

برنامه‌ریزی بهینه زمان‌بندی پمپاژ به مخازن شبکه‌های توزیع آب با کنترل هزینه استهلاک پمپ‌ها

محمود اکبری^{۱*}، ابراهیم بن‌زاده^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

makbari@kashanu.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

ebannazadehghomi@gmail.com

چکیده: در شبکه‌های توزیع آب، مقدار قابل توجهی از انرژی الکتریسیته برای پمپاژ و انتقال آب به مخازن استفاده می‌شود. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پمپاژ می‌تواند نقش مهمی در مدیریت مصرف انرژی الکتریکی و کاهش هزینه آن داشته باشد. هدف از این مطالعه، تعیین برنامه زمان‌بندی بهینه پمپاژ برای یک افق زمانی ۲۴ ساعته است که در آن بتوان در عین تأمین نیاز آبی مصرف‌کنندگان، هزینه انرژی الکتریکی مصرفی ناشی از پمپاژ را با در نظر گرفتن محدودیت مربوط به استهلاک پمپ‌ها به حداقل رساند. برای این منظور، مسئله بهینه‌سازی زمان‌بندی پمپاژ آب از چاه‌ها به مخزن در قالب یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح فرموله شده و برای حل آن از روش شاخه و حد استفاده می‌شود. در این تحقیق، علاوه بر هدف کمینه کردن هزینه پمپاژ، کاهش استهلاک پمپ‌ها در اثر خاموش و روشن شدن‌های مکرر نیز مدنظر است. برای کنترل و کاهش استهلاک پمپ‌ها از یک قید در برنامه‌ریزی زمانی پمپاژ استفاده می‌شود. به منظور نشان‌دادن کارایی مدل مذکور، شبکه آب شهر نوش‌آباد از توابع شهرستان کاشان، به عنوان مطالعه موردی استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد مدل فرموله شده در این مطالعه، به خوبی می‌تواند دو هدف مذکور را تأمین کند به نحوی که خروجی‌های مدل در مقایسه با بهره‌برداری موجود، هم از نقطه نظر هزینه انرژی و هم استهلاک پمپ‌ها وضعیت به مراتب بهتری دارد. به طور مشخص، هزینه انرژی حتی در حالتی که قید استهلاک پمپ‌ها در پراهمیت ترین حالت خود منظور شده است نیز، در مقایسه با بهره‌برداری تاریخی حدود ۱۵ درصد کمتر است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت مصرف انرژی، استهلاک پمپ، بهینه‌سازی، زمان‌بندی پمپاژ، برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح.

۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل دنیای امروز، تأمین انرژی الکتریکی و استفاده بهینه از آن است، زیرا تولید آن بسیار پرهزینه و گاهی مستلزم مصرف منابع تجدیدناپذیر نظیر سوخت‌های فسیلی است. یکی از اقدامات مؤثر در این زمینه، بهینه‌سازی در بخش‌های مختلف مصرف‌کننده انرژی و در نتیجه کاهش مصرف آن است. علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف، مدیریت مصرف انرژی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ارزش انرژی الکتریکی تولیدی در ساعات اوج مصرف، به مراتب بیشتر از ارزش آن در ساعات میان‌باری و کم‌باری است، به نحوی که تعرفه برق برای مصرف‌کنندگان نیز متناسب با ارزش آن، در ساعات اوج بار بیشتر از میان‌باری و به همین ترتیب بیشتر از کم‌باری است. در ایران فقط چند ساعت از شبانه‌روز، وضعیت اوج مصرف اتفاق می‌افتد و در سایر ساعات، حتی به یک‌سوم مصرف زمان اوج می‌رسد و در عمل از ظرفیت‌ها و سرمایه‌گذاری‌های موجود استفاده مطلوب نمی‌شود [۱]. در سیستم‌های توزیع آب که جزء لاینفک زیربنای شهری محسوب می‌شوند، عمده مصرف انرژی الکتریکی توسط پمپ‌های تأمین آب صورت می‌پذیرد. در آمریکا حدود ۴ درصد از مصارف انرژی الکتریکی مربوط به شبکه‌های توزیع آب و تصفیه آن است [۲]. از این رو صرفه‌جویی و مدیریت در انرژی مصرفی این بخش، به طور مستقیم تأثیر بسزایی در کاهش مصرف انرژی شبکه تأمین و توزیع آب و هزینه‌های آن خواهد داشت. هزینه پرداختی برای پمپاژ آب در مدت یک سال در کشور انگلستان، حدود ۷۰۰ میلیون پوند بوده است [۳]. در اکثر کشورها بزرگ‌ترین بخش بودجه سیستم‌های توزیع آب، مربوط به هزینه برق مصرفی آن‌هاست [۴]. قسمت اعظم این بودجه مربوط به هزینه انرژی مصرفی پمپ‌ها (بیش از ۹۰ درصد مصرف انرژی کل سیستم) است که تا حد زیادی به نرخ‌گذاری انرژی در هر کشوری وابسته است. از طرف دیگر، میزان این مصرف با توان پمپ و زمان مصرف رابطه مستقیم دارد. مدیریت مصرف انرژی با هدف کاهش مصرف در ساعات پرباری می‌تواند در کاهش هزینه‌های انرژی بسیار مؤثر باشد. به عبارت دیگر، مناسب‌تر است پمپاژ آب به مخازن و پرکردن آن‌ها در ساعات کم‌باری صورت گیرد که هزینه کمتری دارد. اما محدودیتی که سبب ایجاد چالش در برنامه‌ریزی زمانی پمپاژ می‌شود، ظرفیت ذخیره محدود مخازن است که جواب‌گوی مقدار مصرف در باقی‌مانده ساعات شبانه‌روز نیست و لازم است در ساعات دیگر شبانه‌روز نیز، پمپاژ کافی به مخازن صورت گیرد.

درواقع می‌توان با بهره‌گیری از ظرفیت ذخیره‌سازی مخازن، همراه با

کنترل بهینه پمپ‌ها و باتوجه به تعرفه برق زمانی متغیر به صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌های مصرف برق دست یافت، بدون آنکه نیاز به هزینه‌های سخت‌افزاری باشد [۴]. در مطالعات گذشته نشان داده شده است که با برنامه‌ریزی زمانی بهینه پمپاژ می‌توان حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد در هزینه انرژی الکتریکی صرفه‌جویی کرد [۵]. منظور از برنامه‌ریزی زمانی پمپاژ، انتخاب ترکیب صحیحی از پمپ‌ها در هر بازه زمانی است. در این خصوص برنامه زمانی بهینه پمپاژ، برنامه زمانی است که اهداف مشخصی را بهینه می‌کند و در عین حال محدودیت‌های مختلف فیزیکی و بهره‌برداری مثل تأمین نیاز مصرف‌کنندگان را ارضا می‌کند. در اکثر مطالعات انجام‌شده جانمایی شبکه و اجزای مختلف آن مثل پمپ‌ها از قبل مشخص است و بهینه‌سازی در فاز بهره‌برداری صورت می‌گیرد. مرجع [۶] مرور نسبتاً کاملی روی مدل‌های بهینه‌سازی خطی، غیرخطی، عدد صحیح، مختلط و پویا که با هدف کمینه‌کردن هزینه برق صورت گرفته انجام می‌دهد. در مطالعه ایشان، تقسیم‌بندی مطالعات برحسب نوع مدل بهینه‌سازی، نوع مدل هیدرولیکی مورد استفاده، نوع شبکه از نقطه نظر تعداد مخازن و همچنین نوع تابع مصرف صورت می‌گیرد. مرجع [۷] از الگوریتم ژنتیک برای برنامه‌ریزی زمانی پمپاژ یک شبکه تک‌مخزنه شامل ۴ پمپ در یک دوره ۲۴ ساعته استفاده می‌کند. مرجع [۸] از الگوریتم جامعه مورچگان در بهینه‌سازی برنامه زمانی پمپاژ استفاده می‌کند و نتایج را با الگوریتم ژنتیک^۱ مقایسه می‌کند که در این مقایسه، الگوریتم مورچگان نسبت به الگوریتم ژنتیک، از نظر هزینه پمپاژ موفق‌تر است. به علاوه در این مطالعه، تأثیر گام‌های زمانی کمتر از یک ساعت (نیم ساعت و ربع ساعت) نیز در مدل‌سازی بررسی می‌شود که برخلاف انتظار نتایج نسبت به گام زمانی یک‌ساعته بدتر است. علت این موضوع بزرگ شدن فضای جستجو برای الگوریتم است که علی‌رغم شانس حصول به جواب‌های بهتر، به علت افزایش شبیه‌سازی‌ها موفق الگوریتم برای رسیدن به جواب بهینه را کمتر می‌کند [۸]. البته در بهره‌برداری‌های واقعی، استفاده از گام‌های زمانی کمتر از یک ساعت، به سبب افزایش تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها و در نتیجه استهلاک پمپ‌ها مطلوب نیست [۸]. مرجع [۹] از یک الگوریتم شاخه و حد^۲ ابتکاری برای تعیین برنامه‌ریزی بهینه پمپاژ یک شبکه فرضی با یک مخزن و سه پمپ تقویتی استفاده می‌کند. روش ارائه‌شده در این مرجع که مبتنی بر یک روش شمارشی درختی است، برای شبکه با تعداد پمپ‌های کم می‌تواند منجر به جواب بهینه کلی شود و با افزایش تعداد زیاد پمپ‌ها به دلیل افزایش نمای تعداد جواب‌ها، عملاً کارایی خود را از دست می‌دهد. مرجع [۱۰] برنامه‌ریزی بهینه پمپاژ در شبکه توزیع آب با

تقویتی پمپ‌هایی هستند که برای تأمین فشار کافی در قسمت‌هایی از شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در برنامه‌ریزی زمان‌بندی پمپاژ در انتقال آب از چاه‌ها به مخازن، ظرفیت محدود مخازن مهم‌ترین چالش برنامه‌ریزی است، درحالی‌که در برنامه‌ریزی زمان‌بندی پمپاژ برای شبکه‌های شامل پمپ‌های تقویتی، تأمین فشار کافی و مجاز در گره‌های مصرف، چالش برنامه‌ریزی را بیشتر می‌کند.

درحالی‌که در بیشتر مطالعات گذشته، مدیریت مصرف انرژی در برنامه‌ریزی زمان‌بندی پمپاژ به‌تنهایی مورد توجه قرار گرفته، اما در برنامه‌ریزی، اهداف دیگری نیز می‌تواند مدنظر قرار گیرد. مرجع [۱۱] در مطالعه خود علاوه بر کمینه‌کردن هزینه پمپاژ، به مسئله فرونشست زمین در اثر پمپاژ پیوسته از یک چاه نیز توجه می‌کند. در مدل مورد استفاده در این مرجع، از یک الگوریتم ژنتیک ارتقایافته استفاده می‌شود که برخلاف مطالعات متداول، محدود به گام‌های زمانی ثابت برنامه‌ریزی نیست. بخش دیگر هزینه‌های مرتبط با پمپاژ، به هزینه ناشی از تعمیر و نگهداری پمپ‌ها در طول دوره خدمت‌رسانی پمپ‌ها مربوط می‌شود که منجر به ایجاد یک هزینه ثانویه به نام هزینه استهلاک می‌گردد. این بخش از هزینه‌های پمپاژ در اثر روشن و خاموش شدن‌های مکرر پمپ‌ها به وجود می‌آید که به مرور زمان، موجب فرسایش و از بین رفتن پمپ‌ها خواهد شد. تعداد دفعات خاموش و روشن کردن پمپ‌ها رابطه‌ای مستقیم با استهلاک پمپ‌ها دارد [۸].

درحالی‌که تمرکز اکثر مطالعات گذشته در برنامه‌ریزی زمان‌بندی پمپاژ، فقط به هدف مدیریت مصرف انرژی بوده است، در این مطالعه علاوه بر این هدف، کنترل هزینه استهلاک پمپ‌های شبکه توزیع آب نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. برای این منظور، مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پمپاژ با هدف کمینه‌کردن هزینه انرژی و کنترل هزینه استهلاک پمپ‌ها توسعه داده می‌شود. از آنجایی‌که برآورد هزینه استهلاک پمپ‌ها مشکل است، تأمین این هدف با استفاده از یک هدف جایگزین، یعنی کنترل تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها ارزیابی می‌شود. با کمینه‌کردن تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها، هزینه نگهداری یا استهلاک پمپ‌ها نیز کاهش می‌یابد. به‌منظور کاهش هزینه استهلاک پمپ‌ها تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها از طریق یک محدودیت در مدل بهینه‌سازی کنترل می‌شود. در این مطالعه، برنامه‌ریزی زمان‌بندی پمپاژ برای پمپ‌های مورد استفاده در انتقال آب از منابع تأمین آب (مثلاً چاه‌ها) به مخازن مورد توجه قرار می‌گیرد.

پمپ‌های آبرسان که آب را از چاه‌ها به مخازن منتقل می‌کنند، معمولاً پمپ‌های با دور ثابت هستند که در این مطالعه نیز از پمپ‌های با دور ثابت در مدل‌سازی استفاده می‌شود. افق زمانی برنامه‌ریزی مدل‌سازی،

پمپاژ مستقیم را در قالب یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح^۱ مختلط فرموله می‌کند و از الگوریتم شاخه و حد جهت حل آن استفاده می‌نماید. برخلاف روش‌های ابتکاری تصادفی که تضمینی برای رسیدن به جواب بهینه ندارند، استفاده از الگوریتم روش شاخه و حد برای مسائل نه‌چندان بزرگ می‌تواند منجر به رسیدن به جواب بهینه کلی شود. پمپ‌های مورد استفاده در شبکه‌ها از نوع پمپ‌های با دور ثابت یا پمپ‌های با دور متغیرند. در پمپ‌های دور ثابت، دبی پمپاژ هر پمپ مشخص است، اما در شبکه با پمپ‌های دور متغیر، دبی هر پمپ می‌تواند تغییر کند. فرموله‌کردن مسئله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پمپاژ بسته به نوع پمپ‌های مورد استفاده متفاوت است. در حالت پمپ‌های دور ثابت، هدف این است که در هر گام زمانی، کدام یک از پمپ‌ها روشن و کدام یک از آن‌ها خاموش باشد. اما در حالت پمپ‌های دور متغیر، تعیین دبی بهینه هر پمپ در هر گام زمانی مدنظر است. بنابراین فضای تصمیم درباره متغیر دبی پمپ در پمپ‌های دور ثابت، یک فضای گسسته و به‌طور دقیق‌تر، دودویی^۲ (روشن یا خاموش) است، درحالی‌که فضای تصمیم در خصوص پمپ‌های دور متغیر، فضای پیوسته است. در تعدادی از مطالعات گذشته در حوزه برنامه زمان‌بندی بهینه پمپاژ، پمپ‌های دور ثابت مورد استفاده قرار گرفته است [۸ و ۱۱] و تعدادی از تحقیقات مربوط به پمپ‌های با دور متغیر است [۱۲-۱۵]. مرجع [۱۶] برنامه‌ریزی بهینه پمپاژ را در دو حالت پمپ‌های با دور ثابت و پمپ‌های با دور متغیر بررسی می‌کند. در مدل مورد استفاده این مرجع، در حالت پمپ ثابت، مقادیر دبی پمپ‌ها یا مقدار صفر اختیار می‌کند یا مقدار مشخصی از دبی پمپاژ، درحالی‌که در حالت پمپ با دور متغیر، دبی پمپاژ پمپ‌ها هر عدد حقیقی مثبت کوچک‌تر از ظرفیت پمپاژ پمپ‌ها را می‌تواند اختیار کند. در این مطالعه، برنامه زمان‌بندی پمپاژ با هدف کمینه کردن میزان مصرف انرژی برای یک شبکه شعاعی که از چاه تغذیه می‌شود صورت می‌گیرد. هدف از این مطالعه، تعیین نقاط ماکزیمم عملکرد پمپ‌ها از لحاظ مقدار دبی پمپاژ و سرعت دوران (در خصوص پمپ‌های با دور متغیر) است.

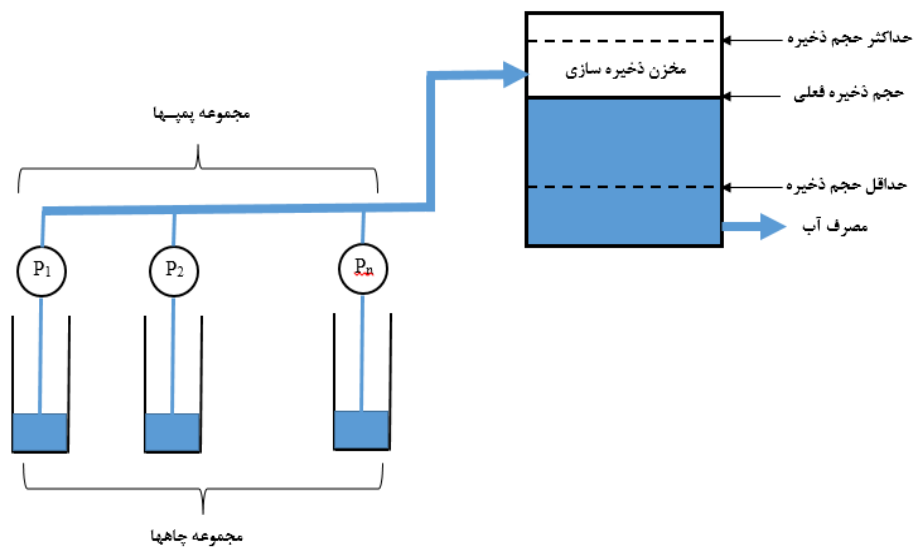
از نقطه نظر دیگر، مطالعات انجام شده در حوزه برنامه‌ریزی زمان‌بندی پمپاژ به دو دسته تقسیم می‌شود: برنامه‌ریزی زمان‌بندی پمپاژ برای پمپ‌های مورد استفاده در انتقال آب از منابع تأمین آب (مثلاً چاه‌ها) به مخازن [۱۱-۱۳] و برنامه‌ریزی زمان‌بندی پمپاژ برای پمپ‌های تقویتی موجود در شبکه توزیع [۸-۱۰، ۱۴-۱۵]. در حالت اول، پمپ‌ها به‌عنوان پمپ‌های آبرسان، آب را از چاه‌ها به مخازن پمپاژ می‌کنند و آب از مخازن به‌صورت تقوی وارد شبکه می‌شود. در نقطه مقابل، پمپ‌های

1. Integer Non-Linear Programming
2. Binary

برای تأمین آب موردنیاز شبکه‌های توزیع آب، از منابع موجود مثل چاه‌ها، آب به مخزن یک شبکه پمپاژ می‌شود. شکل (۱) مجموعه مخزن و پمپ‌های یک شبکه توزیع آب را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. برای انتقال آب به مخزن ممکن است یک یا چند پمپ به‌طور هم‌زمان کار کنند. انتقال و پمپاژ آب در هر ساعتی از شبانه‌روز، حتی در ساعات اوج مصرف برق نیز می‌تواند انجام شود که نتیجه این امر می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های ناشی از برق مصرفی توسط پمپ‌ها شود. در این باره، تعیین برنامه‌ی زمانی بهینه‌ی پمپاژ برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در این مطالعه، جانمایی مخزن و پمپ‌ها مشخص است.

یک شبانه‌روز و با گام‌های زمانی ساعتی است. برای بررسی کارایی مدل، برخلاف اکثر مطالعات گذشته که از شبکه‌های فرضی استفاده شده، از یک مطالعه‌ی موردی واقعی استفاده می‌شود که در تعیین تعرفه برق نیز، از تعرفه‌های برق واقعی و مطابق مصوبه وزارت نیرو بهره گرفته می‌شود. در ادامه این مقاله، ابتدا روش تحقیق شامل فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی و روش حل آن ارائه می‌شود. سپس مطالعه‌ی موردی و مشخصات آن معرفی می‌شود و با به‌کارگیری مدل ساخته‌شده برای مطالعه‌ی موردی، نتایج بیان شده و در نهایت جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از مقاله صورت می‌گیرد.

۲. روش تحقیق



شکل (۱): سیستم مخزن و مجموعه پمپ‌ها

Subject to:

$$Cost_{i,t} = E_{i,t} \cdot r_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$E_{i,t} = \frac{0.002725 \cdot q_{i,t} \cdot h_i}{\eta_i} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$q_{i,t} = Z_{i,t} \cdot q_i^* \quad \forall t = 1, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$Z_{i,t} \text{ is binary} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^n q_{i,t} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - D_t \quad \forall t = 1, \dots, T-1 \quad (7)$$

۱.۲. فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی

باتوجه به اینکه چالش تصمیم‌گیری در تعیین برنامه زمانی بهینه پمپاژ مربوط به تعیین زمان خاموش و روشن کردن پمپ‌ها می‌باشد از این‌رو، مدل مذکور در قالب یک مدل برنامه‌ریزی دودویی (صفر و یکی) فرموله می‌شود. برای این منظور از متغیرهای دودویی به فرم $Z_{i,t}$ برای حالت روشن و خاموش پمپ‌ها، استفاده می‌شود که $Z_{i,t}=1$ بیانگر حالت روشن و $Z_{i,t}=0$ بیانگر حالت خاموش پمپ i در گام زمانی t می‌باشد. مدل بهینه‌سازی لازم برای تعیین برنامه زمانی بهینه پمپاژ شامل تابع هدف و قیود مخزن و قیود پمپ‌ها، می‌تواند به صورت زیر فرموله گردد:

$$Obj: \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T Cost_{i,t} \quad (1)$$

قید در مدل بهینه‌سازی در تکرار قاعده بهره‌برداری در طول چند شبانه‌روز می‌تواند منجر به ناکارآمدی مخزن در تأمین نیازها شود. همانطور که اشاره شد، برای جلوگیری از استهلاک پمپ‌ها در این مطالعه، متوسط دفعات خاموش‌روشن شدن پمپ‌ها محدود می‌شود که این موضوع از طریق روابط (۱۰) تا (۱۲) به مدل معرفی می‌شود.

۲.۲. حل مدل بهینه‌سازی

مدل فرموله شده در این مطالعه، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی است که برای حل آن از نرم‌افزار لینگو^۱ استفاده می‌شود. در این نرم‌افزار، برای حل مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح از الگوریتم شاخه و حد استفاده می‌شود. الگوریتم شاخه و حد یک الگوریتم مؤثر ریاضی در حل مسائل مختلف بهینه‌سازی گسسته است. این الگوریتم با شمارش تمامی جواب‌های مسئله و با حذف بسیاری از آن‌ها از طریق تخمین مرزهای بالا و پایین جواب، مقدار بهینه را برای مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌کند. درحالی‌که استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری مثل الگوریتم ژنتیک، رسیدن به جواب بهینه کلی را تضمین نمی‌کند. استفاده از الگوریتم شاخه و حد برای مسائل نه‌چندان بزرگ می‌تواند منجر به رسیدن به جواب بهینه کلی شود، اما برای مسائل بزرگ با تعداد زیاد متغیرهای عدد صحیح کارایی خود را از دست می‌دهد و عملکرد بهتری از شمارش کامل نخواهد داشت. در مطالعه موردی پیش رو با تعداد نسبتاً کمی از متغیرهای عدد صحیح (از نوع دودویی)، انتظار می‌رود استفاده از این روش منجر به رسیدن به جواب‌های بهینه کلی شود.

۳. مطالعه موردی

در این تحقیق، تعیین برنامه زمانی بهینه پمپاژ شهرستان نوش‌آباد از توابع شهر کاشان که در استان اصفهان و در ۹ کیلومتری شهرستان کاشان قرار دارد، بررسی شده است. مصرف آب شرب و کشاورزی این شهرستان به‌طور کل در حدود ۷۴۷۵۵۱ مترمکعب در سال است. شبکه توزیع آب شهر نوش‌آباد یک شبکه تقلی است که آب آن از طریق یک مخزن تأمین می‌شود. حداقل حجم ذخیره مجاز تنها مخزن زمینی این شهرستان در زمان مطالعه، ۱۲۰۰ مترمکعب و حداکثر مجاز آن ۲۰۰۰ مترمکعب و دارای ابعادی به طول ۳۰ متر، عرض ۲۰ متر و ارتفاع ۴ متر است و در تراز ۸۹۹ متری از سطح دریا واقع شده است. آب موردنیاز این شهرستان برای مصارف مختلف توسط پنج حلقه چاه تأمین می‌شود که آب استحصالی تمامی این چاه‌ها در نهایت توسط یک خط لوله به مخزن تأمین آب شبکه وارد می‌شوند. مشخصات

$$S_T + Q_T - D_T \geq S_1 \quad (8)$$

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$NS = \sum_{i=1}^n \sum_{t=2}^T |Z_{i,t} - Z_{i,t-1}| \quad (10)$$

$$MNS = \frac{NS}{n} \quad (11)$$

$$MNS \leq SW \quad (12)$$

در روابط فوق، t نشان‌دهنده گام زمانی مدل‌سازی است که در این مطالعه از گام زمانی ساعتی استفاده می‌شود؛ T تعداد بازه‌های زمانی در طول دوره بهره‌برداری برای برنامه‌ریزی است که در این مطالعه مقدار آن ۲۴ است؛ i شماره پمپ موردنظر، n تعداد پمپ‌های موردبهره‌برداری، $Cost_{i,t}$ معرف هزینه کلی برق مصرفی پمپ i ام در گام زمانی t ام برحسب ریال، $E_{i,t}$ میزان انرژی الکتریسیته مصرف‌شده توسط پمپ i در گام زمانی t برحسب کیلووات ساعت، r_t نرخ یا تعرفه برق برحسب ریال بر کیلووات ساعت در گام زمانی t ، η_i راندمان پمپ i ، $q_{i,t}$ دبی پمپ i برحسب مترمکعب بر ساعت در گام زمانی t ام، h_i ارتفاع پمپاژ پمپ i ام برحسب متر، S_i میزان ذخیره مخزن در گام زمانی t ام برحسب مترمکعب، Q_t دبی ورودی مخزن در گام زمانی t ام برحسب مترمکعب بر ساعت، D_t نیاز آبی مصرف‌کنندگان در گام زمانی t ام برحسب مترمکعب بر ساعت، S_{min} حداقل ذخیره مجاز مخزن برحسب مترمکعب، S_{max} حداکثر ذخیره مجاز مخزن برحسب مترمکعب، NS تعداد دفعات خاموش‌روشن شدن پمپ‌ها، MNS متوسط تعداد دفعات خاموش‌روشن شدن پمپ‌ها، SW متوسط مجاز دفعات خاموش‌روشن شدن پمپ‌هاست که به‌عنوان پارامتر به مدل معرفی می‌شود. باتوجه‌به اینکه متغیرهای دودویی $Z_{i,t}$ متغیرهای تصمیم مدل به حساب می‌آیند، تعداد کل متغیرهای تصمیم مدل برابر با nT است. در روابط فوق، تابع هدف در قالب رابطه (۱) معرف کمینه کردن هزینه برق مصرفی توسط پمپ‌هاست. هزینه برق مصرفی در قالب رابطه (۲) تابعی از میزان مصرف برق و تعرفه برق است. میزان برق مصرفی هر پمپ در هر گام زمانی نیز در قالب رابطه (۳) تعیین می‌شود که تابعی از میزان دبی پمپاژ، هد پمپ و راندمان پمپ است. دبی پمپاژ هر پمپ بسته به اینکه پمپ موردنظر روشن باشد یا خاموش، به ترتیب یا مقدار مشخصی دارد (q_i^*) یا مقدار آن برابر صفر است. روابط (۴) تا (۹) مربوط به قیود پیوستگی و فیزیکی مخزن است. علت استفاده از محدودیت رابطه (۸) در مدل، عدم استفاده از ذخیره آب مخزن یک دوره (در اینجا یک شبانه‌روز) برای دوره بعد است. عدم استفاده از این

برنامه ریزی بهینه زمان بندی پمپاژ به مخازن شبکه های توزیع آب با کنترل... ۴۷

پمپ های مورد استفاده در این چاه ها در جدول (۱) ارائه شده است که متوالی روی یک محور نصب می شوند. استفاده از پمپ های چند طبقه در آن، مدل پمپ از دو قسمت تشکیل شده که عدد بعد از اعشار بیانگر تعداد طبقات پمپ است [۱۷]. در پمپ چند طبقه، تعدادی پمپ به طور متداول است.

جدول (۱): مشخصات پمپ ها [۱۷]

شماره پمپ (i)	مدل پمپ	دبی پمپاژ* (مترمکعب بر ساعت)	ارتفاع پمپاژ (متر)	راندمان (%)
۱	۶۶۰۸/۹	۱۸	۱۶۵	۵۸
۲	۶۶۰۸/۱۳	۱۸	۲۳۸	۵۹
۳	۶۶۰۹/۱۲	۳۹/۶	۲۱۱	۷۷
۴	۶۶۱۱/۱۱	۶۱/۲	۱۸۳	۷۵
۵	۲۹۳/۸	۳۰	۱۵۳	۶۵

* مقادیر مندرج در این ستون، همان مقادیر q_i^* ظاهر شده در رابطه (۴) است.

در جدول (۲)، نیاز آبی مصرف کنندگان در ساعات مختلف شبانه روز مربوط به یک روز مشخص از سال (۲۳ بهمن ۱۳۹۴) ارائه شده است [۱۷]. در مطالعات گذشته، عمدتاً از یک الگوی متوسط مصرف بهره برداری تاریخی را فراهم می کنند.

جدول (۲): نیاز آبی مصرف کنندگان در ساعات مختلف شبانه روز [۱۷]

دبی مورد نیاز (مترمکعب بر ساعت)	گام زمانی (ساعت)	دبی مورد نیاز (مترمکعب بر ساعت)	گام زمانی (ساعت)	دبی مورد نیاز (مترمکعب بر ساعت)	گام زمانی (ساعت)	دبی مورد نیاز (مترمکعب بر ساعت)	گام زمانی (ساعت)
۱۱۸	۱۹	۱۸۸	۱۳	۸۲/۲	۷	۶۰/۴	۱
۹۸/۴	۲۰	۱۶۱	۱۴	۶۴/۹	۸	۳۳/۵	۲
۸۴/۶	۲۱	۱۴۴	۱۵	۱۲۱	۹	۲۱/۳	۳
۸۰/۶	۲۲	۱۳۴	۱۶	۱۵۲	۱۰	۱۸/۳	۴
۹۴/۱	۲۳	۱۲۰	۱۷	۱۷۴	۱۱	۴۰/۶	۵
۶۸/۲	۲۴	۱۰۹	۱۸	۱۵۲	۱۲	۱۰/۲	۶

برق مصرفی برای پمپاژ آب به مخازن، جزء مصارف تولید محسوب می شود. در جدول (۳) تعرفه برق برای مصارف تولید، مطابق مصوبه وزارت نیرو در سال ۱۳۹۴ ارائه شده است [۱۸]. همان طور که از جدول (۳) مشخص است، در خصوص پمپ های با توان قراردادی بالای ۳۰ کیلووات، بهای مصرف برق از مجموع دو بهای انرژی و بهای قدرت تشکیل شده است. توان قراردادی همان توانی است که توسط فرد یا سازمان مربوط از شرکت توزیع نیروی برق خریداری می شود و بر حسب کیلووات است. در مطالعه موردی پیش رو، توان قراردادی همه

جدول (۳): تعرفه برق برای مصارف تولید مصوب وزارت نیرو در سال ۱۳۹۴ [۱۸]

پلکان های زمانی (ساعت)		$kw \leq 30$ توان قراردادی پمپ		$kw > 30$ توان قراردادی پمپ	
حالات بار	نیمه اول سال	نیمه دوم سال	نرخ انرژی (ریال به کیلووات ساعت)	نرخ انرژی (ریال به کیلووات ساعت)	نرخ قدرت (ریال به کیلووات)
میان بار	۱۹ تا ۷	۱۷ تا ۵	۲۶۶	۲۱۳	۱۶۳۶۸
اوج بار	۲۳ تا ۱۹	۲۱ تا ۱۷	۵۳۲	۴۲۶	۱۶۳۶۸
کم بار	۷ تا ۲۳	۵ تا ۲۱	۱۳۳	۱۰۶/۵	۱۶۳۶۸

۴. ارائه نتایج و تفسیر آن

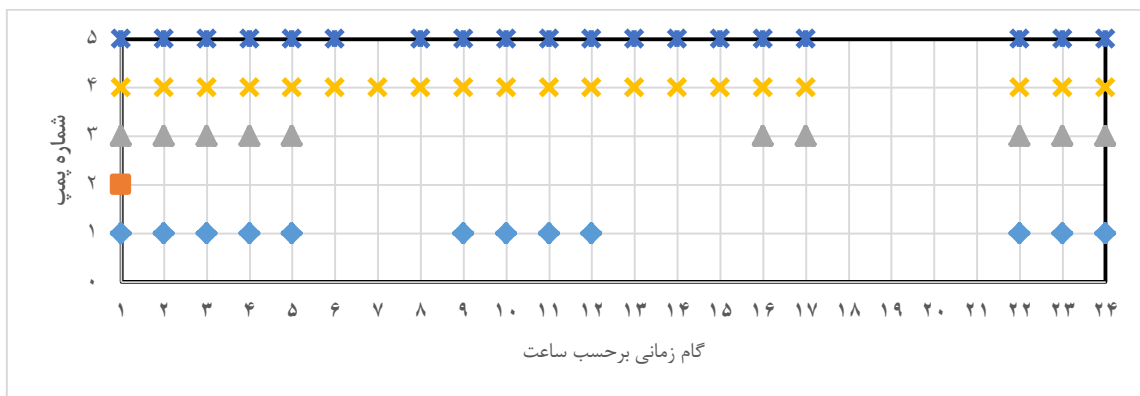
در این بخش، نتایج مدل بهینه‌سازی فرموله‌شده برای مطالعه موردی ارائه می‌شود. برای این منظور، مدل در سه حالت بدون قید استهلاک پمپ‌ها (رابطه ۱۲)، حالت با منظورکردن قید استهلاک پمپ‌ها و مقدار $SW=1$ و حالت با منظورکردن قید استهلاک پمپ‌ها و مقدار $SW=2$ بررسی می‌شود. برای نشان‌دادن کارایی مدل، نتایج سه حالت فوق همراه با وضعیت بهره‌برداری تاریخی موجود در جدول (۴) مقایسه می‌شود. شایان ذکر است که در همه اجراها مدل به جواب بهینه کلی منتج شده است.

مقایسه بین حالات مختلف برنامه‌ریزی از دو جنبه قابل‌بررسی است: یکی هزینه انرژی و دیگری هزینه مربوط به استهلاک پمپ‌ها که در قالب تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها بیان شده است. همان‌گونه که از جدول (۴) مشخص است، مطابق انتظار هزینه انرژی در حالت برنامه‌ریزی بدون ملاحظه قید استهلاک پمپ‌ها از بقیه حالات کمتر است. علاوه‌براین، قید مربوط به استهلاک پمپ‌ها با کاهش مقدار SW فضای شدنی مسئله را کوچک‌تر می‌کند و در نتیجه، مطابق انتظار هزینه انرژی در حالت $SW=1$ از هزینه انرژی در حالت $SW=2$ بیشتر است. در مقایسه با سه حالت بهینه به دست آمده از مدل، هزینه انرژی در حالت بهره‌برداری موجود به مراتب بیشتر است. در این حالت، هزینه انرژی نسبت به نتایج بهینه مدل در حالت بدون قید استهلاک پمپ‌ها، حدود ۲۳ درصد بیشتر است. از نقطه نظر تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها، بیشترین محدودیت مربوط به حالت مدل مقید به قید استهلاک پمپ‌ها با $SW=1$

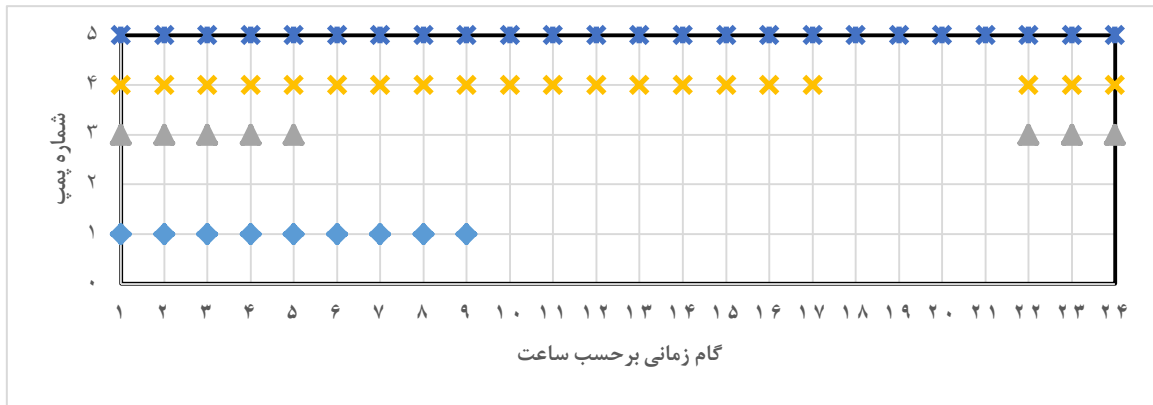
است که در نهایت، کمترین تعداد کل دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها با $NS=5$ مربوط به این حالت برنامه‌ریزی است. با مقایسه سه حالت مختلف مدل برنامه‌ریزی بهینه، دو هدف کمینه‌کردن هزینه انرژی برق و هدف کاهش استهلاک پمپ‌ها در تعارض با همدیگر قرار دارند، به نحوی که مدل بدون ملاحظه قید استهلاک پمپ‌ها با کمترین هزینه انرژی، دارای بیشترین تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها با $NS=15$ است و مدل با ملاحظه قید استهلاک پمپ‌ها و اکیدترین قید با $SW=1$ دارای بیشترین هزینه و کمترین تعداد کل دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها با $NS=5$ می‌باشد. گفتنی است که نتایج مدل با قید مقادیر $SW=3$ و بیشتر از آن، دقیقاً منطبق بر نتایج مدل بدون ملاحظه قید استهلاک پمپ‌هاست. چون متوسط دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها در حالت بدون قید، عملاً برابر با ۳ می‌شود و قید استهلاک پمپ‌ها با مقادیر SW بزرگ‌تر یا مساوی ۳ یک قید غیرفعال است که هیچ تأثیری در جواب‌های مدل ندارد. از منظر تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها، وضعیت بهره‌برداری موجود حتی نسبت به نتایج مدل بدون ملاحظه این موضوع نیز بدتر است و متوسط تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها در حالت بهره‌برداری موجود بیشتر از ۳ است. برای نشان دادن جزئیات بیشتری از سهم پمپ‌ها از کل هزینه انرژی در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز، نمودار ساعات روشن شدن پمپ‌ها در ۴ حالت مختلف برنامه‌ریزی، در شکل‌های (۲) تا (۵) نمایش داده شده است.

جدول (۴): نتایج مربوط به مدل بهینه‌سازی و مقایسه با بهره‌برداری تاریخی

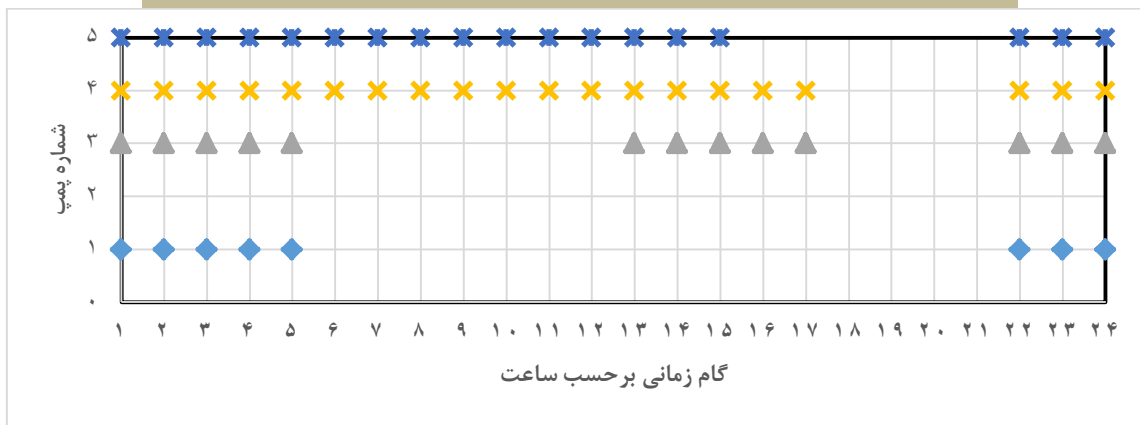
حالت برنامه‌ریزی	SW	NS	پمپ ۱	پمپ ۲	پمپ ۳	پمپ ۴	پمپ ۵	هزینه انرژی (ریال)
مدل بدون قید استهلاک پمپ‌ها	--	۱۵	۴	۱	۴	۲	۴	۲۶۳۸۳۵
مدل با قید استهلاک پمپ‌ها	۱	۵	۱	۰	۲	۲	۰	۲۸۱۵۶۲
مدل با قید استهلاک پمپ‌ها	۲	۱۰	۲	۰	۴	۲	۲	۲۶۴۶۳۶
وضعیت بهره‌برداری موجود	--	۱۶	۰	۴	۴	۴	۴	۳۲۵۱۹۶



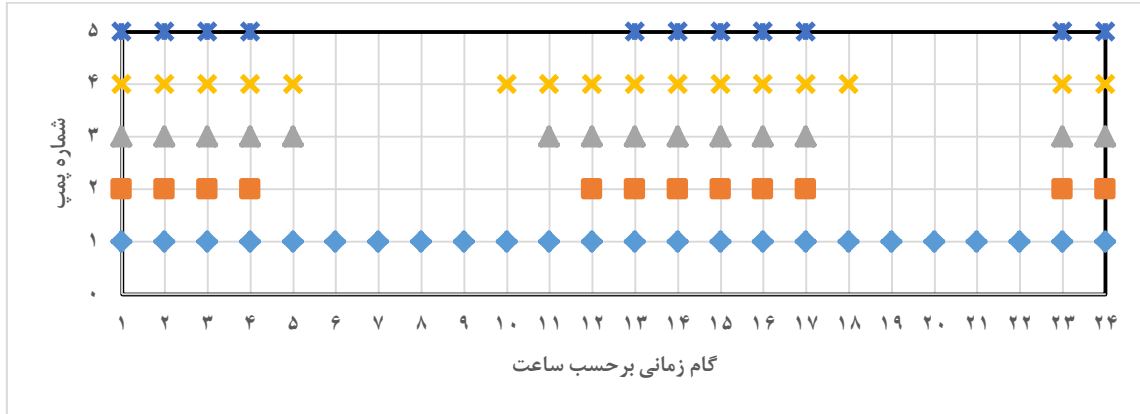
شکل (۲): نمودار ساعات روشن بودن پمپ‌ها در مدل بهینه‌سازی بدون ملاحظه قید استهلاک پمپ‌ها



شکل (۳): نمودار ساعات روشن بودن پمپ‌ها در مدل بهینه‌سازی با ملاحظه قید استهلاک پمپ‌ها ($SW=1$)



شکل (۴): نمودار ساعات روشن بودن پمپ‌ها در مدل بهینه‌سازی با ملاحظه قید استهلاک پمپ‌ها ($SW=2$)



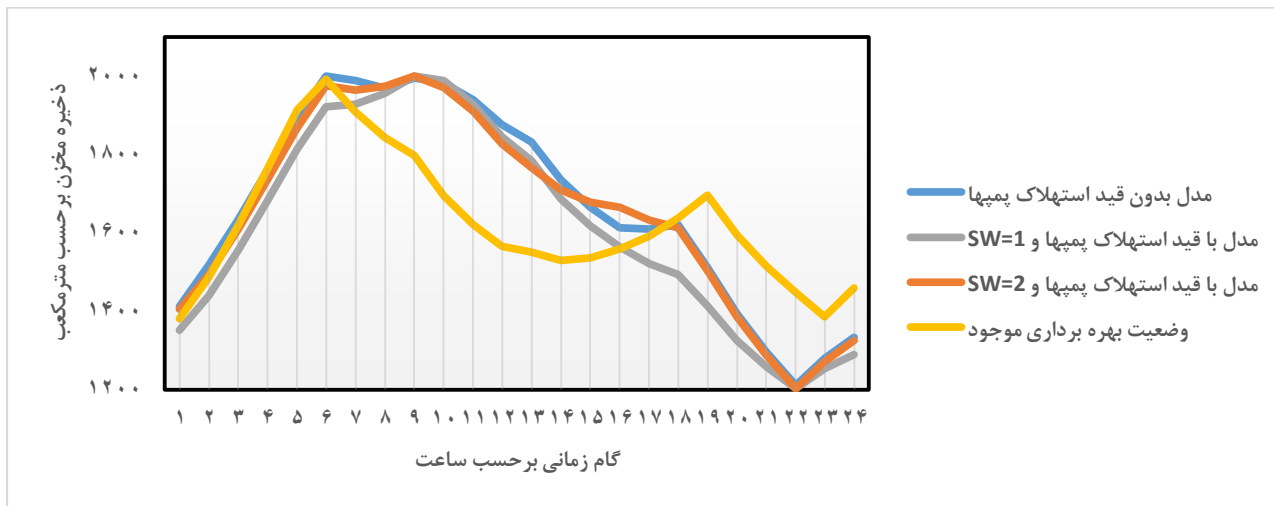
شکل (۵): نمودار ساعات روشن بودن پمپ‌ها در وضعیت بهره‌برداری موجود

فقط پمپ ۱ در این ساعات روشن است و بقیه پمپ‌ها استفاده نمی‌شود. باتوجه به تعرفه برق پایین‌تر در ساعات ۲۱ تا ۵ صبح، در همه حالات برنامه‌ریزی، استفاده بیشتری از پمپ‌ها صورت گرفته است. نکته دیگر، اولویت استفاده از پمپ‌ها در مدل برنامه‌ریزی است. باتوجه به رابطه (۳) مقادیر انرژی الکتریکی مصرفی پمپ‌ها به ترتیب برابر $19/79$ ، $13/95$ ، $29/57$ ، $40/69$ و $19/24$ کیلووات ساعت است. همچنین مطابق جدول (۱) دبی پمپاژ پمپ‌ها به ترتیب برابر 18 ، 18 ، $39/6$ ، $61/2$ و 30 مترمکعب بر ساعت است. باتوجه به میزان مصرف انرژی الکتریکی و دبی پمپاژ پمپ‌ها، پمپ ۲ در مقایسه با پمپ ۱ با دبی پمپاژ یکسان مصرف

عواملی چون دبی هر پمپ، ارتفاع پمپاژ، راندمان هر پمپ، مقدار ذخیره مخزن، حداقل و حداکثر ذخیره مخزن، تعرفه برق زمان-متغیر و تعداد دفعات روشن و خاموش شدن هر پمپ، که همگی در قالب مدل بهینه‌سازی فرموله شده‌اند، در نهایت منجر به خروجی‌های بهینه هر مدل می‌شود. مثلاً در ساعات ۱۷ تا ۲۱ باتوجه به گران‌تر بودن تعرفه برق، در حالت برنامه‌ریزی بدون ملاحظه قید استهلاک پمپ‌ها و حالت مدل مقید به قید استهلاک پمپ‌ها با $SW=2$ هیچ‌کدام از پمپ‌ها روشن نیست و فقط در حالت مدل مقید به قید استهلاک پمپ‌ها با $SW=1$ پمپ ۵ در این ساعات روشن است. در وضعیت بهره‌برداری موجود نیز

روشن است.
در شکل (۶) نمودار تغییرات ذخیره آب مخزن در طول شبانه‌روز برای برنامه‌ریزی‌های مختلف ارائه شده است.

برق بیشتری دارد. همچنین در مقایسه با پمپ ۵ نیز با وجود مصرف برق تقریباً یکسان، دبی پمپاژ کمتری دارد. به همین دلیل است که در همه حالات مدل بهینه‌سازی، پمپ ۲ استفاده نشده و فقط ۱ بار و آن هم در حالت مدل بدون قید استهلاك پمپ‌ها و در اولین ساعت شبانه‌روز



شکل (۶): تغییرات ذخیره مخزن در ساعات شبانه‌روز در حالات مختلف برنامه‌ریزی

شد. برای کنترل استهلاك پمپ‌ها از یک قید در برنامه‌ریزی زمانی پمپاژ استفاده شد که متوسط دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها توسط این قید کنترل گردید. برای حل مدل، از روش ریاضی شاخه و حد در قالب نرم‌افزار لینگو استفاده شد. استفاده از این روش در همه اجراها منجر به جواب بهینه کلی شد.

برای نشان‌دادن کارایی مدل مذکور، شبکه آب شهر نوش‌آباد از توابع شهرستان کاشان، به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شد. باتوجه‌به اینکه دو هدف کمینه‌کردن هزینه انرژی برق و هدف کاهش استهلاك پمپ‌ها در تعارض با همدیگر قرار داشتند، حساسیت نتایج مدل نسبت به تقویت هدف دوم موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حالتی که در آن قید استهلاك پمپ منظور نشده بود نسبت به حالات دیگر، هزینه انرژی کمتری دارد ولی در عوض متوسط تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها در این حالت بیشتر بود. هزینه انرژی در این حالت در مقایسه با هزینه انرژی در بهره‌برداری تاریخی، حدود ۲۳ درصد کمتر بود. هزینه انرژی حتی در حالتی که قید استهلاك پمپ در پراهمیت ترین حالت خود منظور شده بود و متوسط دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها به ۱ محدود شده بود نیز، در مقایسه با بهره‌برداری تاریخی حدود ۱۵ درصد کمتر بود. در بهره‌برداری تاریخی، تعداد کل دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها برابر با ۱۶ بود که این پارامتر در خروجی‌های مدل حتی در حالت عدم ملاحظه قید استهلاك پمپ‌ها برابر با ۱۵ است.

همان‌طور که از نمودار شکل (۶) مشهود است در سه حالت برنامه‌ریزی بهینه، در ساعات اول شبانه‌روز باتوجه‌به تعرفه کم برق و حداکثر ظرفیت پمپاژ و همچنین مصرف کم آب توسط مصرف‌کنندگان، مخزن در حال پر شدن است و در حد فاصل ساعت ششم برنامه‌ریزی (پنج صبح) تا ساعت دهم برنامه‌ریزی (ساعت نه صبح) ذخیره مخزن در حداکثر مقدار مجاز خود قرار دارد. همچنین باتوجه‌به تعرفه گران‌تر برق در ساعت اوج بار (ساعت ۱۷ تا ۲۱)، از ذخیره آب موجود مخزن تا جای ممکن بهره گرفته می‌شود، به‌نحوی که در ابتدای ساعت بیست‌ودوم برنامه‌ریزی (ساعت ۲۱) ذخیره آب مخزن در حدود حداقل مقدار مجاز خود قرار دارد.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، برنامه‌ریزی بهینه پمپاژ آب به مخازن شبکه توزیع آب در یک افق زمانی ۲۴ ساعته و در گام‌های زمانی ساعتی مورد بررسی قرار گرفت. در یک برنامه‌ریزی زمانی پمپاژ تعیین می‌شود که چه پمپ یا پمپ‌هایی، در چه گام زمانی روشن یا خاموش باشد تا هدف برنامه‌ریزی تأمین گردد. در این مطالعه علاوه بر مدیریت مصرف انرژی و کمینه‌کردن هزینه برق مصرفی ناشی از پمپاژ، کنترل هزینه‌های ناشی از استهلاك پمپ‌ها در اثر روشن و خاموش شدن‌های متعدد نیز مورد توجه قرار گرفت. برای این منظور، مسئله بهینه‌سازی زمان‌بندی پمپاژ آب از چاه‌ها به مخزن در قالب یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح فرموله

به نحوی که در انتهای ساعات پرباری، ذخیره آب مخزن در حدود حداقل مقدار مجاز خود قرار می‌گیرد. این موضوع خود می‌تواند برای استخراج الگویی مناسب برای تدوین یک سیاست بهره‌برداری مناسب و بهینه مورد استفاده قرار گیرد.

در این مطالعه، عدم قطعیت در مقدار و الگوی مصرف آب روزانه لحاظ نشد و مدل‌سازی برای یک روز مشخص از سال با مقادیر مصرف ساعتی معلوم صورت گرفت. لحاظ کردن عدم قطعیت در مقادیر مصارف و استفاده از الگوهای مختلف مصرف، می‌تواند برای استخراج سیاست بهره‌برداری مناسب و بهینه در بهره‌برداری واقعی مورد استفاده قرار گیرد که بستر مناسبی برای پژوهش‌های آتی است.

نتایج مربوط به وضعیت روشن و خاموش شدن پمپ‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز، به خوبی کارایی مدل بهینه‌سازی را نشان داد، به نحوی که در ساعات پرباری، پمپاژ کمتری صورت می‌گیرد و برعکس عمده پمپاژ در ساعات کم‌باری انجام می‌شد. به علاوه اولویت در روشن شدن پمپ‌ها با پمپ‌هایی بود که به علت راندمان بالاتر یا ارتفاع پمپاژ کمتر، برق کمتری مصرف می‌کردند.

بررسی تغییرات ذخیره آب مخزن نشان داد که در ساعات اول شبانه‌روز، با توجه به تعرفه کم برق و حداکثر ظرفیت پمپاژ و همچنین مصرف کم آب توسط مصرف‌کنندگان، مخزن در حال پر شدن بود و در ابتدای ساعات میان‌باری به حداکثر مقدار مجاز خود می‌رسید و بعد از آن از ذخیره آب موجود مخزن تا جای ممکن بهره گرفته می‌شد.

مراجع

- [1] Kia, M., Sahebi, M., Abedini, E., Hosseini, S. H., "Simultaneous Implementation of Optimal Demand Response and Security Constrained Unit Commitment", 16th Electric Power Distribution Conference, Iran, 2011.
- [2] Pasha, MFK., Lansley, K. "Strategies to Develop Warm Solutions for Real-Time Pump Scheduling for Water Distribution Systems", Water Resources Management Vol. 28, No.12, pp. 3975–3987, 2014.
- [3] Savic, DA., Walters, GA., Schawb M "Multiobjective Genetic Algorithms for Pump Scheduling in Water Supply", In: AISB International Workshop on Evolutionary Computing, Berlin, pp.227–236, 1997.
- [4] Mays, LW., "Water Distribution Systems Handbook", New York: McGraw-Hill, 2000.
- [5] Boulos, PF., Moore, M., Hsiung, P., Thomas, D., "Optimal Pump Operation of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms", Proc., Distribution System Symp., AWWA, 2010, San Diego, pp. 23–25, 2001.
- [6] Ormsbee, LE., Lansley, KE., "Optimal Control of Water Supply Pumping Systems", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 120, pp.237–252, 1994.
- [7] Mackle, G., Savic, DA., Walters, GA., "Application of Genetic Algorithms to Pump Scheduling for Water Supply", In: First International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, IEEE/IEEE, pp. 400–405, 1995.
- [8] López-Ibáñez, M., Prasad, TD., Paechter, B., "Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 134, No. 4, pp.337-346, 2008.
- [9] Costa, LHM., de Athayde Prata, B., Ramos, HM., de Castro, M. "A Branch-and-Bound Algorithm for Optimal Pump Scheduling in Water Distribution Networks", Water Resources Management, Vol. 30, pp.1037-1052, 2016.
- [10] Menke, R., Abraham, E., Parpas, P., Stoianov, I., "Exploring Optimal Pump Scheduling in Water Distribution Networks with Branch and Bound Methods", Water Resources Management, Vol. 30, pp. 5333–5349, 2016.
- [11] Wang JY, Chang TP, Chen JS "An Enhanced Genetic Algorithm for Bi-Objective Pump Scheduling in Water Supply", Expert Systems with Applications, Vol. 36, pp. 10249–10258, 2009.
- [12] Bene, JG., Hos, CJ., "Finding Least-Cost Pump Schedules for Reservoir Filling with a Variable Speed Pump", Water Resources Planning and Management, Vol. 138, No. 6, pp.682-686, 2012.
- [13] Fang, H., Zhang, J., Gao, JL., "Optimal Operation of Multi-Storage Tank Multi-Source System Based on Storage Policy", Journal of Applied Physics and Engineering, Vol. 11, No. 8, pp.571-579, 2010.
- [14] Moradi-Jalal, M., Marino, M., Afshar, A., "Optimal Design and Operation of Irrigation Pumping Stations", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 129, No. 3, pp. 149-154, 2003.
- [15] Puleo, V., Morley, M., Freni, G., Savić, D., "Multi-Stage Linear Programming Optimization for Pump Scheduling", In: 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2013, Procedia Engineering, Vol. 70, pp.1378-1385, 2014.
- [16] Fatemi, S., Kuh, A., Gupta, V., "Energy Efficient Scheduling Algorithms for Pumping Water in Radial Networks", ITA Workshop, 2016.
- [17] شرکت آب و فاضلاب کاشان، گزارش میزان مصرف ساعات شبانه‌روز و اطلاعات شبکه آب شهر نوش‌آباد، ۱۳۹۴.
- [18] وزارت نیرو، تعرفه‌های برق و شرایط عمومی آن‌ها، مصوبه هیئت وزیران به شماره ۱۴۵۶۹۰/ت ۵۱۲۵۸ هـ مورخ ۹۳/۱۲/۲، <http://tariff.moe.gov.ir>.