

بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخازن سد برق آبی بر اساس الگوی بازارهای پرداخت پیشنهادشده

مریم پرهیزکاری^۱

حامد مازندرانی زاده^{۲*}

کریم افشار^۳

چکیده

از آبان ماه سال ۱۳۸۲ که بازار برق کشور ایران راه‌اندازی شد، ساختار انحصاری تولید برق به ساختار رقابتی تبدیل شده است. در این بازار، پیش‌بینی قیمت برق نه‌تنها در قیمت‌دهی ضروری است بلکه دریافتن استراتژی بهینه بهره‌برداری از سوی بهره‌برداران نیروگاه نیز نقشی اساسی دارد. در این مقاله، از روش شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی قیمت روزانه انرژی در ساعت‌های اوج استفاده‌شده و نتایج حاصل از آن برای بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخزن سد کارون ۵ به کار گرفته شده است. هدف‌های در نظر گرفته‌شده شامل دو هدف بیشینه‌سازی درآمد سالانه و بیشینه‌سازی حداقل انرژی تولیدی روزانه است. نتایج نشان می‌دهد مدل ANN به‌دست‌آمده، با ضریب رگرسیون برابر ۰/۹۷ از توانایی مناسب در پیش‌بینی قیمت برق برخوردار است. همچنین نتایج منحنی پارتو نشان می‌دهد درحالی‌که مقدار حداقل انرژی تولیدی روزانه از صفر تا حدود ۱۰۰۰ مگاوات در تغییر است، مقدار درآمد سالانه از ۲۴۵ تا ۲۱۵ میلیارد ریال تغییر می‌کند. به‌عبارت‌دیگر افزایش حداقل انرژی روزانه تولیدی از صفر به ۱۰۰۰ مگاوات، منجر به کاهش ۳۰ میلیارد ریالی در درآمد سالانه بهره‌برداری از مخزن خواهد شد.

واژه‌های کلیدی

تولیدکننده برق آبی، بازار برق، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک چندهدفه، رفع اختلاف، Nash

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی. گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲. هیئت‌علمی گروه علوم و مهندسی آب. دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir

۳. هیئت‌علمی گروه مهندسی برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

مقدمه

پانیگراهی^۳، (۲۰۱۴). نتایج به‌دست‌آمده از مدل شبیه‌سازی با استفاده هم‌زمان از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح و مدل ARMA-GARCH، نشان می‌دهد استفاده از نتایج مدل ارائه‌شده موجب افزایش سود حاصل از فروش برق نیروگاه کارون ۴ شده است (کبیری و همکاران، ۱۳۹۴).

همچنین در زمینه بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن برق‌آبی می‌توان به بهینه‌سازی بهره‌برداری کوتاه‌مدت یک نیروگاه برق‌آبی در بازار برق رقابتی (پرز-دیاز^۴ و همکاران، ۲۰۱۰)، استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری جامع پیشرفته از دحام ذرات (ESLPSO) در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های برق‌آبی چندمخزنه (ژانگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۶) و استفاده از مدل بهینه‌سازی تصادفی برای برنامه‌ریزی هفتگی یک سیستم برق‌آبی در بازارهای روز قبل و رزرو در بازار برق کشور اسپانیا (چازاررا^۶ و همکاران، ۲۰۱۶) اشاره نمود. در زمینه بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن برق‌آبی با احتساب کشش قیمتی برق، با بهره‌گیری از معادله تابع تقاضا یک مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن از نوع برنامه‌ریزی پویا توسعه یافت (مازندرانی زاده و همکاران، ۱۳۸۶).

از آنجاکه در بیشتر برنامه‌ریزی‌هایی که در طبیعت صورت می‌گیرد بیش از یک هدف وجود دارد، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. استفاده از مدل بهینه‌سازی چندهدفه MOQPSO که مبتنی بر مدل PSO است برای بهینه‌سازی برنامه تولید برق نیروگاه حرارتی نشان از توانایی این روش در مقایسه با روش‌های سنتی بهینه‌سازی دارد (فنگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۷). معرفی جواب‌های اولیه به روش بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم ژنتیک (NSGA-II)^۸ در بهره‌برداری بلندمدت مخزن با دو هدف متعارض کاهش کل کمبود و کاهش بیشترین کمبود نیاز منجر به بهبود قابل توجه منحنی پارتو شد (اسرینیواسان و کومار^۹، ۲۰۱۸). همچنین استفاده از NSGA-II در

بازار عمده‌فروشی برق ایران به‌طور رسمی از آبان ماه ۱۳۸۲ شروع به فعالیت نمود. مکانیسم پرداخت به فروشندگان برمبنای روش "پرداخت برمبنای پیشنهاد" (PAB)^۱ است. بازار برق ایران از نظر بازه زمانی اجراء، بازار روز بعد بوده و یک روز قبل از معامله، برندگان بازار تعیین می‌شوند (افشار و ریاحی، ۱۳۸۸). تولیدکنندگان برق‌آبی ضروری است که بر اساس پیش‌بینی قیمت برق، پیش‌بینی شرایط مخزن و مکانیسم بازار استراتژی مناسبی برای قیمت‌دهی اتخاذ نمایند. در چنین بازارهایی سود نهایی تولیدکنندگان نه تنها متأثر از مقدار تولید است بلکه به زمان تولید نیز وابسته است. به‌عبارت‌دیگر بهره‌برداران نیروگاه‌های برق‌آبی باید ضمن پیش‌بینی قیمت برق، اقدام به برنامه‌ریزی تولید نمایند.

شیوه‌های پیش‌بینی قیمت برق که تا به امروز در دیگر بازارها بکار رفته است، برای پیش‌بینی قیمت برق در بازارهای آتی نیز مورداستفاده قرار گرفته‌اند. باین‌حال، وجود برخی خواص ویژه بازار برق موجب شده است تا خطای پیش‌بینی بالا باشد. تلاش برای بهبود این نتایج در مقالات متعدد صورت گرفته است. نتایج تحقیق انجام‌شده مطابق با روش‌شناسی سری‌های زمانی با تمرکز بر مدل‌های ARMAX-GARCH، نشان از توانایی این مدل‌ها در مدیریت ریسک قیمت دارد (منظور و یادی‌پور، ۱۳۹۵). با استفاده از تبدیل موجک و ترکیبی از شبکه عصبی و منطق فازی برخی محققین اقدام به ارائه مدل پیش‌بینی کوتاه‌مدت قیمت برق در یک بازار رقابتی نمودند (کاتالائو^۲ و همکاران، ۲۰۱۱). در زمینه پیش‌بینی قیمت برق استفاده از نوعی تکنیک شبکه عصبی به نام ماشین یادگیری سریع (ELM) و ترکیب آن با تکنیک موجک باعث بهبود دقت پیش‌بینی و نیز افزایش قابلیت اطمینان شده است. عملکرد مدل‌های فوق، با استفاده از اطلاعات موجود در بازارهای برق انتاریو، نیویورک و ایتالیا ارزیابی شده است (شیرواستاوا و

۶. Chazarra

۷. Feng

۸. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

۹. Srinivasan and Kumar

۱. Pay As Bid

۲. Catalao

۳. Shirvastava and Panigrahi

۴. Perez-Diaz

۵. Zhang

یک است که در b ضرب شده و سپس با wp جمع می‌شود. بدین ترتیب خروجی نورون به صورت معادله زیر قابل تعریف است:

$$a = f(wp + b) \quad (1)$$

که در آن f تابع تبدیل است و نوع آن توسط طراح شبکه انتخاب می‌شود (اندرسون و مک نیل^۴، ۱۹۹۲).

مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II:

شکل کلی مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به صورت زیر است:

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

به طوری که x بردار جواب، $f_i(x)$ تابع هدف i ام 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). الگوریتم کلی روش NSGA-II که در سال ۲۰۰۲ توسط دب^۵ و همکاران، به منظور رفع نواقص مدل اولیه ارائه گردید به شرح زیر است (کوئلو^۶ و همکاران، ۲۰۰۷):

۱. ایجاد جمعیت اولیه به تعداد N

۲. محاسبه برازندگی هریک از جواب‌ها بر اساس M تابع هدف

۳. خوشه‌بندی جواب‌ها به جبهه‌های پارتو^۷ مختلف: 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 در تمام اهداف بهتر یا مساوی با آن باشد و در حداقل یک هدف از آن بهتر باشد. به عبارت دیگر:

بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم سه مخزنی در کشور چین باعث شکل‌گیری مجموعه‌ای از بهترین جواب‌ها در منحنی بهینه پارتو شده است (دایی^۱ و همکاران، ۲۰۱۷). استفاده از مدل بهینه‌سازی GA به صورت موازی در حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن برق آبی با دو هدف متعارض افزایش سود حاصل از بهره‌برداری و حفظ نیازهای اکولوژیکی پایین دست حکایت از قدرت مدل پیشنهادی دارد (فنگ^۲ و همکاران ۲۰۱۸).

با توجه به اهمیت موضوع بازارهای PAB و انعطاف‌پذیری نحوه بهره‌برداری از مخازن برق آبی، مرور سوابق مطالعات انجام شده در زمینه بهره‌برداری از مخازن برق آبی نشان می‌دهد مدلی که ضمن پیش‌بینی قیمت برق اقدام به پیشینه‌سازی درآمد کل نماید تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق تلاش شده که در ابتدا با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۳ قیمت انرژی در ساعت‌های اوج مصرف در PAB پیش‌بینی شده و سپس با استفاده از NSGA-II مدلی به منظور برنامه‌ریزی تولید انرژی برق آبی با هدف‌های: ۱- پیشینه‌سازی درآمد سالانه و ۲- پیشینه‌سازی حداقل انرژی تولید شده روزانه ارائه گردد. در نهایت با استفاده از روش‌های حل اختلاف، به انتخاب جواب بهینه نهایی در بین جواب‌های به دست آمده پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

شبکه عصبی مصنوعی:

یک شبکه عصبی از نورون‌های مصنوعی تشکیل شده است. نورون یا گره کوچک‌ترین واحد پردازش اطلاعات است که اساس عملکرد شبکه‌های عصبی را تشکیل می‌دهد. هر یک از نورون‌ها، ورودی‌ها را دریافت نموده و پس از پردازش روی آن‌ها، یک سیگنال خروجی تولید می‌نمایند. اگر p و a ، به ترتیب ورودی و خروجی نورون باشند میزان تأثیر p روی a به وسیله مقدار عدد w تعیین می‌شود. ورودی دیگر مقدار ثابت

۷. Coello Coello
۸. Pareto Frontiers

۲. Dai
۳. Feng
۴. Artificial Neural Networks
۵. Anderson and Mc Neill
۶. Deb

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

روش انتخاب نقطه بهینه:

مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه دارای جواب واحدی نیستند و جواب آن‌ها از تعدادی جواب نامغلوب واقع بر جبهه پارتو اول تشکیل شده است. روش‌هایی برای انتخاب یک نقطه بهینه نهایی از میان جواب‌های واقع بر سطح پارتو وجود دارد. نش متقارن^۷: بر اساس رابطه نش، نقطه تعادل جایی است که حاصل ضرب فاصله هر یک از اهداف از حداقل خود، ماکزیمم شود.

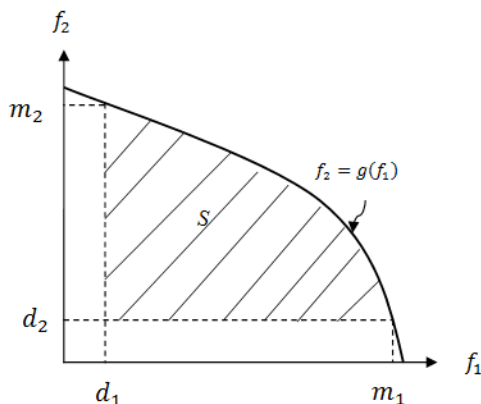
$$\text{maximize } (f_1 - d_1)(f_2 - d_2)$$

$$\text{S.t.} \quad (6)$$

$$d_1 \leq f_1 \leq m_1$$

$$d_2 \leq f_2 \leq m_2$$

f_i تابع هدف i ، d_i و m_i به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار تابع هدف f_i است. چنانچه بهینه‌سازی دو هدف f_1 و f_2 موردنظر باشد شکل (۱) به ارائه تصویری پارامترهای رابطه بالا می‌پردازد (نصیرزاده و همکاران، ۱۳۹۳).



شکل (۱): روش نش بر روی مجموعه جواب S برای دو تابع هدف

روش نش نامتقارن^۸:

$$(3) \quad (f_i(x_1) \geq f_i(x_2), \forall i = 1, 2, 3, \dots, M) \& (f_i(x_1) > f_i(x_2), \exists i = 1, 2, 3, \dots, M)$$

بر اساس این رابطه و برحسب اینکه جواب موردنظر توسط چه تعداد جواب دیگر مغلوب شده باشند، جواب‌ها به جبهه‌های پارتو ۱، ۲ و ... خوشه‌بندی می‌شوند. جواب‌های واقع بر یک جبهه با یکدیگر نامغلوب هستند.

۴. محاسبه فاصله ازدحامی^۱: این پارامتر نشان‌دهنده فاصله هر جواب با جواب‌های اطراف آن است به عبارت دیگر تراکم جواب‌ها در اطراف هر جواب را می‌سنجد.

$$cd_k(x_i) = \frac{f_k(x_{i+1}) - f_k(x_{i-1}))}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \quad (4)$$

$$cd(x_i) = \sum_{k=1}^M cd_k(x_i) \quad (5)$$

به طوریکه $cd_k(x_i)$ فاصله ازدحامی جواب x_i به ازای تابع هدف k و $cd(x_i)$ کل فاصله ازدحامی جواب x_i به ازای تمام توابع هدف است. همچنین f_k^{\max} و f_k^{\min} به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار تابع هدف k است.

۵. تشکیل حوضچه ازدواج^۲: از بین جواب‌های موجود، بر اساس دو معیار زیر و با یکی از روش‌های انتخاب نظیر انتخاب رقابتی^۳ و یا چرخ رولت^۴ 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: به منظور حفظ تنوع جواب‌ها اگر x_1 و x_2 دو عضو از یک جبهه پارتو باشند، عضو با فاصله ازدحامی بیشتر انتخاب می‌شود.

۶. انجام عملیات تقاطع^۵ و جهش^۶ برای تولید فرزندان جدید.

۷. تلفیق جمعیت اولیه و فرزندان.

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

۶. Mutation

۷. Symmetric Nash solution

۸. Non-Symmetric Nash solution

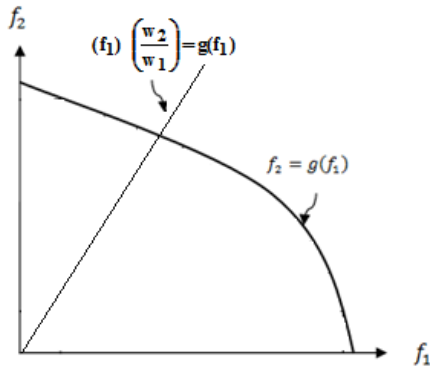
۱. Crowding Distance

۲. Mating Pool

۳. Tournament

۴. Roulette wheel

۵. Cross Over



شکل (۲): نمایی از انتخاب نقطه بهینه توسط روش Kalai-Smorodinsky

روش Monotonic Area:

این روش مبتنی بر تقسیم فضای زیر منحنی پارتو به دست آمده (فضای S)، به دو قسمت مساوی توسط یک خط راست است. اگر اهمیت اهداف با هم برابر نباشد، در نتیجه توان اختصاص داده شده به آن‌ها نیز برابر نبوده و خط متمایل به سمت هدف با اهمیت بیشتر می‌شود (روش نامتقارن). با استفاده از ریشه معادله غیرخطی (۱۰)، می‌توان جواب بهینه را انتخاب نمود.

$$w_2 \left[\int_{d_1}^x g(t) dt - \frac{1}{2}(x - d_1)(g(x) + d_2) \right] = \quad (10)$$

$$w_1 \left[\int_x^{m_1} g(t) dt - (m_1 - x) d_2 + \frac{1}{2}(x - d_1)(g(x) - d_2) \right]$$

مدل بهینه‌سازی پیشنهادی:

هدف یک تولیدکننده برق آبی از شرکت در بازار، کسب بیشترین منافع در عین توجه به حداقل انرژی تولیدی روزانه است. توابع هدف مدل دوهدفه بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن به صورت رابطه (۱۱) بیان می‌شود.

این روش توسط سلتن و هارسنی^۱ در سال ۱۹۷۲ معرفی شده است. در روش نش نامتقارن همان‌گونه که از نام آن مشخص است به مدل اجازه داده می‌شود که اهداف درجه اهمیت متفاوتی داشته باشند. این روش کاملاً شبیه روش نش متقارن است ولی می‌توان به هدف با اهمیت بیشتر، توان بزرگ‌تری داده و اثر آن را در انتخاب یک نقطه از پارتو بیشتر نمود. رابطه (۷) چگونگی این روش را نشان می‌دهد.

$$\text{maximize } (f_1 - d_1)^{w_1} (f_2 - d_2)^{w_2} \quad (7)$$

s.t.

$$d_1 \leq f_1 \leq m_1$$

$$f_2 = g(f_1)$$

w_1 و w_2 به ترتیب توان‌های هدف‌های ۱ و ۲ هستند و درجه اهمیت اهداف را نشان می‌دهند.

روش Kalai-Smorodinsky:

رابطه (۸) توسط کالای و اسمورودینسکی^۲ در سال ۱۹۷۵ ارائه شده است.

$$d_2 + \left[\frac{(m_2 - d_2)}{(m_1 - d_1)} \right] (f_1 - d_1) \left(\frac{w_2}{w_1} \right) - f_2 = 0 \quad (8)$$

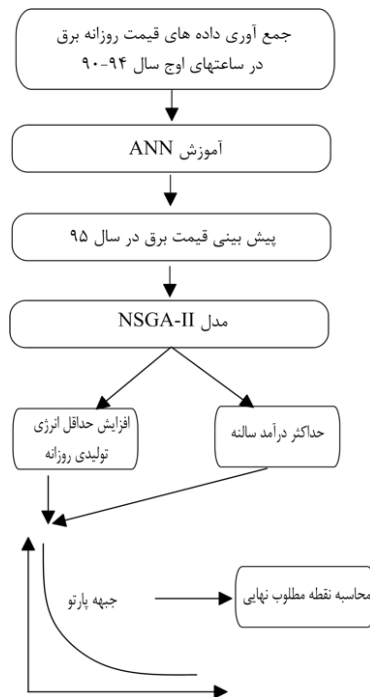
s.t.

$$d_1 \leq f_1 \leq m_1$$

$$f_2 = g(f_1)$$

اگر هر دو هدف نرمال شود در نتیجه $d_2 = d_1 = 0$ و $m_2 = m_1 = 0$ می‌شود. پس رابطه (۹) حاصل می‌شود که رابطه بین یک خط راست و منحنی پارتو است (شکل ۲). w_2/w_1 شیب خط متقاطع با پارتو را نشان می‌دهد که با تغییر مقادیر آن‌ها، جواب بهینه متفاوتی به دست می‌آید.

$$f_1 \left(\frac{w_2}{w_1} \right) = g(f_1) \quad (9)$$



شکل (۳): مراحل اجرای مدل پیشنهادی

مطالعه موردی:

جهت اجرای مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، سد کارون ۵ از حوزه آبریز کارون به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. رودخانه کارون به‌عنوان مهم‌ترین و پرآب‌ترین منبع آبی کشور محسوب می‌گردد. حوزه آبریز رودخانه کارون در بالادست محور پیشنهادی سد کارون ۵ در محدوده ۵۰' - ۴۹° تا ۵۱' - ۵۰° درجه طول شرقی و ۳۱' - ۲۱° تا ۳۲' - ۲۶° درجه عرض شمالی گسترده شده است. مهم‌ترین شاخه‌های این رودخانه عبارتند از کیار، جهان‌بین، شلمزار، کوهرنگ و آب و ننگ 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 (۴) موقعیت سد کارون ۵ در کنار سایر سدهای احداث شده بر رودخانه کارون نمایش می‌دهد.

$$\text{maximize } \sum_{t=1}^{365} (Income_t) \text{ \& maximize (min } E_t)$$

Subject to:

$$Income_t = Pr_t \times E_t$$

$$Pr_t = ANN(Pr_{t-1}, \dots, Pr_{t-7}, Pr_{t-14}, \dots, \quad (11)$$

$$Pr_{t-91}, Pr_{t-343}, Pr_{t-350}, \dots, Pr_{t-365})$$

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t - Ev_t - Sw_t$$

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

$$0 \leq R_t \leq R_{\max}$$

$$Ev_t = f(S_t, S_{t+1})$$

$$E_t = 2730 \times u \times h_{net} \times R_t$$

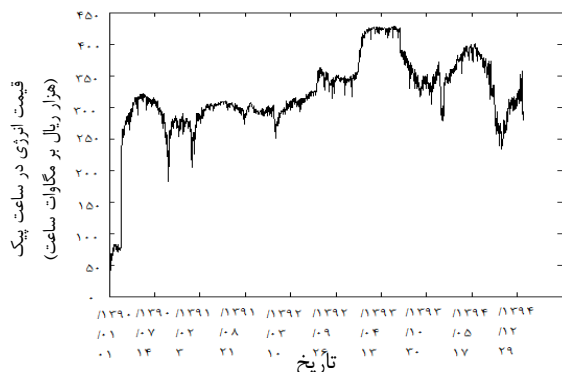
$$E_{\min} \leq E_t \leq E_{\max}$$

$$h_{net} = h_t - h_{tw}$$

$$h_t = g(S_t)$$

در رابطه فوق $Income_t$ عبارت از درآمد روزانه (برحسب هزار ریال)، Pr_t قیمت پیک انرژی روزانه (هزار ریال بر مگاوات ساعت) که بر اساس مدل ANN توسعه داده شده بر مبنای قیمت روزهای گذشته قابل محاسبه است، E_t انرژی تولیدی در روز t (مگاوات ساعت)، S_t حجم مخزن در ابتدای روز t (میلیون مترمکعب)، I_t جریان ورودی به مخزن در روز t (میلیون مترمکعب)، R_t جریان خروجی از مخزن در طول روز t (میلیون مترمکعب)، مقدار تبخیر از مخزن در روز t (میلیون مترمکعب) که تابعی از حجم مخزن در ابتدا و انتهای دوره است، Sw_t مقدار سرریز از سد 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 (میلیون مترمکعب)، u راندمان نیروگاه و h_{net} ارتفاع آب خالص روی نیروگاه (متر) است که از $h_{net} = h_t - h_{tw}$ قابل محاسبه است. h_{tw} تراز آب در پایاب نیروگاه و h_t تراز آب مخزن در روز t است که بر اساس منحنی سطح-حجم-ارتفاع تابعی از حجم مخزن در آن روز است. E_{\min} و E_{\max} به ترتیب حداقل و حداکثر انرژی تولیدی روزانه است. E_{\min} برابر صفر و E_{\max} برابر حاصل ضرب تعداد ساعت کار نیروگاه در ظرفیت نصب است. شایان ذکر است در محاسبات بالا تمام افت‌های موضعی و اصطحاکای در ضریب راندمان نیروگاه (u) لحاظ شده است و از بررسی مستقل آن‌ها صرف نظر شده است. در شکل (۳) مراحل اجرای مدل پیشنهادی نمایش داده شده است.

بین ساعات ۱۹ تا ۲۳ و در نیمه دوم سال بین ساعات ۱۸ تا ۲۲ در نظر گرفته شده است که نمودار آن در شکل (۵) نشان داده شده است.



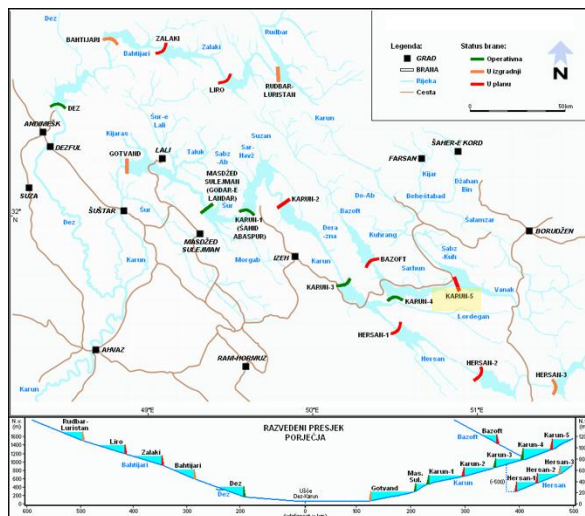
شکل (۵): قیمت روزانه انرژی در ساعات های پیک بین سال های ۹۰ تا ۹۴

بررسی قیمت های ثبت شده نشان می دهد تغییرات قیمت نه تنها متأثر از فصل است بلکه به روز هفته نیز وابسته است، به عنوان مثال قیمت در روزهای ابتدایی هفته گران تر 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 (رابطه ۱۲). به منظور افزایش دقت عملکرد مدل ANN داده های ورودی با

$$\text{استفاده از رابطه } x^N = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \text{ نرمال شدند.}$$

$$\begin{aligned} x(t) = ANN & [x(t-1), x(t-2), x(t-3), \\ & x(t-4), x(t-5), x(t-6), x(t-7), \\ & x(t-14), x(t-21), x(t-28), x(t-35), \\ & x(t-42), x(t-49), x(t-56), \\ & x(t-63), x(t-70), x(t-77), \\ & x(t-84), x(t-91), x(t-343), \\ & x(t-350), x(t-357), x(t-364)] \end{aligned} \quad (12)$$

در رابطه بالا $x(t)$ قیمت برق در روز t است. پس از آزمایش شبکه های مختلف از نظر تعداد لایه، تعداد نرون و الگوریتم های مختلف آموزش، یک شبکه پرسپترون دولایه با یک لایه پنهان و ۱۰ نرون و یک لایه خروجی و یک نرون،



شکل (۴): موقعیت کلی منطقه طرح

مساحت حوزه آبریز سد ۱۰۱۸۶ کیلومترمربع و آبدهی میانگین سالانه آن در شرایط اقلیمی (بدون هیچ گونه برداشت) برابر ۱۱۳/۶ مترمکعب بر ثانیه یا ۳۵۸۵ میلیون مترمکعب در سال است. همچنین بارندگی میانگین حوزه ۶۱۳ میلی متر در سال حاصل گردیده است. جدول (۱) اطلاعات مطالعه موردی را نمایش می دهد.

جدول (۱): اطلاعات مطالعه موردی

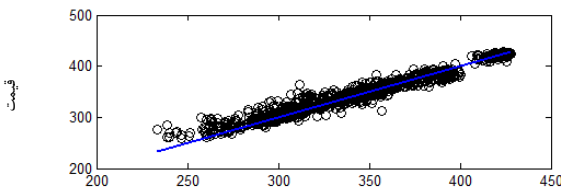
حجم ماکزیمم مخزن	۲۰۱۳	میلیون مترمکعب
حجم مینیمم مخزن	۱۲۲۰	میلیون مترمکعب
حداکثر جریان خروجی مخزن	۳۰/۲۳	میلیون مترمکعب در روز
ظرفیت نصب نیروگاه	۳۳۶	مگاوات
راندمان توربین	٪۹۲	—
تراز آب در پایاب نیروگاه	۱۰۳۱/۴	متر

نتایج و بحث

الف- نتایج مدل ANN

داده های 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

شکل (۶-الف): میزان انطباق داده‌های خروجی بر داده‌های ورودی



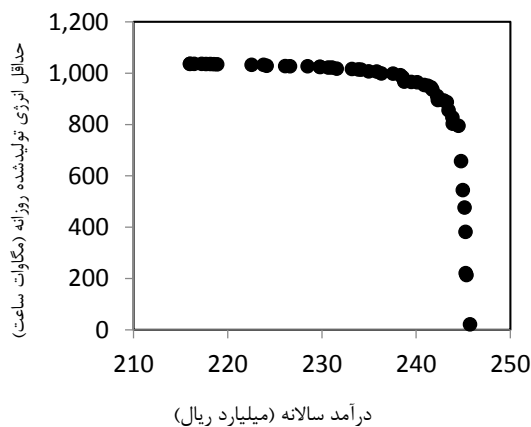
شکل (۶-ب): میزان همبستگی مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده

شکل (۶): میزان انطباق داده‌های خروجی بر داده‌های ورودی

ب- نتایج مدل بهینه‌سازی دوهدفه

مدل NSGA-II با پارامترهایی شامل تعداد اعضای جمعیت ۱۰۰ عضو، تعداد نسل برابر ۲۰۰، نرخ ازدواج ۰/۸ و نرخ جهش ۰/۲ و زمان اجرای در حدود ۲۰۰۰ ثانیه در محیط نرم‌افزار Matlab 2014 با پردازشگر مرکزی دو گیگاهرتز، حافظه چهار مگابایت اجرا شد.

نتایج بهینه‌سازی دوهدفه NSGA-II در شکل (۷) ارائه شده است. محور X و Y به ترتیب نمایش‌دهنده هدف‌های مدل، درآمد سالانه و حداقل انرژی تولیدشده روزانه است.



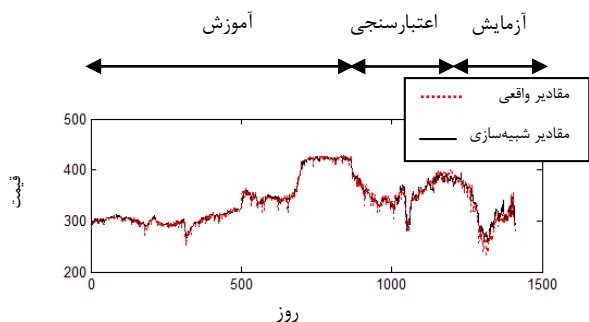
شکل (۷): نتایج حاصل از NSGA-II

با الگوریتم آموزش لونیگ-مارکوات^۱ مورد استفاده قرار گرفته است. تابع تانژانت سیگموئید برای لایه پنهان و تابع خطی برای لایه خروجی به عنوان تابع تبدیل در نظر گرفته شده است.

در جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی کل داده‌ها، داده‌های آموزش، داده‌های اعتبارسنجی و داده‌های آزمایش آمده است. به منظور بررسی کارایی مدل از معیارهای میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب رگرسیون (R) استفاده شده است. با توجه به این که نتیجه شبیه‌سازی بر اساس نتایج داده‌های آزمایش صورت می‌گیرد این مدل با ضریب رگرسیون و میانگین مربعات خطا به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۷۲، از توانایی مناسبی در پیش‌بینی اطلاعات آینده برخوردار است. شکل (۶) میزان انطباق داده‌های خروجی را بر داده‌های ورودی نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۶-الف) دیده می‌شود، اطلاعات ورودی شبکه به سه بخش تقسیم شده که ۶۰٪ به آموزش شبکه، ۲۰٪ به اعتبارسنجی و ۲۰٪ نیز به آزمایش شبکه اختصاص یافته است. داده‌های اعتبارسنجی و آموزش از انتهای سری زمانی انتخاب شدند. شکل (۶-ب) به نمایش میزان همبستگی مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده می‌پردازد.

جدول (۲): نتایج آموزش شبکه عصبی

MSE	R	
۲۵/۳۰	۰/۹۹۴	داده‌های آموزش
۱۰۱/۵۲	۰/۹۴۳	داده‌های اعتبارسنجی
۲۶۸/۰۲	۰/۹۷	داده‌های آزمایش
۷۲/۲۶	۰/۹۸۳	کل داده‌ها



به عبارت دیگر بهره‌برداران باید ضمن پیش‌بینی قیمت پیک روزانه، نسبت به برنامه‌ریزی بهره‌برداری با توجه به کلیه محدودیت‌ها نظیر رعایت حجم حداقل، حجم حداکثر، خروجی و ... اقدام نمایند. در این مطالعه با استفاده از داده‌های قیمت روزانه برق در بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴ اقدام به توسعه مدل ANN به منظور پیش‌بینی قیمت برق در سال ۱۳۹۵ شد. مدل ANN به دست‌آمده از توانایی قابل قبولی برای پیش‌بینی قیمت‌های آینده برخوردار است. سپس با استفاده از مدل بهینه‌سازی NSGA-II اقدام به ارائه مدلی دوهدفه به منظور افزایش درآمد سالانه و بهینه‌سازی حداقل انرژی تولیدشده گردید. نتایج حاصل از این مدل محدود و وسیعی از جواب‌ها است که با یکدیگر نامغلوب بوده و در بعضی درآمد سالانه بهینه بوده، در بعضی حداقل انرژی تولیدشده روزانه بهینه بوده و در برخی به هر دو هدف توجه شده است. به منظور انتخاب یک جواب از بین جواب‌های ارائه شده از روش‌های رفع اختلاف Nash، Kalai-Smorodinsky و Area Monotonic استفاده شد.

مراجع

- ۱- افشار، ک؛ و ریاحی، ر. (۱۳۸۸). "تجدید ساختار در صنعت برق و گذری بر بازار برق ایران"، شرکت مدیریت شبکه برق ایران، ۱۴۰ صفحه.
- ۲- کبیری، ا. زهرانی، ب؛ و پورسپاهی سامیان، ح. (۱۳۹۴). "بهینه‌سازی غیرقطعی پیشنهاددهی قیمت تولید انرژی برق آبی در بازار برق ایران (مطالعه موردی سیستم برق آبی کارون)"، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز دانشکده مهندسی عمران.
- ۳- مازندرانی زاده، ح. موسوی، س. ج؛ و پرتوی‌راد، ف. (۱۳۸۶). "بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن با احتساب عوامل اقتصادی و قیمت انرژی برقایی"، مجله عمران و محیط‌زیست امیرکبیر، شماره ۶۹، صفحات ۸۳ تا ۹۳.
- ۴- مازندرانی زاده، ح. (۱۳۹۵). "طراحی سیستم زهکشی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II با رویکرد اقتصادی-زیست‌محیطی"، مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال دوازدهم، شماره ۳، صفحات ۱۴۲ تا ۱۵۲.
- ۵- منظور، د؛ و یادی پور، م. (۱۳۹۵). "ارزیابی و پیش‌بینی نوسانات قیمت در بازار برق ایران به کمک مدل ARMAX-GARCH"، فصلنامه اقتصاد مقداری، دوره سیزده شماره ۱، صفحات ۹۷ تا ۱۱۷.

نتایج شکل (۷) نشان می‌دهد اگر حداقل انرژی تولیدشده روزانه برابر بیشترین مقدار باشد درآمد سالانه کمترین مقدار ممکن خواهد شد و بالعکس اگر حداقل انرژی تولیدشده برابر حداقل مقدار باشد درآمد به بیشترین مقدار ممکن خواهد رسید. به عبارت دیگر دو هدف درآمد و حداقل انرژی تولیدشده رابطه‌ای معکوس با یکدیگر داشته و افزایش یکی از آن‌ها به کاهش دیگری منجر خواهد شد.

ج- نتایج حاصل از روش‌های حل اختلاف نتایج و محاسبات مربوط به روش نش متقارن، نش نامتقارن، Kalai-Smorodinsky و Area Monotonic در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳): جواب بهینه نهایی

روش انتخاب جواب مطلوب	درآمد سالانه (میلیارد ریال)	حداقل انرژی تولیدشده روزانه (مگاوات ساعت)
Nash	۲۴۳/۲	۸۸۷/۱۹
Non-Symmetric Nash, $w_1=2, w_2=1$	۲۴۳/۲	۸۸۷/۱۹
Non-Symmetric Nash, $w_1=1, w_2=2$	۲۴۱/۲	۹۵۰/۴۳
Kalai-Smorodinsky, $w_1=1, w_2=1$	۲۴۲/۲	۹۱۰/۶۲
Kalai-Smorodinsky, $w_1=2, w_2=1$	۲۴۴/۹	۵۴۴/۲۷
Kalai-Smorodinsky, $w_1=1, w_2=2$	۲۳۰/۶	۱۰۲۱/۷۳
Area Monotonic, $w_1=1, w_2=1$	۲۲۶/۱	۱۰۲۷/۰۷
Area Monotonic, $w_1=2, w_2=1$	۲۳۰/۶	۱۰۲۱/۷۳
Area Monotonic, $w_1=1, w_2=2$	۲۲۲/۵	۱۰۳۲/۲۸

بررسی نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد استفاده از روش‌های مختلف رفع اختلاف در شرایطی که هر دو هدف از اهمیت یکسان برخوردار باشند به نتایج یکسان منجر خواهد شد.

نتیجه‌گیری

شکل‌گیری بازار رقابتی برق در کشور ایران، امکان تأمین برق در ساعت‌های پیک از طریق انرژی برق آبی، پیش‌بینی قیمت برق، انعطاف‌پذیری بهره‌برداری از مخازن برق آبی و مشخصات بازارهای PAB بر اهمیت روزافزون انجام مطالعه بر نحوه بهره‌برداری بهینه از مخازن برق آبی تأکید دارد. مقدار درآمد حاصل از بهره‌برداری از مخازن برق آبی به سه عامل: مقدار تولید، زمان تولید و قیمت برق در زمان تولید بستگی دارد.

for electricity markets." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55, 41-50.

- 19- Srinivasan, K. & Kumar, K. (2018). "Multi-objective simulation-optimization model for long-term reservoir operation using piecewise linear hedging rule". *Water resources management*, 132(5), 1901-199.
- 20- Zhang, X. YU, X. & Qin, H. (2016). "Optimal operation of multi-reservoir hydropower systems using enhanced comprehensive learning particle swarm optimization." *Journal of Hydro-environment Research*, 10, 50-63.
- ۶- نصیرزاده، ف. مازندرانی‌زاده، ح. روح‌پرور، م. (۱۳۹۳). "تخصیص کمی ریسک در پروژه‌های ساخت با رویکرد نظریه بازی‌های همکارانه"، *مجله مهندسی سازه و ساخت*، دوره اول، شماره ۱، صفحات ۵۸ تا ۷۱.
- 7- Anderson, D. & Mc neill, G. (1992). "Artificial neural networks technology". *Kaman Sciences Corporation*, 258, 1-83.
- 8- Catalao, J. P. D. S. Pousinho, H. M. I. & Mendes, V. M. F. (2011). "Short-term electricity prices forecasting in a competitive market by a hybrid intelligent approach." *Energy Conversion and Management*, 52, 1061-1065.
- 9- Chazarra, M. Garcia-Gonzalez, J. Perez-Diaz, J. I. & Arteseros, M. (2016). "Stochastic optimization model for the weekly scheduling of a hydropower system in day-ahead and secondary regulation reserve markets." *Electric Power Systems Research*, 130, 67-77.
- 10- Coello Coello, C.A. Lamont, G.B. VanVeldhuizen, D.A. (2007). "Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems." *Springer*, 2nd Ed. New York, USA.
- 11- Dai, L. Peipei, Z. Wang, Y. Jiang, D. Dai, H. Mao, H. and Wang, M. (2017). "Multi-objective optimization of cascade reservoirs using NSGA-II: A case study of the Three Gorges-Gezhouba cascade reservoirs in the middle Yangtze River, China". *Human and Ecological Risk Assessment*, 23(4), 814-835.
- 12- Deb, K. Pratap, A. Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002), "A Fast and Elitist Multi objective Genetic Algorithm: NSGA-II". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6, 182-197.
- 13- Feng, Z. Niu W. and Cheng C. (2017). "Multi-objective quantum-behaved particle swarm optimization for economic environmental hydrothermal energy system scheduling". *Energy*, 131, 165-178.
- 14- Feng, Z. Niub W. and Cheng, C. (2018). "Optimization of hydropower reservoirs operation balancing generation benefit and ecological requirement with parallel multi-objective genetic algorithm". *Energy*, 153, 706-718.
- 15- Harsanyi, J. & Selten, R. (1972) "A Generalized Nash Solution for Two-Person Bargaining Games with Incomplete Information". *Management Science*, 18(5), 80-106.
- 16- Kalai, E. & Smorodinsky, M. (1975). "Other solutions to Nash's bargaining problem". *Econometrica*. 43 (3): 513–518.
- 17- Perez-Diaz, J. I. Wilhelmi, J. R. & Arevalo, L. A. (2010). "Optimal short-term operation schedule of a hydropower plant in a competitive electricity market." *Energy Conversion and Management*, 51, 2955-2966.
- 18- Shirvastava, N. A. & Panigrahi, B. K. (2014). "A hybrid wavelet-ELM based short term price forecasting

Multi-Objective Optimization of Hydropower Reservoirs Based on P.A.B Markets

Maryam Parhizkari^۱

Hamed Mazandaarni Zadeh^{*۲}

Karim Afshar^۳

Abstract

Since November 2003 that Iran electricity market was established, the monopoly market has been changed to competitive market. In this market, electricity price forecasting is not only necessary to giving price but also is crucial to find the best strategy for powerplant operators. In this research, daily energy price at peak hours were forecasted by Artificial Neural Network and its results were used to run multi objective optimization of Karoon 5 reservoir operation. Two goals included maximization salary income and maximization of minimum daily produced energy was considered as the goals. Results show ANN model by 0.97 regression coefficient is an appropriate model to forecast the electricity energy price. Pareto curve shows while minimum daily energy production varies from 0 to 100 M.W., salary income decreases from 245 to 215 trillion Rials. In other words, minimum daily energy production increasement from 0 to 1000 M.W. leads to 30 trillion Rials decrease in salary income.

Keywords

Hydropower Producer, Electricity Market, Artificial Neural Network, Multi Objective Genetic Algorithm, Conflict Resolution, Nash

¹ .M.S. Graduated, Water Science and Engineering Group, IKIU, Qazvin, Iran

² * .Water Science and Engineering Group, IKIU, Qazvin, Iran, mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir

³ .Department of Electrical Engineering, IKIU, Qazvin, Iran