

بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخزن برق آبی-مطالعه موردی: سد کارون ۵

مریم پرهیزکاری^۱

حامد مازندرانی‌زاده^{۲*}

چکیده

افزایش جمعیت و به دنبال آن افزایش نیازها، تغییر اقلیم و کاهش ورودی به مخازن و همچنین افزایش تنوع بهره‌برداران پایین دست، باعث شده است بهره‌برداری بهینه از مخازن بیش از پیش مورد توجه محققین قرار گیرد. هدف از این پژوهش مقایسه عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO در حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه بهره‌برداری از مخزن برق آبی است. اغلب مسائل تصمیم‌گیری در دنیای واقعی به‌ویژه در زمینه مدیریت منابع آب، مسائل چندهدفه‌ای هستند که تصمیم‌گیری بر اساس اهداف متفاوت و متضاد انجام می‌شود. با توجه به دامنه وسیع کاربرد این گونه مسائل، مدل‌های متفاوتی برای حل آن‌ها پیشنهاد شده است، که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II و MOPSO اشاره کرد. در ابتدا با استفاده از شبکه عصبی به پیش‌بینی قیمت روزانه انرژی در ساعت‌های اوج پرداخته شد، سپس نتایج حاصل برای بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخزن سد کارون ۵، شامل دو هدف بهینه‌سازی درآمد سالانه و بهینه‌سازی حداقل انرژی تولیدشده روزانه، به کار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که هرچند زمان اجرای روش NSGA-II بیش از دو برابر روش MOPSO است، ولی دقت نتایج آن در هر دو هدف بهتر از MOPSO است، به نحوی که میانگین درآمد سالانه و حداقل انرژی تولیدی روزانه به دست آمده از روش NSGA-II به ترتیب ۱۸ درصد و ۲۰ درصد بهتر از روش MOPSO است.

واژه‌های کلیدی

قیمت اوج مصرف، بار پیک، شبکه عصبی، شبکه برق، پرداخت بر اساس پیشنهاد

^۱ دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

^{۲*} دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره). mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir

مقدمه

در دو دهه‌ی اخیر صنعت برق در بسیاری از کشورها تحت اصلاحات بنیادی و ساختاری قرار گرفته است. هدف اصلی تغییرات بازار برق، حرکت از فضایی محصور در قوانین و مقررات به فضایی آزاد و رقابتی با دسترسی باز و آزاد به شبکه می‌باشد. در محیط رقابتی جدید تصمیمات مشارکت‌کنندگان بازار باید به طور مستقل و با اطلاعات ناقص درباره‌ی رقبا گرفته شود. این تجدید ساختار، مسائل و مباحث جدیدی را در صنعت برق به همراه داشته است. به دلیل وجود ابهامات ذاتی در صنعت برق-قدرت، مانند تغییرات روزانه و ساعتی بار، رفتار دیگر رقبا و نیز محدودیت‌های احتمالی در خطوط قدرت قیمت‌گذاری برق توسط تولیدکننده از مسائل مهم در بازار برق تلقی می‌شود. منحنی پیشنهاد قیمت^۱ که توسط نیروگاه‌ها ارائه می‌شود به این مفهوم است که حاضر به تولید چه میزان انرژی در چه سطح قیمتی هستند (غنی نژاد، ۲۰۲۰). بازار برق غالباً محیطی پویا و پیچیده با کنش‌ها و بازخوردهای ساختاری پیچیده توصیف می‌شود که همه ذی‌نفعان با ریسک نااطمینانی‌هایی روبرو هستند و سعی دارند از طریق قیمت‌گذاری بهینه سود خود را بیشینه کرده و ریسک متناظر را کمینه نمایند (وحیدی نصب، ۲۰۱۰).

نتایج پژوهش صادقی و ذوالفقاری (۱۳۸۹) با استفاده از شبکه‌های عصبی و تبدیل موجک، نشان از توانایی این مدل‌ها در پیش‌بینی قیمت دارد. هانگ^۲ و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از یک مدل ترکیبی جدید از شبکه عصبی اقدام به ارائه مدل پیش‌بینی کوتاه‌مدت قیمت برق در یک بازار رقابتی و مقایسه آن با مدل‌های دیگر نمودند.

در زمینه بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن برق آبی می‌توان به تعیین عملکرد بهینه سیستم چندمخزنی در حوضه رودخانه چی^۳ تایلند با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (کامفن^۴، ۲۰۱۳)، الگوریتم تکاملی چندهدفه^۵ (MOEA) در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های برق آبی چندمخزنی (ردی^۶ و کومار^۷، ۲۰۰۶) و استفاده از مدل بهینه‌سازی (NA-ACO)^۸ که از مفهوم الگوریتم مورچه‌های چندمستعمره بهره‌مند می‌شود و مقایسه آن با الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II^۹ در بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخزن به مطالعه‌ی افشار و همکاران (۲۰۰۹) اشاره نمود. یانگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۵) ضمن ارائه مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی جدیدی به نام MOSPD^{۱۱} به مقایسه میان این الگوریتم و الگوریتم‌های MOPSO^{۱۲}، NSGA-II و AMOSA^{۱۳} در حل چند مسئله شاخص و همچنین حل بهره‌برداری بهینه از سد OTC واقع در ایالات متحده به منظور تولید انرژی برق آبی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد منحنی بهینه پارتو^{۱۴} حاصل از الگوریتم پیشنهادی، دربرگیرنده دامنه وسیع‌تری از جواب‌ها نسبت به سایر الگوریتم‌ها است.

پرهیزکاری و مازندانی زاده (۱۳۹۸) در زمینه بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد کارون ۵ به منظور تولید انرژی برق آبی اقدام به ارائه یک مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن به روش MOPSO نمودند. (مازندانی زاده و همکاران ۱۳۹۹) با هدف بهینه‌سازی تأمین نیازهای زیست‌محیطی و کشاورزی به مقایسه عملکرد دو روش بهینه‌سازی MOPSO و NSGA-II در بهره‌برداری بهینه از یک سیستم دو مخزن پرداختند.

نتایج پژوهش اسپان منش و همکاران (۱۳۹۳) در زمینه

⁹ Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

¹⁰ Yang

¹¹ Multi-Objective Complex Evolution Global Optimization with Principle Component Analysis and Crowding Distance

¹² Multi-Objective Particle Swarm Optimization

¹³ Archived Multi-objective Simulated Annealing

¹⁴ Pareto frontiers

¹ Offer Curve

² Haung

³ Chi

⁴ Kumphon

⁵ Multi-Objective Evolutionary Optimization

⁶ Reddy

⁷ Kumar

⁸ Non-dominated Archiving Ant Colony Optimization

گذشته و حال که در زمینه بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن برق آبی با استفاده از روش‌های فراکاوشی انجام شده است، پرداخته‌اند. نتیجه‌ی پژوهش ایشان نشان می‌دهد تمرکز پژوهش‌های آینده نه تنها باید بر روی ارائه روابط جدید در خصوص بهره‌برداری باشد بلکه در نحوه‌ی اثرگذاری روش‌های بهینه‌سازی نیز باید پژوهش‌های بیشتری انجام شود.

بررسی پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد موضوع شبیه‌سازی بازار برق به ویژه بازارهای PAB^۳ و بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخزن برق آبی بر اساس رویکرد بازار PAB کمتر مورد توجه پژوهش‌های گذشته قرار گرفته است. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع بازار PAB و انعطاف‌پذیری نحوه بهره‌برداری از مخازن برق آبی، در این مقاله تلاش شده که با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی^۴ (ANN) قیمت انرژی در ساعت‌های اوج مصرف روزانه پیش‌بینی شده، سپس به مقایسه دو مدل بهینه‌سازی چندهدفه MOPSO و NSGA-II به منظور برنامه‌ریزی تولید انرژی برق آبی با هدف‌های یشینه‌سازی درآمد سالانه و بیشینه‌سازی حداقل انرژی تولیدی روزانه پرداخته شود.

مواد و روش‌ها

شبکه عصبی مصنوعی

بررسی شبکه عصبی انسان و اجزای آن، الهام‌بخش پژوهش‌گران برای ارائه یک مدل شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی پدیده‌ها شد. شبکه عصبی مصنوعی متشکل از سه مؤلفه وزن (w)، بایاس (b) و تابع انتقال (F) است. این سه جزء برای هر عصب منحصر به فرد است. شکل (۱) ساختار شماییک شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد (مطهری و مازندرانی زاده، ۲۰۱۷).

معیارهای مختلفی برای ارزیابی عملکرد ANN ممکن است استفاده شود که مهمترین آنها میانگین مربعات خطا (MSE) است.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (k_{oi} - k_{pi})^2 \quad (1)$$

بهینه‌سازی برنامه‌ریزی میان‌مدت سیستم پنج مخزنه برق آبی حوضه کارون، با هدف حداکثرسازی سود حاصل از تولید برق آبی و تخصیص آب کشاورزی با استفاده از روش دوگان غیرقطعی (SDDP) نشان می‌دهد روش SDDP عملکرد مناسبی در حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری غیرقطعی از سیستم مورد نظر دارد.

احمدیان‌فر و همکاران، در سال ۱۳۹۵ با ارائه‌ی یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه شامل اهداف کشاورزی و زیست‌محیطی در یک سیستم چندمخزنه با تلفیق مدل شبیه‌سازی بهره‌برداری و مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه، با هدف کاهش شاخص کمبود آب برای تأمین اهداف موردنظر در طول دوره آماری ۴۸ ساله نشان دادند که این الگوریتم در به دست آوردن جبهه جواب‌های غالب کارایی مؤثری دارد. نتایج مطالعه‌ی پرهیزکاری و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II نشان می‌دهد استفاده از مدل ارائه شده، موجب افزایش بهره‌وری و سود حاصل از فروش برق شده است.

فنگ^۱ و همکاران (۲۰۱۷) ضمن مقایسه‌ی نتایج حاصل از بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم برق آبی به منظور برآوردن نیاز شبکه برق در چین با دو هدف بیشینه‌سازی تولید کل و بیشینه‌سازی تولید برق مطمئن، با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه MOPSO و NSGA-II نشان داد که روش MOPSO قادر به ارائه راه‌حل‌های بهتری نسبت به NSGA-II است. در پژوهش فنگ و همکاران (۲۰۱۷) صرفاً به موضوع بهینه‌سازی تولید برق اشاره شده است و موضوعاتی مانند درآمد بهره‌بردار، قیمت برق، بازار برق و ... مورد توجه قرار نگرفته است.

پژوهش حاتم خانی و همکاران (۲۰۲۱) در خصوص مقایسه بهینه‌سازی طراحی مشخصات سد و نیروگاه بختیاری شامل ارتفاع سد، ظرفیت نیروگاه و ظرفیت سرریز در دو حالت با احتساب بهره‌برداری و بدون احتساب بهره‌برداری نشان می‌دهد خسارت ناشی از سیل بیش از آنکه بر متغیرهای طراحی سد و نیروگاه اثرگذار باشد، بر متغیرهای بهره‌برداری اثرگذار است. چونگ^۲ و همکاران (۲۰۲۱) به مرور مطالعات

^۳ Pay as Bid

^۴ Artificial Neural Networks

^۱ Feng

^۲ Chong

بر یکدیگر این است که اگر x_1 و x_2 دو بردار جواب از مسئله بهینه‌سازی M هدفه باشند، x_1 بر x_2 مسلط است اگر و تنها اگر از نظر هیچ‌یک از اهداف از x_2 بدتر نباشد و در حداقل یک هدف از آن بهتر باشد. همچنین آرشیو جایی برای نگهداری تعداد محدودی از پاسخ‌های ناغالب است.

مشابه الگوریتم تک‌هدفه PSO، سرعت و موقعیت هر ذره در هر مرحله به کمک رابطه‌های (۳) و (۴) محاسبه می‌شود، با این تفاوت که به جای بهترین موقعیت جمعی، موقعیت یکی از اعضای آرشیو به تصادف انتخاب و به عنوان رهبر بقیه نقاط تعیین می‌شود. اگر بردارهای مکان و سرعت ذره i ام در زمان t به ترتیب با x^i و v^i نمایش داده شوند، سرعت و مکان ذره در زمان $t+1$ با استفاده از معادلات زیر قابل محاسبه است:

$$x^i[t+1] = x^i[t] + v^i[t+1] \quad (3)$$

$$v^i[t+1] = wv^i[t] + c_1r_1(x^{i,pbest}[t] - x^i[t]) + c_2r_2(rep_h - x^i[t]) \quad (4)$$

به‌طوری‌که rep_h عضو تصادفی از مخزن^۳، $x^{i,pbest}[t]$ بهترین تجربه شخصی^۴ ذره i ، w ضریب اینرسی، r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک، c_1 و c_2 به ترتیب ضریب یادگیری شخصی و ضریب یادگیری جمعی است. روند الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات به صورت زیر است:

۱. ایجاد جمعیت اولیه

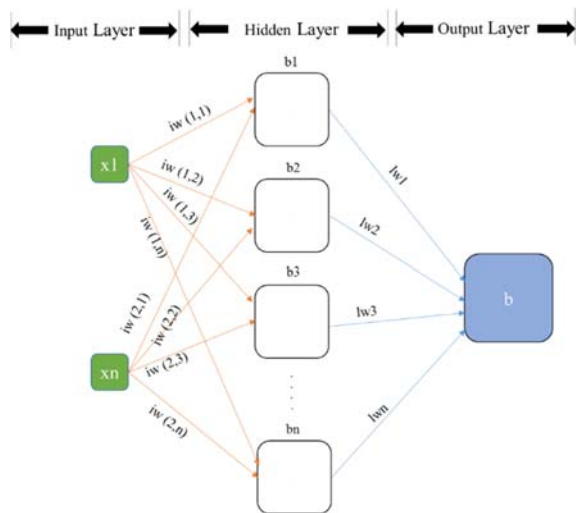
۲. جداسازی اعضای ناغالب جمعیت و ذخیره آن‌ها در مخزن (rep)

۳. شبکه‌بندی فضای هدف کشف‌شده و انتخاب تصادفی رهبر از میان اعضای rep به هر عضو از جمعیت بر اساس توزیع احتمال بولتزمن^۵

$$P_i = \frac{e^{-\beta n_i}}{\sum e^{-\beta n_i}} \quad (5)$$

رابطه‌ی (۵) توزیع احتمال بولتزمن را نشان می‌دهد که P_i احتمال انتخاب خانه i ام، n_i تعداد اعضای موجود در خانه i ام و β پارامتر فشار انتخاب^۶ است.

که در رابطه فوق n تعداد نمونه‌ها، k_{oi} و k_{pi} به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط ANN است.



شکل (۱): شکل شماتیک شبکه عصبی مصنوعی (مطهری و مازندرانی زاده، ۲۰۱۷)

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه MOPSO

هنگامی‌که تابع هدف مسئله دربرگیرنده چندین هدف متضاد باشد، روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه قابل استفاده هستند. شکل کلی مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned} &\text{Minimize/Maximize } f_i(x) \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \\ &\text{Subject to:} \\ &h_l(x) = 0 \quad l = 1, 2, 3, \dots, E_1 \\ &g_k(x) \leq 0 \quad k = 1, 2, 3, \dots, E_2 \end{aligned} \quad (2)$$

به‌طوری‌که x بردار جواب، $f_i(x)$ تابع هدف i ام، M تعداد اهداف، $h_l(x)$ و $g_k(x)$ به ترتیب قیدهای مساوی و نامساوی مسئله، E_1 و E_2 به ترتیب تعداد قیدهای مساوی و قیدهای نامساوی هستند (مازندرانی زاده، ۱۳۹۵).

تاکنون نسخه‌های گوناگونی از الگوریتم PSO برای حل مسائل چندهدفه ارائه شده است، یکی از معروف‌ترین الگوریتم‌هایی که در این راستا معرفی شده است، الگوریتم MOPSO است که توسط کوئلو^۱ و همکاران (۲۰۰۴) ارائه شده است. الگوریتم MOPSO شامل دو مفهوم غلبه جواب‌ها بر یکدیگر و آرشیو^۲ است. منظور از غلبه جواب‌ها

⁴ Personal best (pbest)

⁵ Boltzmann

⁶ Selection pressure

¹ Coello Coello

² Archive

³ Representory

تمام توابع هدف است. همچنین $f_k^{\min}$ و $f_k^{\max}$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار تابع هدف k ام است.

۵. تشکیل حوضچه ازدواج^۴: از بین جواب‌های موجود، بر اساس دو معیار زیر تعداد N جواب برای تشکیل حوضچه ازدواج انتخاب می‌شود.

الف- جبهه پارتو: جواب‌های واقع در جبهه‌های پارتو به ترتیب اولویت جبهه انتخاب می‌شوند.

ب-فاصله ازدحامی: اگر x_1 و x_2 دو عضو از یک جبهه پارتو باشند، عضو با فاصله ازدحامی بیشتر انتخاب می‌شود.

۶. انجام عملیات تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید.

۷. تلفیق جمعیت اولیه و فرزندان.

۸. انتخاب N عضو برتر بر مبنای معیارهای الف و ب.

۹. تکرار مراحل ۵ تا ۸ به تعداد کافی تا توقف مسئله.

روش تقسیم عادلانه منافع

از آنجاکه مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه دارای جواب منحصر به فرد و یکتایی نیستند، برای یافتن جواب نهایی در بین جواب‌های ناغالب به دست آمده، روش‌های مختلفی از جمله روش نش متقارن^۵ پیشنهاد شده‌اند.

روش نش متقارن: این روش که توسط (نش^۶، ۱۹۵۳) به منظور حل بازی‌های همکاریانه معرفی گردید برای انجام تقسیم عادلانه در بین جواب‌های مسئله بهینه‌سازی M هدفه مناسب است. این روش بر مبنای بهینه‌سازی فاصله همه هدف‌ها از حداقل مقدار آن هدف است (حاجی رجبی و مازندرانی زاده، ۱۳۹۷).

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \prod_{i=1}^M (f_i - f_i^+) \\ & \text{Subject to:} \end{aligned} \quad (8)$$

$$f_i^- \leq f_i \leq f_i^+$$

که f_i تابع هدف i ام، f_i^- و f_i^+ به ترتیب کمترین و بیشترین مقادیر تابع هدف i ام هستند.

مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

مدل پیشنهادی در این مطالعه کسب بیشترین منافع سالانه در عین توجه به حداقل انرژی تولیدی روزانه است.

۴. به‌روزرسانی موقعیت ذرات بر اساس رابطه (۴) و (۵)

۵. به‌روزرسانی بهترین تجربه شخصی هر ذره، به نحوی که:

- اگر موقعیت جدید ذره بر بهترین تجربه شخصی غلبه نماید، موقعیت جدید جایگزین بهترین تجربه خواهد شد.

- اگر موقعیت جدید توسط بهترین تجربه شخصی مغلوب شود، بهترین تجربه شخصی تغییر نمی‌کند.

- اگر موقعیت جدید و بهترین تجربه شخصی ذره با یکدیگر ناغالب باشند، به تصادف یکی از آن‌ها به عنوان بهترین تجربه شخصی در نظر گرفته می‌شود.

۶. اعضای ناغالب جمعیت فعلی به rep اضافه می‌شود.

۷. اعضای مغلوب rep حذف می‌شوند.

۸. اگر تعداد اعضای rep بیش از ظرفیت تعیین شده باشد اعضای اضافی حذف می‌شوند (اندازه آرشیو محدود است).

۹. تکرار مراحل ۳ تا ۸ به تعداد کافی تا توقف مسئله.

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II، که توسط (دب^۱ و همکاران، ۲۰۰۶) به منظور رفع نواقص مدل اولیه NSGA ارائه گردید به شرح زیر است (کوئلو^۲ و همکاران، ۲۰۰۷):

۱. ایجاد جمعیت اولیه به تعداد N

۲. محاسبه برازندگی هر یک از جواب‌ها بر اساس M تابع هدف

۳. خوشه‌بندی جواب‌ها به جبهه‌های پارتو مختلف. بر حسب اینکه هر جواب توسط چه تعداد جواب دیگر مغلوب شده باشد، جواب‌ها به جبهه‌های پارتو ۱، ۲ و ... خوشه‌بندی می‌شوند.

۴. محاسبه فاصله ازدحامی^۳: این پارامتر نشان‌دهنده فاصله هر جواب با جواب‌های اطراف آن است.

$$cd_k(x_i) = \frac{f_k(x_{i+1}) - f_k(x_{i-1})}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \quad (6)$$

$$cd(x_i) = \sum_{k=1}^M cd_k(x_i) \quad (7)$$

به نحوی که $cd_k(x_i)$ فاصله ازدحامی جواب x_i به ازای تابع هدف k ام و $cd(x_i)$ کل فاصله ازدحامی جواب x_i به ازای

⁴ Mating pool

⁵ Symmetric Nash solution

⁶ Nash

¹ Deb

² Coello

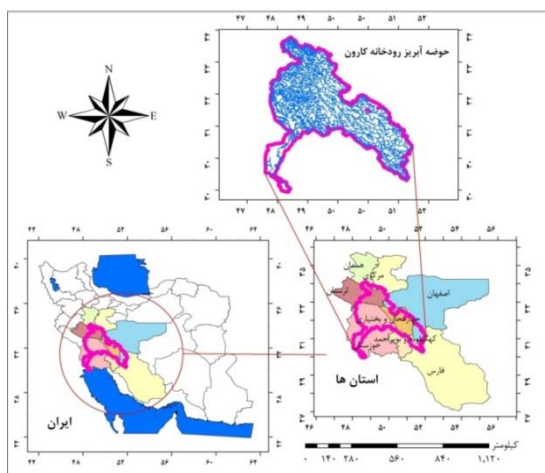
³ Crowding Distance

سد ۱۰۱۸۶ کیلومترمربع، آبدهی میانگین سالانه ۳۵۸۵ میلیون مترمکعب، بارندگی میانگین حوضه ۶۱۳ میلی‌متر در سال است. جدول (۱) اطلاعات مطالعه موردی را نمایش می‌دهد.

جدول (۱): اطلاعات مطالعه موردی (مازندرانی زاده و همکاران،

(۱۳۸۳)

Parameter	Description	Unit	Amount
S_{max}	Volume of maximum storage	Mm ³	۲۰۱۳
S_{min}	Volume of minimum storage	Mm ³	۱۲۲۰
R_{max}	Maximum input capacity of power plant	Mm ³ .day ⁻¹	۳۰/۲
C	Installation capacity of power plant	Megawatt	۳۳۶
u	Efficiency of turbine	—	%۹۲
$h_{tailwater}$	Water elevation on power plant tail water	m	۱۰۳۱



شکل (۲): موقعیت کلی منطقه طرح (مازندرانی زاده و همکاران،

(۱۳۸۳)

نتایج و بحث

نتایج حاصل از مدل ANN

داده‌های قیمت انرژی الکتریکی بازار برق ایران به صورت ساعتی در وبگاه شرکت مدیریت شبکه برق ایران ارائه شده است، قیمت برق در بازه زمانی سال ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۴ از این وبگاه استخراج شده و میانگین قیمت پیک در نیمه اول سال بین ساعات ۱۹ تا ۲۳ و در نیمه دوم سال بین ساعات ۱۸ تا ۲۲ در نظر گرفته شده است. بررسی قیمت های ثبت شده نشان می‌دهد تغییرات قیمت نه تنها متأثر از فصل است بلکه

$$\text{Maximize } \sum_{t=1}^{365} (Pr_t \times E_t) \text{ and Maximize (Min } E_t)$$

Subject to:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t - L_t - Sp_t$$

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max}$$

$$0 \leq R_t \leq R_{max} \quad (9)$$

$$E_t = 2730 \times u \times h_{net,t} \times R_t \quad (10)$$

$$h_{net,t} = h_t - h_{tailwater} \quad (11)$$

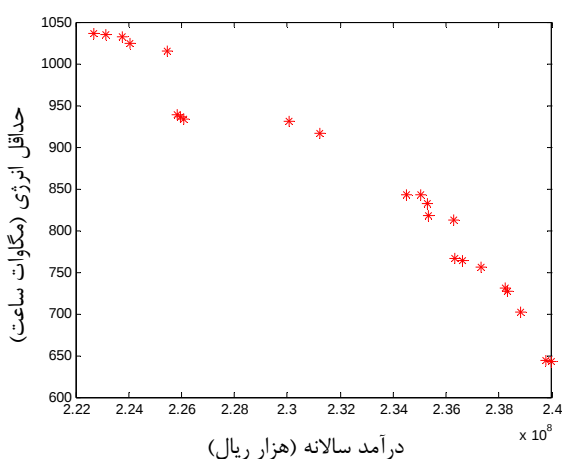
در رابطه فوق Pr_t قیمت پیک انرژی روزانه (هزار ریال بر مگاوات ساعت)، E_t انرژی تولیدی در روز t (مگاوات ساعت)، S_t حجم مخزن در ابتدای روز t (میلیون مترمکعب)، L_t جریان ورودی به مخزن در روز t (میلیون مترمکعب)، R_t تلفات آب در طول روز t ، R_t جریان خروجی از مخزن در طول روز t (میلیون مترمکعب)، Sp_t جریان سرریز از مخزن در روز t (میلیون مترمکعب)، S_{min} و S_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر حجم مخزن (میلیون مترمکعب)، R_{max} حداکثر جریان خروجی از مخزن، u راندمان نیروگاه و h_{net} ارتفاع آب خالص روی نیروگاه (متر) در روز t است که از $h_{net} = h_t - h_{tailwater}$ قابل محاسبه است. h_t تراز آب در پایاب نیروگاه و h_t تراز آب مخزن در روز t است. در این مسئله R_t به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است.

مطالعه موردی

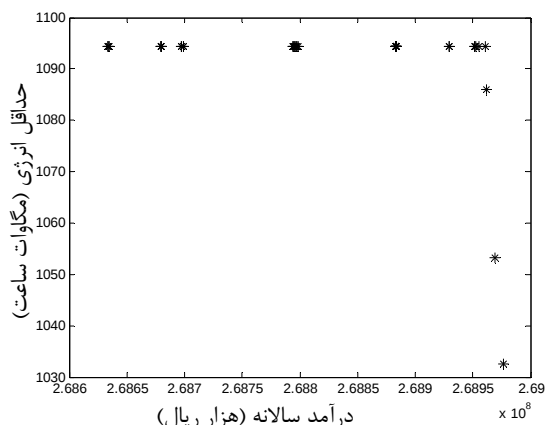
جهت اجرای مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، سد کارون ۵ از حوضه آبریز رودخانه کارون به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. رودخانه کارون به عنوان مهم‌ترین و پرآب‌ترین منبع آبی کشور محسوب می‌گردد. حوضه آبریز رودخانه کارون در بالادست محور پیشنهادی سد کارون ۵ در محدوده ۵۰' - ۴۹° تا ۵۱' - ۵۰° درجه طول شرقی و ۳۱' - ۳۲° تا ۲۶° درجه عرض شمالی گسترده شده است. مهم‌ترین شاخه‌های این رودخانه عبارت‌اند از کیار، جهان‌بین، شلمزار، کوه‌رنگ و آب و نک که مجموع این شاخه‌ها بعلاوه چند شاخه دیگر رودخانه کارون را تشکیل می‌دهند. جریان این رودخانه در ایستگاه هیدرومتری ارمند که کمی بالاتر از محل محور پیشنهادی قرار دارد، اندازه‌گیری می‌شود. شکل (۲) موقعیت کلی منطقه را نمایش می‌دهد. مساحت حوضه آبریز

نتایج حاصل از مدل‌های بهینه‌سازی

درصد تقاطع و جهش در مدل NSGA-II به ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۴، همچنین پارامترهای MOPSO برابر $C1=1$ ، $C2=1$ ، $W=0.5$ ، $\beta=1$ و میزان تکرار در هر دو الگوریتم برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. جبهه پرتو به‌دست‌آمده از روش‌های MOPSO و NSGA-II به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نمایش داده شده است. در هر دو شکل مجموعه‌ای از جواب‌های ناغالب مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر در جواب‌های بخش پایین سمت راست، هدف درآمد کل سالانه مورد توجه قرار گرفته و در جواب‌های بالا سمت چپ، هدف بیشترین انرژی تولیدشده روزانه مورد توجه قرار گرفته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود جواب‌های به‌دست‌آمده از روش MOPSO توسط جواب‌های NSGA-II مغلوب شده‌اند.



شکل (۴): نمایش جبهه پارتو در روش بهینه‌سازی دوهدفه MOPSO

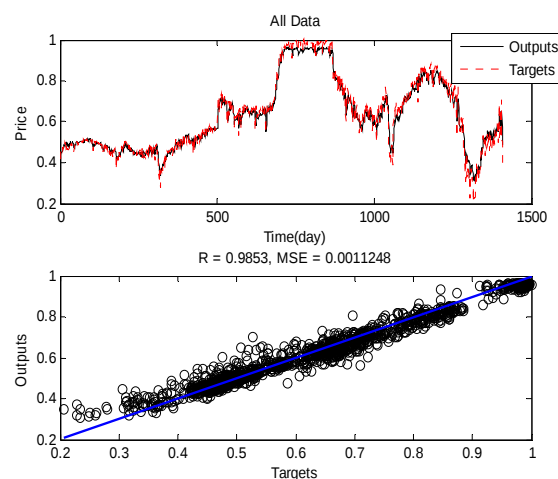


شکل (۵): نمایش جبهه پارتو در روش بهینه‌سازی دوهدفه NSGA-II

به روز هفته نیز وابسته است، به عنوان مثال قیمت در روزهای ابتدایی هفته گرانتر از قیمت در روزهای انتهایی و تعطیل است. بنابراین به منظور اعمال چنین اثراتی، قیمت برق در ۷ روز گذشته، قیمت برق در ۱۲ هفته گذشته و همچنین قیمت برق در چهار هفته ابتدایی سال به عنوان ورودی و قیمت برق در ساعت اوج مصرف روز t به عنوان خروجی مدل ANN در نظر گرفته شدند.

$$x(t) = f(x(t-1), x(t-2), x(t-3), x(t-4), x(t-5), x(t-6), x(t-7), x(t-14), x(t-21), x(t-28), x(t-35), x(t-42), x(t-49), x(t-56), x(t-63), x(t-70), x(t-77), x(t-84), x(t-91), x(t-343), x(t-350), x(t-357), x(t-364)) \quad (12)$$

که در رابطه فوق $x(t)$ قیمت در روز t است. در این پژوهش، یک شبکه پرسپترون^۱ دو لایه با یک لایه پنهان و ۱۰ نرون و یک لایه خروجی و یک نرون، با الگوریتم آموزش لونیگ مارکوات^۲ مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل (۳) نتایج شبیه‌سازی کل داده‌ها نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل ANN با ضریب رگرسیون و میانگین مربعات خطا به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۰۰۱، از توانایی مناسبی در پیش‌بینی اطلاعات آینده برخوردار است. به منظور بررسی کارایی مدل از معیارهای میانگین مربعات خطا (MSE) استفاده شده است.



شکل (۳): میزان انطباق کل داده‌ها بر داده‌های ورودی

² Levenberg-Marquardt

¹ Perceptron

از آنجایی که نتایج مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه دامن‌های از جواب‌ها را در برمی‌گیرد، لذا به منظور انتخاب یک جواب نهایی از بین جواب‌های به دست آمده، از مدل تقسیم منافع عادلانه نش متقارن استفاده شده است. جدول (۲) نتایج حاصل از مدل نش متقارن و زمان اجرای هر الگوریتم را نمایش می‌دهد. شایان ذکر است هر دو الگوریتم در محیط نرم افزار Matlab 2014 در رایانه Intel Core i5 @2.5GHz با حافظه داخلی ۶ گیگابایت اجرا شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میانگین زمان اجرای الگوریتم NSGA-II در طی ۵ اجرا برابر ۲۳۲۳ ثانیه است، در حالی که میانگین زمان اجرای الگوریتم MOPSO برابر ۹۶۸ ثانیه، در حدود ۴۰ درصد زمان اجرای NSGA-II است. در خصوص دقت جواب‌ها، جواب‌های NSGA-II از دقت بیشتری نسبت به جواب‌های MOPSO برخوردار است، به نحوی که میانگین درآمد سالانه و حداقل انرژی تولیدی روزانه به دست آمده از روش NSGA-II به ترتیب ۱۸ درصد و ۲۰ درصد بهتر از روش MOPSO است.

جدول (۲): نتایج حاصل از اجرای مدل‌های بهینه‌سازی در

چندین اجرای مختلف

حداقل انرژی (مگاوات ساعت)	درآمد سالانه (میلیارد ریال)	زمان (ثانیه)	اجرا	
۹۳۴	۲۲۶	۱۱۶۳	اول	روش MOPSO
۱۰۲۳/۳	۲۲۳	۸۹۸	دوم	
۸۲۲/۶	۲۳۳	۹۵۰	سوم	
۷۴۶/۲	۲۳۵	۸۹۹	چهارم	
۱۰۲۵/۷	۲۲۱	۹۳۴	پنجم	
۹۱۰/۳	۲۲۷/۶	۹۶۸/۸	میانگین	روش NSGA-II
۱۰۹۴/۳	۲۶۸	۲۱۴۳	اول	
۱۰۴۶/۸	۲۶۹	۲۱۳۰	دوم	
۱۱۱۳/۲	۲۷۱	۲۰۹۷	سوم	
۱۱۲۳/۴	۲۷۰	۲۷۵۹	چهارم	
۱۰۶۴/۸	۲۶۹	۲۴۸۷	پنجم	میانگین
۱۰۸۸/۵	۲۶۹/۴	۲۳۲۳/۲	میانگین	

نتیجه‌گیری

تأمین بار پیک شبکه برق رسانی کشور از مهم‌ترین اولویت‌های وزارت نیرو است. با توجه به سرعت ورود و خروج

نیروگاه‌های برق آبی به شبکه، از ظرفیت این نیروگاه‌ها غالباً در تأمین بار پیک استفاده می‌شود. از این رو بهینه‌سازی بهره‌برداری از نیروگاه‌های برق آبی همواره مدنظر مدیران صنعت آب و برق بوده است. از آنجا که بهره‌برداری از این نیروگاه‌ها غالباً با اهداف متفاوتی صورت می‌گیرد، در این پژوهش به مقایسه عملکرد دو الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه MOPSO و NSGA-II در بهره‌برداری از سد و نیروگاه کارون ۵ پرداخته شده است. به نحوی که دستیابی هم‌زمان به دو هدف بهینه‌سازی درآمد کل سالانه و بهینه‌سازی حداقل تولید روزانه برق مد نظر قرار گرفته است. به این منظور ابتدا با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و با استفاده از آمار قیمت برق در ساعت اوج مصرف سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴، نسبت به پیش بینی قیمت برق در ساعت‌های اوج مصرف در سال ۱۳۹۵ اقدام شد، سپس با هر یک از مدل‌های بهینه‌سازی MOPSO و NSGA-II اقدام به اجرای مدل بهره‌برداری گردید. نتایج نشان می‌دهد هر دو مدل عملکرد قابل قبولی برای دستیابی به هدف‌ها دارند، ولی روش زمان حل مسئله توسط روش MOPSO تقریباً نصف روش NSGA-II است، در حالی که دقت جواب‌های به دست آمده توسط روش NSGA-II در حدود ۲۰ درصد بیش از دقت جواب‌های روش MOPSO است. در ادامه پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود اثر عدم داده‌های جریان ورودی به مخزن بر تولید انرژی برق آبی و به دنبال آن میزان سودآوری و نحوه بهره‌برداری از مخزن بررسی شود.

مراجع

- ۱- احمدیان فر، ا. ا. ادیب، آ. تقیان، م. و حقیقی، ع. (۱۳۹۶). بهینه‌سازی بهره‌برداری از سدهای مخزنی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه با رویکرد مرتب‌سازی نامغلوب"، مجله علوم و مهندسی آبیاری، دوره ۳۹، شماره ۲، صفحات ۸۹ تا ۱۰۰
- ۲- اسپان منش، و. زهرایی، ب. و پورسپاهی سامیان، ج. (۱۳۹۲). "کاربرد روش بهینه‌سازی SDDP در بهره‌برداری میان مدت سیستم چندمخزنه ی برق آبی حوضه کارون"، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران.
- ۳- پرهیزکاری، م. مازندرانی زاده، ح. و افشار، ک. (۱۳۹۷). "بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخازن سد برق آبی براساس الگوی بازارهای پرداخت پیشنهادشده"، نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی، سال پنجم، شماره نوزدهم، صفحات ۵۴ تا ۶۱.

- hydropower system. "Journal of water resources planning and management 143,10.
- 16- Ghaninejad, M., (2020). "Supply, Demand, and Bidding in Iran's Electricity Market." MPRA Paper 105340, University Library of Munich, Germany.
- 17- Hatamkhani, A., Shourian, M. & Moridi, A. (2021). "Optimal Design and Operation of a Hydropower Reservoir Plant Using a WEAP-Based Simulation–Optimization Approach." *Water Resour Manage* 35, 1637–1652.
- 18- Huang, Ch., Shen, Y., Chen, Y., and Chen, H., (2020). "A novel hybrid deep neural network model for short-term electricity price forecasting." *International journal of Energy Research*, University of Science and Technology, China, 18019.
- 19- Kunphon, B., (2013). "Genetic Algorithms for Multi-objective Optimization: Application to a Multi-reservoir System in the Chi River Basin, Thailand." *Water Resources Management*, 27, 4369-4378.
- 20- Motahari M., Mazandaranizadeh H., (2017). "Development of a PSO-ANN model for rainfall-runoff response in basins, Case Study: Karaj Basin. " *Civil engineering journal*, 3(1),35-44.
- 21- Nash J., (1953). "Two-person cooperative games." *Econometrica* 21(1),128-140.
- 22- Reddy, M., and Kumar, D., (2006). "Optimal Reservoir Operation using Multi-Objective Evolutionary Algorithm." *Water Resources Management*, 20, 861-878.
- 23- Vahidinasab, V., (2010). "Normal boundary intersection method for suppliers' strategic bidding in electricity markets: an environmental, economic approach." *Energy Conversion and Management*, 51(6): 1111-9.
- 24- Yang T., Gao X., Sellars S.L. and Sorooshian S., (2015). "Improving the multi-objective evolutionary optimization algorithm for hydropower reservoir operations in the California Oroville–Thermalito complex." *Environmental Modelling & Software*, 69,262-279.
- ۴- پرهیزکاری، م. و مازندرانی زاده، ح. (۱۳۹۸). "استفاده از MOPSO در بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخزن برق آبی، مطالعه موردی: سد کارون ۵"، *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، سال پانزدهم، شماره ۱، صفحات ۳۶۱ تا ۳۶۴.
- ۵- حاجی رجبی، ف. و مازندرانی زاده، ح. (۱۳۹۶). "بهینه‌سازی چندهدفه عمق نصب زهکش بر مبنای تقسیم عادلانه منافع آثار کوتاه‌مدت در مقابل آثار بلندمدت زیست محیطی"، *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، سال سیزدهم، شماره ۴، صفحات ۱۴۴ تا ۱۵۳.
- ۶- صادقی، ح. و ذوالفقاری، م. (۱۳۸۹). "پیش‌بینی کوتاه‌مدت تقاضای برق کشور با استفاده از شبکه عصبی و تبدیل موجک"، *فصلنامه اقتصاد مقداری*، دوره هفتم، شماره دوم، صفحات ۲۷ تا ۵۶.
- ۷- مازندرانی زاده، ح. (۱۳۹۵). "طراحی سیستم زهکشی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه NSGA-II با رویکرد اقتصادی- زیست محیطی"، *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، سال دوازدهم، شماره ۳، صفحات ۱۴۲ تا ۱۵۲.
- ۸- مازندرانی زاده، ح. موسوی، س. ج. و پرتوی‌راد، ف. (۱۳۸۳). "بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن با احتساب عوامل اقتصادی و قیمت انرژی برقایی"، *مجله عمران و محیط زیست امیرکبیر*، شماره ۶۹، صفحات ۸۳ تا ۹۳.
- ۹- مازندرانی زاده، ح. پیاده کوهسار، آ. و صدر، ک. (۱۳۹۹). "مقایسه عملکرد الگوریتم‌های MOPSO و NSGA-II در محاسبه منحنی فرمان سیستم‌های چندمخزنه"، *نشریه سد و نیروگاه برق آبی ایران*، دوره هفتم، شماره بیست و چهارم، صفحات ۵۲ تا ۶۲.
- 10- Afshar A., and Sharifi F., (2009). "Non-dominated archiving multi-colony ant algorithm for multi-objective optimization: Application to multi-purpose reservoir operation." *Engineering Optimization*, 4, 313-325.
- 11- Chong K. L., Lai S. H., Ahmed A. N., Zaafer W. Z. W., Rao R. V., Sherif M., Sefelnasr A. and El-Shafie A., (2021). "Review on Dam and Reservoir Optimal Operation for Irrigation and Hydropower Energy Generation Utilizing Meta-Heuristic Algorithms," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 19488-19505.
- 12- Coello Coello, C.A., Lamont, G.B., VanVeldhuizen, D.A., (2007). "Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems." Springer, 2nd Ed., New York, USA.
- 13- Coello C., Pulido G. and Lechuga M., (2004). "Handling multiple objectives with particle swarm optimization." *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 8,256-279.
- 14- Deb K., and sundar J., (2006). "Reference point based multi-objective optimization using evolutionary algorithms. " *Proceedings of the 8th annual conference on genetic and evolutionary computation*, 635-642
- 15- Feng Zh., Niu W., Zhou J. and Ch Ch., (2017). "Multi-objective operation optimization of a cascaded

Multi-objective optimization of hydropower reservoir operation case study, Karoon 5

Maryam Parhizkari¹
Hamed Mazandarani Zadeh^{*2}

Abstract

Increasing the population and consequently increasing the needs, climate change and reducing the inflow to the reservoirs, as well as increasing the diversity of downstream operators, has caused the optimal use of reservoirs to be more considered by researchers. The purpose of this study is to compare the performance of NSGA-II and MOPSO algorithms in solving the problem of multi-objective optimization of hydropower reservoir operation. Near the most of real-world decision-making issues, especially in the field of water resources management, are multi-objective issues in which decisions are made based on different and conflicting goals. Due to the wide range of application of these issues, different models have been proposed to solve them, NSGA-II and MOPSO are the most important of these multi-objective optimization models. Initially, the daily energy price was predicted using neural networks during peak hours, then the results were used to optimize the multi-objective operation of the Karoon 5 dam reservoir, including the two objectives of maximizing annual revenue and maximizing the minimum daily energy produced. Although the run time of the NSGA-II method is about twice as high as the MOPSO, the precision of its results is 20% better for both purposes than MOPSO.

Keywords

Peak consumption price, Peak load, Neural network, Electricity network, Pay as bid

¹ Ph.D. Student, Department of Water Science and Engineering, IKIU, Qazvin, Iran.

^{2*} Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, IKIU, Qazvin, Iran.
mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir