بهینه‌سازی هزینه انرژی مصرفی در سامانه‌های انتقال آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک

رسول رجب‌پور [۱*]، بهرام سامی کشکولی [۲]، طاهره فرجی [۳]، ابوالقاسم محمدزاده [۴]، سیف‌اله امین [۵]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیضا
۲- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، مهندسین مشاور رهاب اندیشان زاگرس شیراز
۳- کارشناس ارشد محیط‌زیست، مهندسین مشاور رهاب اندیشان زاگرس شیراز
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه شیراز
۵- استاد مهندسی عمران، دانشگاه شیراز
*پست الکترونیک نویسنده مسئول: rasou_1360l@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۲۸ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۱۲

چکیده

با تعیین برنامه زمانی مناسب بهره‌برداری از پمپ‌های یک سامانه انتقال آب می‌توان صرفه‌جویی قابل‌توجهی در میزان هزینه انرژی مصرفی به دست آورد. در این مقاله برنامه بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ با استفاده از الگوریتم ژنتیک به‌گونه‌ای تعیین گردید که هزینه انرژی مصرفی حداقل شود. برای مسئله تعیین برنامه بهره‌برداری بهینه پمپ‌ها یک مدل بهینه‌سازی-شبیه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک تهیه شد. در این مدل الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار متلب با بخش هیدرولیکی مدل ای‌پنت به‌عنوان مرجعی از فرامین و اطلاعات تلفیق گردید. از مدل پیشنهادی برای تعیین برنامه بهینه بهره‌برداری از سامانه انتقال آب از سد کوثر به شهر دوگنبدان در یک روز معمولی استفاده شد که مقایسه برنامه بهینه بهره‌برداری استخراج شده با حالت بهره‌برداری عادی، کاهشی برابر ۲۶/۸ درصد در هزینه انرژی مصرفی کل را نشان می‌دهد. این موضوع بیانگر تأثیر بسزای استفاده از این مدل در کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی در سامانه‌های انتقال آب تحت فشار می‌باشد.

کلیدواژگان: انرژی، بهینه‌سازی، ایستگاه پمپاژ، الگوریتم ژنتیک، بهره‌برداری

Optimization of Energy Cost in Water Supply Systems Using Genetic Algorithms

Rasoul Rajabpour [1*], Bahram Sami Kashkoli [2], Tahereh Faraji [3], Abolghasem Mohamadzadeh [4], Seyfollah Amin [5]

1-Ph.D Student in Civil Engineering, Islamic Azad University, Beyazeh Branch, Beyazeh, Iran
2- M.Sc. of Water Structures, Rahab Andishan Zagros Consulting Engineers, Shiraz, Iran
3. M.Sc. of Environmental Science, Consulting Engineers, Rayab Andishan Zagros, Shiraz, Iran
4- M.Sc. Student of Civil Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
5- Professor of Civil Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
*Corresponding author, E-mail address: rasou_1360l@yahoo.com

Received: 19.07.2017 Accepted: 03.09.2017

Abstract

In this paper, the optimal operation of pumping stations was determined using a genetic algorithm so that the minimum energy cost. The schedule for the operation of the water pump system can be a significant savings in the cost of energy to be achieved. Determine the optimum pump operation schedule an optimization model - simulation-based genetic algorithm was developed. The model integrates GA optimizer and EPANET hydraulic network solver in MATLAB. The proposed model is applied to find the optimal pump operation schedule of Dogonbadan water conveyance system from Kowsar Dam in an ordinary day of the year. The comparison of optimal schedule with ordinary operation strategy shows 26.8 percent reduction in total energy cost. This indicates the high capability of the proposed model.

Keywords: Energy, Optimization, Pumping station, Genrtic algorithm, Operation

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-10-19]

۱- مقدمه

امروزه امر آب‌رسانی به‌عنوان یکی از اولویت‌های کاری هر کشوری قرار دارد چراکه در صورت عدم تأمین آب شرب در شهرهای بزرگ تمامی امور آن‌ها مختل شده و باعث رکود در کارها و اختلال در جریان زندگی می‌شود. همچنین اختلال در امر آب‌رسانی به روستاها خسارات جبران‌ناپذیری را در بخش کشاورزی به همراه خواهد آورد. با توجه به هدفمند شدن یارانه‌ها و اهمیت هزینه آب مصرفی، توجه و دقت بیشتر در طراحی و بهره‌برداری ایستگاه‌های پمپاژ امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد؛ تا هزینه انجام کار بیهوده بالا نرفته و از مصرف بیهوده انرژی جلوگیری شود و آب مصرفی با قیمت کم‌تر و مناسب‌تر به دست مصرف‌کننده برسد.

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی عملکرد بهینه پمپ‌ها و ایستگاه‌های پمپاژ صورت گرفته است. به‌عنوان مثال مأکل و همکاران در زمینه بهره‌برداری بهینه (هزینه برق مصرفی) ایستگاه‌های پمپاژ تحقیقاتی انجام دادند. در تحقیق موردنظر آن‌ها از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان الگوریتم بهینه‌ساز استفاده شد [۱]. رودین و همکاران در دو مقاله جداگانه با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی ایستگاه‌های پمپاژ را برای مینیمم کردن هزینه در طول یک شبانه‌روز انجام دادند. تابع هدف مسئله آن‌ها انتخاب تعدادی پمپ از مجموعه‌ی پمپ‌های موجود و تعیین برنامه بهره‌برداری از این مجموعه انتخابی بود، به‌گونه‌ای که هزینه اجرا (مجموعه پمپ‌ها) و بهره‌برداری کمینه گردد [۲]. مرادی و همکاران با استفاده از الگوریتم ژنتیک مدل جدیدی را جهت طراحی و بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ کشاورزی ارائه دادند [۳ و ۴]. در این مدل با داشتن مشخصات پمپ‌های پیشنهادی و با توجه به منحنی نیاز در پایین‌دست ترکیب مختلفی از پمپ‌ها که می‌توانستند نیاز را برطرف سازند ساخته شد و سپس با کمک الگوریتم ژنتیک برای هر مجموعه ساخته شده، بهینه‌سازی انجام و سپس گزینه‌ای که دارای کمترین هزینه بود به‌عنوان گزینه نهایی انتخاب شد. رجب پور و افشار با استفاده از الگوریتم PSO برنامه بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ متوالی با پمپ‌های دور متغیر را با هدف کمینه‌سازی هزینه انرژی مصرفی ارائه نمودند [۵].

از الگوریتم ژنتیک به‌طور گسترده‌ای در حل مسائل مهندسی آب استفاده شده است. به‌عنوان مثال وانگ از الگوریتم ژنتیک برای کالیبره کردن یک مدل مفهومی بارش - رواناب استفاده کرد [۶]. سیمپسون و همکاران کارایی روش‌های شمارشی کامل، برنامه‌ریزی غیرخطی و الگوریتم ژنتیک را برای یک خط لوله نمونه با هم مقایسه کرده و به این نتیجه رسیدند که الگوریتم ژنتیک می‌تواند راه‌حل‌های قابل قبولی ارائه کند [۷ و ۸]. الگوریتم ژنتیک ارتقاء یافته توسط دندی و همکاران ابداع شد و برای طراحی شبکه توزیع آب تحت فشار با موفقیت استفاده گردید [۹]. رایتزل و همکاران یک مسئله آلودگی آب‌های زیرزمینی را با الگوریتم ژنتیک حل کردند [۱۰]. اولیویرا و لوکز از الگوریتم ژنتیک برای بررسی و ارزیابی قوانین بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی استفاده کردند [۱۱]. ویژگی برجسته الگوریتم ژنتیک در این زمینه، آزادی عمل آن در تعریف و مشخص کردن سیاست‌های بهره‌برداری و ارزیابی آن‌ها می‌باشد. در سال‌های اخیر نیز کارهای بسیاری در این زمینه صورت گرفته است؛ به‌عنوان نمونه چنگ و همکاران بهره‌برداری از مخازن نیروگاه‌های برق آبی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی بهینه‌سازی کردند [۱۲]. هاشمی و همکاران مطالعه‌ای پیرامون بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد توسط الگوریتم ژنتیک، با لحاظ کردن احتمالات در جریانات ورودی به مخزن به انجام رساندند [۱۳].

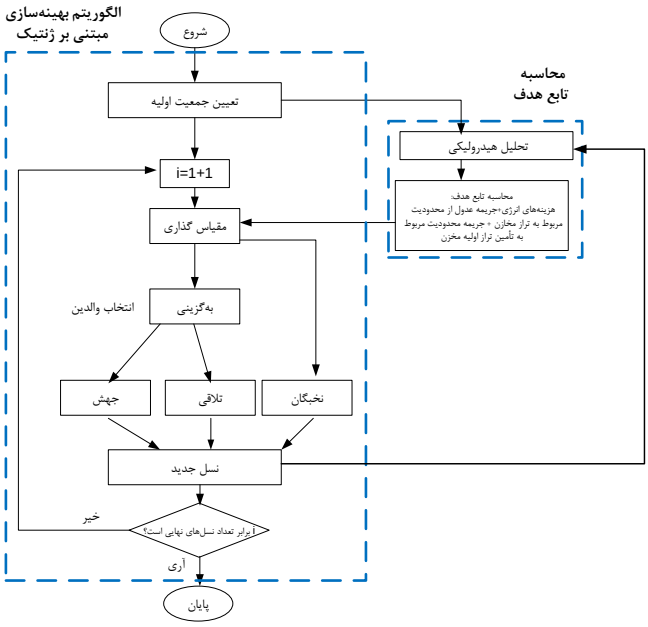
در بسیاری از ایستگاه‌های پمپاژ دستورالعمل خاصی جهت بهره‌برداری از پمپ‌ها وجود ندارد و اپراتور با توجه به نیاز و وضعیت آب موجود در مخازن بدون توجه به ساعات کم‌مصرف یا پرمصرف برق اقدام به روشن و خاموش کردن پمپ‌ها می‌نماید. این‌گونه بهره‌برداری هزینه‌های زیادی را به سیستم تحمیل می‌کند. در این پژوهش با توجه به محدودیت‌های موجود، دستورالعمل بهره‌برداری از پمپ‌های هر ایستگاه (وضعیت روشن-خاموش بودن پمپ‌ها) به‌گونه‌ای ارائه شده که هزینه بهره‌برداری کمینه شود. مدل پیشنهادی در مورد طرح آب‌رسانی از سد کوثر به شهر دوگنبدان استفاده شده و دستورالعمل بهره‌برداری بهینه استخراج و ارائه گردیده است.

۲- تشریح مدل بهینه‌سازی تهیه شده

شکل ۱ فلوچارت مدل کامپیوتری تهیه‌شده جهت تعیین دستورالعمل نحوه بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ متوالی را نشان می‌دهد. اساس کار این مدل تلفیق تحلیل‌گر هیدرولیکی (قسمت محاسبه تابع هدف) و الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار متلب می‌باشد. مدل بهینه‌سازی موردنظر در محیط نرم‌افزار متلب توسعه داده شده است. در این مدل جهت شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه و تعیین پارامترهای هیدرولیکی موردنیاز، بخش هیدرولیکی مدل ای‌پنت ۲

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-10-19]

[1]به‌عنوان مرجعی از فرامین و اطلاعات (DLL[2]) در محیط متلب وارد شده و با فراخوانی دستورات لازم شبکه موردنظر تحلیل هیدرولیکی می‌گردد. مدل بهینه‌سازی که برای مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ متوالی توسعه داده شده، در نرم‌افزار متلب با تحلیل‌گر هیدرولیکی شبکه تلفیق می‌گردد.



شکل ۱- فلوچارت مدل کامپیوتری تعیین دستورالعمل نحوه بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌ها

۳- مدل ریاضی

تابع هدف در مسئله مورد بررسی به حداقل رساندن میزان هزینه انرژی مصرفی در طول شبانه‌روز است. متغیرهای تصمیم وضعیت روشن و خاموش بودن پمپ‌های موجود در هر ایستگاه در ساعات مختلف شبانه‌روز می‌باشد. محدودیت‌های این مسئله را می‌توان در دو بخش، یکی مربوط به پمپ‌های موجود و نیاز در پایین‌دست و دیگری مربوط به مخازن ذخیره در هر ایستگاه تقسیم نمود.

تابع هدف در این مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MinCOST = \rho g \sum_{s=1}^{st}\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n(s)} \frac{Q_{i,j,s} H(IQ)_{j,s}}{e_{i,j,s}(Q_{i,j,s})\ \Delta t_j \times CE_j} \qquad (۱)$$

و محدودیت‌های مربوط به پمپ‌ها عبارت‌اند:

$$\sum_{j=1}^{m} Q_{i,j,s} = (IQ)_{j,s} \qquad (۲)$$

در روابط فوق متغیرها عبارت‌اند:

$COST$: هزینه انرژی متوسط مصرفی جهت پمپاژ منحنی گسسته مصرف مربوط به سیستم موجود که هدف تعیین مقدار کمینه آن است.

CE_j: هزینه مصرف انرژی برای هر کیلووات ساعت در تقسیم j ام منحنی گسسته مصرف.

$e_{i,j,s}(Q_{i,j,s})$: کارایی پمپ i ام در تقسیم j ام منحنی گسسته مصرف در ایستگاه s ام که تابعی از دبی عبوری از خود پمپ و ارتفاع پمپاژ مربوطه می‌باشد.

$H(IQ)_{j,s}$: ارتفاع خالص پمپاژ مربوط به دبی کل در تقسیم j ام منحنی گسسته مصرف در ایستگاه s (m).

$Q_{i,j,s}$: دبی عبوری از پمپ i ام در تقسیم j ام منحنی گسسته مصرف در ایستگاه s $(\frac{m^3}{s})$.

Δt_j: مدت زمان تقسیم j ام منحنی گسسته مصرف (hr)

$(IQ)_{j,s}$: دبی کل که در تقسیم j ام منحنی گسسته مصرف در ایستگاه $(IQ)_{j,s}$: $(\frac{m^3}{s})$. ماکزیمم دبی کل در ایستگاه s که می‌تواند در هر تقسیم منحنی گسسته مصرف پمپاژ شود.

i: اندیس مربوط به شماره پمپ.

j: اندیس مربوط به شماره تقسیم‌بندی منحنی گسسته مصرف.

s: اندیس مربوط به شماره ایستگاه.

$n(s)$: تعداد پمپ‌ها در ایستگاه s

m: تعداد تقسیمات منحنی گسسته مصرف.

st: تعداد ایستگاه‌های پمپاژ.

در این مسئله علاوه بر محدودیت‌های ذکر شده در بالا محدودیت مربوط به مخزن ذخیره هر ایستگاه پمپاژ نیز اعمال می‌شود. محدودیت مربوط به مخازن ذخیره عبارت است از:

$$h_{j,k} \le h_{max_s} \qquad (۳)$$

$$h_{j,k} \ge h_{min_s} \qquad (۴)$$

$h_{j,s}$ ارتفاع آب داخل مخزن s در زمان j از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$h_{j,k} = h_{j-1,k} + \frac{[I_{j,k} - O_{j,k}]}{surf_k} \qquad (۵)$$

که در آن h_{max_s} ارتفاع حداکثر مجاز ذخیره آب در مخزن k؛ h_{min_s} ارتفاع حداقل مجاز ذخیره آب در مخزن k؛ $h_{j,k}$ ارتفاع آب داخل مخزن k در زمان j؛ $surf_k$ مساحت کف مخزن k بر حسب مترمربع؛ $I_{j,k}$حجم آب ورودی پمپاژ شده به مخزن k

[1] EPANET2
[2] Dynamic link library

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-10-19]

در زمان j و $O_{j,k}$حجم آب خروجی پمپاژ شده از مخزن k در زمان j بر حسب مترمکعبی باشد که در آن j اندیس مربوط به شماره تقسیم‌بندی منحنی گسسته مصرف و k اندیس مربوط به شماره مخزن می‌باشد[۵].

۴- محاسبه تابع هدف

جهت شبیه‌سازی هیدرولیکی سیستم و تعیین پارامترهای هیدرولیکی موردنیاز از مدل ای‌پنت ۲ استفاده می‌شود. این مدل توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C در چندین بخش تهیه شده است. به دلیل حجم گسترده برنامه و پیچیدگی‌های ناشی از هماهنگ کردن قسمت‌های مختلف آن، بخش هیدرولیکی مدل ای‌پنت به‌عنوان مرجعی از فرامین و اطلاعات در محیط نرم‌افزار متلب وارد می‌شود و با فراخوانی دستورات لازم شبکه موردنظر تحلیل هیدرولیکی می‌گردد.

اولین گام در این قسمت تهیه یک مدل ای‌پنت از مسئله موردنظر می‌باشد. بدین منظور کلیه مشخصات شبکه از قبیل مشخصات خطوط لوله، شیرآلات، مخازن و تانک‌ها در مدل وارد می‌شوند. مشخصات پمپ‌های شبکه از قبیل منحنی کارکرد و منحنی راندمان آن‌ها برای مدل تعریف می‌شود. همچنین مقادیر مصرف و الگوی مصرف پایین‌دست و همچنین الگوی تغییرات قیمت انرژی در ساعات مختلف شبانه‌روز برای مدل تعریف می‌گردد.

چنانکه گفته شد، در الگوریتم بهینه‌ساز هر گزینه به‌صورت یک رشته صفر و یک نشان داده می‌شود. برای محاسبه تابع هدف یک گزینه، این رشته صفر و یک به‌صورت مجموعه‌ای از عبارت‌های کنترلی که تغییر وضعیت پمپ را دستور می‌دهند، برای مدل ای‌پنت تعریف شده و سپس مدل ای‌پنت به ازای مقادیر کنترل تنظیم شده حل می‌شود.

سپس با حل هیدرولیکی گزینه موردنظر، مقدار تابع هدف از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\text{Fitness value=Energy cost+Penalty1+Penalty2} \quad (۶)$$

هزینه انرژی توسط مدل ای‌پنت به‌صورت مستقیم محاسبه می‌گردد.

Penalty1: جریمه‌ای که برای تجاوز گزینه موردنظر از تراز حداکثر و حداقل مجاز مخازن در نظر گرفته می‌شود. مقدار این جریمه از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Penalty1 = \alpha \left\{ \begin{array}{c} \sum_{k=1}^{Nt}\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{H_k^t}{H_{min,k}}-1\right)^2 \\ + \\ \sum_{k=1}^{Nt}\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{H_k^t}{H_{max,k}}-1\right)^2 \end{array} \right\} \quad \forall \begin{cases} H_k^t < H_{min,k} \\ H_k^t > H_{max,k} \end{cases} \quad (۷)$$

در این رابطه k شماره مخزن، Nt تعداد کل مخازن، t شماره بازه زمانی موردنظر و T تعداد کل بازه‌های زمانی است که مقادیر عمق آب در مخازن محاسبه می‌شود. H_k^t مقدار عمق آب در مخزن k ام در دوره زمانی t ام می‌باشد. $H_{min,k}$ و $H_{max,k}$ به ترتیب حداقل و حداکثر عمق مجاز آب در مخزن k ام می‌باشند.

Penalty2: جریمه‌ای است که برای به وجود آمدن کمبود عمق در نظر گرفته می‌شود. کمبود عمق عبارت است از کمبود عمق مخزن ذخیره‌ای در انتهای دوره نسبت به عمق آن در ابتدای دوره. مقدار این جریمه از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

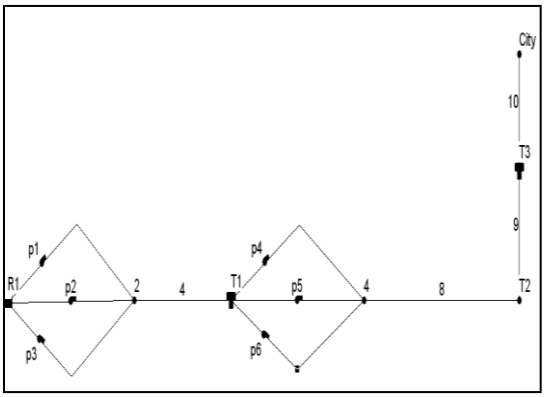
$$Penalty2 = \beta \left\{ \sum_{k=1}^{Nt}\left(\frac{H_k^T}{H_{Ini,k}}-1\right)^2 \right\} \quad (۸)$$

در این رابطه H_k^T عمق آب مخزن k ام در انتهای دوره زمانی و $H_{Ini,k}$ عمق اولیه آب در مخزن k ام می‌باشد.

لازم به ذکر است که α و β ضریب جریمه می‌باشند و مقدار مناسب آن‌ها در مسئله مورد بررسی پس از سعی و خطا به ترتیب برابر $\propto = 10^{10}$ و $\beta = 10^{11}$ تعیین گردیده است.

۵- مطالعه موردی

در این قسمت طرح آب‌رسانی از سد کوثر به شهر دوگنبدان مدل گردید و مسئله بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های موجود در این طرح مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ شماتیک مدل ای‌پنت سیستم تأمین آب شهر دوگنبدان از سد کوثر را نشان می‌دهد.



شکل ۲- شماتیک مدل Epanet سیستم تأمین آب شهر دوگنبدان از سد کوثر

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-10-19]

در جدول ۱ مشخصات تراز مخازن موجود در طرح ارائه شده است. برای آزمایش قابلیت مدل بهینه‌سازی تهیه شده یک روز معمولی با دبی ۲۵۰ لیتر در ثانیه در نظر گرفته می‌شود. سپس با در نظر گرفتن الگوی زمانی پیشنهادی برای شهرهای با جمعیت بین ۵۰ تا ۱۰۰ هزار نفر الگوی نیاز آبی پایین‌دست در ساعات شبانه‌روز تهیه شده و در جدول ۲ ارائه شده است.

در بیشتر موارد قیمت انرژی الکتریکی در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز متفاوت است. بر این اساس یکی از مهم‌ترین ارکان بهینه‌سازی هزینه‌های انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ، اطلاع از ساختار محاسبه قیمت انرژی الکتریکی در محل است. به‌طور کلی ساعات شبانه‌روز به ۳ دوره کم‌باری، میانباری و پرباری تقسیم شده و قیمت برق در هر دوره متفاوت است.

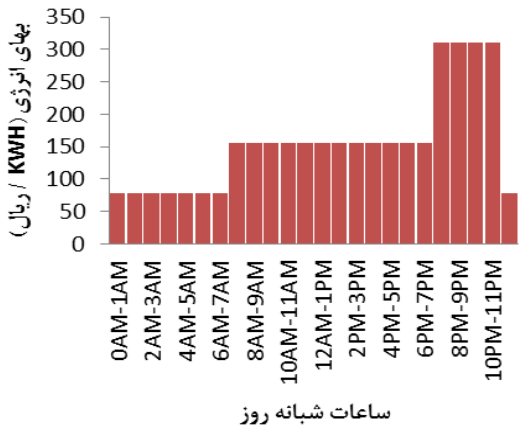
در این پژوهش بر اساس بخش‌نامه‌های رایج وزارت نیرو در محاسبه قیمت انرژی الکتریکی ساختار محاسبه قیمت انرژی به‌صورت شکل ۳ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات تراز مخازن طرح

	تراز کف مخزن (متر)	حداقل تراز آب در مخزن (متر)	حداکثر تراز آب در مخزن (متر)
مخزن ایستگاه پمپاژ ۲	۵۹۹	۵۹۹/۵	۶۰۳/۵
مخزن ذخیره ۲۰ هزار مترمکعبی	۸۰۶	۸۰۶/۵	۸۱۰/۵

جدول ۲- الگوی نیاز آبی پایین‌دست در ساعات شبانه‌روز در روز انتخابی

زمان (ساعت)	نسبت	دبی (لیتر در ثانیه)	زمان (ساعت)	نسبت	دبی (لیتر در ثانیه)
۱	۰/۰۲۵	۱۵۰	۱۳	۰/۰۵۳	۳۱۸
۲	۰/۰۲۲	۱۳۲	۱۴	۰/۰۶۲	۳۷۲
۳	۰/۰۱۵	۹۰	۱۵	۰/۰۶۲	۳۷۲
۴	۰/۰۱۷	۱۰۲	۱۶	۰/۰۵۷	۳۴۲
۵	۰/۰۱۸	۱۰۸	۱۷	۰/۰۵۷	۳۴۲
۶	۰/۰۲	۱۲۰	۱۸	۰/۰۵	۳۰۰
۷	۰/۰۲۳	۱۳۸	۱۹	۰/۰۵۳	۳۱۸
۸	۰/۰۵۴	۳۲۴	۲۰	۰/۰۴۶	۲۷۶
۹	۰/۰۶۱	۳۶۶	۲۱	۰/۰۴۱	۲۴۶
۱۰	۰/۰۶۶	۳۹۶	۲۲	۰/۰۳۳	۱۹۸
۱۱	۰/۰۵۸	۳۴۸	۲۳	۰/۰۳۱	۱۸۶
۱۲	۰/۰۴۹	۲۹۴	۲۴	۰/۰۲۷	۱۶۲



شکل ۳- هیستوگرام قیمت انرژی در ساعات شبانه‌روز

۶- اجرای مدل و بررسی نتایج

۶-۱- بهره‌برداری بر اساس برنامه بهینه تهیه شده توسط مدل

در این قسمت با استفاده از مدل تهیه شده برنامه بهینه بهره‌برداری از پمپ‌های سیستم تأمین آب دوگنبدان تهیه شده و برای یک روز معمولی با مصرف سرانه ۲۲۷ لیتر بر روز و عمق اولیه مخازن برابر ۴ متر اجرا شده است.

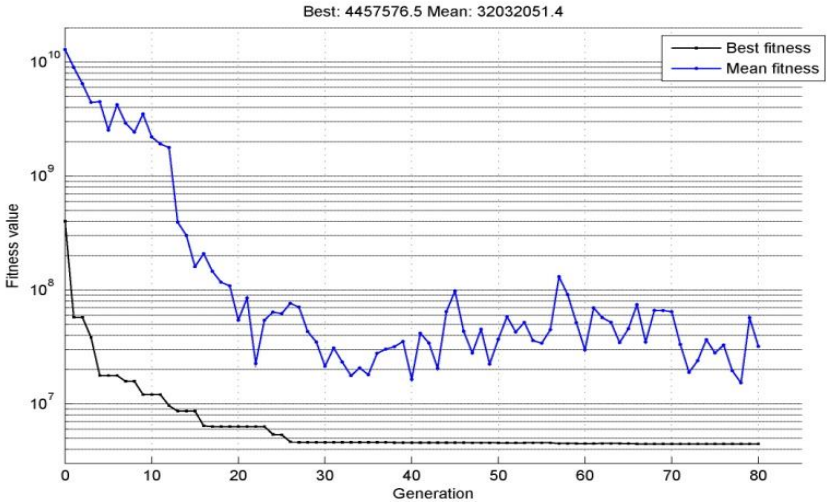
شکل ۴ تغییرات مقدار تابع هدف بهترین عضو هر نسل و متوسط تابع هدف اعضای هر نسل در طول فرآیند بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. چنانکه ملاحظه می‌شود پس از گذشت ۶۰ نسل و ۳۶۰۰ بار محاسبه تابع هدف، پاسخ بهینه‌ای با مقدار تابع هدفی برابر ۴۴۵۷۵۷۶.۵ توسط مدل بهینه‌سازی حاصل شده است. وضعیت روشن-خاموشی پمپ‌ها پاسخ بهینه در طول ۲۴ ساعت نیز در جدول ۳ نشان داده شده است.

۶-۲- بهره‌برداری عادی

در اینجا حالتی در نظر گرفته می‌شود که بهره‌بردار، پمپ‌های مربوط به هر مخزن را تا زمانی روشن نگه می‌دارد که مخازن مربوطه پر شوند و سپس پمپ‌ها را خاموش کرده و اجازه می‌دهد آب موردنیاز از مخزن تأمین شود. سپس با رسیدن تراز مخزن مربوطه به یک تراز حداقل مجدداً پمپ‌های مربوط به آن مخزن روشن می‌شوند.

متوسط تابع هدف اعضای هر نسل در طول فرآیند بهینه‌سازی در این جا نیز مشابه حالت قبل برای یک روز معمولی با سرانه مصرف ۲۲۷ لیتر بر روز و در شرایطی که تراز اولیه هر دو مخزن سیستم ۴ متر می‌باشد، مدل ای‌پنت بر اساس عبارت‌های کنترل زیر، پمپ‌های شبکه را به مدت ۲۴ ساعت مورد بهره‌برداری قرار می‌دهد. شکل ۵ وضعیت روشن-

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-10-19]

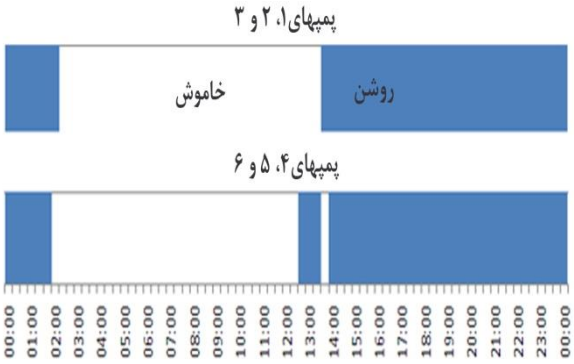


شکل ۴- نمودار تغییرات مقدار تابع هدف بهترین عضو هر نسل و در ادامه پاسخ بهینه به دست آمده توسط مدل بهینه‌سازی با حالت بهره‌برداری عادی مقایسه شده است.

خاموشی پمپ‌ها در طول دوره موردنظر در حالت بهره‌برداری عادی را نشان می‌دهد. هزینه انرژی مصرفی کل و تفکیکی پمپ‌ها را در ۲۴ ساعت برای حالت بهره‌برداری عادی و حالت بهره‌برداری بهینه در جدول ۴ نشان داده شده است. چنانکه در این جدول مشخص است هزینه کل انرژی مصرفی در حالت بهره‌برداری بهینه ۲۶/۸ درصد کمتر از حالت بهره‌برداری عادی است. مقایسه هزینه کل انرژی مصرفی در حالت بهره‌برداری بهینه با حالت بهره‌برداری عادی نیز در جدول ۵ انجام گرفته است.

جدول ۳- پاسخ بهینه - وضعیت روشن-خاموشی پمپ‌ها (۰ خاموش و ۱ روشن) در طول دوره ۲۴ ساعته روز انتخابی

	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00
پمپ ۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰
پمپ ۲	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰
پمپ ۳	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱
پمپ ۴	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱
پمپ ۵	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱
پمپ ۶	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰



شکل ۵- وضعیت روشن-خاموشی پمپ‌ها در طول دوره موردنظر در حالت بهره‌برداری عادی

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-10-19]

جدول ۴- هزینه کل انرژی مصرفی در حالت بهره‌برداری عادی و بهره‌برداری بهینه

شماره پمپ	هزینه انرژی مصرفی شرایط عادی بهره‌برداری	هزینه انرژی مصرفی شرایط بهره‌برداری بهینه (با الگوریتم ژنتیک)
۱	۸۱۱۰۰۱/۶	۵۹۴۷۲۹/۴
۲	۸۱۱۰۰۱/۶	۵۱۰۰۹۸/۴
۳	۸۱۱۰۰۱/۶	۶۵۲۳۸۵/۱
۴	۱۱۹۱۸۸۲	۸۸۰۲۱۳/۲
۵	۱۱۹۱۸۸۲	۱۱۴۹۴۹۰
۶	۱۱۹۱۸۸۲	۶۱۲۷۰۵/۵

شکل ۶ تغییرات سطح آب در مخزن ایستگاه پمپاژ دوم را نشان می‌دهد. چنانکه ملاحظه می‌شود تغییرات سطح آب این مخزن در حالت‌های بهره‌برداری عادی و بهره‌برداری بهینه تفاوت زیادی باهم ندارند. این به این معنا است که با توجه به حجم اندک این مخزن (۲۰۰۰ مترمکعب) نسبت به مخزن ذخیره‌ای ۲۰ هزار مترمکعبی، مدل بهینه‌سازی نتوانسته از این مخزن استفاده زیادی در جهت کاهش هزینه‌های پمپاژ انجام دهد. چنانکه در نمودار فوق مشاهده می‌شود، عمق آب در این مخزن از حداقل و حداکثر مجاز تجاوز نکرده است.

لازم به ذکر است که با توجه به حجم اندک این مخزن خاصیت ذخیره‌ای نداشته و در نتیجه در مدل بهینه‌سازی لزومی برای در نظر گرفتن قید کمبود برای این مخزن وجود نداشته است.

شکل ۷ تغییرات سطح آب در مخزن ذخیره ۲۰ هزار مترمکعبی در حالت بهره‌برداری عادی و بهره‌برداری بهینه را نشان می‌دهد. چنانکه در این نمودار مشخص است تغییرات سطح آب این مخزن در حالت‌های بهره‌برداری عادی و بهره‌برداری بهینه تفاوت قابل توجهی دارد. این به این معنا است که با توجه به حجم زیاد مخزن، نحوه پر و خالی کردن این مخزن نقش بسزایی در فرآیند بهینه‌سازی داشته است.

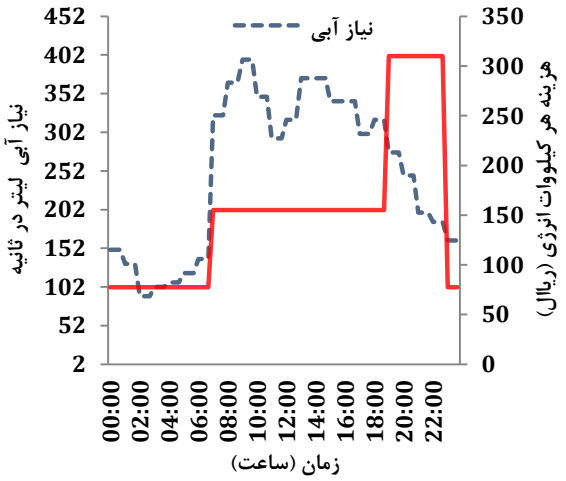
جدول ۵- مقایسه هزینه کل انرژی مصرفی در حالت بهره‌برداری بهینه با حالت بهره‌برداری عادی

	شرایط عادی بهره‌برداری	شرایط بهره‌برداری بهینه (با الگوریتم ژنتیک)
هزینه کل (ریال در روز)	۶۰۰۸۶۵۳	۴۳۹۹۶۲۱.۵۰
درصد برق مصرفی	۱۰۰	۷۳/۲

شکل ۸ تغییرات هزینه واحد انرژی مصرفی و همچنین هیستوگرام نیاز آبی را نشان می‌دهد. چنانکه ملاحظه می‌شود در پاسخ بهینه به دست آمده، ابتدا در دوره کم‌باری (ساعت ۰ الی ۷ صبح) مخزن کاملاً پرشده است. سپس با تنظیم نحوه روشن- خاموش بودن پمپ‌ها سعی شده تراز مخزن در کل دوره میانباری یعنی ساعت ۷ صبح الی ۷ شب نسبتاً پر نگه داشته شود. ولی در ادامه و در دوره پرباری یعنی از ساعت ۷ شب الی ۱۱ شب مخزن خالی شده و سیستم به‌جای پمپاژ از آب ذخیره شده در مخزن استفاده نموده و عمق مخزن به ۳/۸۵ متر رسیده است و در ساعت ۱۱ الی ۱۲ نیز که دوره کم‌باری محسوب می‌شود افزایش مجدد نرخ پمپاژ، کمبود آب مخزن جبران شده و عمق آب مخزن مجدداً به ۴ متر رسیده است.

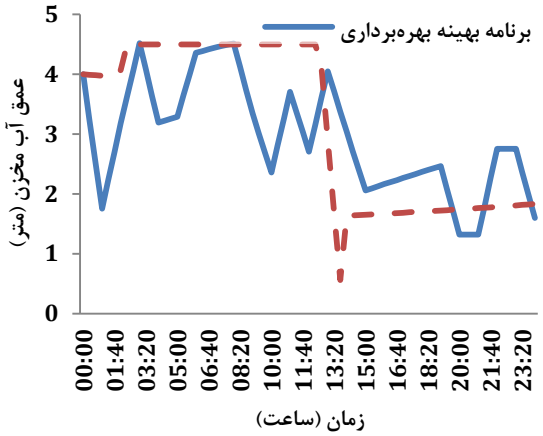
در طرف مقابل در حالت بهره‌برداری عادی در ساعت ۰ صبح کلیه پمپ‌ها روشن شده و پس از ۱ ساعت و ۴۰ دقیقه تراز مخزن به حداکثر رسیده و پمپ‌ها خاموش شده‌اند. در ادامه در شرایطی که پمپ‌ها خاموش بوده‌اند نیاز آبی از حجم ذخیره مخزن تأمین شده است تا زمانی که عمق آب در مخزن ذخیره ۲۰ هزار مترمکعبی به ۲/۵ متر رسیده و برای جلوگیری از کاهش بیش از حد ذخیره مخزن، پمپ‌ها روشن شده و با رسیدن عمق آب مخزن به ۴ متر در ساعت ۲۴، کمبود عمق آب مخزن جبران شده است.

لازم به ذکر است که پاسخ بهینه به دست آمده کمبود عمق ناچیزی برابر ۲ سانتی‌متر داشته است. این در حالی است که در بهره‌برداری عادی کمبود عمق برابر ۴ سانتیمتر بوده است.

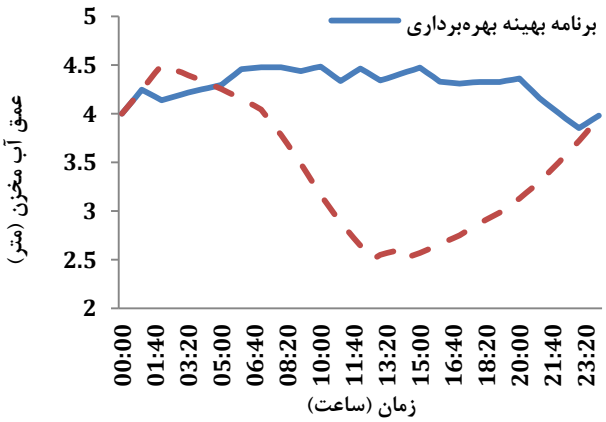


شکل ۶- تغییرات سطح آب در مخزن ایستگاه پمپاژ دوم

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-10-19]



شکل ۷- تغییرات سطح آب در مخزن ذخیره ۲۰ هزار مترمکعبی در حالت بهره‌برداری عادی و بهره‌برداری بهینه



شکل ۸- تغییرات هزینه واحد انرژی مصرفی و نیاز آبی

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی کامپیوتری جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های توزیع آب تحت فشار توسعه داده شده و مدل مذکور برای بهینه‌سازی مصرف انرژی سیستم تأمین آب شهر دوگنبدان از سد کوثر مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور در یک روز عادی با مصرف سرانه‌ای برابر ۲۲۷ لیتر در روز و با در نظر گرفتن هیستوگرام فرضی نیاز آبی سیستم، با استفاده از مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده، برنامه بهینه بهره‌برداری از پمپ‌ها تعیین گردید. سپس استفاده از این برنامه بهینه در این روز خاص با حالت عادی بهره‌برداری مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضمن رعایت کلیه قیود مسئله، هزینه انرژی مصرفی در حالت بهره‌برداری بهینه ۲۶/۸ درصد نسبت به حالت بهره‌برداری عادی کاهش داشته است. این موضوع به‌خوبی توان مدل توسعه داده شده در کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی را نشان می‌دهد. با این وجود موارد ذیل در استفاده از این مدل باید مدنظر قرار گیرد:

اصلی‌ترین پارامتری که برنامه پمپاژ بهینه تهیه شده توسط مدل به آن وابسته است، هیستوگرام نیاز آبی سیستم می‌باشد. در صورتی که پیش‌بینی این هیستوگرام با دقت همراه نباشد نتایج بهینه‌سازی نیز ارزش خود را از دست می‌دهد.

خاموش و روشن شدن پمپ‌ها هزینه‌های جانبی تعمیر و نگهداری را به سیستم تحمیل می‌نماید که در نظر گرفته نشده است.

باید توجه داشت که در مورد مسئله خاص سیستم انتقال آب شهر دوگنبدان حجم مخزن ذخیره‌ای ۲۰ هزار مترمکعبی به‌طور یکپارچه در دست می‌باشد. در این شرایط بهره‌برداری عادی (ضابطه محور) با حداقل مشکلات مواجه می‌شود. ولی اگر فرض شود که همین حجم ذخیره توسط چندین مخزن با احجام کوچک‌تر در دست بود، بهره‌برداری عادی (ضابطه محور) به مشکلات قابل توجهی از قبیل روشن و خاموش شدن‌ها متعدد و ناتوانی در استفاده از حجم مخازن جهت کاهش هزینه‌های پمپاژ مواجه می‌شد.

منابع

[1] G. Mackle, D. A. Savic, G. A. Walters, *Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply*. GALESIA, 95. London: Institute of Electrical Engineers Conference Publication 4/4: pp. 400-405, 1995.

[2] S. I. Rodin, M. Moradi-Jalal, Use of genetic algorithm in optimization of irrigation pumping stations, WAPIRRA program, http://stullia.t-k.ru/waterpump, 2002.

[3] M. Moradi-Jalal, S. I. Rodin, M. A. Mariño, Use of genetic algorithm in optimization of irrigation pumping stations. *Journal of Irrigation And Drainage Engineering*, Vol. 130, No. 5, pp. 357-365, 2004.

[4] M. Moradi-Jalal, M. A. Marino, A. Afshar, Optimal design and operation of irrigation pumping station, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 129, No. 3 pp. 149-154, 2003.

[5] H. Afshar, R. Rajabpour, Application of local and global particle swarm optimization algorithms to optimal design and operation of irrigation pumping systems, *Irrigation*

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-10-19]

and drainage, Vol. 58, No. 3, pp. 321-331, 2009.

[6] Q. J. Wang, The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models. *Water Resource Research 27*, Vol. 27, No. 9, pp. 2467-2471, 1991.

[7] L. J. Murphy, A. R. Simpson, G. C. Dandy, Design of a pipe network using genetic algorithms. Water-Melbourne Then Artarmon-, 20, pp. 40-40, 1993.

[8] A. R. Simpson, G. C. Dandy, L. J. Murphy, Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 120, No. 4, pp. 423-443, 1994.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2025-10-19]