

طراحی قیمت زمان حقیقی با در نظرگیری عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر و بارهای حرارتی در شبکه‌های هوشمند

حمید کریمی^۱ شهرام جدید^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت - تهران - ایران

h_karimi@elec.iust.ac.ir

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت - تهران - ایران

jadid@iust.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک طرح قیمت‌گذاری زمان حقیقی جدید برای برنامه‌های پاسخگویی بار ارائه شده است. نهاد LSE (Load Serving Entity) مسئول تامین انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان دارای انواع بارهای انعطاف‌پذیر الکتریکی، غیرقابل انعطاف الکتریکی و بارهای حرارتی می‌باشد. این نهاد با توجه به شرایط بهره‌برداری شبکه و عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر یک برنامه پاسخگویی بار مبنی بر قیمت را طراحی می‌کند. بارهای غیرقابل انعطاف الکتریکی و حرارتی قادر به شرکت در طرح پیشنهادی نبوده و مطابق قیمت بازار خرده‌فروشی هزینه‌های خود را پرداخت می‌کنند. در حالیکه بارهای انعطاف‌پذیر الکتریکی توانایی شرکت در طرح پیشنهادی را دارند. بارهای الکتریکی انعطاف‌پذیر مصرف‌کنندگان بوسیله جمع‌کننده‌های پاسخگویی بار جمع‌آوری می‌شود و جمع‌کننده‌های پاسخگویی بار به نمایندگی از مجموعه‌ای از بارهای انعطاف‌پذیر الکتریکی در این طرح مشارکت می‌کنند. مزیت طرح پیشنهادی این است که طرح ارائه شده کاهش هزینه را برای مصرف‌کنندگانی که در این طرح شرکت می‌کنند تضمین می‌کند. همچنین این طرح باعث بهبود ویژگی‌های منحنی مصرف همچون ضریب بار می‌گردد. طرح پیشنهادی با استفاده از بهینه‌سازی دو سطحی و با هدف حداکثر نمودن همزمان سود LSE و مصرف‌کنندگان ارائه و بوسیله نرم‌افزار GAMS حل شده است.

کلمات کلیدی: پاسخگویی بار، نهاد خدمت‌رسان بار، عدم قطعیت، بارهای انعطاف‌پذیر و غیرقابل انعطاف الکتریکی، بارهای حرارتی، بهینه‌سازی دو سطحی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۰۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر شهرام جدید

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - نارمک - خیابان فرجام - دانشگاه علم و صنعت - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

در [۱۰] نویسندگان از یک مدل دو سطحی برای یک مسأله تصمیم-گیری توسط یک خرده‌فروش انرژی استفاده کرده‌اند.

بهینه‌سازی دو سطحی به منظور تجزیه و تحلیل وضعیت رقابت برای یک تصمیم‌گیری سلسله مراتبی بین فراهم‌کنندگان خدمات انرژی ریز شبکه‌ها و واحدهای تولیدی بزرگ در [۱۱] ارائه شده است. در [۱۲]، یک شرکت خصوصی با استفاده از یک مسأله دو سطحی سعی نموده است تا یک حل برد-برد را برای خود و مصرف-کنندگان پیشنهاد دهد ولی این مقاله بارهای حرارتی و عدم قطعیت تولید منابع تجدیدپذیر را در نظر نگرفته است. نویسندگان در [۱۳] با استفاده از یک بهینه‌سازی چند هدفه و دو سطحی، تعامل بین چندین ریز شبکه را مدل نموده است و برای حل مدل پیشنهادی از الگوریتم ابتکاری Immune استفاده کرده است.

لازم به ذکر است که روش‌های ابتکاری مبنای ریاضی نداشته و تضمینی را در خصوص بهترین جواب ارائه نمی‌دهند بلکه براساس تعداد تکرار و زمان تعیین شده به حل مسأله می‌پردازد. در حالیکه ما در این مقاله از روش‌های ریاضی برای حل مسأله استفاده می‌کنیم.

در این مقاله یک شرکت خصوصی^{LSE}، انرژی مورد نیاز بخشی از مصرف‌کنندگان را تامین می‌کند. نهاد LSE در بازار عمده‌فروشی شرکت نموده و انرژی الکتریکی را خریداری می‌کند. این نهاد با هدف کسب سود، انرژی خریداری شده را در بازار خرده‌فروشی و با قیمتی که خود تعیین می‌کند به مصرف‌کنندگان می‌فروشد. قیمت طراحی شده توسط LSE برای فروش انرژی در بازار خرده‌فروشی بصورت پویا و وابسته به شرایط بهره‌برداری سیستم قدرت، همچون تولید منابع تجدیدپذیر، توان قابل خرید از شبکه و حالت باتری‌ها تعیین می‌گردد. مصرف‌کنندگان قادر هستند تا انرژی مورد نیاز خود را از LSE و یا از بازار خرده‌فروشی تامین نمایند. در صورت خرید انرژی از LSE، قیمت تعیین شده توسط این نهاد باید پرداخته شود. این تعرفه قیمت پویا به گونه‌ای طراحی می‌گردد تا مصرف‌کنندگان به مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار پیشنهادی توسط LSE تشویق گردند.

بارهای در نظر گرفته شده در این مقاله متعلق به یکی از سه دسته بارهای انعطاف‌پذیر الکتریکی، بارهای غیرقابل انعطاف الکتریکی و بارهای حرارتی می‌باشد. نهاد LSE باید بارهای غیرقابل انعطاف الکتریکی و حرارتی را به طور کامل تامین کند. در صورتی که بخشی از این بارها قطع شود یک جریمه سنگین به LSE تحمیل می‌گردد. در صورت مشارکت مصرف‌کنندگان در طرح پیشنهاد شده توسط LSE، قیمت پرداختی بارهای غیرقابل انعطاف و حرارتی همان قیمت بازار خرده‌فروشی بوده ولی بارهای انعطاف‌پذیر قیمت طراحی شده را می‌پردازند. بارهای انعطاف‌پذیر بوسیله جمع‌کننده‌های پاسخگویی بار جمع‌آوری می‌شوند. هر جمع‌کننده به مجموعه‌ای از بارهای انعطاف‌پذیر خدمت‌رسانی کرده و بارهای انعطاف‌پذیر مصرف‌کنندگان را جمع‌آوری می‌کند. استفاده از جمع‌کننده‌ها باعث می‌شود تا از تعامل

در برنامه‌ریزی سیستم قدرت بیشتر بر روی بخش تولید و انتقال تمرکز شده و به بخش طرف تقاضا توجه کمی می‌شد. صنعت برق در سراسر دنیا دستخوش تغییرات زیادی شده و کشورهای مختلف با انگیزه‌های متفاوت پا به عرصه خصوصی‌سازی و تجدیدساختار گذاشته‌اند. پاسخگویی بار یکی از مهم‌ترین ویژگی شبکه‌های هوشمند است که سازمان‌ها و بهره‌برداران سیستم قدرت را قادر می‌سازد تا نوسازی در شبکه‌های خود را به تعویق بیندازند، هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش داده و فرصت کاهش پرداختی را برای مصرف‌کنندگان خود فراهم کنند. شبکه‌های هوشمند با ایجاد زیرساخت‌های مخابراتی و برقراری ارتباط دو طرفه میان تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، امکان اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار را فراهم می‌آورد.

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه پاسخگویی بار انجام شده است. برنامه‌های پاسخگویی بار به طور کلی به برنامه‌های پاسخگویی بار مبنی بر قیمت، مبنی بر پرداخت‌های تشویقی و برنامه‌های مبنی بر بازار دسته‌بندی می‌شوند [۱]. همچنین مدل تک دوره‌ای و چند دوره‌ای برنامه‌های پاسخگویی بار مبنی بر قیمت و پرداخت‌های تشویقی با استفاده از مفهوم کشش در [۲] ارائه شده است. در [۳] پاسخگویی بار مبنی بر ابر، جهت افزایش بهره‌وری انرژی و حفظ حریم خصوصی مصرف‌کنندگان معرفی شده است که جنبه‌های تعامل با کاربر و پذیرش این برنامه‌ها در [۴] ارائه شده است.

با اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار ممکن است در زمان‌هایی که قیمت برق پایین است اوج بار جدیدی بوجود آید. راه حل پیشنهاد شده در [۵]، طراحی یک قیمت مجزا برای بارهایی است که عامل اصلی ایجاد اوج جدید می‌باشند. در [۶] مسأله برنامه‌ریزی انرژی برای یک خانه دارای لوازم الکتریکی و حرارتی قابل کنترل و غیرقابل کنترل (همچون ماشین‌لباسشویی، آبگرم‌کن و یخچال)، بدون در نظرگیری عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر مدل شده است. در [۷] مسأله برنامه‌ریزی مصرف انرژی برای یک خانه مجهز به سیستم تهویه مطبوع، آبگرم‌کن و سیستم خورشیدی، تحت یک قیمت زمان حقیقی و با هدف کاهش هزینه پرداختی بررسی شده است. قابل ذکر است که همه مقالات ذکر شده در بالا بصورت یک مسأله تک سطحی مدل شده‌اند.

در زمینه‌های مختلفی از بهینه‌سازی دو سطحی استفاده شده است. نویسندگان در [۸] با استفاده از بهینه‌سازی دو سطحی به بررسی پایداری ولتاژ می‌پردازد. در [۹] با استفاده از بهینه‌سازی دو سطحی سعی شده است تا هزینه و منحنی بار شبکه قدرت بهینه گردد. سطح اول مسأله به دنبال حداکثرسازی سود مصرف‌کنندگان بوده و سطح دیگر آن مربوط به یکنواخت بودن ضریب بار شبکه می‌باشد. نویسندگان در [۹] از نحوه تامین انرژی در بازار عمده‌فروشی صحبتی نکرده است.

همانطور در شکل (۱) دیده می‌شود LSE دارای یک ارتباط یک جهته با منابع تولید انرژی تجدیدپذیر بوده و فقط قابلیت خرید انرژی از این منابع را دارا می‌باشد. از طرفی LSE قابلیت برقراری ارتباط دو جهته با شبکه اصلی برای خرید و یا فروش انرژی را دارا می‌باشد.

ساختار مقاله بصورتی سازماندهی شده است که پس از مقدمه در بخش اول، در بخش دوم به معرفی مدل پیشنهادی و فرمول‌بندی اجزای مختلف مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود. در بخش سوم به تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. در نهایت نتیجه-گیری در بخش چهارم ارائه می‌گردد.

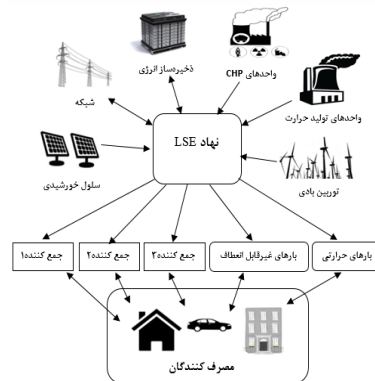
۲- مدل مسأله

تعامل بین LSE و مصرف‌کنندگان بصورت یک مسأله بهینه‌سازی دو سطحی فرموله می‌شود که در آن LSE بعنوان رهبر و جمع‌کننده‌ها بعنوان پیرو می‌باشند. در این مدل LSE با توجه به میزان انرژی درخواستی مصرف‌کنندگان در هر ساعت، یک قیمت زمان حقیقی (C_t^{DR}) طراحی می‌کند. جمع‌کننده‌های پاسخگویی بار با توجه به قیمت ارائه شده توسط LSE، میزان مصرف ساعتی بارهای انعطاف-پذیر (P_{di}) را تنظیم نموده و پاسخ را به LSE ارسال می‌کنند. بنابراین، سطح بالای بهینه‌سازی مربوط به LSE و سطح پایین مربوط به جمع‌کننده‌ها می‌باشد.

مدل برنامه‌ریزی دو سطحی برای انتخاب یک تصمیم، شامل دو تصمیم‌گیرنده در یک ساختار سلسله مراتبی می‌باشد. در این مسائل رهبر در سطح بالا و پیروها در سطح پایین قرار می‌گیرند و هر کدام برای بهینه‌سازی تابع هدف خود با توجه به محدودیت‌های مسأله تلاش می‌کند. متغیرهای تصمیم‌گیری یک برنامه دو سطحی بین بازیگرهای دو سطح تقسیم شده است. روش‌های مختلفی برای حل مسأله‌های بهینه‌سازی دو سطحی وجود دارد [14-17]. شکل (۲) خلاصه‌ای از بهینه‌سازی مدل پیشنهادی را همراه با سطوح مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، متغیر سطح بالای مسأله بهینه‌سازی قیمت طراحی توسط LSE می‌باشد که به عنوان یک ورودی ثابت به سطح پایین بهینه‌سازی وارد می‌شود. بر اساس قیمت طراحی شده در سطح اول، جمع‌کننده‌های پاسخگویی بار مصرف انرژی خود را برنامه‌ریزی کرده و پاسخ خود را به LSE در سطح بالای مسأله ارسال می‌کنند. این فرآیند مجدداً تکرار شده تا قیمت و مصرف انرژی بهینه بدست آید.

مستقیم مصرف‌کنندگان کوچک با بازار جلوگیری شده و از پیچیدگی بازار و تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری در مسأله بهینه‌سازی کاسته شود. جمع‌کننده‌های پاسخگویی بار با مصرف‌کنندگان انعطاف‌پذیر قرارداد بسته و مصرف‌کنندگان مشخصات بارهای خود و میزان رفاه بدست آمده از هر وسیله را به جمع‌کننده‌ها اعلام می‌کنند. براساس اطلاعات جمع‌آوری شده از مصرف‌کنندگان، هر جمع‌کننده یک تابع رفاه مناسب را برای مصرف‌کنندگان خود بدست می‌آورد که این تابع رفاه در بخش‌های بعد توصیف می‌شود. باید توجه داشت که بارهای غیر قابل انعطاف و حرارتی نباید قطع گردند و آنها قابلیت انتقال به زمان‌های دیگر را ندارند. در عوض بارهای انعطاف‌پذیر قابلیت قطع و یا انتقال به سایر زمان‌ها را دارا می‌باشند. به منظور تشویق مصرف‌کنندگان به شرکت در طرح پیشنهادی، قیمت طراحی شده توسط LSE در هر زمان (قیمت زمان حقیقی برای بارهای انعطاف‌پذیر) برابر یا پایین‌تر از قیمت بازار خرده‌فروشی می‌باشد. بدین صورت در بدترین وضعیت یعنی زمانی که قیمت برق تعیین شده برابر با قیمت بازار خرده‌فروشی باشد، هزینه پرداختی مشارکت‌کنندگان در این طرح مشابه با زمانی می‌باشد که آن‌ها در این طرح شرکت نکنند. به این معنا که طرح ارائه شده هیچ گونه اثر منفی بر روی مصرف‌کنندگان ندارد. نوآوری‌های اصلی این مقاله بصورت زیر می‌باشد:

- ارائه یک مدل دو سطحی که بصورت همزمان سود LSE و مصرف‌کنندگان را حداکثر نماید. در این مسأله LSE به عنوان رهبر و جمع‌کننده‌ها به عنوان پیرو می‌باشند.
- استفاده از شرایط بهینگی KKT و تبدیل مسأله بهینه‌سازی دو سطحی به مسأله تک سطحی و حل مسأله به روش کلاسیک و نه ابتکاری.
- در نظرگیری جریمه متغیر با زمان برای بارهای قطع شده الکتریکی و حرارتی.
- در نظرگیری بارهای حرارتی، که این بارها تحت قیمت بازار خرده‌فروشی (نه قیمت طراحی شده توسط LSE) هزینه‌های خود را پرداخت می‌کنند.
- در نظرگیری واحدهای تولید حرارت و واحدهای تولید همزمان برق و حرارت برای تامین انرژی حرارتی مصرف‌کنندگان. شکل (۱) این طرح پیشنهادی را بصورت شماتیک نشان می‌دهد.

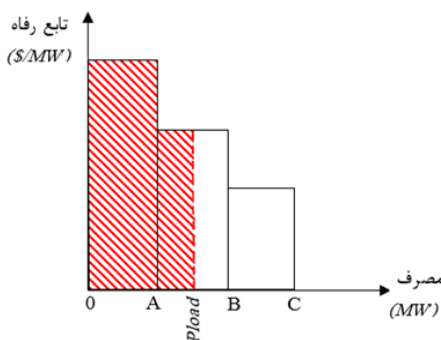


شکل (۱): مدل سیستم پیشنهادی

$$Maximize \sum_{t=1}^{NT} [U_{d,t}(P_{d,t}) - \Delta TC_t^{DR} P_{d,t}] \quad (4)$$

که در آن $U_{d,t}(P_{d,t})$ میزان رفاه بدست آمده از مصرف انرژی و $\Delta TC_t^{DR} P_{d,t}$ هزینه مصرف انرژی برای بارهای انعطاف پذیر می باشد. بدیهی است که هر چه میزان مصرف بالاتر باشد رفاه بدست آمده افزایش می یابد. تابع رفاه مصرف کنندگان بصورت یک تابع بلوکه ای چند پله همانند شکل (۳) مدل شده است. مطابق شکل (۳) با افزایش مصرف، میزان رفاه بدست آمده افزایش می یابد به گونه ای اگر میزان مصرف برابر با P_{load} باشد، ناحیه هاشور خورده، میزان رفاه مصرف کنندگان را نشان می دهد. با توجه به شکل (۳) داریم:

$$U_{d,t}(P_{d,t}) = \Delta T \sum_{m=1}^{NM_d} u_{d,m,t} P_{d,m,t} \quad (5)$$



شکل (۳): تابع رفاه مصرف کنندگان

سایر محدودیت های سطح پایین مساله بهینه سازی بصورت زیر می باشد:

$$P_{d,t} = \sum_{m=1}^{NM_d} P_{d,m,t} \quad (6)$$

$$0 \leq P_{d,m,t} \leq P_{d,m,t}^{max} \quad (7)$$

$$\Delta T \sum_{t=1}^{NT} P_{d,t} \geq E_d \quad (8)$$

$$P_{d,t} \geq P_{d,t}^{min} \quad (9)$$

$$P_{d,t} - P_{d,t-1} \leq R_d^U \quad (10)$$

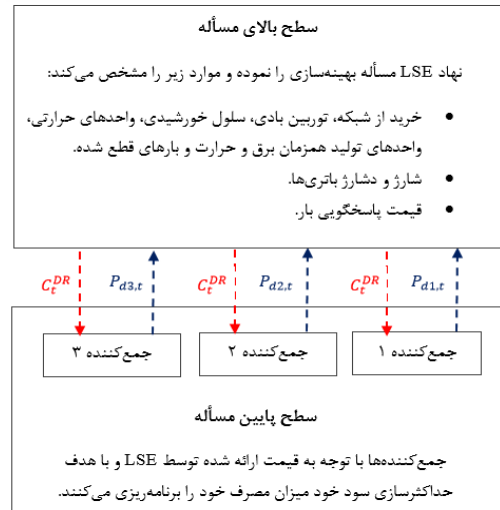
$$P_{d,t-1} - P_{d,t} \leq R_d^D \quad (11)$$

که $u_{d,m,t}$ سطح رفاه پله m برای جمع کننده d در زمان t ، $P_{d,m,t}$ سطح توان هر پله و $P_{d,t}$ کل توان مصرفی برای جمع کننده d در زمان t ، E_d حداقل انرژی مصرفی برای جمع کننده d و R_d^U و R_d^D شیب افزایش و کاهش مصرف انرژی برای جمع کننده d می باشد.

۲-۳- باتری ها

نهاد LSE از باتری ها بعنوان ذخیره ساز انرژی استفاده می کند تا سود خود را حداکثر نماید. برای مدلسازی باتری ها داریم:

$$0 \leq P_t^c \leq b_t^c P^c \quad (12)$$



شکل (۲): خلاصه ای از بهینه سازی دو سطحی ارائه شده

توابع هدف بهینه سازی و مدلسازی اجزای مختلف به صورت زیر می باشد:

۲-۱- تابع هدف LSE

همانطور که اشاره شد هدف از این مساله، حداکثر سازی سود LSE و مصرف کنندگان می باشد. سود LSE از (۱) بدست می آید:

$$Profit = Rev - Cost \quad (1)$$

$$Rev = \sum_{t=1}^{NT} \Delta T [C_t^H (H_t - H_t^{LC}) + C_t^R (D_t - D_t^{LC}) + \sum_{d=1}^{ND} C_t^{DR} P_{d,t}] \quad (2)$$

$$Cost = \left[P_t^s C_t^s + P_t^{solar} C_t^{solar} + P_t^{wind} C_t^{wind} + \sum_{j=1}^{Nj} C_j (P_j^c, H_j^c) + D_t^{LC} C_t^{LC} + H_t^{LC} C_t^{HC} + \sum_{k=1}^{Nk} C_k (H_t^k) \right] \quad (3)$$

که Rev ، $Cost$ و $Profit$ به ترتیب سود، درآمد و هزینه های LSE می باشد. همچنین D_t و H_t مقدار بارهای غیرقابل انعطاف الکتریکی و حرارتی، D_t^{LC} و H_t^{LC} مقدار بارهای قطع شده غیرقابل انعطاف الکتریکی و حرارتی، C_t^H و C_t^R قیمت پرداختی بارهای غیرقابل انعطاف الکتریکی و حرارتی می باشد. همچنین C_t^{DR} قیمت پرداختی بارهای انعطاف پذیر و $P_{d,t}$ میزان بارهای انعطاف پذیر جمع کننده ها می باشد. هزینه های LSE مربوط به خرید انرژی از شبکه (P_t^s)، توربین های بادی (P_t^{wind})، سلول های خورشیدی (P_t^{solar})، واحدهای تولید همزمان ($C_j (P_j^c, H_j^c)$)، واحدهای حرارتی ($C_k (H_t^k)$) و جریمه ناشی از قطع بارهای غیرقابل انعطاف می باشد.

۲-۲- تابع هدف مصرف کنندگان

در سطح پایین مساله بهینه سازی، جمع کننده های پاسخگویی بار به دنبال حداکثر نمودن سود مصرف کنندگان خود هستند. سود مصرف کنندگان از (۴) بدست می آید:

توربین بادی در زمان t و سناریوی s می‌باشد. در نهایت حداکثر توان قابل خرید و خریداری شده از توربین بادی از (۲۱) و (۲۲) بدست می‌آید:

$$P_t^{wind\ max} = \sum_{s=1}^{NT} \rho_s P_{t,s}^{wind} \quad (21)$$

$$0 \leq P_t^{wind} \leq P_t^{wind\ max} \quad (22)$$

که $P_t^{wind\ max}$ حداکثر توان خروجی از توربین بادی، ρ_s احتمال سناریوی s و P_t^{wind} توان خریداری شده از توربین‌های بادی می‌باشد. پارامترهای A ، B و C مقادیر ثابتی بوده که وابسته به سرعت‌های قطع پایین و بالا می‌باشد.

۲-۶- واحدهای تولید حرارت

از این واحدها فقط به منظور تولید حرارت استفاده می‌شود و هزینه تولید انرژی توسط این واحدها بصورت یک منحنی درجه دوم همچون (۲۳) مدل می‌گردد [18,19].

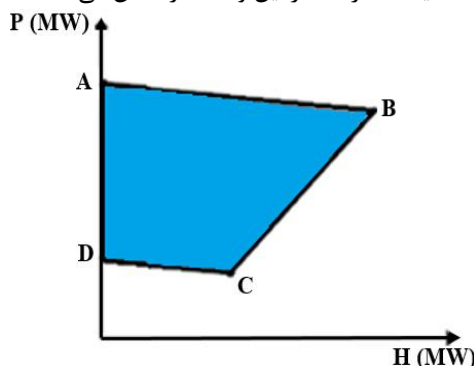
$$C_k(H_t^k) = a_k(H_t^k)^2 + b_k(H_t^k) + c_k \quad (23)$$

$$H_{\min}^k \leq H_t^k \leq H_{\max}^k \quad (24)$$

که $C_k(H_t^k)$ و H_t^k هزینه تولید توان حرارتی و حرارت تولید شده توسط واحد k ام در زمان t می‌باشد و a_k ، b_k و c_k ضرایب هزینه برای تولید حرارت واحد k ام می‌باشد. همچنین H_{\min}^k و H_{\max}^k حداکثر و حداقل توان حرارتی قابل تولید توسط واحد k ام را نشان می‌دهند.

۲-۷- واحدهای تولید همزمان برق و حرارت

از این واحدها برای تامین همزمان نیازهای الکتریکی و حرارتی مصرف‌کنندگان استفاده می‌شود. در این واحدها توان الکتریکی و حرارتی خروجی به یکدیگر وابسته هستند. به همین علت یک ناحیه عملکرد برای این واحدها مطابق شکل (۴) ارائه می‌گردد که ناحیه رنگ شده ناحیه عملکرد مجاز این واحدها را نشان می‌دهد.



شکل (۴): ناحیه عملکرد مجاز واحدهای تولید همزمان برق و حرارت

هزینه و محدودیت‌های بهره‌برداری از واحدهای تولید همزمان برق و حرارت در (۲۵) تا (۲۷) آورده شده است.

$$0 \leq P_t^d \leq b_t^d P^d \quad (13)$$

$$SOC^{\min} \leq SOC_t \leq SOC^{\max} \quad (14)$$

$$SOC_{t+1} = SOC_t + \Delta T \left(\frac{\eta^c P_t^c}{E} - \frac{P_t^d}{E \eta^d} \right) \quad (15)$$

$$SOC_{t24} = SOC_{t1} \quad (16)$$

$$b_t^c + b_t^d \leq 1 \quad (17)$$

متغیرهای P_t^d و P_t^c توان شارژ و دشارژ باتری در زمان t و P^d و P^c نشان دهنده حداکثر توان شارژ و دشارژ، SOC_t نشانگر حالت شارژ در زمان t ، SOC^{\min} و SOC^{\max} بیانگر حداقل و حداکثر حالت شارژ، η^c و η^d بازده شارژ و دشارژ و E ظرفیت باتری می‌باشد. همچنین b_t^c و b_t^d محدودیت‌های باینری مربوط به حد شارژ و دشارژ شدن باتری هستند. در حالیکه محدودیت مربوط به حد شارژ و دشارژ در (۱۲) و (۱۳) بیان شده است. در حالیکه محدودیت مربوط به حالت شارژ باتری در (۱۴) و (۱۵) ارائه شده است. همچنین (۱۶) بیان می‌کند که میزان انرژی باتری باید در ابتدا و انتهای روز با هم برابر باشد. در نهایت (۱۷)، از شارژ و دشارژ شدن همزمان باتری جلوگیری می‌کند.

۲-۴- سلول‌های خورشیدی

حداکثر توان خروجی از سلول‌های خورشیدی با در نظرگیری عدم قطعیت تابش خورشید از (۱۸) بدست می‌آید:

$$P_t^{solar\ max} = B_{pv} \eta_{pv} A_{pv} \sum_{s=1}^{N_s} \rho_s I_{t,s} (1 - 0.005(T_t^{out} - 25)) \quad (18)$$

که $P_t^{solar\ max}$ حداکثر توان خروجی در زمان t ، T_t^{out} و $I_{s,t}$ دمای محیط و شدت تابش خورشید در زمان t و سناریوی s ، A_{pv} مساحت صفحه‌های خورشیدی، B_{pv} تعداد صفحات خورشیدی، η_{pv} بازده سلول‌های خورشیدی و ρ_s احتمال وقوع سناریوی s می‌باشد. همچنین مقدار انرژی خریداری شده از سلول‌های خورشیدی توسط LSE در (۱۹) بیان شده است:

$$0 \leq P_t^{solar} \leq P_t^{solar\ max} \quad (19)$$

۲-۵- توربین بادی

توان خروجی از توربین‌های بادی در زمان t و سناریوی s از (۲۰) بدست می‌آید:

$$P_{t,s}^{wind} = \begin{cases} 0 & V_{t,s}^{wind} < V_{ci} \\ P_r \left(A + B V_{t,s}^{wind} + C (V_{t,s}^{wind})^2 \right) & V_{ci} < V_{t,s}^{wind} < V_r \\ P_r & V_r < V_{t,s}^{wind} < V_{co} \\ 0 & V_{co} < V_{t,s}^{wind} \end{cases} \quad (20)$$

که پارامترهای V_{ci} ، V_r ، V_{co} و P_r و $P_{t,s}^{wind}$ بترتیب سرعت قطع پایین، سرعت قطع بالا، سرعت نامی، توان نامی و توان خروجی از

جدول (۱): مشخصات سلول‌های خورشیدی

B_{PV}	η^{PV}	$A_{PV} (m^2)$
۳۰۰۰	۰/۳	۱/۲ × ۱/۸

جدول (۲): مشخصات توربین‌های بادی

$V_{co}(m/s)$	$V_{ci}(m/s)$	$V_r(m/s)$	$Pr (MW)$
۳۰	۵	۱۲	۴

جدول (۳): مشخصات باتری

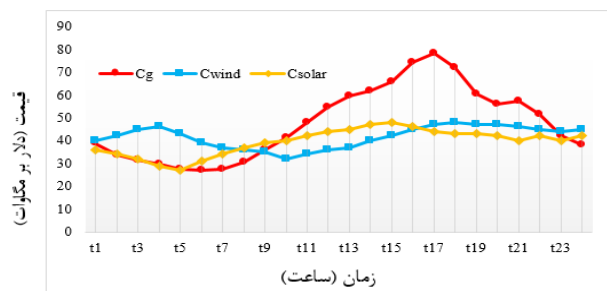
SOC^{max} (MWh)	SOC^{min} (MWh)	P^d و P^c (MW)	η^d و η^c	E (MWh)
۰/۹	۰/۱	۰/۱	۰/۹	۰/۵

جدول (۴) میزان توان و سطح رفاه هر پله در حالت پایه را برای جمع‌کننده‌های پاسخگویی بار نشان می‌دهد. در این مقاله از ۳ جمع‌کننده پاسخگویی بار استفاده شده است. ضریب‌های ۱، ۰/۸ و ۱/۲ برابر حالت پایه بترتیب برای سطوح رفاه مصرف‌کنندگان در ساعت‌های t_8 - t_1 ، t_9 - t_{16} و t_{17} - t_{24} قرار داده شده است. حداقل مصرف انرژی بارهای انعطاف‌پذیر جمع‌کننده‌ها برابر با ۶۰ درصد حداکثر مصرف انرژی روزانه در نظر گرفته شده است. برای دمای محیط، سرعت باد و شدت تابش خورشید از داده‌های آب و هوایی شهر فرانکفورت آلمان استفاده شده است [۲۰].

جدول (۴): میزان بارهای انعطاف‌پذیر و سطح رفاه

جمع‌کننده	توان بلوک‌های تقاضا (MW)	سطح رفاه هر بلوک تقاضا (\\$)
۱	۱-۱-۱-۱	۵۶-۵۲-۵۱-۴۶
۲	۱-۱-۱-۱	۶۱-۵۶-۵۲-۴۶
۳	۱-۱-۲-۲	۵۹-۵۶-۵۲-۴۷

داده‌های مربوط به قیمت برق شبکه، توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی در شکل (۵) آورده شده است.



شکل (۵): قیمت برق شبکه، توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی

همچنین جریمه مربوط به قطع بارهای الکتریکی و حرارتی در شکل (۶) به نمایش درآمده است.

$$C_j(P_j^c, H_j^c) = a_j(P_j^c)^2 + b_j P_j^c + c_j + d_j(H_j^c)^2 + e_j H_j^c + f_j P_j^c H_j^c \quad (25)$$

$$P_j^{c \min}(H_j^c) \leq P_j^c \leq P_j^{c \max}(H_j^c) \quad (26)$$

$$H_j^{c \min}(P_j^c) \leq H_j^c \leq H_j^{c \max}(P_j^c) \quad (27)$$

مقادیر $a_j, b_j, c_j, d_j, e_j, f_j$ ضرایب هزینه و H_j^c و P_j^c توان الکتریکی و حرارتی تولیدی واحد j می‌باشد. محدودیت‌های (۲۶) و (۲۷) بیان می‌کند که توان الکتریکی و حرارتی باید در محدوده مجاز خود باشند که $P_j^{c \min}(H_j^c)$ و $P_j^{c \max}(H_j^c)$ و $H_j^{c \min}(P_j^c)$ و $H_j^{c \max}(P_j^c)$ حداکثر توان الکتریکی و حرارتی برای واحد j می‌باشد.

۲-۸- خرید انرژی از شبکه و منابع تجدیدپذیر

محدودیت خرید انرژی از شبکه در (۲۸) و محدودیت قطع بارهای غیرقابل انعطاف الکتریکی و حرارتی از (۲۹) و (۳۰) بدست می‌آید.

$$-P_t^{g, \max} \leq P_t^g \leq P_t^{g, \max} \quad (28)$$

$$0 \leq D_t^{LC} \leq D_t \quad (29)$$

$$0 \leq H_t^{LC} \leq H_t \quad (30)$$

۲-۹- تعادل توان الکتریکی و حرارتی

تعادل توان الکتریکی و حرارتی از (۳۱) و (۳۲) بدست می‌آید:

$$P_t^g + (P_t^d - P_t^c) + D_t^{LC} + P_t^{wind} + P_t^{solar} + \sum_{j=1}^{N_j} P_j^c = D_t + \sum_{d=1}^{N_d} P_{d,t} \quad (31)$$

$$\sum_{j=1}^{N_j} H_j^c + \sum_{k=1}^{N_k} H_k^t = H_t - H_t^{LC} \quad (32)$$

۲-۱۰- قیمت پاسخگویی بار

قیمتی که مصرف‌کنندگان بارهای انعطاف‌پذیر در صورت مشارکت در برنامه پاسخگویی بار پیشنهادی توسط LSE می‌پردازند توسط (۳۳) بیان می‌گردد:

$$C_t^{DR} \leq C_t^R \quad (33)$$

رابطه (۳۳) نشان می‌دهد که در هر زمان، قیمت برق برای بارهای انعطاف‌پذیر همواره کمتر یا برابر با قیمت بازار خرده‌فروشی می‌باشد. بنابراین در بدترین شرایط میزان پرداختی مصرف‌کنندگان شرکت-کننده در این برنامه برابر با حالتی است که در این برنامه‌ها مشارکت نکنند.

۳- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها و تحلیل آنها ارائه می‌شود. اطلاعات مربوط به سلول‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و باتری در جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) آورده شده است.

اطلاعات مربوط به ضرایب هزینه و ناحیه مجاز عملکرد واحدهای تولید همزمان برق و حرارت در جدول‌های (۶) و (۷) آورده شده است.

جدول (۶): ضرایب هزینه برای واحدهای تولید و حرارت

شماره واحد	واحد ۱	واحد ۲
$(\$/MW^2)$	۰/۴۳۵	۰/۵۷
b $(\$/MW)$	۵۶	۳۲
c $(\$)$	۱۲/۵	۲۲
$(\$/MW^2)$	۰/۰۲۷	۰/۱
e $(\$/MW)$	۰/۶	۰/۴
f $(\$/MW^2)$	۰/۰۱۱	۰/۰۴۲

جدول (۷): ناحیه عملکرد مجاز واحدهای تولید همزمان برق و حرارت

شماره واحد	واحد ۱	واحد ۲
(MW)	۲/۴۷	۱/۵
P_B (MW)	۲/۱۵	۱/۳
P_C (MW)	۰/۸۱	۰/۵
P_D (MW)	۰/۹۸۸	۰/۶۴
H_A (MW)	.	.
H_B (MW)	۱/۸	۰/۹
H_C (MW)	۱/۰۴۸	۰/۶
H_D (MW)	.	.

برای ارزیابی مدل پیشنهادی دو طرح زیر با هم مقایسه می‌شوند:

طرح اول: مصرف‌کنندگان در برنامه پاسخگویی بار طراحی شده توسط LSE شرکت می‌کنند. بنابراین بارهای انعطاف‌پذیر قیمت طراحی شده توسط LSE را می‌پردازند در حالیکه بارهای غیرقابل انعطاف و حرارتی قیمت بازار خرده‌فروشی را پرداخت می‌کنند.

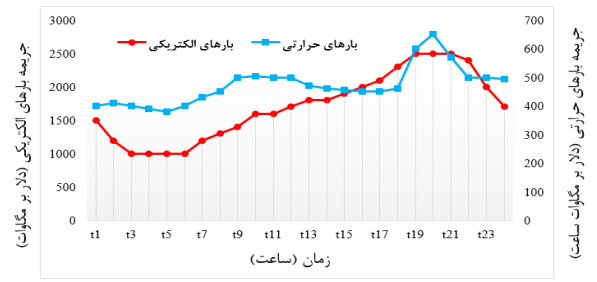
طرح دوم: مصرف‌کنندگان در برنامه پاسخگویی بار طراحی شده توسط LSE شرکت نکرده و تمامی بارها قیمت بازار خرده‌فروشی را می‌پردازند.

نتایج بهینه‌سازی در جدول (۸) و قیمت طراحی شده در شکل (۹) آورده شده است.

جدول (۸): مقایسه دو طرح

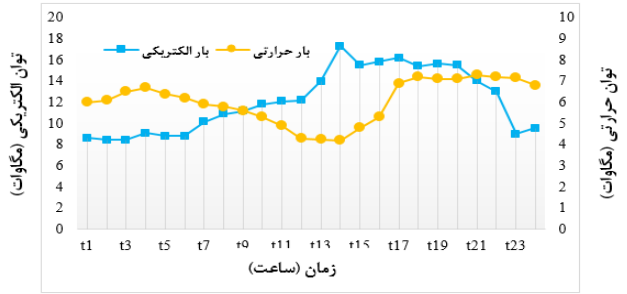
طرح	سود LSE $(\$)$	پرداختی $(\$)$	رفاه $(\$)$
طرح اول	۵۶۶۹/۳۴	۳۴۷۴۲/۶۱	۱۱۲۱۴/۱۲
طرح دوم	-۲۷۴۵۸/۴۸	۳۵۱۳۳/۶۲	۱۱۸۲۰/۴

در جدول (۸) دیده می‌شود که سود LSE در طرح اول بیش از طرح دوم می‌باشد. همچنین مصرف‌کنندگان نیز در طرح اول هزینه کمتری را پرداخت می‌کنند. اما میزان رفاه مصرف‌کنندگان در طرح اول کمی کاهش می‌یابد. علت کاهش در رفاه مصرف‌کنندگان به این علت است که آنها مقداری از بارهای خود را از دوره اوج مصرف و میان



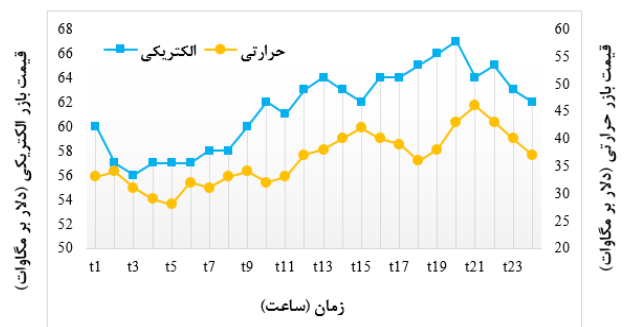
شکل (۶): جریمه پرداختی در صورت قطع بارهای الکتریکی و حرارتی

حداکثر توان قابل خرید از شبکه در تمامی زمان‌ها ۲۲ مگاوات فرض شده است. همچنین فرض می‌کنیم که LSE میزان بارهای غیرقابل انعطاف الکتریکی و حرارتی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند و منحنی‌های مصرف در شکل (۷) به نمایش درآمده است.



شکل (۷): منحنی مصرف بارهای الکتریکی و حرارتی غیرقابل انعطاف

شکل (۸) قیمت بازار خرده‌فروشی که مصرف‌کنندگان در صورت عدم مشارکت در طرح پیشنهادی LSE ملزم به پرداخت آن هستند را نشان می‌دهد.



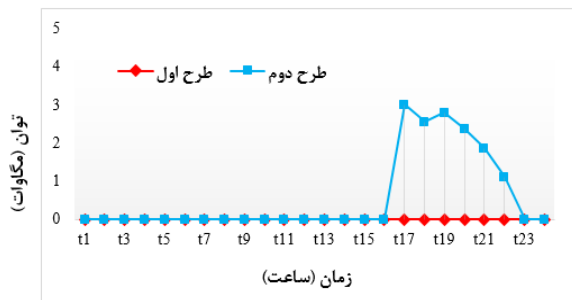
شکل (۸): قیمت بازار خرده‌فروشی

برای تامین انرژی حرارتی مصرف‌کنندگان، دو واحد تولید حرارت و دو واحد تولید همزمان در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به واحدهای تولید حرارت در جدول (۵) آورده شده است.

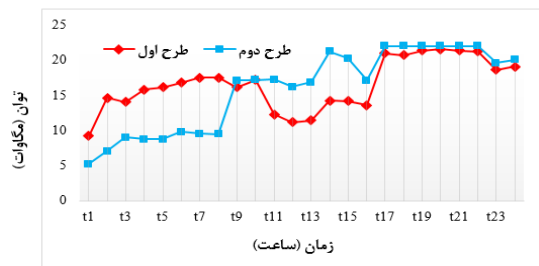
جدول (۵): اطلاعات مربوط به واحدهای حرارتی

شماره واحد	واحد ۱	واحد ۲
حداقل توان (MW)	.	.
حداکثر توان (MW)	۲	۲/۵
a $(\$/MW^2)$	۰/۲	۰/۳
b $(\$/MW)$	۵۳	۴۵
c $(\$)$	۱۰	۱۵

شکل (۱۱) میزان بارهای الکتریکی قطع شده در هر دو طرح را نشان می‌دهد. در طرح اول هیچ باری قطع نشده است ولی در طرح دوم و در زمان‌های اوج مصرف بخشی از بارهای الکتریکی مصرف‌کنندگان قطع شده است. در واقع در طرح اول به علت انتقال بخشی از مصرف بارهای انعطاف‌پذیر از دوره‌های اوج به کم باری، هیچ باری در دوره اوج قطع نشده است. برای درک بهتر این موضوع میزان توان خریداری شده از شبکه در هر دو طرح در شکل (۱۲) آورده شده است.

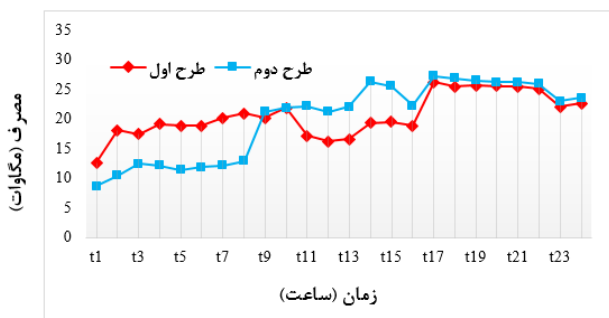


شکل (۱۱): میزان بارهای قطع شده الکتریکی در هر دو طرح



شکل (۱۲): توان خریداری شده از شبکه در هر دو طرح

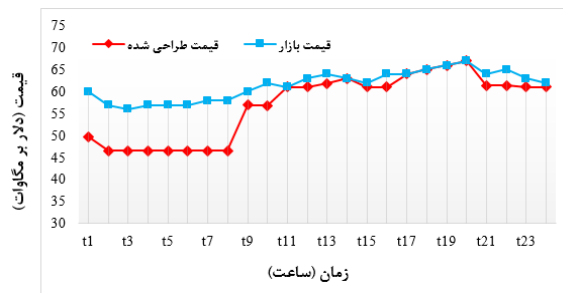
با توجه به شکل (۱۲) دیده می‌شود که در طرح دوم و در زمان‌های t_{17} تا t_{22} حداکثر توان در دسترس از شبکه خریداری شده است و با توجه به کمبود تولید، به ناچار بخشی از بارهای مصرف‌کنندگان قطع شده است. ولی در طرح اول با توجه به انتقال بار صورت گرفته، هیچ باری قطع نشده است.



شکل (۱۳): منحنی مصرف انرژی کل در هر دو طرح

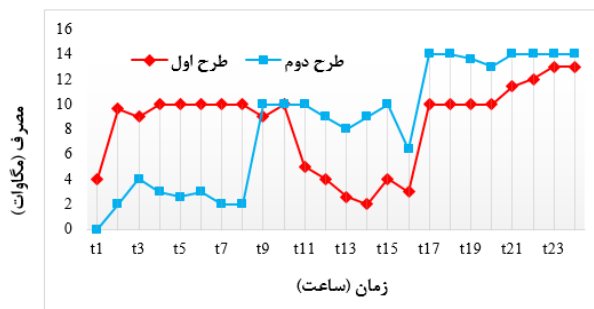
همچنین منحنی مصرف کل بارهای الکتریکی شامل بارهای انعطاف‌پذیر، غیر قابل انعطاف و بارهای قطع شده الکتریکی در شکل (۱۳) آورده شده است. شکل (۱۳) نشان می‌دهد که منحنی مصرف کل در طرح اول یکنواخت‌تر از طرح دوم می‌باشد. ویژگی‌های این دو منحنی از جمله ضریب بار، بار اوج، حداقل بار و کل انرژی مصرفی در جدول (۹) آورده شده است.

باری به دوره کم باری منتقل کرده و ضریب رفاه در دوره اوج و میان باری بالاتر از دوره کم باری می‌باشد.



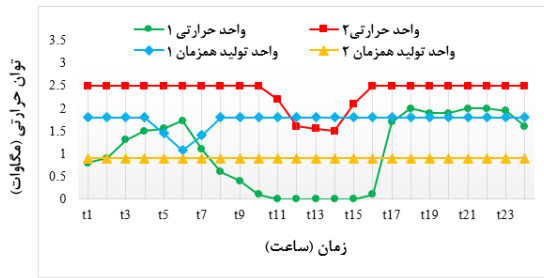
شکل (۹): قیمت برق برای بارهای انعطاف‌پذیر در طرح اول و دوم

متناسب شکل (۹)، قیمت طراحی شده برای بارهای انعطاف‌پذیر در طرح اول و تمامی زمان‌ها کمتر از قیمت بازار خرده‌فروشی می‌باشد. همانطور که قبلاً ذکر شد این امر به علت تشویق مصرف‌کنندگان به شرکت در این طرح می‌باشد. در شکل (۹) مشاهده می‌شود که LSE قیمت برق را در زمان‌های t_1 تا t_8 کمتر از قیمت بازار تعیین نموده است. علت این امر این است که در واقع LSE بخش عمده‌ای از انرژی خود را از طریق شبکه تامین می‌کند و قیمت برق شبکه در زمان‌های t_1 تا t_8 پایین می‌باشد. به همین دلیل LSE قیمت را در این زمان‌ها بین قیمت برق شبکه و قیمت بازار تعیین می‌کند تا هم سود برده و هم مصرف‌کنندگان را تشویق کند که بارها در زمان اوج مصرف بیشتر باشد، نهاد LSE قیمت در کم باری را پایین‌تر اعلام می‌کند تا مصرف‌کنندگان تشویق شده و بارهای بیشتری را به دوره کم باری منتقل نمایند. منحنی مصرف بارهای انعطاف‌پذیر در هر دو طرح در شکل (۱۰) آورده شده است.

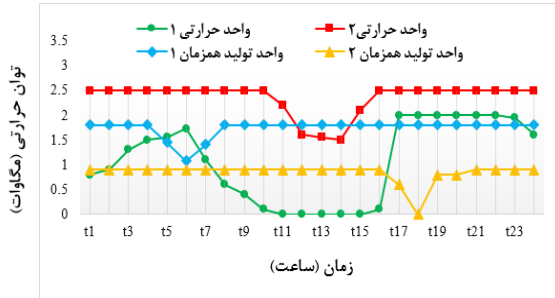


شکل (۱۰): منحنی مصرف بارهای انعطاف‌پذیر در طرح اول و دوم

متناسب با شکل (۱۰)، در طرح دوم میزان مصرف انرژی در زمان‌های t_1 تا t_8 بسیار کم، در زمان‌های t_9 تا t_{16} متوسط و در زمان‌های t_{17} تا t_{24} بسیار بالا می‌باشد. این نحوه مصرف انرژی به این دلیل است که سطح رفاه مصرف انرژی در زمان‌های t_1 تا t_8 کم و در t_{17} تا t_{24} بیش از حالت پایه می‌باشد. با اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار در زمان‌هایی که قیمت طراحی شده توسط LSE پایین اعلام شده است، انرژی بیشتری توسط بارهای انعطاف‌پذیر مصرف شده است.

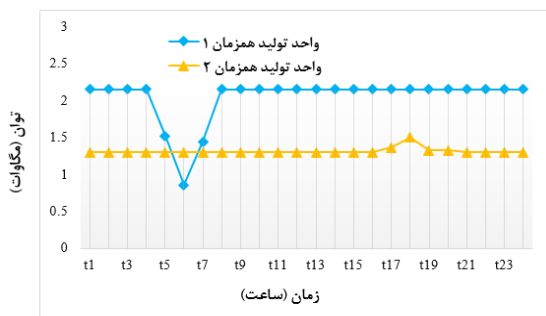


شکل (۱۶): حرارت تولیدی تمامی واحدها در طرح اول



شکل (۱۷): حرارت تولیدی تمامی واحدها در طرح دوم

همانطور که در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) دیده می‌شود در طرح اول و در ساعت t_{21} تمامی واحدهای حرارتی و تولید همزمان برق و حرارت در حداکثر تولید حرارتی خود قرار گرفته‌اند. ولی میزان مصرف انرژی حرارتی در این ساعت بیش از حداکثر تولید بوده و به ناچار مقداری از انرژی حرارتی مصرف‌کنندگان قطع شده است. اما در طرح دوم علاوه بر ساعت t_{21} ، مقداری از انرژی مصرف‌کنندگان در ساعت t_{18} نیز قطع شده است. با توجه به شکل (۱۷) مقدار حرارت تولیدی واحد تولید همزمان برق و حرارت دوم در ساعت t_{18} صفر شده است و این به این معناست که این واحد در حداکثر تولید توان الکتریکی خود قرار گرفته است. توان خروجی واحدهای تولید همزمان برق و حرارت در طرح دوم در شکل (۱۸) آورده شده است.



شکل (۱۸): توان تولیدی واحدهای تولید همزمان در طرح دوم

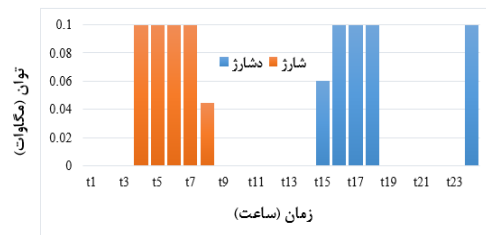
مطابق شکل (۱۸) واحد تولید همزمان برق و حرارت دوم در زمان t_{18} در حداکثر تولید توان الکتریکی قرار گرفته و نتیجه آن عدم تولید انرژی حرارتی بوده که منجر به قطع بخشی از بارهای حرارتی مصرف‌کنندگان شده است. حداکثر شدن توان الکتریکی خروجی واحد تولید همزمان دوم به این علت است که مقدار جریمه برای قطع بارهای الکتریکی در ساعت مذکور بیش از جریمه قطع بارهای حرارتی می-

جدول (۹): مقایسه ویژگی‌های منحنی مصرف در هر دو طرح

ویژگی	بار اوج (MW)	بار حداقل (MW)	ضریب بار (%)	انرژی مصرفی (MWh)
طرح اول	۲۶/۲	۱۲/۶۴	۷۸	۴۹۳/۲۱
طرح دوم	۲۷/۲	۸/۶۴	۷۳	۴۷۹/۵۲

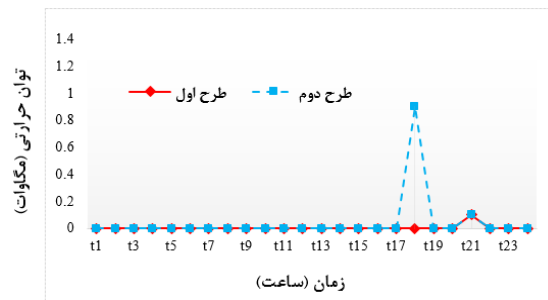
در طرح اول بار اوج کاهش یافته و بار حداقل افزایش یافته است که منجر به افزایش ضریب توان منحنی مصرف گردیده است. بعلاوه در طرح اول مصرف‌کنندگان انرژی بیشتری را مصرف کرده‌اند. با اینکه مصرف‌کنندگان در طرح اول به میزان ۱۳/۶۹ مگاوات ساعت انرژی بیشتر از طرح دوم استفاده کرده‌اند، با این وجود پرداختی مصرف‌کنندگان در طرح اول کمتر از طرح دوم می‌باشد.

وضعیت شارژ و دشارژ باتری‌ها در شکل (۱۴) به نمایش در آمده است. با توجه به شکل، در زمان‌هایی که قیمت برق شبکه پایین می‌باشد، LSE انرژی الکتریکی را خریداری کرده و در باتری‌ها ذخیره می‌کند و در زمان‌های اوج مصرف که قیمت بالا می‌باشد، انرژی ذخیره شده را دشارژ نموده و کسب درآمد می‌کند.



شکل (۱۴): شارژ و دشارژ باتری‌ها در طرح اول

میزان بارهای حرارتی قطع شده طرح اول و دوم در شکل (۱۵) آورده شده است.



شکل (۱۵): بارهای حرارتی قطع شده در طرح اول و دوم

میزان بارهای حرارتی قطع شده در طرح اول کمتر از بارهای حرارتی قطع شده در طرح دوم می‌باشد. حرارت تولیدی واحدهای حرارتی و واحدهای تولید همزمان برق و حرارت طرح اول و دوم در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) آورده شده است.

- Smart home Environment," Energy Conversion and Management, vol. 106, pp. 181-193, 2015.
- [7] H. T. Nguyen, D. T. Nguyen, and L. B. Le, "Energy Management for Households with Solar Assisted Thermal Load Considering Renewable Energy and Price Uncertainty," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, pp. 301-314, 2015.
- [8] T. Amraee, and A. Soroudi. "Voltage Stability Constrained OPF Using A Bilevel Programming Technique." Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 14, No. 4, pp. 103-109, 2018.
- [9] A. Safdarian, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Lehtonen, "A Distributed Algorithm for Managing Residential Demand Response in Smart Grids," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 10, pp. 2385-2393, 2014.
- [10] M. Carrion, J. M. Arroyo, and A. J. Conejo, "A Bilevel Stochastic Programming Approach for Retailer Futures Market Trading," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, pp. 1446-1456, 2009.
- [11] G. E. Asimakopoulou, A. L. Dimeas, and N. D. Hatziaargyriou, "Leader-Follower Strategies for Energy Management of Multi-Microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, pp. 1909-1916, 2013.
- [12] D. T. Nguyen, H. T. Nguyen and L. B. Le, "Dynamic Pricing Design for Demand Response Integration in Power Distribution Networks," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 5, pp. 3457-3472, 2016.
- [13] Chiu, Wei-Yu, Hongjian Sun, and H. Vincent Poor. "A Multiobjective Approach to Multimicrogrid System Design." IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 5, pp. 2263-2272, 2015.
- [14] H. M. Nehi and F. Hamidi, "Upper and lower bounds for the optimal values of the interval bilevel linear programming problem," Applied Mathematical Modelling, vol. 39, pp. 1650-1664, 2015.
- [15] W. Zhongping, W. Guangmin, and L. Yibing, "A Dual-Relax Penalty Function Approach for Solving Nonlinear Bilevel Programming with Linear Lower Level Problem," Acta Mathematica Scientia, vol. 31, pp. 652-660, 2011.
- [16] M. Sakawa and T. Matsui, "Stackelberg Solutions for Random Fuzzy Two-Level Linear Programming Through Possibility-Based Probability Model," Expert Systems with Applications, vol. 39, pp. 10898-10903, 2012.
- [17] Y. Jiang, X. Li, C. Huang, and X. Wu, "Application of Particle Swarm Optimization Based on CHKS Smoothing Function for Solving Nonlinear Bilevel Programming Problem," Applied Mathematics and Computation, vol. 219, pp. 4332-4339, 2013.
- [18] M. Mehdinejad, B. Mohammadi-Ivatloo, and R. Dadashzadeh-Bonab, "Energy Production Cost Minimization in a Combined Heat and Power Generation Systems Using Cuckoo Optimization Algorithm," Energy Efficiency, vol. 10, pp. 81-96, 2017.
- [19] M. Nazari-Heris, S. Abapour, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Optimal Economic Dispatch of FC-CHP Based Heat and Power Micro-Grids," Applied Thermal Engineering, vol. 114, pp. 756-769, 2017.
- [20] <http://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>.

¹ Cloud Demand Response

² Load Serving Entity

³ Karush-Kuhn-Tucker

باشد و به همین دلیل LSE به منظور کاهش میزان جریمه، این واحد را در حداکثر تولید توان الکتریکی قرار داده است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک طرح جدید برای قیمت‌گذاری برنامه‌های پاسخگویی بار زمان حقیقی با در نظرگیری بارهای حرارتی و واحدهای تولید همزمان برق و حرارت ارائه گردید. مدل ارائه شده بصورت یک بهینه‌سازی دو سطحی مدل گردید که نهاد LSE به عنوان رهبر در سطح بالای مسأله و جمع‌کنندگان پاسخگویی بار به عنوان پیرو و در سطح پایین مسأله جای گرفتند تا بصورت همزمان سود خود را حداکثر سازند. مدل ارائه شده با استفاده از شرایط بهینگی KKT به یک مسأله بهینه‌سازی تک سطحی تبدیل و حل گردیده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در صورت اجرای طرح پیشنهادی، میزان سود LSE افزایش یافته و پرداختی مصرف‌کنندگان کاهش می‌یابد. همچنین اجرای طرح پیشنهادی باعث کاهش قطعی بارهای الکتریکی و حرارتی شده است. با اجرای این طرح بهره‌بردار شبکه نیز سود می‌برد زیرا که این طرح باعث بهبود در ضریب بار، کاهش بار اوج، افزایش بار حداقل می‌شود. دیگر مزیت طرح پیشنهادی قابلیت مشارکت تمامی بارها اعم از کوچک و بزرگ می‌باشد. زیرا این بارها بوسیله جمع‌کننده‌های پاسخگویی بار در این طرح مشارکت می‌نمایند که این کار علاوه بر اینکه قابلیت مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار را برای تمامی مصرف‌کنندگان فراهم می‌کند باعث جلوگیری از مشارکت مستقیم مصرف‌کنندگان در بازار و پیچیدگی محاسبات می‌گردد.

منابع

- [1] H. R. Arasteh, M. Parsa Moghaddam, and M. K. Sheikh-Eslami. "Bidding Strategy in Demand Response Exchange Market." Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 10, No. 2, pp. 1-10, 2013.
- [2] H. Aalami, M. P. Moghaddam, and G. Yousefi, "Modeling and Prioritizing Demand Response Programs in Power Markets," Electric Power Systems Research, vol. 80, pp. 426-435, 2010.
- [3] H. Kim, Y. J. Kim, K. Yang, and M. Thottan, "Cloud-Based Demand Response for Smart Grid: Architecture and distributed algorithms," In Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp. 398-403, 2011.
- [4] J. Schwarzer, A. Kiefel, and D. Engel, "The Role of User Interaction and Acceptance in a Cloud-Based Demand Response Model," In Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE, pp. 4797-4802, 2013.
- [5] F. Y. Xu and L. L. Lai, "Novel Active Time-Based Demand Response for Industrial Consumers in Smart Grid," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 11, pp. 1564-1573, 2015.
- [6] E. Shirazi, A. Zakariazadeh, and S. Jadid, "Optimal Joint Scheduling of Electrical and Thermal Appliances in a