

## مدیریت مصرف انرژی در الکتروپمپها مبتنی بر بهینه‌سازی ابتکاری

ابوالفضل سلامی\*<sup>۱</sup>محمد مهدی فارسی<sup>۲</sup>

## چکیده

امروزه با افزایش کاربرد سیستم‌های آبی در فرآیندهای مختلف، الکتروپمپها به صورت وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بسیاری از موارد به دلیل بهره‌برداری غلط و قدیمی بودن تکنولوژی‌های موجود، تلفات در این الکتروپمپها قابل توجه بوده و باعث تحمیل هزینه‌های زیادی به جامعه و محیط زیست می‌شود. از این رو، در تحقیقات اخیر به این موضوع توجه خاصی شده و راه‌حل‌های مختلفی برای حل این مشکل ارائه شده است. مصرف‌کننده اصلی توان در شبکه‌های پمپاژ آب، موتورهای القایی موجود در الکتروپمپها هستند بنابراین کاهش مصرف در این موتورها باعث کاهش مصرف توان در شبکه پمپاژ می‌شود. مدیریت مصرف انرژی در الکتروپمپها و ارائه یک برنامه زمان‌بندی مناسب می‌تواند مصرف انرژی را در این سیستم بهینه کند که این بهینه‌سازی می‌تواند باعث کاهش چشمگیر هزینه‌های انرژی شود. در این مقاله با بررسی شرایط موجود در شبکه‌های پمپاژ آب، راه حلی برای بهینه‌سازی پاسخگویی الکتروپمپها ارائه شده است. برای حل مسئله بهینه‌سازی یک الگوریتم ابتکاری استفاده شده است که با شبیه‌سازی‌های انجام شده کارآمدی روش پیشنهادی نشان داده شده است.

## واژه‌های کلیدی

الکتروپمپ، بهینه‌سازی مصرف انرژی، بهینه‌سازی ابتکاری، کاهش هزینه برق، مدیریت سمت تقاضا.

\*۱. استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اراک salami@arakut.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اراک mehdfarsi69@yahoo.com

## مقدمه

در سال‌های گذشته آب به‌صورت یک کالای کاملاً مصرفی مورد توجه بشر بوده و به همین دلیل بسیاری از عوامل تأثیرگذار در آن مانند هزینه برق، کیفیت سیستم توزیع و نحوه بهره‌برداری تا حد زیادی مورد توجه قرار نمی‌گرفت. از این رو بیشتر شبکه‌های آبرسانی به‌صورت تجربی و بر اساس موارد مشابه در گذشته طراحی و ساخته می‌شدند (هانگبین و زوشی<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳). امروزه با پیشرفت جوامع مدرن و پیدایش موضوعاتی مانند اقتصاد انرژی و رقابتی‌شدن شرکت‌ها در زمینه کیفیت توزیع آب، اهمیت سیستم‌های پمپاژ آب و انرژی مصرفی در آن‌ها افزایش یافته است. علاوه بر موضوعات بالا مسائل دیگری نظیر مشکلات زیست محیطی، هزینه‌های تعمیر و نگهداری، هزینه‌های پرسنل و بسیاری از عوامل دیگر باعث شده تا در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های آبرسانی و بهبود عملکرد آن‌ها صورت گیرد.

یکی از روش‌های مرسوم تولید انرژی، استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تولید برق است. این روش تولید، علاوه بر نیاز فراوان به آب، باعث آلوده‌شدن محیط زیست می‌شود. نگرانی‌های ناشی از محیط زیست وقتی بیشتر می‌شود که می‌بینیم قسمت اعظمی از تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی است. مثلاً در کشور پرغال در سال ۲۰۱۱ حدود ۴۰٪ از الکتریسیته تولیدی از سوخت‌های فسیلی شامل زغال سنگ، نفت خام و گاز طبیعی تأمین شده است. از این رو کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی علاوه بر کاهش آلودگی محیط زیست، باعث استفاده بهینه از منابع آبی می‌شود. بر همین اساس در سال‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در اروپا افزایش چشم‌گیری داشته است (رامس<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۱) و جاگتاپ و پاور<sup>۳</sup> (۲۰۱۳) گانسن<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۵)).

بر اساس مطالعات جاگتاپ و پاور (۲۰۱۳) کشور هندوستان برنامه‌ها و مقررات زیادی برای صیانت از انرژی و آب وضع کرده است. بر اساس این قوانین، تمامی بخش‌ها ملزم به استفاده

صحیح از منابع آب و انرژی هستند. در بخش‌های کشاورزی و صنعت سیستم‌های پمپاژ فراوانی وجود دارد که مستعد اجرای روش‌های بهینه‌سازی هستند. بر اساس تحقیقات انجام شده کارایی انرژی در سیستم‌های پمپاژ، ارتباط مستقیمی با فلسفه بهره‌برداری، برنامه‌ریزی و ظرفیت تولید دارد.

ایران نیز به عنوان یک کشور نفت خیز تلاش‌های بسیاری برای کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی انجام داده است. از جمله این کارها می‌توان به ۱۱ پروژه تولید برق از انرژی خورشید اشاره کرد. با این وجود، در ۲۰ سال گذشته حدود ۹۵٪ از تقاضای انرژی در ایران توسط سوخت‌های فسیلی تأمین شده است (بهرامی و اکبرزاده<sup>۵</sup>، ۲۰۱۳).

بر اساس مطالب ارائه شده، بهینه‌سازی در سیستم‌های پمپاژ از اهمیت خاصی برخوردار است. با توجه به این موضوع در تحقیقات اخیر روش‌های بهینه‌سازی مختلفی برای کاهش هزینه‌ها و تلفات ارائه شده است. یک روش بهینه‌سازی به‌منظور کاهش مصرف الکتریسیته بر اساس مدل خطی شده الکتروپمپ‌ها توسط پولتو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۴) ارائه شده است که در آن روش پیشنهادی، اجتناب از روابط غیرخطی الکتروپمپ‌ها، باعث ساده‌سازی و افزایش سرعت حل مسئله بهینه‌سازی می‌شود. در روشی مشابه، کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان شبکه مطابق با شرایط حاکم بر سیستم‌های آبی مدنظر قرار گرفته و اهداف بیان شده توسط الگوریتم ازدحام ذرات، بهینه شده است (وی<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۹)). در روشی دیگر یک الگوریتم فرا ابتکاری برای افزایش کارایی شبکه‌های خنک‌سازی ارائه شده است که در آن بهینه‌سازی بین هزینه انرژی مصرفی و فشار آب در سیستم پمپاژ (توسط الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده)، صورت گرفته است (سان<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). در مورد مشابه دیگر، با توجه به تعرفه‌های الکتریسیته یک مدل بهینه‌سازی بیان گردیده و بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است (عبدالمجید و اولانیکی<sup>۹</sup>، ۲۰۱۰). در این تحقیق، با تغییر دادن زمان مصرف انرژی به زمان‌هایی که تعرفه برق کمتر است،

7 Wei

8 Sun

9 AbdelMeguid &amp; Ulanicki

1 Hongbin &amp; Xushi

2 Ramos

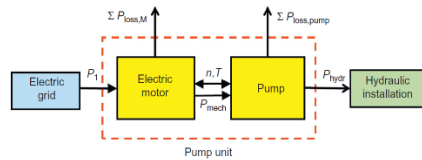
3 Jagtap &amp; Pawar

4 Ganesan

5 Bahrami &amp; Abbaszadeh

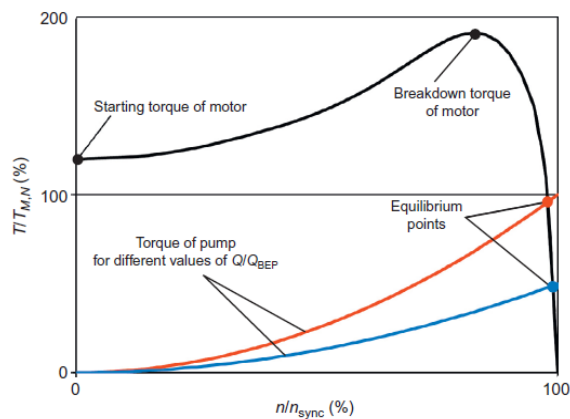
6 Puleo

می‌شود. نمای شماتیک از یک مجموعه پمپ به همراه جزئیات مربوط به توزیع توان در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): توزیع توان در یک پمپ

یکی از عوامل مهم در مصرف انرژی در سیستم‌های پمپاژ مربوط به مقدار بار مکانیکی و نقطه‌ی کار موتور الکتریکی است. در پمپ‌های الکتریکی، معمولاً از موتورهای القایی استفاده می‌شود. به منظور پایداری و حفظ سرعت در یک محدوده قابل قبول، موتورهای القایی در نزدیکی سرعت نامی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. در این موتورها اگر بار کاهش یابد؛ سرعت افزایش می‌یابد و اگر بار افزایش یابد؛ سرعت کاهش می‌یابد. البته این موضوع تأثیر زیادی در شبکه آبرسانی ندارد. نمودار سرعت-گشتاور یک موتور القایی در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): نمودار سرعت-گشتاور یک موتور القایی

برای به‌دست آوردن نقطه کار موتورهای القایی باید نمودار سرعت-گشتاور موتور با نمودار سرعت-گشتاور بار تلاقی یابد. نمودار مربوط به بار مکانیکی ثابت و غیرقابل تغییر است؛ پس برای تغییر سرعت نقطه‌ی کار باید نمودار موتور القایی تغییر کند که این امر توسط تغییر در فرکانس و دامنه ولتاژ امکان‌پذیر است. درایورهای ولتاژ-فرکانس با تغییر نقطه‌ی کار می‌توانند گشتاور منتقل شده موتور را کنترل و در نتیجه مصرف انرژی را تغییر دهند.

هزینه‌های ناشی از انرژی را کاهش داده‌اند. مدلی دیگر برای بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی با ابعاد گسترده توسط اسکوکارو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰) ارائه شده است. در این مدل از زبان برنامه‌نویسی GAMS به‌منظور حل مسئله غیرخطی با ابعاد بزرگ استفاده شده است. در روش ارائه شده این مدل، برای افزایش سرعت، مقادیر زیادی از جزئیات حذف شده است. مشکل اساسی در تمامی الگوریتم‌های بالا، کاهش سرعت بهینه‌سازی با افزایش ابعاد مسئله است. در این مقاله یک الگوریتم بهینه‌سازی ابتکاری ارائه شده که نه تنها از سرعت بهینه‌سازی بالایی برخوردار است بلکه در بهینه‌سازی مسائل با شرایط خاص و ابعاد بزرگ نیز قابل استفاده است.

در ابتدای این مقاله، مقدمه‌ای بر اهمیت انرژی و منابع آب بیان و ضرورت اصلاح و بهینه‌سازی ساختارها و الگوریتم‌های مربوطه ارائه شده است. در قسمت دوم عوامل مؤثر در مصرف انرژی در الکتروپمپ‌ها و سیستم پمپاژ به‌خصوص موتورهای القایی موجود در آن‌ها مثل درایورها، فرکانس کاری و موارد مشابه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بعد از آن، در قسمت دیگر هزینه‌ها و عوامل مؤثر در سیستم پمپاژ مانند تعرفه‌ها، راندمان و نحوه ذخیره‌سازی بیان شده است. در گام بعد، یک الگوریتم بهینه‌سازی ابتکاری پیشنهاد شده و جزئیات آن بیان خواهد شد. سپس مسئله بهینه‌سازی هزینه و کیفیت خدمات بر روی یک نمونه مطالعاتی اجرا و نتایج آن ارائه می‌شود. در پایان نیز نتیجه‌گیری‌های شبیه‌سازی عددی آورده شده است.

### عوامل مؤثر در مصرف انرژی در سیستم‌های پمپاژ

در سیستم‌های آبرسانی انرژی مورد نیاز برای پمپاژ توسط الکتروموتورهایی که به شبکه برق و یا منابع تغذیه متصل هستند؛ تأمین می‌شود. بدین منظور انرژی الکتریکی ابتدا وارد موتور الکتریکی پمپ شده و به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. این تبدیل انرژی همراه با تلفاتی است که مقدار آن با توجه به نوع موتور متفاوت است. انرژی مکانیکی خروجی پمپ به انرژی هیدرولیکی در شبکه پمپاژ تبدیل و باعث انتقال انرژی به ساختار شبکه آبرسانی می‌شود. در این مرحله نیز قسمتی از انرژی تلف

### هزینه‌ها در سیستم پمپاژ

هزینه‌های الکتریسیته در پمپ‌های آب، قسمت بزرگی از هزینه‌های شرکت‌های توزیع آب را شامل می‌شوند. صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی از راه‌های مختلفی قابل حصول است. از جمله این راه‌ها می‌توان به طراحی مجدد سیستم جایگزین با بازده انرژی بالاتر، نگهداری مناسب از برخی از تجهیزات به-خصوص پمپ‌ها و کنترل بهینه سیستم اشاره کرد (عبدالمجید و اولانیکی، ۲۰۱۰). هزینه پرداختی برای الکتریسیته با دو عامل میزان توان مصرفی و تعرفه برق رابطه مستقیم دارد. برای کاهش عامل اول می‌توان راهکارهای نظیر کاهش میزان آب پمپ شده به کمک اصلاح شبکه، کاهش هد مخالف (شامل اختلاف ارتفاع و سایش آب) در مقابل پمپ آب و استفاده از پمپ‌ها در نزدیکی نقطه‌ی کار موتور الکتریکی را پیشنهاد داد. برای کاهش عامل دوم نیز می‌توان راه‌کارهایی مثل برنامه‌ریزی بهینه مصرف انرژی در پمپ‌ها و انتقال توان مصرفی از زمان پیک به زمان خاموشی به کمک یک برنامه زمان‌بندی معین و اصلاح ظرفیت‌های ذخیره‌سازی اشاره کرد.

برنامه‌ریزی بهینه مصرف انرژی در الکتروپمپ‌ها یک مسئله بسیار پیچیده محسوب می‌شود؛ زیرا همزمان با کاهش هزینه‌های انرژی باید دیگر شرط‌های مسئله را هم در نظر گرفت. یک راه حل ساده این است که تمام آب مورد نیاز در طی یک روز از طریق پمپاژ در شب و با تعرفه پایین تأمین گردد. این امر نیازمند ذخیره‌سازی قوی است که بتواند آب مورد نیاز را تأمین کند که این مسئله خود مشکلی بزرگ به حساب می‌آید. از این رو بهینه‌سازی باید با در نظر گرفتن شرط‌های فوق صورت گیرد (پزشک و هلوگ<sup>۱</sup>، ۱۹۹۶).

شرایط دیگر مسئله را می‌توان در موارد زیر به‌طور خلاصه بیان نمود:

- انتخاب پمپ‌هایی با توانایی تأمین هد مورد نیاز برای غلبه بر تلفات هیدرولیکی، اختلاف هد استاتیکی و تقاضای مشترکان
- نگه‌داشتن سطح رزرو در یک باند مشخص برای مقابله با سرریز و تأمین نیاز مشترکان.
- نگه‌داشتن فشار زیر سطح قابل اطمینان برای کاهش نشتی و جلوگیری از خطر ترکیدگی.

### ۴. تأمین قابلیت اطمینان در سطح مطلوب تعیین شده.

روش‌های دیگری نیز برای کاهش هزینه پیشنهاد می‌شود که اکثریت بر پایه‌ی کنترل بهینه و استفاده هم‌زمان چند موتور در نزدیکی نقطه‌ی کار با حداکثر راندمان است.

### بیان مسئله

همان‌طور که گفته شد هزینه‌های الکتریسیته در پمپ‌های آب قسمت بزرگی از هزینه‌های شرکت‌های توزیع آب را شامل می‌شوند. در اینجا فرض شده است که به کمک یک مخزن ذخیره‌سازی آب مصرف انرژی تعدادی پمپ الکتریکی کاهش می‌یابد. متغیر مسئله، دبی ورودی مخزن در ساعات مختلف طی یک دوره برنامه‌ریزی است. دبی ورودی در هر بازه زمانی معادل مجموع دبی‌های خروجی پمپ‌ها در همان بازه زمانی است. دبی خروجی هر پمپ، با توجه منحنی مشخصه آن، توان الکتریکی را تعیین می‌کند. توان الکتریکی مصرفی نیز بر اساس تعرفه‌های برق هزینه الکتریسیته را مشخص می‌کند. از آنجایی که توان الکتریکی مصرفی الکتروپمپ بر اساس دبی خروجی، یک منحنی محدب بوده و مجموع چند تابع محدب نیز یک تابع محدب است پس تابع هدف نیز یک تابع محدب محسوب می‌شود. از این رو می‌توان تابع هدف برای بهینه‌سازی را به‌صورت زیر بیان کرد.

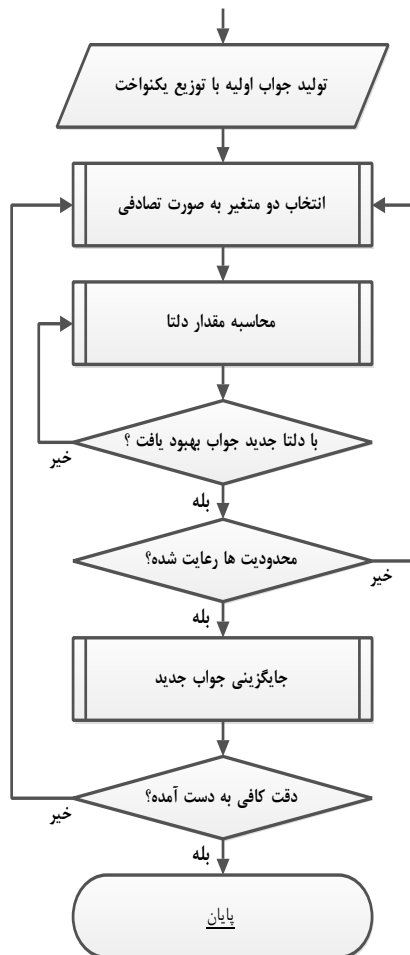
$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^T C_t P_{t,i}(h_t, q_{t,i}) \quad (1)$$

این تابع در  $T$  بازه زمانی، هزینه الکتریسیته‌ی  $N$  پمپ را کاهش می‌دهد. در این تابع  $C_t$  هزینه الکتریسیته بر حسب تعرفه زمان استفاده (TOU)<sup>۲</sup>  $P_{t,i}$  توان مصرفی پمپ  $i$  در بازه زمانی  $h_t, t$  ارتفاع مخزن در بازه  $t$  و  $q_{t,i}$  دبی پمپ  $i$  در زمان  $t$  است. در فرمول (۱) مقدار تعرفه TOU از پیش مشخص و مقدار آن به زمان استفاده توان وابسته است. مقدار  $P_{t,i}$  از منحنی مشخصه‌های پمپ‌ها و با توجه به مقادیر  $h$  و  $q$  قابل محاسبه است. با توجه به غیرخطی بودن توان مصرفی بر اساس دبی خروجی مسئله موجود یک مسئله NLP است. در این بهینه‌سازی باید شرط‌های دیگری را نیز در نظر گرفت. یک شرط مهم در این مسئله ارتفاع مخزن است که توسط رابطه زیر مشخص می‌شود.

<sup>2</sup>Time Of Use

<sup>1</sup> Pezeshk & Helweg

متغیر مسئله دبی خروجی الکتروپمپها است. این الگوریتم برای یک شبانه روز پیش رو قابلیت اجرا دارد. همچنین فرض شده بر اساس ساز و کارهای موجود میزان آب مصرفی مشترکان شبکه در بازه برنامه‌ریزی با دقت خوبی پیش‌بینی شده است. از آنجایی که میزان آب مصرفی مشترکان در یک دوره زمانی (مثلاً یک شبانه روز) ثابت است؛ بنابراین باید مجموع دبی ورودی به مخزن نیز عدد ثابتی باشد، به عبارت دیگر مجموع متغیرها مقداری ثابتی هستند. با توجه به این شرط اساسی، به ازای هر کاهش در یک متغیر، باید متغیر دیگری افزایش یابد. در شکل (۳) فلوجارت این الگوریتم نشان داده شده است.



شکل (۳): فلوجارت الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهاد شده در شکل (۳) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$h_{\min} \leq h_t \leq h_{\max} \quad t=1, \dots, T \quad (2)$$

رابطه (۲)، شرط لازم برای حداقل و حداکثر ارتفاع آب موجود در مخزن را بیان می‌کند. حداقل ارتفاع  $h_{\min}$  بر اساس حداقل فشار لازم برای تزریق آب به شبکه و حداکثر ارتفاع  $h_{\max}$  بر اساس آستانه تحمل تجهیزات مختلف تعیین می‌شود. شرط مهم دیگر مسئله، دبی خروجی پمپ‌های آب است که به صورت زیر بیان می‌شود.

$$q_{\min} \leq q_{t,i} \leq q_{\max} \quad i=1, \dots, N \quad (3)$$

در رابطه بالا  $q_{\min}$  حداقل دبی خروجی و  $q_{\max}$  حداکثر دبی خروجی پمپ‌ها است. این مقادیر بر اساس نمودارهای هیدرولیکی پمپ‌ها قابل محاسبه است. شرط دیگر مسئله بازگشت ارتفاع اولیه، در پایان دوره بهینه‌سازی است این شرط به صورت زیر قابل بیان است.

$$\sum_{t=0}^T Q_t = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^N q_{t,i} \quad (4)$$

در این رابطه  $q_{t,i}$  دبی خروجی پمپ  $i$  در ساعت  $t$  است. شرط دیگر مسئله، قانون پایستگی جرم در مخزن است. این رابطه نیز به صورت زیر بیان می‌شود.

$$Q_t \cdot \Delta t + (h_t - h_{t-1}) \cdot A = q_t \cdot \Delta t \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $q_t$  دبی ورودی مخزن،  $Q_t$  دبی خروجی مخزن،  $A$  سطح مقطع مخزن و  $\Delta t$  بازه زمانی را نشان می‌دهند.

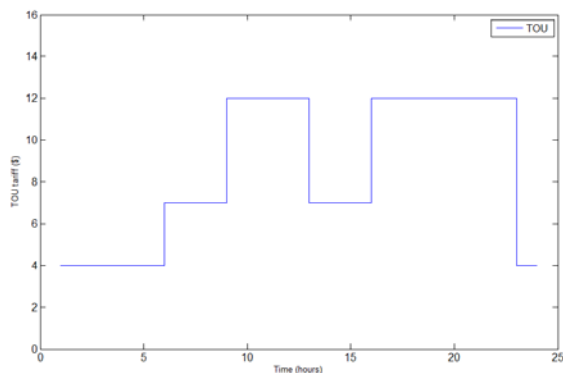
### تشریح الگوریتم بهینه‌سازی ابتکاری

امروزه با پیشرفت ریاضیات، روش‌های بهینه‌سازی نیز رشد چشمگیری داشته‌اند. روش‌های بهینه‌سازی به خصوص در علوم مهندسی کاربرد زیادی دارند. برای مثال روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، تصویری، کلاسیک، برنامه‌ریزی دینامیکی و برنامه‌ریزی عددی از مهم‌ترین‌های روش‌های بهینه‌سازی موجود در علوم مهندسی هستند (مارلر و آرورا<sup>۱</sup>، ۲۰۰۴). با توجه به تنوع موجود می‌توان برای حل هر مسئله بهترین روش موجود در میان سایر روش‌ها را انتخاب کرد. در این مقاله، قصد بر این است که به کمک یک الگوریتم بهینه‌سازی ابتکاری میزان توان مصرفی چند الکتروپمپ را که به یک مخزن متصل هستند کاهش دهیم.

جدول(۱): میزان تقاضا در طول یک شبانه روز

ساعت	دبی مورد نیاز مشترکین (LitSec)	ساعت	دبی مورد نیاز مشترکین (LitSec)
۱	۵	۱۳	۱۶
۲	۶	۱۴	۱۵
۳	۴	۱۵	۱۳
۴	۵	۱۶	۱۴
۵	۶	۱۷	۱۵
۶	۷	۱۸	۱۸
۷	۸	۱۹	۱۷
۸	۹	۲۰	۱۵
۹	۱۱	۲۱	۱۵
۱۰	۱۲	۲۲	۱۰
۱۱	۱۴	۲۳	۶
۱۲	۱۵	۲۴	۷

پارامتر مهم دیگر در این مسئله هزینه انرژی است که از قبل مشخص بوده و مقدار آن بر اساس تعرفه زمان استفاده تعیین می‌شود. در شکل (۴) تعرفه استفاده شده در این مسئله نشان داده شده است. این تعرفه توسط شرکت‌های توزیع برق، تعیین می‌شود.



شکل(۴): هزینه الکتریسیته براساس تعرفه زمان استفاده

تعرفه‌ها معمولاً دارای سه سطح پیک مصرف، ساعات عادی و پیک خاموشی است. با توجه به مقادیر تعرفه‌های الکتریسیته و میزان تقاضای موجود برای آب، الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده در ساعات اولیه روز که تعرفه برق کم است؛ آب را در مخزن ذخیره و در سایر ساعات که هزینه انرژی بیشتر است، از این ذخیره برای انتقال به شبکه استفاده می‌کند. همان طور که مشخص است شرط مهم و تاثیرگذار دیگر مسئله، ارتفاع سطح آب در مخزن است، که این شرط در قید دوم بیان شده است.

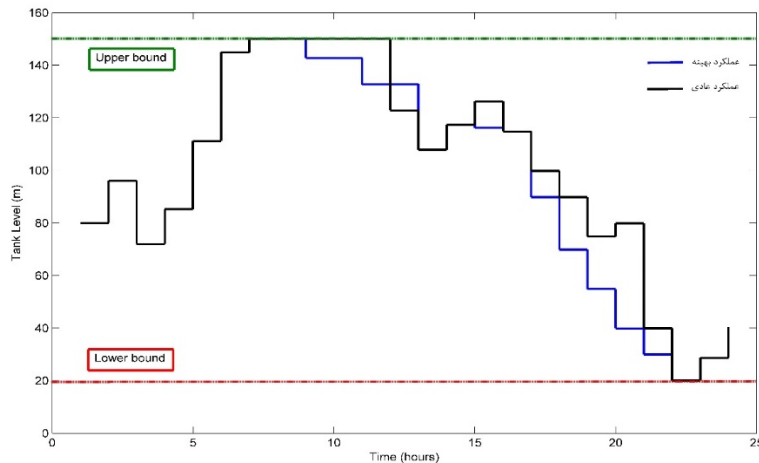
- ابتدا یک پاسخ اولیه با متغیرهایی به صورت یکنواخت (برابر) تولید می‌شود. متغیرهای این گام می‌تواند همان دبی‌های خروجی در بهره‌برداری تجربی توسط کاربر باشد.
- دو متغیر از میان متغیرهای تولید شده در قسمت قبل به صورت تصادفی انتخاب می‌شود.
- یک مقدار برای دلتا به صورت تصادفی تولید می‌شود. این مقدار به یکی از متغیرهای قسمت قبل اضافه و از متغیر دیگر کم می‌شود.
- مقدار تابع برازش با مقادیر جدید به دست می‌آید. اگر تابع برازش بهبود یافت، فرآیند به مرحله بعد انتقال می‌یابد. در غیر این صورت فرآیند به مرحله قبل بازگردانده می‌شود.
- در این قسمت محدودیت‌های مسئله بررسی می‌شود. در صورت عدم رعایت محدودیت‌ها فرآیند به مرحله ۲ باز گردانده می‌شود. در غیر این صورت به مرحله بعد انتقال می‌یابد.
- در این قسمت مقادیر قبلی با مقادیر جدید جایگزین می‌شود.
- در این گام، مقدار تابع برازش محاسبه می‌شود. در صورت نداشتن دقت کافی به مرحله دوم باز گردانده شده و متغیرهای جدید انتخاب می‌شوند. در غیر این صورت الگوریتم پایان می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله فرض شده از ۱۲ عدد پمپ الکتریکی ( $N=12$ ) با مشخصه هیدرولیکی یکسان برای ذخیره آب در ۲۴ بازه، یک تقاضای مشترک به صورت بازه‌های یک ساعتی در نظر گرفته شده است. میزان آب مصرفی در جدول (۱) نشان داده شده است.

بیشترین تقاضا در ساعت چهارم به میزان ۱۸ لیتر بر ثانیه و کمترین تقاضا در ساعت هفتم به میزان ۴ لیتر بر ثانیه است. این تقاضا به صورت فرضی در نظر گرفته شده است.

میزان ارتفاع آب درون مخزن در طی دوره در شکل (۵) برای دو حالت بهره‌برداری بهینه و بهره‌برداری دستی نشان داده شده است. مقادیر حداکثر ۱۰۰ متر و حداقل ۲۰ متر مخزن در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل(۵): ارتفاع سطح مخزن در دو حالت بهینه و عادی

هر چند صرفه‌جویی به‌دست آمده تقریباً عدد کوچکی است، اما با توجه به این موضوع که سهم زیادی از هزینه‌های تأمین آب را هزینه الکتریسیته شامل می‌شود، این بهینه‌سازی کاملاً به صرفه است. از طرفی دیگر این روش بهینه‌سازی قابلیت اعمال شرایط موثر دیگر در مسئله، مانند عدم قطعیت در میزان آب مصرفی، عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌های موجود و بسیاری از مسایل دیگر را دارد.

#### جمع بندی

در این مقاله یک الگوریتم بهینه‌سازی ابتکاری برای کاهش مصرف انرژی در پمپ‌ها ارائه شد. با توجه به مطالب بیان شده و نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته به‌کارگیری یک سیستم بهره‌برداری بهینه از پمپ‌های الکتریکی موجود در شبکه‌های تأمین و توزیع آب، تا حد زیادی در میزان هزینه برق مصرفی پمپ‌ها صرفه‌جویی نموده و باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. در این روش به کمک منحنی مشخصه‌ی هیدرولیکی پمپ‌ها و دبی آب خروجی، توان الکتریکی مصرفی بهینه می‌شود.

با توجه به نتایج بهره‌برداری حاصل از الگوریتم بهینه شده، در دو حالت، بهره‌برداری بهینه حاصل از شبیه‌سازی و عملکرد عادی که به‌صورت دستی انجام می‌پذیرد، مشاهده می‌شود پس از اتمام دوره برنامه‌ریزی و بازگشت به نقطه صفر، ارتفاع مخزن به مقدار اولیه خود (۳۰ متر) می‌رسد.

با توجه به شکل (۵)، در برخی از ساعات (مثل ساعات اولیه بهره‌برداری) نمودارهای مربوط به سطوح آب موجود در مخزن برای دو حالت بهره‌برداری بهینه و بهره‌برداری تجربی توسط کاربر به‌صورت یکسان است. این تشابه به‌خاطر این نکته ایجاد شده که تعرفه در هر دو حالت در حداقل مقدار بوده، بنابراین آب تزریقی به مخزن باید حداکثر باشد. در نتیجه در دو حالت فوق نمودار بهره‌برداری یکسانی ایجاد شده است. هدف اصلی از این بهینه‌سازی کاهش هزینه‌های الکتریسیته‌ی پمپ‌ها است. پس از انجام شبیه‌سازی‌های مربوطه، نتایج موجود نشان می‌دهد که در حالت بهره‌برداری توسط الگوریتم بهینه نسبت به حالت بهره‌برداری با دبی خروجی به اندازه تقاضا مشترک، حدود ۲۵٪ و نسبت به حالت بهره‌برداری تجربی توسط کاربر حدود ۷٪ در هزینه الکتریسیته پمپ‌ها صرفه‌جویی داشته است.

water supply systems." *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 436-442.

10- Skworcow, P., Paluszczyszyn, D., Ulanicki, B., Rudek, R. and Belrain, T. (2014). "Optimisation of Pump and Valve Schedules in Complex Large-scale Water Distribution Systems Using GAMS Modelling Language." *Procedia Engineering*, 70, 1566-1574.

11- Sun, J., Feng, X., Wang, Y., Deng, C. and K. H. Chu, K.H. (2014). "Pump network optimization for a cooling water system." *Energy*, 67(April), 506-512.

12- Wei, Z., Zhihong, Z., and Huiwen, W. (2009). "Optimal Operation Model of Water Supply Network and Application." in *Services Science, Management and Engineering*, 2009. *SSME'09. IITA International Conference on*, 499-502.

## تشکر و قدردانی

از شرکت آب و فاضلاب استان مرکزی به‌خاطر حمایت از این پژوهش و یاری رساندن در تهیه اطلاعات مورد نیاز تشکر می‌شود.

## مراجع

1- AbdelMeguid, H. and Ulanicki, B. (2010). "Feedback rules for operation of pumps in a water supply system considering electricity tariffs." *Water Distribution Systems Analysis*, 425, 1188-1205.

2- Bahrami, M. and Abbaszadeh, P. (2013). "An overview of renewable energies in Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24(August), 198-208.

3- Ganesan, P., Thirugnanasambandam, M., Rajakarunakaran, S., and Devaraj, D. (2015) "Specific Energy Consumption and Co<sup>2</sup> Emission Reduction Analysis in a Textile Industry." *International Journal of Green Energy*, 12(7), 685-693.

4- Hongbin, Z. and Xushi, Y. (2003). "Water network system theories and analysis." *China Architecture & Buliding Press*, 9, 49-50.

5- Jagtap, S. P. and Pawar, A. N. (2013). "Energy Efficiency Evaluation in Pumping System." *Modern Mechanical Engineering*, 3, 171-180.

6- Marler, R. T. and Arora, J. S. (2004). "Survey of multi-objective optimization methods for engineering." *Structural and multidisciplinary optimization*, 26(6), 369-395.

7- Pezeshk, S. and Helweg, O. (1996). "Adaptive search optimization in reducing pump operating costs." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(1), 57-63.

8- Puleo, V., Morley, M., Freni, G. and Savić, D. (2014). "Multi-stage linear programming optimization for pump scheduling." *Procedia Engineering*, 70, 1378-1385.

9- Ramos, H. M., Kenov, K. N. and F. Vieira, F. (2011). "Environmentally friendly hybrid solutions to improve the energy and hydraulic efficiency in