اعمال یک تابع جریمه در تابع هدف و همچنین طی فرآیند جستجو در الگوریتم COA، اعتمادپذیری را دقیقا برابر اعتمادپذیری مطلوب تامین کند. با این حال انتظار می‌رفت مدل ۲ که دارای سه درجه آزادی می‌باشد نتایج بهتری ازخود نشان دهد. به عنوان یک نتیجه می‌توان چنین استنباط کرد که نقش بهینه‌سازی تعیین ظرفیت نیروگاه با استفاده از الگوریتم COA خیلی محسوس نبوده و تعیین ظرفیت نیروگاه با استفاده از مدل RBS منجر به نتایج بهتر اگرچه با تفاوت خیلی ناچیز شده است. به منظور بررسی و کنترل، جواب مدل ۱ به عنوان یک جواب اولیه به مدل ۲ داده شدو با تعیین شعاع خیلی کوچک (۰،۰۵) برای پارامترهای مورد بررسی مشاهده شد که نتایج مدل ۱ بهینه است .

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه مسئله طراحی بهینه از سد برقابی بختیاری فرمول‌بندی شد. توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی با ترکیب الگوریتم (COA) و یک مدل شبیه‌سازی مخزن برقابی، جهت بهینه‌سازی سد برقابی بختیاری مدنظر قرارگرفت. در این راستا دو مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی طراحی توسعه داده شد. مدل اول دارای دو متغیر تصمیم (تراز نرمال، تراز حداقل بهره‌برداری) می‌باشد که از الگوریتم COA به دست می‌آیند. درمدل دوم ظرفیت نصب نیز جز متغیرهای تصمیم الگوریتم COA بوده و طی فرآیند جستجو بهینه میشود. نتایج حاصل از اجرای دو مدل بهینه‌سازی طراحی سد بختیاری بیانگر توانایی مطلوب الگوریتم COA در همگرایی سریع به سمت جواب‌های بهینه می‌باشد. نتایج بیانگر این موضوع است که می‌توان از الگوریتم COA در مسایل بهینه‌سازی بهره‌برداری و همچنین مسایل بهینه‌سازی با متغیرهای متعدد و توابع غیرخطی و پیچیده بهره‌مند شد.

۶. مراجع

۱. *Bozorg Haddad O, Afshar A, Marion MA (۲۰۰۸) Honey-bee matin optimization (HBMO) algorithm in deriving optimal operating rules for reservoirs. Journal of Hydroinformatics ۱۰(۳): ۲۵۷-۲٦٤*

۲. *Jamshid Mousavi, S., Shourian, M.,(۲۰۱۰)" Capacity optimization of hydropower storage projects using particle swarm optimization algorithm"Journal of Hydroinformatics*

۳. *Ma X. (۲۰۱۱) Optimal Operation of Hydropower Station Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm. In: Shen G., Huang X. (eds) Advanced Research on Computer Science and Information Engineering. Communications in Computer and Information Science, vol ۱۵۳. Springer, Berlin, Heidelberg*

٤. *Jothiprakash, V. & Arunkumar, R. Water Resour Manage (۲۰۱۳) ۲۷: ۱۹٦۳. doi: ۱۰,۱۰۰۷/s ۱۱۲٦۹-۰۱۳-۰۲٦۵-۸*

٥. *Choong,Sh., El-SHafie, A.,Wan Mohtar,W.H.M, "Optimisation of Multiple Hydropower Reservoir Operation Using Artificial Bee Colony Algorithm" Journal of Water Resour Manage, DOI ۱۰,۱۰۰۷/s ۱۱۲٦۹-۰۱۷-۱۵۸۵-x*

٦. *Mousavi S.J., Nakhaei P., Sadollah A., Kim J.H. (۲۰۱۷) Optimization of Hydropower Storage Projects Using Harmony Search Algorithm. In: Del Ser J. (eds) Harmony Search Algorithm. ICHSA ۲۰۱۷. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol ۵۱٤. Springer, Singapore*

۷. افشاریان زاده، نوید; موسوی، سیدجمشید " طراحی و بهره برداری بهینه بر مبنای اعتمادپذیری از مخازن سدهای برقابی پیاپی با احتساب اثرات متقابل هیدرولیکی " تحقیقات منابع آب ایران، سال دوازدهم، شماره۳،زمستان۱۳۹۵

۸. گیلانی، سیدحکیمی; افراخته، حسین " روشی جدید به منظور تعیین ظرفیت نیروگاه‌های بادی با کمک الگوریتم فاخته و زنجیره گسسته مارکوف "دومین کنفرانس انرژی های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران

۹. *Ming, B., Chang, J., Huang, Q. et al. Water Resour Manage (۲۰۱۵) ۲۹: ۵٦۷۱. doi: ۱۰,۱۰۰۷/s ۱۱۲٦۹-۰۱۵-۱۱٤۰-٦*

۱۰. *Abdollahi, M., Bouyer, A. & Abdollahi, D. J Supercomput (۲۰۱٦) ۷۲: ۱۲٤٦. doi: ۱۰,۱۰۰۷/s ۱۱۲۲۷-۰۱٦-۱٦٦۰-۸*

۱۱. *Kaushik, A., Verma, S., Singh, H.J. et al. Int J Syst Assur Eng Manag (۲۰۱۷). doi: ۱۰,۱۰۰۷/s ۱۳۱۹۸-۰۱۷-۰٦۱۵-۷*

۱۲. *R. Rajabioun, "Cuckoo Optimization Algorithm", Applied Soft Computing Journal, Vol. ۱۱, pp. ۵۵۰۸–۵۵۱۸, ۲۰۱۱*

۱۳. بختیار، رهام; موسوی، سیدجمشید " ارزیابی اثر عدم قطعیت در جریان‌های ورودی و تغییر شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم بر مولفه‌های طراحی مخزن برقابی سد کارون ۵ " نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره۲، تابستان

۱٤. *Mahab-Ghods Consulting Engineers (۲۰۰۲) Report on Economic Evaluation of Bakhtiari Dam Project.Water Resources Division .*

۱٥. *Bozorg Haddad, O., Ashofteh, P., Rasoulzadeh, S.,Miguel A. Mariño, Dist.M.ASCE(۲۰۱۳) "Optimization Model for Design-Operation of Pumped-Storage and Hydropower Systems", American Society of Civil Engineers. DOI: ۱۰.۱۰٦۱/(ASCE)EY.۱۹٤۳-۷۸۹۷,۰۰۰۰۱٦۹*