نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال سیزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، (پیاپی ۵۱): صص ۷۵-۶۷

علمی- ترویجی

ارائه یک مدل برنامه‌ریزی اقتصادی- زیست محیطی ریزشبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق

سیدمحمدصادق‌زاده*[۱]، سعیدزمانیان[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۷
تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۰۳/۲۱

چکیده

امروزه استفاده از ریزشبکه‌های به‌هم‌پیوسته آب و برق به یک راه حل مناسب برای افزایش نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر در حل مسائل اقتصادی مرتبط با این حوزه تبدیل شده است. با این حال، به‌منظور افزایش بازده انرژی و غلبه بر چالش‌های زیست محیطی و اقتصادی مربوط به برنامه‌ریزی ریزشبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق به یک مدل کارآمد مورد نیاز است. این مقاله مدل بهینه‌سازی دو هدفه را برای برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه ارائه می‌دهد. در این مدل پمپ‌های سرعت متغیر موجود در شبکه آب و همچنین تانک‌های ذخیره‌ساز به‌عنوان منابع انعطاف‌پذیر به‌منظور کاهش هزینه بهره‌برداری و آلایندگی به‌صورت بهینه برنامه‌ریزی می‌شود. مدل پیشنهادی یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه را تشکیل می‌دهد. در این مقاله از روش محدودیت اپسیلون و روش فازی به‌منظور حل مسئله دو هدفه پیشنهادی استفاده شده است. مدل پیشنهادی بر روی ریزشبکه ۳۳ باسه برق و ۱۵ گره آب آزمایش شده و برای موارد مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی تأثیر یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی شبکه آب و برق را در کاهش هزینه بهره‌برداری و انتشار آلایندگی اثبات می‌کند.

کلید واژه‌ها: شبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق، کاهش هزینه بهره‌برداری، کاهش آلایندگی

[۱] دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران (sadeghzadeh@shahed.ac.ir)- نویسنده مسئول
[۲] پژوهشگر، دانشکده مهندسی و پدافند غیر عامل، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

۱- مقدمه

۱-۱- ضرورت انجام تحقیق

امروزه، تأمین بارهای یک ریزشبکه به‌صورت اقتصادی با کمترین میزان انتشار آلایندگی یک موضوع جذاب برای محققین است تا علاوه بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، میزان آلایندگی صنعت برق را نیز کاهش دهند. بنابراین پروژه‌های برنامه‌ریزی دو هدفه ریزشبکه، برای کاهش هم‌زمان آلایندگی و هزینه تأمین برق یک ریزشبکه انجام می‌شوند. وجود پمپ‌های سرعت متغیر آب در شبکه توزیع آب ارتباط مهمی را بین شبکه‌های آب و برق ایجاد کرده است. بنابراین، سامانه توزیع آب یک مصرف کننده الکتریکی مهم بوده و عدم تأمین آن می‌تواند باعث کاهش بار آب شود. محققان تأثیر سامانه‌های توزیع برق و آب بر یکدیگر را برجسته کرده‌اند. به‌عنوان مثال، نویسندگان مرجع [۱] تلاش کردند تا تأثیر سامانه توزیع آب بر روی سامانه توزیع برق را نشان دهند. آن‌ها از دو مدل بهینه‌سازی برای یافتن مشارکت مطلوب سامانه توزیع آب در برنامه‌ریزی پاسخ تقاضای سامانه الکتریکی استفاده کردند. برای این منظور، اولین مدل بهینه‌سازی برای اطمینان از به حداقل رسیدن آماده‌سازی آب بدون شرکت در برنامه‌های پاسخ به تقاضای الکتریکی، نشان داده شد. در مدل بهینه‌سازی دوم، از انعطاف‌پذیری پمپ‌های با سرعت متغیر واقع در سامانه توزیع آب و مخازن ذخیره آب برای به حداکثر رساندن نرخ سود سامانه توزیع آب حاصل از مشارکت این سامانه در برنامه‌های پاسخ به تقاضای برق استفاده شده است. در ادامه مطالعات دیگر برنامه‌ریزی پمپ آب را درنظر گرفتند تا هزینه عملیات توزیع آب را به حداقل برسانند. به‌عنوان مثال، مدل‌های مختلف ریاضی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابتکاری برای برنامه‌ریزی پمپ‌های آب برای به حداقل رساندن کل هزینه عملکرد سامانه توزیع آب در مراجع [۲ و ۳] استفاده شد. در مرجع [۴]، یک روش تصادفی دو مرحله‌ای مقاوم برای درنظر گرفتن عدم قطعیت تقاضای آب و سامانه توزیع برق برای برنامه‌ریزی پمپ‌های شبکه آب و به حداقل رساندن هزینه کل توزیع آب ارائه شده است. علاوه بر این، نویسندگان مرجع [۴] یک مدل انعطاف‌پذیر جریان آب-برق را برای بهینه‌سازی عملکرد اجزای انعطاف‌پذیر شبکه متمرکز آب و برق با درنظر گرفتن عملکرد هر دو شبکه توزیع برق و شبکه آب ارائه داده‌اند. آن‌ها سامانه توزیع برق-آب یکپارچه‌ای را ارائه دادند که در آن از انعطاف‌پذیری انرژی حاصل از برنامه‌ریزی بهینه پمپ‌های آب با سرعت متغیر و مخازن ذخیره آب برای به حداقل رساندن کل هزینه عملکرد سامانه توزیع یکپارچه استفاده می‌شود. در یک کار مشابه، نویسنده مرجع [۵] مدل ریاضی جدیدی را برای بهینه‌سازی سامانه یکپارچه ریزشبکه برق-آب ارائه داد. این مرجع سه سناریو را درنظر گرفت که شامل عملکرد مستقل، سامانه یکپارچه بدون واحدهای ذخیره برق و سامانه یکپارچه با واحدهای ذخیره انرژی است. می‌توان نتیجه گرفت که سامانه‌های توزیع جدید با تلفیق شبکه‌های برق و آب ساخته شده‌اند. از این رو، باید یک برنامه دفاعی بهینه برای یک سامانه توزیع برق-آب یکپارچه ارائه شود تا اطمینان حاصل شود که کاهش بار الکتریکی و بار آب در هنگام حمله عامل برهم زننده به حداقل می‌رسد.

۱-۲- مرور کارهای انجام شده

در حال حاضر، تحقیقات در مورد بهره‌برداری ریزشبکه بیشتر بر روی مدل عملیات بهینه اقتصادی تمرکز دارد [۹-۶]. به‌طور کلی، کل هزینه بهره‌برداری ریزشبکه برق به‌عنوان تابع هدف استفاده می‌شود و محدودیت‌های خاصی برای تدوین استراتژی‌های زمان-بندی در ریزشبکه ایجاد می‌شود. مرجع [۱۰] یک مدل ریاضی جدید برای برنامه‌ریزی بهینه منابع انرژی و مدیریت هوشمند بارها پیشنهاد می‌کند که شامل شارژ هوشمند خودرهای برقی، برنامه‌های ذخیره‌ساز و عملکرد سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی باتری، برای ریزشبکه‌های جدا از شبکه است. مدل پیشنهادی استراتژی‌های مدیریت انرژی را با درنظر گرفتن محدودیت‌های شبکه و توابع هدف مختلف از دیدگاه بهره‌بردار ریزشبکه و صاحبان خودروهای برقی و سامانه‌های ذخیره‌ساز توسعه می‌دهد. مرجع [۱۱] یک مدل زمان‌بندی بهینه‌سازی ریزشبکه هیبریدی AC-DC با درنظر گرفتن برنامه‌های پاسخگویی بار ارائه کرده است. مرجع [۱۲] یک مدل برنامه‌ریزی ریزشبکه جزیره‌ای را که متشکل از سامانه PV، توربین جزر و مدی، ژنراتور دیزلی و باتری لیتیوم یونی است، برای جزیره‌ای در منطقه بریتانی در فرانسه پیشنهاد می‌کند. برنامه‌ریزی اقتصادی ریزشبکه شامل هزینه نصب باتری، هزینه‌های بهره‌برداری انرژی سامانه و انتشار آلایندگی و محدودیت‌های شبکه به‌دست می‌آید. مرجع [۱۳] به‌طور جامع عدم قطعیت پاسخ تقاضا و تولید انرژی تجدیدپذیر را درنظر گرفته و پاسخگویی بار را به‌منظور کاهش هزینه ریزشبکه درنظر گرفته است. مرجع [۱۴] یک سامانه مدیریت انرژی را برای یک ریزشبکه جزیره‌ای متشکل از سامانه فتوولتائیک و ذخیره‌ساز باتری ارائه می‌دهد. این سامانه از یک رویکرد پیش‌بینی برای تنظیم برنامه‌های عملیاتی به‌منظور به حداقل رساندن قطعی‌های سامانه در ریزشبکه استفاده می‌کند. این رویکرد همچنین دارای محدودیت‌هایی در وضعیت شارژ باتری است تا عدم قطعیت در برآورد انرژی ذخیره شده را درنظر بگیرد.

مرجع [۱۵] یک تحلیل مقایسه‌ای در مورد استراتژی‌های تصمیم گیری و روش‌های حل آن‌ها برای سامانه‌های مدیریت انرژی ریزشبکه ارائه می‌دهد. برای مدیریت نوسانات و متناوب بودن منابع انرژی تجدیدپذیر و تقاضای بار، روش‌های مختلف کمی سازی عدم قطعیت خلاصه شده‌اند. تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای در فناوری‌های ارتباطی نیز برای اجرای مقرون به صرفه سامانه‌های مدیریت انرژی ریزشبکه مورد بحث قرار گرفته است. به‌طور کلی، بینش‌هایی در مورد جهت‌های آینده و کاربردهای دنیای واقعی ارائه شده است. مرجع [۱۶] الگوریتم توزیع شده را برای حل گسسته مسئله توان بهینه‌سازی، کنترل فرکانس بهینه‌سازی، کنترل ولتاژ بهینه‌سازی و کنترل مساحت وسیع بهینه‌سازی معرفی کرده و با استفاده از آن به بهینه‌سازی و کنترل سامانه قدرت می‌پردازد.

۱-۳- نوآوری‌های مقاله

مقالات بررسی شده به دو بخش تقسیم می‌شوند. دسته اول، مدل‌های برنامه‌ریزی اقتصادی ریزشبکه به‌هم‌پیوسته آب را با هدف کاهش کل هزینه بهره‌برداری ریزشبکه ارائه کرده‌اند. در این مراجع از میزان آلایندگی تولید برق صرف نظر شده است. در دسته دوم با استفاده از منابع انعطاف‌پذیر همچون سامانه‌های ذخیره‌سازی و خودروهای برقی سعی در کاهش هزینه بهره‌برداری ریزشبکه برق‌دارند. برخی از این منابع علاوه بر هزینه بهره‌برداری، میزان آلایندگی را نیز کمینه می‌سازند. با این حال هیچ یک از مراجع، کمینه‌سازی میزان آلایندگی و تابع هدف را برای یک شبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق بررسی نکرده‌اند. از این رو در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه جهت کمینه کردن هزینه بهره‌برداری و میزان انتشار آلایندگی یک ریزشبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق ارائه شده است.

۱-۴- ساختار مقاله

در این مقاله، مدل ریاضی سامانه پیشنهادی، در بخش ۲ توضیح داده شده است. بخش ۳ الگوریتم حل مسئله را با جزئیات شرح می‌دهد. نتایج عددی شبیه‌سازی و بررسی عملکرد سامانه در بخش ۴ توضیح داده شده است. درنهایت، در بخش ۵ به نتیجه‌گیری و اهمیت نتایج به‌دست آمده، اشاره شده است.

۲- مدل ریاضی اجزای ریزشبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق

در این بخش ابتدا توضیحات معمول و مدل ریاضی تجهیزات مختلف تولید هم‌زمان برق و سرمایش مورد بررسی قرار گرفته است. پس از آن مدل مربوط به هر یک از شبکه‌های توزیع برق و شبکه آب‌رسانی یک جزیره مدل‌سازی می‌گردد. تابع هدف مدل ارائه شده در رابطه‌های (۱ و ۲) به ترتیب برای مدل‌سازی هزینه بهره‌برداری و میزان انتشار نوشته شده است که در آن هزینه بهره‌برداری از نیروگاه gام، با C_i^g نشان داده شده است. همچنین میزان آلایندگی این نیروگاه با A_i^g مشخص شده است.

$$OF_1 = \sum_{i=1}^{n} C_i^g \quad (۱)$$

$$OF_1 = \sum_{i=1}^{n} A_i^g \quad (۲)$$

۲-۱- نیروگاه‌های تولید پراکنده حرارتی

نیروگاه‌های تولید پراکنده حرارتی برق، معمولاً دارای مدلی همانند نیروگاه‌های حرارتی مرسوم با ظرفیت محدودتر می‌باشند. بنابراین مدل ریاضی آن‌ها نیز می‌تواند مشابه نیروگاه‌های بزرگ با ظرفیت محدودتر نشان داده شود. بر این اساس، مدل ریاضی یک نیروگاه تولید پراکنده در زیر نشان داده شده است:

$$C_i^g = a_g P_g^2 + b_{gen} P_g + c_g \quad (۳)$$

$$A_i^g = d_g P_g^2 + e_g P_g + f_g \quad (۴)$$

$$P_{gen}^{\min} \le P_{gen} \le P_{gen}^{\max} \quad (۵)$$

$$Q_{gen}^{\min} \le Q_{gen} \le Q_{gen}^{\max} \quad (۶)$$

در این روابط، هزینه تولید یک نیروگاه حرارتی به‌صورت تابع نوشته شده در رابطه (۳) محاسبه می‌گردد. در این رابطه ضرایب هزینه یک واحد حرارتی با $a_{gen}, b_{gen}, c_{gen}$ نشان داده شده است. همچنین میزان توان تولید شده توسط یک نیروگاه حرارتی در رابطه (۳) با P_{gen} مشخص شده است. توان واحد حرارتی باید حداقل و حداکثر محدودیت‌های سطح تولید را برآورده کند. مدل ریاضی این محدودیت در رابطه (۵) نشان داده شده است. نمونه این محدودیت برای توان راکتیو یک نیروگاه حرارتی نیز باید در مدل‌سازی ریاضی برقرار باشد. محدودیت ذکر شده برای توان راکتیو تولیدی یک نیروگاه حرارتی تولید پراکنده در رابطه (۶) نشان داده شده است.

۲-۲- مدل شبکه آب

مدل ریاضی شبکه آب در روابط زیر بیان شده است:

$$P_k^{pump} = \Omega_k^3 \left(d_k - e_k \left(\frac{1}{\Omega_k} Q_{ij}\right)\right) \quad (۷)$$

$$\Delta h_{p,k} = \Omega_k^2 (a_k - b_k (\frac{1}{\Omega_k} Q_{ij})^c) \quad (۸)$$

$$\sum_{ij=1}^{m} A.Q_{ij} - Q^R + Q^T + w_i^{sh} = Q^D \quad (۹)$$

$$Q_{ij} \geq 0 \quad (۱۰)$$

$$Q_{\min}^R \leq Q_t^R \leq Q_{\max}^R \quad (۱۱)$$

$$H_j - H_i - (Z_j - Z_i) + \Delta h_{p,k} = F_{ij} Q_{ij}^{1.85} \quad (۱۲)$$

$$Q_{\min}^T \leq Q_i^T \leq Q_{\max}^T \quad (۱۳)$$

$$V_{i,t}^T = V_{i,t}^T + Q_{i,t}^T \quad (۱۴)$$

$$V_{\min}^T \leq V_i^T \leq V_{\max}^T \quad (۱۵)$$

توان مصرفی پمپ‌های آب مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌شود. از پمپ‌های شبکه آب به‌منظور افزایش فشار در انتهای لوله و سهولت در انتقال آب میان گره‌های شبکه آب استفاده می‌شود. میزان افزایش فشار توسط پمپ‌های شبکه آب بر اساس رابطه (۸) محاسبه می‌شود. قید تعادل آب در رابطه (۹) نشان داده شده است، که در آن میزان آب مورد نیاز تأمین نشده در گره iام با w_i^{sh} نشان داده شده است. میزان آب عبوری از لوله‌های آب بستگی به فشار گره‌های متصل به آن و همچنین ارتفاع هر گره دارد که این مقدار از طریق رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید. حجم آب ورودی و خروجی تانک‌های ذخیره‌ساز آب از طریق رابطه (۱۴) در هر زمان به‌روزرسانی می‌شود. این حجم می‌بایست در یک بازه مناسب بوده که این محدودیت در رابطه (۱۵) لحاظ شده است.

۲-۳- مدل شبکه برق

مدل پخش بار شبکه توزیع، به‌عنوان تصمیمات "انتظار و دیدن" برای کاهش پیامدهای یک حمله تروریستی باید به‌منظور تکمیل مدل سطح پایین مدل‌سازی شوند. در کارهای صورت گرفته در گزارش‌های قبلی در مورد تجزیه و تحلیل آسیب‌پذیری سامانه انتقال الکتریکی و برنامه‌ریزی سخت شدن شبکه انتقال، حل یک مدل پخش بار بهینه DC یا پخش بار اقتصادی، اغلب به‌عنوان یک روش کاهش بار حذف شده استفاده می‌شده است. مدل‌های پخش بار شبکه بیشتر در شبکه‌های انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل پخش بار DC یک مدل خطی است که توان اکتیو و زاویه‌های ولتاژ را درنظر می‌گیرد اما از توان و ولتاژ راکتیو چشم‌پوشی می‌کند. این یک روش مرسوم در شبکه‌های انتقال است. با این حال بر خلاف سامانه‌های انتقال، که اغلب شبکه‌های مشبک هستند، شبکه به‌هم‌پیوسته آب و توزیع برق بیشتر دارای یک توپولوژی شعاعی درخت مانند هستند و آن را حفظ می‌کنند. معادلات DistFlow اغلب برای محاسبه جریان و مشخصات ولتاژ در یک سامانه توزیع اجرا می‌شوند. این معادلات برای هر گره n و هر خط برق (j،i) به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$\begin{aligned} \sum_{h|(n,h)\in L} p_{nh} &= p_{mn} - r_{mn} \frac{p_{mn}^2 + q_{mn}^2}{v_n^2} - P_n \\ \sum_{h|(n,h)\in L} q_{nh} &= q_{mn} - x_{mn} \frac{p_{mn}^2 + q_{mn}^2}{v_n^2} Q_n \end{aligned} \quad (۱۶)$$

$$\begin{aligned} v_j^2 &= v_i^2 - 2(r_{ij} p_{ij} + x_{ij} q_{ij}) \\ &+ (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)(\frac{p_{ij}^2 + q_{ij}^2}{v_i^2}) \end{aligned} \quad (۱۷)$$

در معادلات فوق، m و n گره‌های شبکه توزیع هستند، به‌عنوان مثال شاخص mn به خط برق متصل‌کننده گره n به گره m اشاره دارد. L∈(n,h) مجموعه‌ای از خطوط برق است که از گره n خارج می‌شود. شاخص (j،i) نشان دهنده خط تغذیه شده از گره i و وصل شده به گره j است. نسخه خطی معادلات پخش بار به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته و در سامانه‌های توزیع سنتی و میکروشبکه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با درنظر گرفتن کل شبکه شعاعی، واحدهای تولید پراکنده و کاهش بار معادلات فوق را می‌توان به شرح زیر ساده کرد:

$$\begin{aligned} \sum_{h|(n,h)\in L} p_{nh} &= p_{mn} - P_n + g_n^p + p_n^{ld} + P_{n,k}^{pump} \\ \sum_{h|(n,h)\in L} q_{nh} &= q_{mn} - Q_n + g_n^q \end{aligned} \quad (۱۸)$$

$$v_j = v_i - \frac{(r_{ij} p_{ij} + x_{ij} q_{ij})}{V_0} \quad (۱۹)$$

رابطه (۱۸) نشان می‌دهد که توان اکتیو و راکتیو در هر گره متعادل است. در این رابطه $P_{n,k}^{pump}$ نشان‌دهنده توان مصرفی پمپ شبکه آب است. رابطه (۱۹) سطح ولتاژ در هر گره را محاسبه می‌کند. در مدل ما توپولوژی شبکه توزیع برق به تصمیمات برنامه‌ریزی شبکه و مجموعه عدم اطمینان از حملات بستگی دارد. این رابطه را می‌توان به شرح زیر توصیف کرد:

$$0 \leq p_{ij} \leq M_l^1 \quad (۲۰)$$

$$0 \leq q_{ij,t} \leq M_l^2 \quad (۲۱)$$

$$0 \leq g_{nt}^p \leq \delta_n G_n^p \quad (۲۲)$$

در روابط (۲۰ و ۲۲) توان عبوری از خطوط مدل شده است. M1 و M2 مقادیر بیشینه توان عبوری از خطوط هستند. مقادیر بزرگ برای M1 و M2 به ترتیب کل نیاز توان اکتیو و راکتیو در سامانه توزیع است. بر اساس موارد فوق، جریان بهینه توان برای شبکه توزیع به‌هم‌پیوسته آب و برق به‌صورت زیر تنظیم می‌شود:

$$\sum_{h|(n,h)\in L} p_{nh} = p_{mn} - P_n + g_n^p + p_n^{sh} + P_{k,n}^{pump}$$
$$\sum_{h|(n,h)\in L} q_{nh} = q_{mn} - Q_n + g_n^q \quad (۲۳)$$

$$0 \le g_{nt}^p \le \delta_n G_n^p \quad (۲۴)$$

$$0 \le g_{nt}^q \le Q_{n,t} \quad (۲۵)$$

$$0 \le p_{nt}^{ld} \le P_t^n \quad (۲۶)$$

$$0 \le g_{nt}^p - g_{nt-1}^p \le R_n^p \quad (۲۷)$$

$$\underline{v} \le v_{n,t} \le \overline{v} \quad (۲۸)$$

$$0 \le p_{ij,t} \le M_l^1 \quad (۲۹)$$

$$0 \le q_{ij,t} \le M_l^2 \quad (۳۰)$$

$$v_j = v_i - \frac{(r_{ij}p_{ij} + x_{ij}q_{ij})}{V_0} \quad (۳۱)$$

در این روابط، توان پمپ آب که در شبکه توزیع متصل شده است، ارتباط دهنده شبکه آب و برق است، همچنین محدودیت توان تولیدی نیروگاه تولید پراکنده موجود در ریزشبکه در روابط (۲۵ و ۲۷) بیان شده است. توان عبوری از خطوط شبکه توزیع در روابط (۲۹ و ۳۰) مدل شده‌اند و سطح ولتاژ هر باس شبکه توزیع بر اساس رابطه (۳۱) محاسبه می‌شود.

۳- الگوریتم حل مسئله

۳-۱- روش اپسیلون- محدودیت

روش‌های مختلفی را می‌توان برای حل یک مسئله چند هدفه به‌کار برد. در این مقاله، از روش اپسیلون- محدودیت برای حل مسئله برنامه‌ریزی ریزشبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق پیشنهادی استفاده می‌شود. این روش مبتنی بر تبدیل یک مسئله چند هدفه به یک مسئله تک هدفه است. برای این هدف، تابع هدف محیطی به یک محدودیت تبدیل می‌شود. حد بالایی محدودیت محیطی توسط بردار ε به‌دست آمده و بر اساس رابطه (۳۳) تعیین می‌شود.

$$OF_2 \le \varepsilon_i \quad (۳۲)$$

$$\varepsilon_i = OF_2^{\min} + \frac{Iter_i - 1}{M}(OF_2^{\max} - OF_2^{\min}) \quad (۳۳)$$

۳-۲- روش فازی

در این مقاله از تصمیم گیرنده فازی برای انتخاب بهترین راه حل از مجموعه بهینه پارتو که با حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی به‌دست می‌آید، استفاده می‌شود. در تصمیم گیرنده فازی، یک تابع عضویت فازی به هر راه حل در جبهه پارتو اختصاص داده می‌شود. معادله (۳۹) برای رسیدن به توابع عضویت فازی خطی برای هزینه و انتشار استفاده شده است.

$$\hat{f}_k = \begin{cases} 1 & f_k \le f_k^{\min} \\ \dfrac{f_k^{\max} - f_k}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} & f_k^{\min} \le f_k \le f_k^{\max} \\ 0 & f_k^{\min} \le f_k^{\max} \end{cases} \quad (۳۴)$$

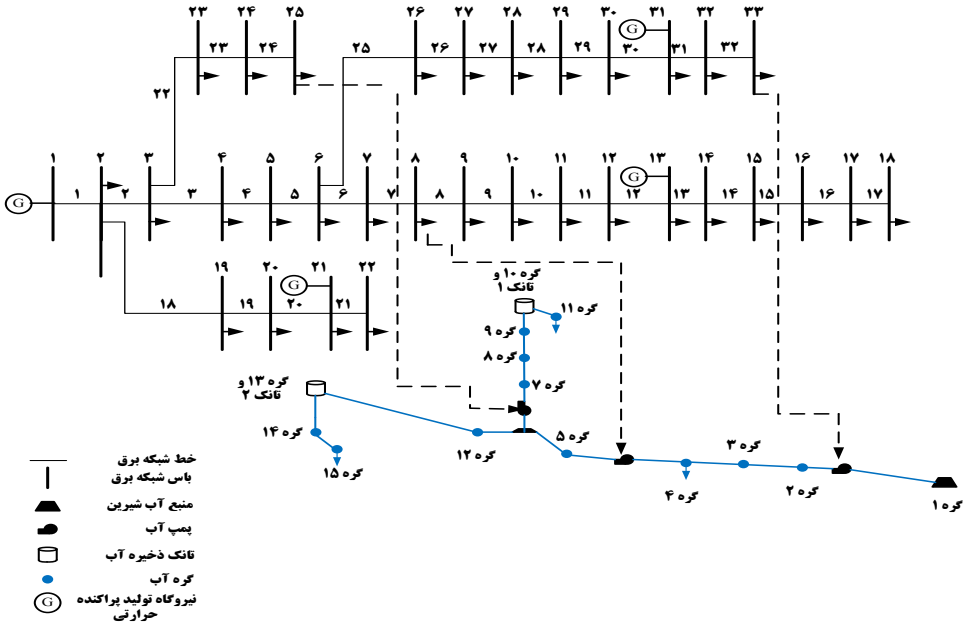
بهترین راه حل مسئله بر اساس روش min-max انتخاب می‌شود. در روش min-max، حداقل مقدار $\hat{f}_1$ و $\hat{f}_2$ برای هر تکرار انتخاب می‌شود. تکراری با مقدار بالاتر $\min(\hat{f}_1, \hat{f}_2)$ به‌عنوان بهترین راه حل پارتو انتخاب می‌شود.

۴- نتایج شبیه‌سازی

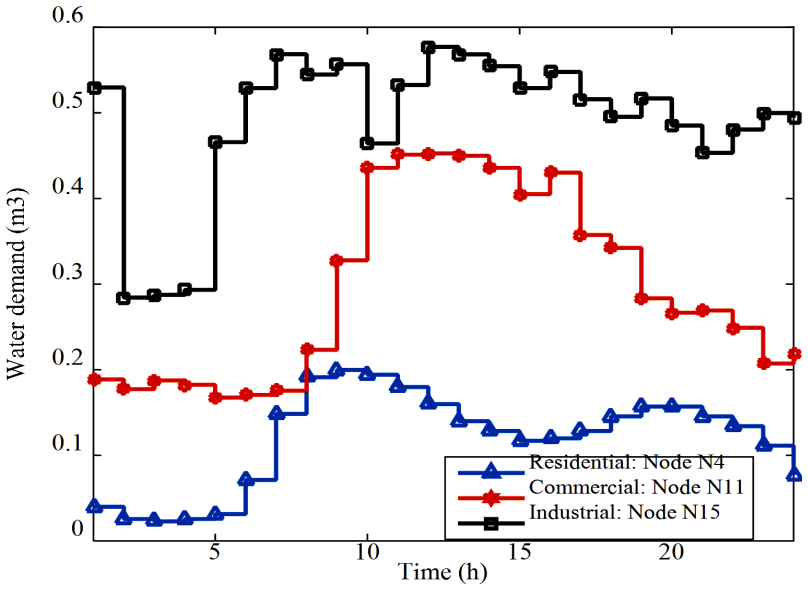
در این بخش، عملکرد طرح پیشنهادی برای برنامه‌ریزی یک ریزشبکه الکتریکی-آب و همچنین روش حل مبتنی بر روش اپسیلون- محدودیت بررسی شده است.

۴-۱- سامانه مورد مطالعه

در این بخش شبکه استاندارد به‌هم‌پیوسته آب و برق که جهت ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی استفاده شده است، معرفی شده است. به‌منظور ارزیابی مدل پیشنهادی این شبکه در نرم‌افزار گمز پیاده‌سازی شده است. هدف از پیاده‌سازی این شبکه کاهش آلایندگی و هزینه بهره‌برداری ریزشبکه به‌هم‌پیوسته با توجه به تأمین بار است. در این شبکه استاندارد، شبکه توزیع جزیره‌ای برق باید نیازهای انرژی یک سامانه ۱۵ گره آب را تأمین کند. توپولوژی شبکه توزیع برق و سامانه آب در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۱) دیده می‌شود، شبکه آب از ۱۵ گره، ۱۴ لوله، ۳ پمپ با سرعت متغیر در لوله‌های ۱، ۴ و ۶، و دو مخزن ذخیره آب (گره‌های ۱۰ و ۱۳) و سه گره بار آب (گره‌های ۴، ۱۱ و ۱۵) تشکیل شده است. مشخصات بارهای شبکه آب در شبکه مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۱): ساختار شبکه استاندارد به‌هم‌پیوسته آب و برق

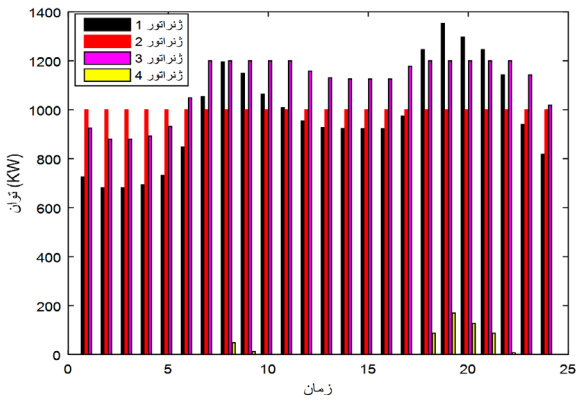


شکل (۲): میزان بار شبکه آب در هر گره برای ۲۴ ساعت

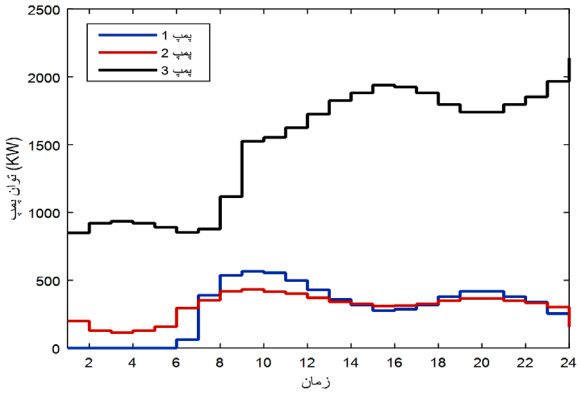
جدول (۱): جبهه پارتو برنامه‌ریزی ریزشبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق

تکرار	هزینه	آلایندگی	مقدار فازی شده هزینه	مقدار فازی شده آلایندگی	کمترین مقدار سطر
۱	۸۰۹۰۶/۳۱۷	۵۲۲۸/۶۶۰	۰	۱	۰
۲	۸۰۸۱۶/۷۹۶	۵۷۳۸/۲	۰/۳۶۵۰	۰/۹۰۰	۰/۳۶۵۰
۳	۸۰۷۷۶/۴۴۲	۶۲۴۷/۷	۰/۵۲۹۵	۰/۸۰۰	۰/۵۲۹۵
۴	۸۰۷۴۸/۶۷۸	۶۵۷۵/۲	۰/۶۴۲۷	۰/۷۳۵۷	۰/۶۴۲۷
۵	۸۰۷۲۶/۹۳۵	۷۲۶۶/۷	۰/۷۳۱۴	۰/۶۰۰	۰/۶۰۰
۶	۸۰۷۰۹/۳۰۵	۷۷۷۶/۲	۰/۸۰۳۲	۰/۵۰۰	۰/۵۰۰
۷	۸۰۶۹۵/۳۹۸	۸۲۸۵/۲	۰/۸۵۹۹	۰/۴۰۰	۰/۴۰۰
۸	۸۰۶۸۴/۲۸۷	۸۷۹۵/۲	۰/۹۰۵۲	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰
۹	۸۰۶۷۹/۷۸۱	۹۰۳۴/۷	۰/۹۲۳۶	۰/۲۵۳۰	۰/۲۵۳۰
۱۰	۸۰۶۶۱/۰۴۶	۱۰۳۲۳/۷۴۳	۱	۰	۰

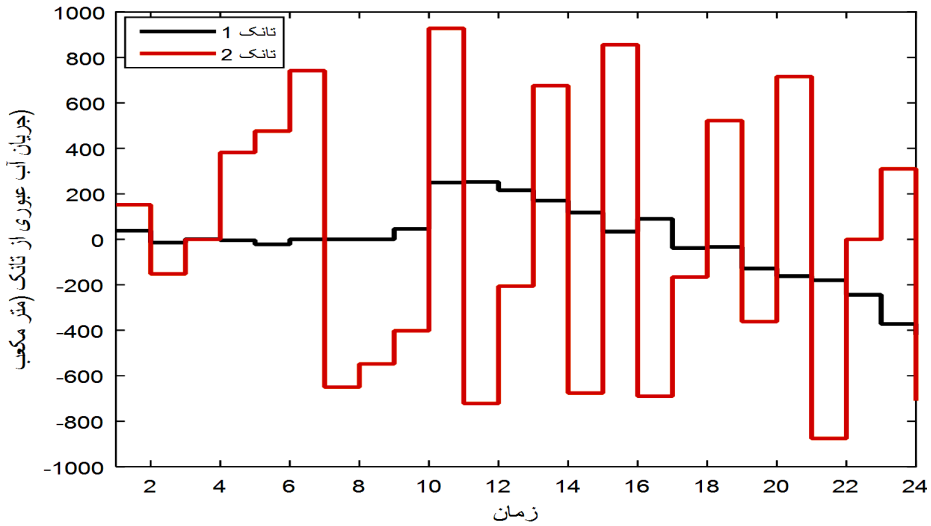
همان‌گونه که در بحث مدل‌سازی مسئله بیان شده است، اولین قدم در به‌دست آورد جواب بهینه مسئله، به‌دست آوردن جواب بهینه پارتو است. راه حل‌های بهینه پارتو به‌دست آمده با حل مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی اقتصادی-زیست‌محیطی ریزشبکه استاندارد به‌هم‌پیوسته برق و آب در جدول (۱) نشان داده شده است. در گام دوم مسئله باید مطابق با روش رضایت‌بخش فازی بهترین جواب مسئله با توجه به حداکثر ضعیف‌ترین تابع عضویت در میان جواب‌های پارتو، جواب بهینه مسئله انتخاب شود. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۱)، مشخص است که حداکثر ضعیف‌ترین تابع عضویت ۰/۶۴۳۷ به راه حل شماره ۴ اختصاص دارد. بنابراین، راه حل شماره ۴ به‌عنوان بهترین راه حل سازش بر اساس روش رضایت‌بخش فازی (min-max) انتخاب می‌شود. طبق جدول (۱) هزینه توان تولیدی راه حل بهینه برای ریزشبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق برابر با ۸۰۷۴۸/۶۷۸ دلار است. علاوه بر این، میزان انتشار آلایندگی مربوط به جواب شماره ۴ برابر با ۶۵۷۵/۲ تن در روز است. در صورتی که تنها جنبه اقتصادی برنامه‌ریزی ریزشبکه اهمیت داشته باشد، حداقل مقدار هزینه بهره‌برداری از ریزشبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق ۸۰۶۶۱/۰۴۶ دلار خواهد بود که این مقدار در ردیف شماره ۱۰ جدول (۱) گزارش شده است. همان‌گونه که در این جدول نشان داده شده است، برای رسیدن به این مقدار ریزشبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق بیشترین میزان انتشار آلایندگی (۱۰۳۲۳/۷۴۳ تن در روز) را خواهد داشت. با وجود حداقل ارزش کل هزینه بهره‌برداری، کران بالای هزینه بهره‌برداری از راه حل گزارش شده در ردیف شماره ۱ جدول (۱) به‌دست می‌آید که در آن مقدار انتشار آلایندگی به‌عنوان حداقل مقدار (۶۶۰/ ۵۲۲۸ تن در روز) درنظر گرفته شده است. توان برنامه‌ریزی شده نیروگاه‌های ریزشبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق برای جواب سازش (تکرار شماره ۴ جبهه پارتو) در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، نیروگاه چهارم که بیشترین میزان انتشار آلایندگی را به ازای تولید انرژی دارا هست، در طول ۲۴ ساعت برنامه‌ریزی شده کمترین توان ممکن را به شبکه تزریق می‌کند. در حالی که نیروگاه شماره ۲، در تمام مدت برنامه‌ریزی شده (۲۴ ساعت) با تمام ظرفیت خود بهره‌برداری می‌شود. دلیل این امر، هزینه پایین تولید انرژی و پایین بودن میزان انتشار آلایندگی این نیروگاه است. از سوی دیگر، وجود پمپ‌های سرعت متغیر در شبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق، این امکان را فراهم می‌سازد تا با بهره‌برداری صحیح از این پمپ‌ها، مقدار انرژی مورد نیاز در ساعت‌های پیک شبکه الکتریکی را کاهش داده و باعث عدم نیاز به استفاده از نیروگاه‌های گران قیمت‌تر و همچنین با نرخ بالای آلایندگی در ساعت‌های پیک بار الکتریکی شود. میزان مصرف پمپ‌های شبکه آب در شکل (۴) برای جواب بهینه نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در زمان پیک (ساعت ۱۸-۱۴) مصرف پمپ‌های شماره ۱ و ۲ کاهش یافته است، در حالی که مصرف پمپ شماره ۳ در این بازه زمانی افزایش یافته است. با توجه به زمان پیک بودن شبکه انتظار می‌رفت که مصرف تمامی پمپ‌های شبکه آب کاهش یابد. دلیل عدم کاهش انرژی مصرفی پمپ شماره ۳ را می‌توان به نیاز شبکه آب به تأمین نیاز آب‌رسانی گره‌ها متصل به این پمپ و عدم وجود راه حل جایگزین برای تأمین نیاز آبی شبکه بدون بهره‌برداری از این پمپ عنوان کرد. به بیان دیگر، لازمه صرفه‌جویی انرژی مصرفی پمپ‌های سامانه آب در زمان‌های پیک انرژی الکتریکی وجود تانکرهای ذخیره آب در اطراف این پمپ‌ها است. میزان جریان آب ورودی و خروجی این پمپ‌ها به گونه‌ای تنظیم می‌شود که پمپ مذکور دارای کمترین مصرف انرژی در زمان پیک بار باشد. میزان جریان آب ورودی و خروجی تانک‌های ذخیره‌ساز آب در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها نشان داده شده است، به‌منظور کاهش مصرف پمپ‌های آب در زمان پیک بار که موجب عدم برنامه‌ریزی نیروگاه با هزینه بهره‌برداری و آلایندگی بالا می‌شود، در حالت تزریق آب به بار هستند. در نتیجه میزان حجم آب لازم جهت عبور از لوله متصل به پمپ آب کاهش یافته و توان مصرفی این پمپ‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش موجب کاهش بار شبکه در این زمان شده و نیازی به برنامه‌ریزی نیروگاه‌های گران‌تر- آلاینده‌تر نیست.



شکل (۳): توان برنامه‌ریزی شده نیروگاه‌ها



شکل (۴): توان مصرفی پمپ‌ها



شکل (۵): جریان عبوری از تانک ذخیره‌ساز

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه جهت برنامه‌ریزی یک ریزشبکه به‌هم‌پیوسته آب و برق ارائه شده است. هدف از این مسئله بهینه‌سازی ارائه شده، کمینه کردن میزان هزینه بهره‌برداری روز بعد ریزشبکه و همچنین کاهش میزان انتشار آلایندگی است. به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی دو هدفه از روش اپسیلون- محدودیت استفاده شده است تا جدول پارتو بهینه به‌دست آید. به‌منظور به‌دست آمدن بهترین جواب سازش از جدول پارتو از روش فازی استفاده شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی در صورتی که تابع هدف، تنها کمینه کردن هزینه بهره‌برداری باشد میزان انتشار آلایندگی شبکه برق برابر با ۱۰۳۲۳/۷۴۳ تن در روز است. در حالی که با بهینه کردن میزان هزینه بهره‌برداری، قادر به کاهش

این میزان آلایندگی به مقدار ۶۵۷۵/۲ تن در روز خواهیم بود. بنابراین استفاده از این روش موجب کاهش میزان آلایندگی می‌شود.

۶- منابع

[1] K. Oikonomou, M. Parvania, and R. Khatami, “Optimal Demand Response Scheduling for Water Distribution Systems,” IEEE Trans. on Industrial Informatics, vol. 14, no. 11, pp. 5112–5122, 2018.

[2] A. M. Bagirov, A. Barton, H. Mala-Jetmarova, A. Al Nuaimat, S. Ahmed, N. Sultanova, and J. Yearwood, “An Algorithm for Minimization of Pumping Costs in Water Distribution Systems Using a Novel Approach to Pump Scheduling,” Mathematical and Computer Modelling, vol. 57, no. 3-4, pp. 873–886, 2013.

[3] M. L´opez-Ib´a˜nez, T. D. Prasad, and B. Paechter, “Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks,” J. of Water Resources Planning and Management, vol. 134, no. 4, pp. 337–346, 2008.

[4] K. Oikonomou and M. Parvania, “Optimal Coordinated Operation of Interdependent Power and Water Distribution Systems,” IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 11, no. 6, pp. 4784–4794, 2020.

[5] F. Moazeni, J. Khazaei, and J. P. P. Mendes, “Maximizing Energy Efficiency of Islanded Micro Water-energy Nexus Using co-optimization of Water Demand and Energy Consumption,” Applied Energy, vol. 266, p. 114863, 2020.

[6] Y. Wen, C. Y. Chung, X. Liu, and L. Che, “Microgrid Dispatch with Frequency-aware Islanding Constraints," IEEE Trans. Power Syst. vol. 34, no. 3, pp. 2465-2468, May 2019.

[7] Y. Yang, X. Lei, and T. Ye, ``Microgrid Energy Optimal Dispatch Considering the Security and Reliability," Zhongguo Dianji Gongcheng Xue-bao/Proc. Chin. Soc. Elect. Eng. vol. 34, no. 19, pp. 30803088, 2014.

[8] S. J. Hossain, T. G. Paul, R. Bisht, A. Suresh, and S. Kamalasadan, “An Integrated Battery Optimal Power Dispatch Architecture for End-User-Driven Microgrid in Islanded and Grid-connected Mode of Operation," IEEE Trans. Ind. Appl. vol. 54, no. 4, pp. 3806-3819, Jul. 2018.

[9] C. Wang, W. Wei, J. Wang, L. Wu, and Y. Liang, “Equilibrium of Interdependent Gas and Electricity Markets with Marginal Price Based Bilateral Energy Trading," IEEE Trans. Power Syst. vol. 33, no. 5, pp. 4854-4867, Sep. 2018.

[10] T. Alharbi and K. Bhattacharya, “Optimal Scheduling of Energy Resources and

Management of Loads in Isolated/Islanded Microgrids," Can. J. Elect. Comput. Eng. vol. 40, no. 4, pp. 284-294, 2017.

[11] Z. Zhong, W. Jianxue, and C. Xiaoyu, "An Energy Management Method of Island Microgrid Based on Load Classication and Scheduling," Autom. Electr. Power Syst. vol. 39, no. 15, pp. 17-23, 2015.

[12] M. F. Zia, E. Elbouchikhi, M. Benbouzid, and J. M. Guerrero, "Energy Management System for an Islanded Microgrid with Convex Relaxation," IEEE Trans. Ind. Appl. vol. 55, no. 6, pp. 7175-7185, Nov. 2019.

[13] H. R. Massrur, T. Niknam, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Investigation of Carrier Demand Response Uncertainty on Energy Flow of Renewable-based Integrated ElectricityGasHeat Systems," IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 14, no. 11, pp. 5133-5142, Nov. 2018.

[14] D. Michaelson, H. Mahmood, and J. Jiang, "A Predictive Energy Management System Using Pre-emptive Load Shedding for Islanded Photovoltaic Microgrids," IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 64, no. 7, pp. 5440-5448, Jul. 2017.

[15] M. F. Zia, E. Elbouchikhi, and M. Benbouzid, "Microgrids Energy Management Systems: A Critical Review on Methods, Solutions, and Prospects," Appl. Energy, vol. 222, pp. 1033-1055, Jul. 2018.

[16] D. K. Molzahn, F. Dörer, H. Sandberg, S. H. Low, S. Chakrabarti, R. Baldick, and J. Lavaei, "Asurvey of Distributed Optimization and Control Algorithms for Electric Power Systems," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 8, no. 6, pp. 2941-2962, Nov. 2017.

Presentation of an Economic-Environmental Planning Model for the Interconnected Water and Electricity Network Microgrids

M. Sadeghzadeh*, S. Zamanian

Abstract

Nowadays, the use of integrated water and electricity microgrids has become a suitable solution for increasing the influence of renewable energies in solving economic problems related to this field. However, an efficient model is needed to increase the energy efficiency and overcome the environmental and economic challenges associated with the integrated water and electricity microgrid planning. This paper presents a multi-objective optimization model for system scheduling. In this model, variable speed pumps in the water system as well as storage tanks and flexible sources are optimally programmed to reduce the operation costs and pollution. The proposed model is a two-objective optimization problem. In this paper, the Epsilon constraint method and the fuzzy method are used to solve the proposed two-objectives problem. The proposed model has been tested on 33 micro-buses and 15 water nodes and has been investigated for different cases. The simulation results prove the effect of water and electricity network planning integration on reducing the operation costs and pollutant emissions.

Key Words: *Interconnected Water and Electricity Network, Reduction of Operating Costs, Reduction of Pollution*

*Associate Professor, Technical and Engineering Faculty, Shahid University, Tehran, Iran (sadeghzadeh@shahed.ac.ir) -Writer-in-Charge