تعیین قیمت بهینه برای برنامه‌های پاسخگویی بار با هدف بهبود همزمان سود مصرف‌کنندگان و ضریب بار شبکه

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 و پویا برای برنامه‌های پاسخگویی بار پیشنهاد می‌گردد که بطور همزمان سود مصرف‌کنندگان و نهاد خدمت‌رسان بار (LSE) را افزایش می‌دهد و علاوه‌بر آن ضریب بار شبکه بهبود می‌یابد. این امکان برای مصرف‌کنندگان وجود دارد که انرژی مورد نیاز خود را از بازار خرده‌فروشی خریداری نمایند یا در طرح ارائه شده توسط LSE مشارکت نمایند و قیمتی که LSE ارائه می‌دهد را برای مصرف انرژی خود پرداخت نمایند. از طرفی LSE برای تشویق مصرف-کنندگان به شرکت در طرح پیشنهادی و حداکثرسازی سود خود، به مصرف‌کنندگان تضمین می‌دهد که قیمت پویایی که توسط این نهاد تعیین می‌شود در هر ساعت کمتر یا برابر با قیمت بازار خرده‌فروشی خواهد بود. از طرفی LSE تلاش می‌کند تا قیمت ارائه شده از ایجاد اوج بار جدید در زمان‌هایی با قیمت برق پایین جلوگیری نماید. مدل ارائه شده بصورت یک بهینه‌سازی چند هدفه و دوسطحی مدل شده است. سطح بالای بهینه‌سازی بصورت چند هدفه می‌باشد و به حداکثرسازی سود LSE و بهبود ضریب بار شبکه می‌پردازد و در سطح پایین بهینه‌سازی سود مصرف‌کنندگان مدل شده است. مدل ارائه شده با استفاده از نرم‌افزار GAMSحل شده است و نتایج ارائه شده، کارایی مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پاسخگویی بار، نهاد خدمت‌رسان بار، بهینه‌سازی دو سطحی، بهینه‌سازی چند هدفه، بازار خرده‌فروشی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۱۲/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر شهرام جدید

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

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با رشد میزان مصرف انرژی، سرمایه‌گذاری‌ها در صنعت برق افزایش یافته است و درنتیجه میزان گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های زیست محیطی افزایش یافته است. شبکه‌های هوشمند یک ابزار کارآمد برای رفع این مشکلات می‌باشد که در آن ملاحظات اقتصادی، محیطی و همچنین مفاهیم تخصصی همچون بهره‌وری انرژی، بهبود بارگذاری و کاهش تلفات قابل مشاهده است [۱]. علاوه بر این موارد، افزایش میزان نفوذ انرژی‌های سبز به عنوان یکی از مزیت-های جالب پیاده سازی شبکه‌های هوشمند محسوب می‌شود [۲].

پاسخگویی بار یکی از ویژگی‌های مهم شبکه‌های هوشمند است که با اجرای این برنامه‌ها، احداث نیروگاه‌های جدید به تعویق افتاده، قابلیت اطمینان سیستم افزایش یافته و فرصت کاهش پرداختی برای مصرف‌کنندگان بوجود می‌آید [۳و۴]. مقالات متعددی در سال‌های اخیر به پاسخگویی‌بار پرداخته‌اند. در [۵] یک روش برآورده ساختن مصرف انرژی ۲۴ ساعته با استفاده از حداقل سازی هزینه خرید انرژی با در نظرگیری واحدهای تولید پراکنده و ذخیره‌سازها ارائه شده است. در [۶] یک مدل تصادفی برای برنامه‌های پاسخگویی بار ارائه شده است که در آن علاوه بر در نظرگیری تشویق‌ها و جریمه‌ها توسط قانون‌گذار، ریسک ناشی از عدم قطعیت قیمت انرژی در بازار عمده فروشی نیز مدل‌سازی شده است.

مرجع [۷] از روش فازی برای حداکثرسازی سود یک نیروگاه مجازی استفاده می‌کند. این نیروگاه مجازی هنگامی که تولیدش بیش از مصرف است، مازاد انرژی را در بازار به فروش می‌رساند و در زمانی که میزان تولید و پاسخگویی بارهایش کمتر از تقاضا باشد انرژی را از بازار خریداری می‌کند. در [۸] نویسنده از بهینه‌سازی دو سطحی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه و منابع تجدیدپذیر همراه با برنامه‌های پاسخگویی بار استفاده کرده است. تابع هدف سطح بالای این مسئله حداقل‌سازی هزینه تولید و سرمایه‌گذاری می‌باشد و تابع هدف سطح پایین آن حداقل‌سازی پرداختی مصرف‌کنندگان است.

در [۹] از برنامه پاسخگویی بار تشویقی برای کاهش بار اوج شبکه استفاده شده است که مسئله مورد مطالعه بوسیله بهینه‌سازی دو سطحی مدل شده است و پاداش تعلق گرفته به هر مصرف‌کننده براساس میزان انتقال بار و بهبود ولتاژ می‌باشد. نویسنده در [۱۰] از یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی برای قیمت‌گذاری انرژی در شبکه هوشمند استفاده کرده است که ارتباط بین مصرف‌کنندگان و بازار عمده‌فروشی بوسیله خرده‌فروش انرژی برقرار شده است.

در [۱۱] یک برنامه پاسخگویی بار برای مدیریت انرژی یک خانه با سه نوع بار شامل بارهای غیرقابل انعطاف، بارهای قابل تنظیم و بارهای قابل انتقال ارائه شده است. نویسنده با استفاده از الگوریتم یادگیری به طراحی یک برنامه پاسخگویی بار خانگی پرداخته است. در [۱۲] به بررسی برنامه‌های پاسخگویی بار بر روی بهره‌برداری شبکه-های توزیع پرداخته شده است. در [۱۳] از یک بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری برای برنامه ریزی مصرف انرژی در شبکه‌های هوشمند با استفاده از چهار نوع برنامه پاسخگویی بار استفاده شده است.

در [۱۴] مسئله برنامه‌ریزی انرژی برای یک خانه مجهز به سیستم تهویه مطبوع، آبگرم‌کن و سیستم خورشیدی تحت یک قیمت زمان حقیقی بررسی شده است. در [۱۵] با در نظرگیری منابع تولیدی مختلف از جمله توربین‌های بادی، سلول‌های خورشیدی و غیره به مدیریت مصرف یک مشترک خانگی پرداخته شده است.

در اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار ممکن است در زمان‌هایی که قیمت برق پایین اعلام می‌شود، یک اوج بار جدید ایجاد گردد. در این مقاله به طراحی یک قیمت زمان حقیقی می‌پردازیم که بصورت همزمان سود مصرف‌کنندگان و نهاد خدمت‌رسان بار[۱] (LSE) را حداکثر نموده و از به وجود آمدن اوج بار جدید جلوگیری می‌کند. مشارکت ما در این مقاله بصورت زیر است:

- طراحی یک قیمت زمان حقیقی که بصورت همزمان سود مصرف-کنندگان و نهاد خدمت‌رسان بار را حداکثر نموده و از بوجود آمدن اوج بار جدید جلوگیری می‌کند.
- در نظرگیری منابع تجدیدپذیر و منابع تولید انرژی قابل پخش (دیزل ژنراتورها) به منظور ایجاد رقابت در بازار عمده‌فروشی.
- مدلسازی مسئله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی دو سطحی و چند هدفه که یک حل برد-برد را برای برای تصمیم‌گیرندگان هر دو سطح را بوجود آورد.
- سطح بالای این مسئله بصورت یک مسئه بهینه سازی چند هدفه مدل شده است که ازترکیب دو روش بهینه‌سازی برای حل مسئله در این سطح استفاده شده است.

پس مقدمه در بخش اول، تئوری مسئله در بخش دوم معرفی شده است. مدل ریاضی مسئله در بخش سوم ارائه شده است و در بخش چهارم به صورت مختصر در مورد روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده در این مقاله مطالبی ارائه گردیده است. نتایج بدست آمده از شبیه-سازی‌ها و تحلیل نتایج در بخش پنجم آورده شده است. در نهایت، بخش ششم مقاله، نتیجه‌گیری کلی آورده شده است.

۲- طرح مسأله

در این مقاله به برنامه‌ریزی خرید و فروش انرژی برای یک شرکت خصوصی (LSE) پرداخته شده است که به منظور کسب سود در بازار برق فعالیت می‌کند. این شرکت خصوصی به منظور کسب درآمد، انرژی الکتریکی را از بازار عمده‌فروشی خریداری می‌کند و در بازار خرده‌فروشی به مصرف‌کنندگان می‌فروشد. LSE قادر است تا انرژی الکتریکی را از شبکه اصلی و منابع انرژی تجدیدپذیر خریداری نماید. همچنین LSE دارای چندین دیزل ژنراتور و ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد و می‌تواند انرژی را در زمان‌هایی که قیمت برق پایین است خریداری

نموده و در باتری‌ها ذخیره نماید و در زمان‌هایی که قیمت برق بالا می‌باشد، از این انرژی ذخیره شده استفاده نماید. در صورتی که LSE از دیزل ژنراتورها استفاده نماید، هزینه راه‌اندازی و سوخت این واحدها بر عهده خودش می‌باشد. LSE انرژی خریداری شده از بازار عمده فروشی و تولیدی خود را به مصرف‌کنندگان عرضه می‌کند.

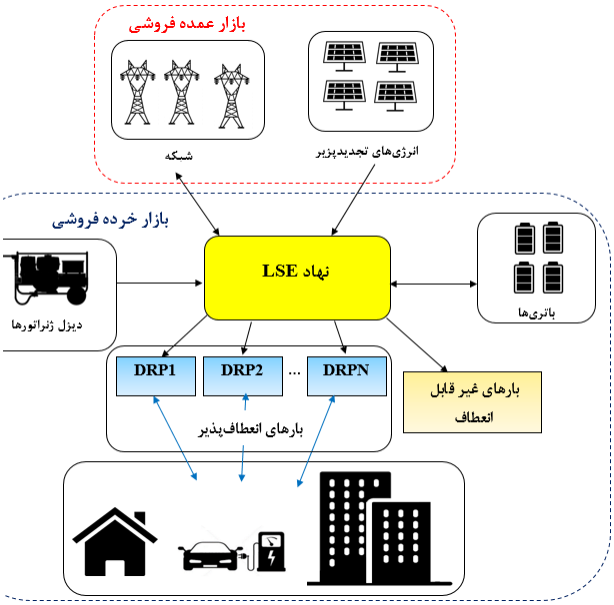
اصولا مصرف‌کنندگان دارای دو نوع بار می‌باشند. گروه اول بارهایی هستند که از آنها به عنوان بارهای انعطاف‌پذیر نام برده می‌شود که وسایلی همانند جارو برقی، ماشین لباسشویی، ماشین ظرفشویی و غیره در این گروه قرار می‌گیرند. مصرف‌کنندگان می‌توانند این وسایل را در هر زمانی مورد بهره‌برداری قرار دهند. گروه دوم بارهایی همچون یخچال و لوازم روشنایی هستند که باید در زمان مشخصی از آنها استفاده نمود و به آنها بارهای غیر قابل انعطاف گفته می‌شود. معمولا مصرف‌کنندگان خانگی اطلاعات کافی و مناسبی از انرژی الکتریکی نداشته و یا زمان کافی برای پیگیری وضعیت انرژی الکتریکی شامل قیمت ساعتی برق را ندارند. به همین دلیل نمی‌توانند هزینه‌های خود را مدیریت کنند. برای بر طرف شدن این معضلات، مصرف‌کنندگان از طریق فراهم‌کنندگان پاسخگویی بار[۲] (DRP) اقدام به خرید انرژی الکتریکی می‌کنند. DRP ها از وضعیت موجود در هر لحظه اطلاع داشته و از طرف گروهی از مصرف‌کنندگان برای خرید انرژی اقدام می‌کنند.

DRP ها می‌توانند انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان خود را از LSE خریداری کنند یا اینکه آن را از بازار خرده فروشی تهیه نمایند. هدف نهایی DRP ها حداکثرسازی سود مصرف‌کنندگانی می‌باشد که به آنها مراجعه کرده‌اند که این کار با برنامه‌ریزی مصرف انرژی برای بارهای انعطاف‌پذیر مصرف‌کنندگان انجام می‌گردد.

نهاد LSE برای فروش بیشتر انرژی و در نتیجه افزایش سود خود تلاش می‌کند تا DRP ها را به خرید انرژی از خود ترغیب نماید. LSE برای اینکه DRP ها با او قرار بسته و انرژی مورد نیاز را از او خریداری نمایند، با آنها توافق می‌کند که قیمت برق را در هیچ زمانی بیش از قیمت بازار خرده فروشی تعیین نکند. به همین دلیل DRP ها در هیچ شرایطی از خرید انرژی LSE متضرر نخواهند شد. در صورت توافق DRP ها با LSE، قیمت پرداختی برای بارهای غیرقابل انعطاف مطابق قیمت بازار خرده‌فروشی بوده و بارهای انعطاف‌پذیر قیمت تعیین شده توسط LSE را می‌پردازند.

ممکن است در زمان‌هایی قیمت برق توسط LSE پایین اعلام می‌شود یک اوج جدید در منحنی مصرف ایجاد گردد. به همین دلیل LSE تلاش می‌کند قیمتی را برای بارهای انعطاف‌پذیر ارائه کند تا علاوه بر افزایش سود خود، ضریب بار شبکه بهبود یابد که این امر بواسطه کاهش انحراف بار شبکه از بار میانگین[۳] (DfM) صورت می‌پذیرد. از آنجایی که LSE یک شرکت خصوصی می‌باشد، اولویت اول آن حداکثرسازی سود خود می‌باشد و بهبود ضریب بار شبکه در اولویت دوم این نهاد قرار می‌گیرد.

شکل ۱ شماتیک طرح ارائه شده را ارائه می‌دهد. مطابق شکل ۱، LSE انرژی را از شبکه اصلی و مالکان سلول‌های خورشیدی در بازار عمده‌فروشی خریداری نموده و با هدف حداکثرسازی سود خود و یکنواخت نمودن منحنی مصرف، یک قیمت زمان حقیقی را برای مصرف‌کنندگانی که در این طرح شرکت کرده‌اند تعیین می‌کند.



شکل (۱): شماتیک طرح ارائه شده

مطابق شکل ۱، فقط بارهای انعطاف‌پذیر مصرف‌کنندگان توسط DRPها جمع‌آوری می‌گردد. و از بارهای غیرقابل انعطاف قیمت بازار خرده‌فروشی دریافت می‌شود.

۳- مدل ریاضی مسأله

همانطور در قسمت قبل اشاره شد، هدف این مقاله طراحی یک قیمت زمان حقیقی می‌باشد که بصورت همزمان سود LSE و مصرف‌کنندگان را حداکثر نموده و از بوجود آمدن اوج بار جلوگیری نماید. در واقع این مسئله از نوع بهینه‌سازی چند هدفه و دو سطحی می‌باشد که LSE به عنوان رهبر و DRP ها به عنوان پیرو می‌باشند.

۳-۱- توابع هدف بهینه‌سازی

در سطح بالای مسئله سود LSE از (۱) بدست می‌آید می‌شود:

$$Profit = Rev - Cost \tag{۱}$$

که *Profit*، *Rev* و *Cost* به ترتیب سود، درآمد فروش و هزینه خرید انرژی برای LSE می‌باشد. درآمد و هزینه خرید انرژی از منابع تولیدی مختلف از (۲) و (۳) بدست می‌آید.

$$Rev = \sum_{t=1}^{NT} \Delta T \left[\pi_t^R \left(D_t - D_t^{LC} \right) + \sum_{DRP=1}^{ND} \pi_t^{DR} P_t^{DRP} \right] \tag{۲}$$

$$Cost = \sum_{t=1}^{NT} \Delta T \left[P_t^{g} \pi_t^{g} + P_t^{solar} \pi_t^{solar} + D_t^{LC} \pi_t^{P} + \sum_{i=1}^{NG} (SU_{i,t} + C_i(P_{i,t})) \right] \quad (۳)$$

که π_t^R قیمت بازار خرده‌فروشی است که بارهای غیرقابل انعطاف می‌پردازند. D_t مقدار بارهای غیرقابل انعطاف الکتریکی در زمان t، D_t^{LC} مقدار بارهای غیرقابل انعطاف الکتریکی تامین نشده، π_t^{DR} هزینه پرداختی مصرف‌کنندگان انعطاف‌پذیر، P_t^{DRP} توان مصرفی بارهای انعطاف‌پذیر، P_t^{g} انرژی خریداری شده از شبکه در قیمت π_t^{g} و P_t^{solar} انرژی خریداری شده از مالکان سلول‌های خورشیدی در قیمت π_t^{solar} می‌باشد. همچنین $SU_{i,t}$ هزینه راه‌اندازی و $C_i(P_{i,t})$ هزینه تولید توان برای دیزل ژنراتور i ام می‌باشد. لازم به ذکر است که یک هزینه سنگین π_t^P در حدود ۳۰ برابر قیمت برق بازار عمده‌فروشی درصورت قطع بارها از طرف بهره‌بردار سیستم به LSE تحمیل گردد. بنابراین هدف اصلی LSE که افزایش سودش می‌باشد از (۴) بدست می‌آید.

$$Max \sum_{t=1}^{24} \Delta T \left[\pi_t^{R} \left(D_t - D_t^{LC} \right) + \sum_{DRP=1}^{ND} \pi_t^{DR} P_t^{DRP} \right] - \sum_{t=1}^{24} \Delta T \left[P_t^{g} \pi_t^{g} + P_t^{solar} \pi_t^{solar} + D_t^{LC} \pi_t^{P} + \sum_{i=1}^{NG} (SU_{i,t} + C_i(P_{i,t})) \right] \quad (۴)$$

از طرفی LSE تلاش می‌کند تا ضریب بار شبکه را بهبود بخشد و از بوجود آمدن بار اوج جلوگیری نماید. این هدف بصورت (۵) مدل شده است.

$$Min \sum_{t=1}^{24} \left| \left(\sum_{DRP=1}^{ND} P_t^{DRP} + D_t - D_t^{LC} \right) - P^{av} \right| \quad (۵)$$

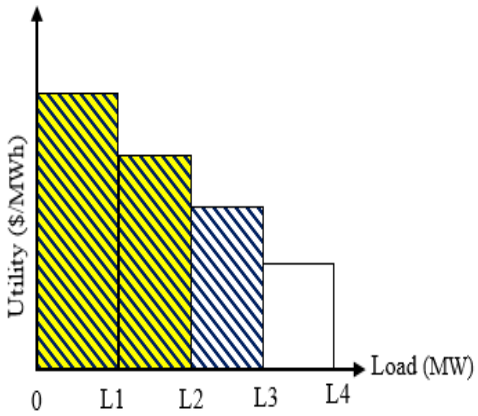
که P^{av} میانگین بار شبکه می‌باشد و از (۶) بدست می‌آید:

$$P^{av} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \left[\sum_{DRP=1}^{ND} P_t^{DRP} + D_t - D_t^{LC} \right] \quad (۶)$$

در سطح پایین مسئله بهینه‌سازی، DRP ها به دنبال حداکثر نمودن سود مصرف‌کنندگان خود هستند. هر چه میزان انرژی مصرفی مصرف‌کنندگان بیشتر باشد، رفاه بدست آمده از مصرف انرژی برای آنها افزایش می‌یابد. اما با افزایش میزان مصرف انرژی الکتریکی، پرداختی مصرف‌کنندگان نیز افزایش می‌یابد. بنابراین تابع هدف مصرف‌کنندگان حداکثرسازی سودشان می‌باشد که بصورت تفاضل رفاه بدست آمده از مصرف انرژی الکتریکی و هزینه پرداختی بابت این میزان مصرف می‌باشد و مطابق (۷) مدل می‌گردد.

$$Max \sum_{t=1}^{24} \left[U_{d,t}\left(P_t^{DRP}\right) - \Delta T\, \pi_t^{DR} P_t^{DRP} \right] \quad (۷)$$

که در آن $U_{d,t}(P_t^{DRP})$، میزان رفاه بدست آمده از مصرف انرژی و $\Delta T\, \pi_t^{DR} P_t^{DRP}$ هزینه مصرف انرژی برای بارهای انعطاف‌پذیر می‌باشد. بدیهی است که هر چه میزان مصرف بالاتر باشد رفاه بدست آمده افزایش می‌یابد. رفاه بدست آمده از مصرف انرژی الکتریکی برای هر مصرف‌کننده متفاوت بوده و به موارد بسیاری همچون تعداد اعضای خانواده و نحوه زندگی مصرف‌کنندگان بستگی دارد. این نکته حائز اهمیت است که تابع رفاه مصرف‌کنندگان برای هر ساعت متفاوت می‌باشد. در این مقاله تابع رفاه مصرف‌کنندگان در هر ساعت بصورت یک تابع بلوکه‌ای چند پله همانند شکل ۲ مدل شده است. مطابق شکل ۲، اگر میزان مصرف L2 باشد، ناحیه زرد رنگ میزان رفاه را برای مصرف L2 نشان می‌دهد. حال اگر میزان مصرف به L3 افزایش یابد، ناحیه هاشور زده شده میزان رفاه را نشان می‌دهد.



شکل (۲): تابع رفاه مصرف‌کنندگان

سایر محدودیت‌های سطح پایین مسئله بهینه‌سازی بصورت زیر می‌باشد:

$$U_{d,t}\left(P_t^{DRP}\right) = \Delta T \sum_{m=1}^{NM_d} u_{d,m,t} P_{d,m,t} \quad (۸)$$

$$P_t^{DRP} = \sum_{m=1}^{NM_d} P_{d,m,t} \quad (۹)$$

$$0 \le P_{d,m,t} \le P_{d,m,t}^{max} \quad (۱۰)$$

$$\Delta T \sum_{t=1}^{NT} P_t^{DRP} \ge E_{DRPs} \quad (۱۱)$$

$$P_t^{DRP} \ge P_{d,t}^{min} \quad (۱۲)$$

که $u_{d,m,t}$ سطح رفاه پله m ام برای فراهم‌کننده پاسخگویی بار d در زمان t، $P_{d,m,t}$ سطح توان هر پله در زمان t، E_{DRPs} حداقل انرژی مصرفی برای DRP ها می‌باشد.

۳-۲- انرژی‌های تجدیدپذیر

در سال‌های اخیر منابع انرژی تجدیدپذیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. انرژی‌هایی همچون خورشید، باد و جزر و مد از این دسته انرژی‌ها محسوب می‌شود. به طور کلی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به دلیل متغیر بودن و امکان خطا در پیش‌بینی توان تولیدی آنها قابلیت اطمینان سیستم را با مشکل مواجه می‌سازند به همین دلیل در نظر

گرفتن عدم قطعیت تولید انرژی این منابع از اهمیت بسیاری برخوردار است.

در این مقاله سلول‌های خورشیدی به همراه عدم قطعیت تولید انرژی این منابع در نظر گرفته شده است. توان خروجی از سلول‌های خورشیدی وابسته به شدت تابش خورشید می‌باشد و تابش خورشید در هر روز و هر ساعت تغییر می‌کند. با در نظرگیری عدم قطعیت شدت تابش خورشید، حداکثر توان قابل خرید از سلول‌های خورشیدی از (۱۳) بدست می‌آید.

$$P_t^{solar\ max} = N_{PV}\eta_{PV}S_{PV}\sum_{s=1}^{Ns}\rho_s I_{t,s}\left(1-0.005\left(T_t^{out}-25\right)\right) \qquad (۱۳)$$

که $P_t^{solar\ max}$ حداکثر توان خروجی از سلول خورشیدی در زمان t، T_t^{out} دمای محیط، $I_{s,t}$ شدت تابش خورشید در زمان t و سناریوی s، S_{PV} مساحت صفحه‌های خورشیدی، N_{PV} تعداد صفحات خورشیدی η_{PV} بازده سلول‌های خورشیدی و ρ_s احتمال وقوع سناریوی s می‌باشد. همچنین مقدار انرژی که LSE قادر به خرید آن می‌باشد از (۱۴) بدست می‌آید.

$$0 \le P_t^{solar} \le P_t^{solar\ max} \qquad (۱۴)$$

۳-۳- ذخیره‌سازهای انرژی

نهاد LSE از باتری‌ها بعنوان ذخیره‌ساز انرژی استفاده می‌کند تا سود خود را حداکثر نماید. برای مدلسازی باتری‌ها داریم:

$$0 \le P_t^{ch} \le b_t^{ch}P^{ch} \qquad (۱۵)$$

$$0 \le P_t^{disch} \le b_t^{disch}P^{disch} \qquad (۱۶)$$

$$SOC^{min} \le SOC_t \le SOC^{max} \qquad (۱۷)$$

$$SOC_{t+1} = SOC_t + \Delta T\left(\frac{\eta^{ch}P_t^{ch}}{Ess} - \frac{P_t^{disch}}{Ess\,\eta^{disch}}\right) \qquad (۱۸)$$

$$SOC_{t24} = SOC_{t1} \qquad (۱۹)$$

$$b_t^{ch} + b_t^{disch} \le 1 \qquad (۲۰)$$

متغیرهای P_t^{ch} و P_t^{disch} توان شارژ و دشارژ باتری در زمان t، P^{ch} و P^{disch} نشان دهنده حداکثر توان شارژ و دشارژ باتری، SOC_t نشانگر حالت شارژ باتری در زمان t، SOC^{min} و SOC^{max} بیانگر حداقل و حداکثر حالت شارژ باتری، η^{ch} و η^{disch} بازده شارژ و دشارژ باتری و Ess ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد. همچنین b_t^{ch} و b_t^{disch} متغیرهای باینری مربوط به شارژ و دشارژ شدن باتری هستند. محدودیت‌های مربوط به حد شارژ و دشارژ در (۱۵) و (۱۶) بیان شده است. محدودیت مربوط به حالت شارژ باتری در (۱۷) و (۱۸) ارائه شده است. همچنین (۱۹) بیان می‌کند که میزان انرژی شارژ و دشارژ باتری باید در طول روز با هم برابر باشد. در نهایت (۲۰)، از شارژ و دشارژ شدن همزمان باتری جلوگیری می‌کند.

۴-۳- دیزل ژنراتورها

LSE مالک چندین دیزل ژنراتور می‌باشد و می‌تواند از آنها بهره‌برداری کند. چون LSE مالک این دیزل ژنراتورها می‌باشد، هزینه بهره‌برداری از این واحدها بر عهده LSE می‌باشد هزینه بهره‌برداری از این واحدها به صورت (۲۱) مدل شده است:

$$C_i(P_{i,t}) = a_i I_{i,t} + \Delta T\sum_{n=1}^{Ni}\lambda_{i,n}P_{i,n,t} \qquad (۲۱)$$

$$0 \le P_{i,n,t} \le P_{i,n} \qquad (۲۲)$$

$$P_{i,t} = P_i^{\min}I_{i,t} + \sum_{n=1}^{Ni}P_{i,n,t} \qquad (۲۳)$$

که $C_i(P_{i,t})$ هزینه تولید توان، N_i نشان‌دهنده تعداد تکه‌های تابع هزینه واحد i ام می‌باشد. پارامتر $\lambda_{i,n}$ نشان دهنده هزینه حدی برای تکه n ام واحد i ام بوده و هزینه راه‌اندازی واحد i ام با a_i نشان داده می‌شود. $P_{i,n}$ حداکثر سطح تولید تکه n ام واحد i ام بوده در حالیکه $P_{i,n,t}$ توان برنامه‌ریزی شده برای تکه n ام واحد i ام در زمان t می‌باشد. رابطه‌های (۲۱) تا (۲۳) هزینه تولید را برای واحد i ام توصیف می‌کند. همچنین محدودیت‌های زیر بر روی بهره‌برداری از دیزل ژنراتورها تحمیل می‌گردد.

$$SU_{i,t} = CU_i y_{i,t} \qquad (۲۴)$$

$$P_i^{\min}I_{i,t} \le P_{i,t} \le P_i^{\max}I_{i,t} \qquad (۲۵)$$

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \le UR_i \qquad (۲۶)$$

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \le DR_i \qquad (۲۷)$$

$$\sum_{h=t}^{t+UT_i-1} I_{i,h} \ge UT_i y_{i,t} \qquad (۲۸)$$

$$\sum_{h=t}^{t+DT_i-1}\left(1-I_{i,h}\right) \ge DT_i z_{i,t} \qquad (۲۹)$$

$$y_{i,t} - z_{i,t} = I_{i,t} - I_{i,t-1} \qquad (۳۰)$$

$$y_{i,t} + z_{i,t} \le 1 \qquad (۳۱)$$

هزینه راه‌اندازی واحدها در (۲۴) ارائه شده است که در آن $SU_{i,t}$ هزینه راه‌اندازی واحد i ام و CU_i هزینه پیشنهادی واحد i ام برای راه-اندازی می‌باشد. رابطه (۲۵) نشان دهنده حد تولید توان برای واحدهای دیزل می‌باشد. همچنین (۲۶) و (۲۷) بیانگر شیب افزایشی و کاهشی تولید توان برای واحد i ام بوده که UR_i و DR_i بترتیب شیب افزایشی و کاهشی تولید توان می‌باشد. سایر روابط بیانگر حدهای حداقل زمان خاموش و روشن شدن و ارتباط متغیرهای باینری می-باشد. که UT_i و DT_i حداقل زمان مورد نیاز برای روشن و خاموش شدن واحدها بوده و $I_{i,t}$، $y_{i,t}$ و $z_{i,t}$ متغیرهای باینری مربوط به خاموش شدن، روشن شدن و در مدار بودن واحدها می‌باشد.

محدودیت خرید انرژی از شبکه در (۳۲) و محدودیت قطع بارهای غیرقابل انعطاف الکتریکی در (۳۳) بیان شده است.

$$-P_t^{g,max} \le P_t^g \le P_t^{g,max} \qquad (۳۲)$$

$$0 \le D_t^{LC} \le D_t \qquad (۳۳)$$

همچنین تعادل توان الکتریکی از (۳۴) و (۳۵) بدست می‌آید.

$$P_t^g + \left(P_t^{disch} - P_t^{ch}\right) + D_t^{LC} + P_t^{solar} + P_{i,t} - D_t + \sum_{d=1}^{Nd} P_t^{DRP} = \sum_{q \in A_p} B_{p,q}\left(\theta_{p,t} - \theta_{q,t}\right) \quad (۳۴)$$

$$-F_{p,q}^{max} \le B_{p,q}\left(\theta_{p,t} - \theta_{q,t}\right) \le F_{p,q}^{max}, \forall t, p \quad (۳۵)$$

در (۳۴) و (۳۵)، p و q نشان‌دهنده شین‌ها، $F_{p,q}^{max}$ حداکثر ظرفیت توان عبوری از خطوط، $B_{p,q}$ سوسپتانس بین دو شین p و q و $\theta_{q,t}$ و $\theta_{p,t}$ زاویه ولتاژ شین‌های p و q در زمان t می‌باشد. همانطور مشخص است است از پخش بار بدون تلفات DC در این مقاله استفاده شده است. مزیت این نوع پخش بار خطی بودن و سادگی می‌باشد و با توجه به اینکه توان راکتیو در این مطالعه در نظر گرفته نشده است، استفاده از این نوع پخش بار دارای دقت قابل قبولی است.

در نهایت قیمت ارائه شده از LSE به مصرف‌کنندگانی که در این طرح شرکت می‌کنند از (۳۶) بدست می‌آید.

$$\pi_t^{DR} \le \pi_t^R \quad (۳۶)$$

بر اساس (۳۶) قیمت تعیین شده توسط LSE در هیچ ساعتی بیش از بازار خرده‌فروشی نخواهد بود.

۴- مدل بهینه‌سازی دو سطحی و چند هدفه

همانطور که در بخش‌های قبل اشاره گردید مدل این مسئله بصورت چندهدفه و دو سطحی می‌باشد. به همین دلیل در این بخش مختصری در مورد بهینه‌سازی دو سطحی و چند هدفه مطالبی ارائه می‌شود.

۴-۱- بهینه‌سازی دو سطحی

مدل برنامه‌ریزی دو سطحی برای انتخاب یک تصمیم شامل دو تصمیم‌گیرنده در یک ساختار سلسله مراتبی ارائه می‌شود. مدل یک برنامه‌ریزی دو سطحی، یک بازی دو نفره (رهبر در سطح بالای مسئله و پیرو در سطح پایین مسئله) می‌باشد که هر بازیگر برای بهینه‌سازی تابع هدف خود با توجه به محدودیت‌های مسئله تلاش می‌کند. متغیرهای تصمیم‌گیری یک برنامه دو سطحی بین بازیگرهای دو سطح تقسیم شده است و هر متغیر هر سطح برروی تابع هدف سطح دیگر تاثیر می‌گذارد. به عبارت دیگر یک مسئله دو سطحی شامل دو مسئله بهینه‌سازی تودرتو می‌باشد.

تصمیم‌گیرنده سطح اول تصمیم خود را بر سطح دوم اعمال کرده، عکس العمل سطح دوم را مشاهده نموده و تلاش می‌کند تا تابع هدف خود را بهینه کند. تصمیم‌گیرنده سطح دوم نیز تصمیم سطح اول را مشاهده کرده و یک تصمیم منطقی را در جهت بهینه نمودن تابع هدفش اتخاذ می‌نماید [۱۶]. روش‌های مختلفی از جمله روش‌های شمارشی، فازی، متناظر کردن سطح دوم و روش‌های فرا ابتکاری برای حل برنامه‌های دو سطحی وجود دارد [۱۹-۱۷].

در این مدل LSE بعنوان رهبر بوده و در سطح بالای مسئله قرار دارد و برای بهینه کردن اهداف خود تلاش می‌کند. همچنین در سطح پایین مسئله DRP ها به عنوان پیرو قرار گرفته‌اند و تصمیم دارند تا سود مصرف‌کنندگان خود را حداکثر سازند. در این مقاله از شرایط بهینگی KKT استفاده شده است و در نتیجه مدل دو سطحی به یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه تک سطحی تبدیل می‌شود.

۴-۲- بهینه‌سازی چند هدفه

بهینه‌سازی چند هدفه مسائلی هستند که دارای بیش از یک تابع هدف هستند که این اهداف معمولا در تضاد با یکدیگر می‌باشند. بر خلاف مسائل بهینه‌سازی تک هدفه که یک جواب بهینه دارند، مسائل چند هدفه دارای یک مجموعه جواب بوده که هیچ یک بر یکدیگر برتری ندارند که به این مجموعه جواب حل‌های بهینه پارتویی گفته می‌شود [۲۰]. در مدل پیشنهاد شده در این مقاله، LSE تلاش می‌کند تا سود خود را حداکثر نماید و از طرفی تمایل دارد تا ضریب بار شبکه را بهبود بخشد. بنابراین سطح بالای مدل ارائه شده از نوع بهینه‌سازی چند هدفه می‌باشد.

روش‌های مختلفی برای حل مسائل چند هدفه وجود دارد که می‌توان به روش‌های ضرایب وزنی [۲۱]، محدودیت اپسیلون [۲۲]، مصالحه [۲۳]، برنامه‌ریزی آرمانی [۲۴]، روش جفرین [۲۵]، روش گام به گام [۲۶]، هدف محدود شده و لکزیکوگرافی [۲۷] اشاره نمود. بعضی از این روش‌ها مجموعه حل‌های بهینه‌های پارتویی را بدست می‌آورد و بعضی دیگر فقط یک جواب را به تصمیم‌گیرنده ارائه می‌دهد. در این مقاله از ادغام دو روش برنامه‌ریزی آرمانی و لکزیکوگرافی استفاده شده است.

در برنامه‌ریزی آرمانی تصمیم‌گیرنده برای هر هدف یک آرمان را تعیین می‌نماید که آرزوی رسیدن به آن را دارد. یک جواب مناسب جوابی خواهد بود که کمترین انحراف را از اهداف فراهم نماید. یک مدل ساده برنامه‌ریزی آرمانی را می‌توان بصورت (۳۷) ارائه نمود:

$$\begin{aligned} &Min \quad \left(\sum_{j=1}^{k}\left(d_j^- + d_j^+\right)^p\right)^{\frac{1}{p}} \\ &s.t: \\ &\quad x \in S \\ &\quad f_j(x) + d_j^- - d_j^+ = b_j \\ &\quad d_j^-, d_j^+ \ge 0 \\ &\quad d_j^- . d_j^+ = 0 \end{aligned} \quad (۳۷)$$

که b_j آرمان، d_j^- مقداری است که از حل ایده آل عبور کرده‌ایم و d_j^+ مقدار باقی مانده تا حل ایده آل برای هدف j ام می‌باشد.

در روش لکزیکوگرافی همانند برنامه‌ریزی آرمانی اهداف توسط تصمیم‌گیرنده به ترتیب ترجیح، اولویت‌بندی می‌شوند. طبیعی است که راضی کننده‌ترین حل در این روش، آن حلی خواهد بود که تابع هدف یا بالاترین اولویت را ارضا می‌کند. فرض کنید که اندیس هر تابع هدف

به عنوان نشانه‌ای از اولویت آن در میان دیگر اهداف باشد. مثلا $f_1(x)$ تابع هدف اولویت اول خواهد بود، $f_2(x)$ هدف اولویت دوم و به همین ترتیب الی $f_k(x)$ که آخرین اولویت را خواهد داشت. در این حالت اولین مدلی که باید حل شود عبارت است از:

$$\begin{aligned} &Max\ f_1(x) \\ &s.t: \\ &\quad x \in S \end{aligned} \qquad (۳۸)$$

فرض کنید که f_1^* حل بهینه (۳۸) باشد، اگر x_1^* که بردار بهینه مدل (۳۸) است یگانه باشد، x_1^* به عنوان بهترین جواب برای کل مدل و مسئله در نظر گرفته خواهد شد. ولی اگر مدل (۳۸) دارای حل یگانه نبوده و بی‌نهایت جواب با هدف f_1^* عاید گردد، به دنبال یافتن حل مدل (۳۹) خواهیم رفت:

$$\begin{aligned} &Max\ f_2(x) \\ &s.t: \\ &\quad f_1(x) = f_1^* \\ &\quad x \in S \end{aligned} \qquad (۳۹)$$

فرض کنید که x_2^* بردار حل بهینه $f_2(x)$ و f_2^* مقدار بهینه نیز باشد. اگر x_2^* یگانه باشد، آن را به عنوان بهترین جواب کل مسئله مد نظر می‌گیریم ولی اگر مدل دارای بی‌نهایت حل باشد، مدل بعدی با هدف اولویت بعدی شکل خواهد گرفت.

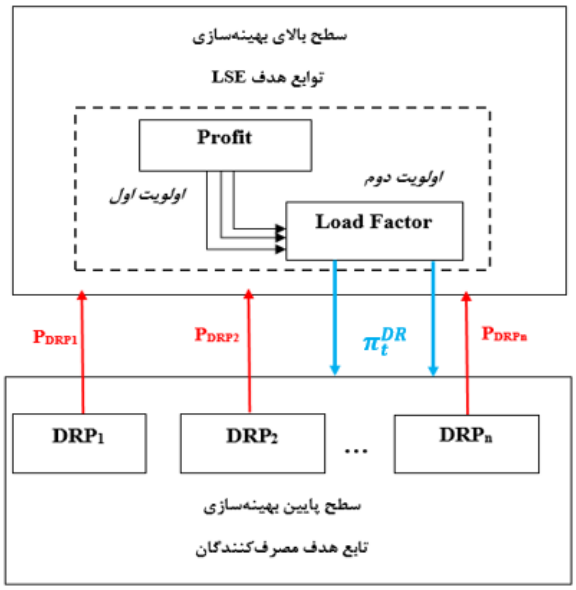
با توجه به اینکه LSE یک شرکت خصوصی می‌باشد که در بازار برق شرکت نموده است، اولویت اول آن حداکثرسازی سود می‌باشد. به همین ترتیب بهبود ضریب بار شبکه در اولویت دوم این شرکت قرار می‌گیرد. این مدل بگونه‌ای طراحی شده است که بهبود ضریب بار شبکه، اثر منفی را در سود LSE نخواهد داشت. بنابراین تابع هدف مدل پیشنهادی بصورت (۴۰) در می‌آید:

$$\begin{aligned} &Min\ \{d_2^+\} \\ &s.t: \\ &\quad x \in S \\ &\quad f_2(x) + d_2^- - d_2^+ = b_2 \\ &\quad f_1(x) + d_1^- - d_1^+ = b_1 \\ &\quad d_1^- = d_1^{-*} \\ &\quad d_j^-, d_j^+ \geq 0 \qquad \forall j \\ &\quad d_j^- . d_j^+ = 0 \qquad \forall j \end{aligned} \qquad (۴۰)$$

که $f_1(x)$ و $f_2(x)$ به ترتیب بیانگر سود LSE و انحراف بار از بار میانگین می‌باشد که در (۴) و (۵) بیان گردید. مجموعه S نیز شامل تمام قیودی می‌باشد که در بخش‌های قبلی ذکر گردید. همچنین d_1^{-*} مقدار بهینه d_1^- می‌باشد که از حل مدل (۴۱) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} &Min\{d_1^-\} \\ &s.t: \\ &\quad x \in S \\ &\quad f_1(x) + d_1^- - d_1^+ = b_1 \\ &\quad d_1^-, d_1^+ \geq 0 \\ &\quad d_1^- . d_1^+ = 0 \end{aligned} \qquad (۴۱)$$

مدل شماتیک این مسئله مطابق شکل ۳ می‌باشد. همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، LSE در سطح بالا و DRP ها در سطح پایین مسئله قرار گرفته‌اند. LSE در سطح بالای بهینه‌سازی به حداکثرسازی سود (معادله ۴) و بهبود ضریب بار شبکه (معادله ۵) می‌پردازد و در سطح پایین بهینه‌سازی، سود مصرف‌کنندگان (معادله ۷) حداکثر می‌گردد. متغیر سطح اول قیمت طراحی شده برای بارهای انعطاف‌پذیر مصرف‌کنندگانی است که در این طرح شرکت نموده‌اند و متغیر سطح پایین، میزان مصرف ساعتی بارهای انعطاف‌پذیر مصرف‌کنندگان می‌باشد.



شکل (۳): مدل بهینه‌سازی دو سطحی چند هدفه

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها ارائه و تحلیل می‌شود. برای این منظور قیمت ارائه شده توسط مالکان سلول‌های خورشیدی برای تمامی ساعات ثابت و ۴۰ دلار بر مگاوات ساعت فرض شده است.

همچنین به منظور جلوگیری از قطع بارها توسط LSE، جریمه تعلق گرفته به LSE برابر با ۱۰۰۰ دلار بر مگاوات ساعت و حداکثر توان قابل خرید از بازار شبکه اصلی ۲۰ مگاوات فرض شده است. اطلاعات مربوط به باتری و سلول‌های خورشیدی در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است. به منظور در نظرگیری عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر از شدت تابش خورشید در ماه ژانویه شهر نیورک آمریکا استفاده شده است [۲۸].

جدول (۱): مشخصات باتری

SOC^{max} (MWh)	SOC^{min} (MWh)	SOC^{min} (MWh)	P^{disch} و P^{ch} (MW)	η^{disch} و η^{ch}	Ess (MWh)
۰/۹	۰/۲	۰/۳	۰/۱	۰/۸	1

جدول (۲): مشخصات سلول‌های خورشیدی

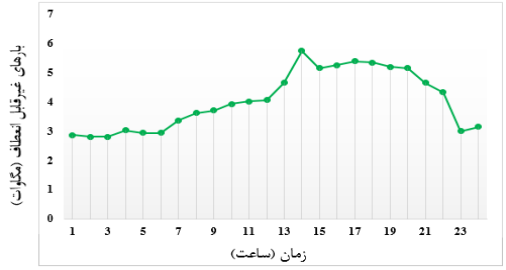
B_{PV}	η^{PV}	S^{PV} (m^2)
۲۰۰۰۰	۰/۳۵	۱/۲ × ۱/۸

مشخصات دیزل ژنراتورهای LSE مطابق جدول ۳ می‌باشد. LSE دارای ۳ دیزل ژنراتور می‌باشد که همانطور که از جدول مشخص است هزینه راه اندازی و تولید توان دیزل ژنراتور اول کمتر از بقیه دیزل‌ها می‌باشد. همچنین به وضوح از جدول ۳ مشخص است که هزینه تولید توان این واحدها از قیمت بازار عمده‌فروشی بیشتر است.

جدول (۳): مشخصات دیزل ژنراتورها

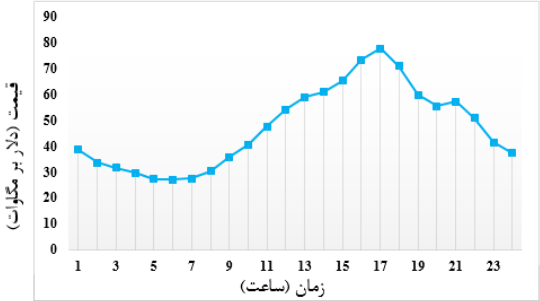
DG3	DG2	DG1	
۱	۱	۲	P^{max}(MW)
۰/۵	۰/۵	۰/۵	P^{min} (MW)
۰/۵	۰/۵	۰/۵	DR,UR(MW)
۸۰	۵۰	۳۰	a ($)
۵۰۰	۳۵۰	۱۳۰	λ ($/MWh)
۳۰	۳۰	۱۵۰	CU($)
۲	۲	۲	DT($)
۲	۲	۲	UT($)

فرض می‌کنیم که LSE میزان بارهای غیرقابل انعطاف هر فراهم‌کننده پاسخگویی بار و قیمت برق بازار عمده فروشی را با دقت بالایی پیش‌بینی نموده است و این مقادیر مطابق شکل‌های ۴ و ۵ می‌باشد [۲۹].



شکل (۴): بارهای غیرقابل انعطاف

سه فراهم‌کننده پاسخگویی بار به نمایندگی از تمامی مصرف‌کنندگان در این طرح شرکت می‌نمایند. رفاه بدست آمده از مصرف انرژی برای هر مصرف‌کننده متفاوت می‌باشد و به پارامترهایی از جمله وضعیت اقتصادی، تعداد اعضای خانواده، سطح فرهنگی و غیره بستگی دارد. با اطلاعاتی که فراهم‌کنندگان پاسخگویی بار از مصرف‌کنندگان خود بدست می‌آورند، یک تابع رفاه برای مجموعه بارهای خود بدست می‌آورند که مقادیر رفاه آن‌ها در حالت پایه در جدول ۴ آورده شده است. همچنین حداقل مصرف انرژی روزانه برای هر فراهم‌کننده ۵۰ درصد حداکثر انرژی مصرفی روزانه در نظر گرفته شده است.



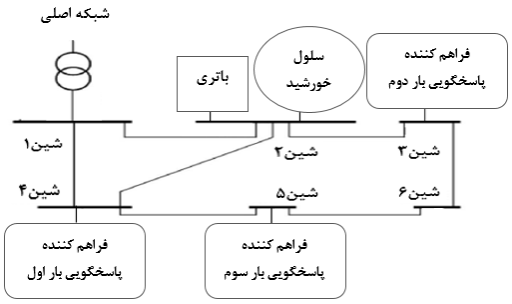
شکل (۵): قیمت برق شبکه

جدول(۴): تابع رفاه مصرف‌کنندگان در حالت پایه

DRP	بلوک‌های تقاضا (MW)	مطلوبیت بلوک‌ها ($/MWh)	E_d (MWh)
۱	۱-۱-۱-۱	۵۶-۵۲-۵۱-۴۶	۴۸
۲	۱-۱-۱-۱	۶۱-۵۶-۵۲-۴۶	۴۸
۳	۱-۱-۲-۲	۵۹-۵۶-۵۲-۴۷	۷۲

میزان رفاه بدست آمده از مصرف انرژی در هر ساعت متفاوت می‌باشد. به همین منظور میزان رفاه بدست آمده در ساعات t_1 تا t_8، t_9 تا t_{17} و t_{18} تا t_{24} به ترتیب ۰/۸، ۱ و ۱/۲ برابر حالت پایه (جدول ۴) در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور سادگی قیمت بازار خرده‌فروشی در تمامی زمان‌ها ثابت فرض شده است.

طرح پیشنهادی بر روی شبکه ۶ شین استاندارد *IEEE* آزمایش شده است [۳۰]. مطابق شکل ۶، دیزل ژنراتور اول در شین شماره ۶ و دیزل ژنراتورهای دوم و سوم در شین ۲ قرار گرفته‌اند. محل قرارگیری فراهم‌کنندگان پاسخگویی بار و باتری‌ها نیزدر شکل به نمایش در آمده است.



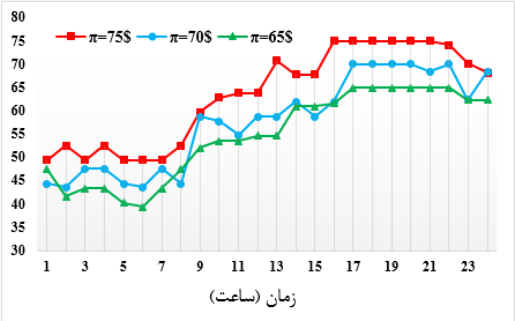
شکل (۶): ساختار شبکه مورد مطالعه

در این مقاله دو سناریوی زیر را با هم مقایسه می‌کنیم:

- **سناریوی اول:** هزینه مصرف انرژی براساس قیمت بازار خرده‌فروشی بوده و تمامی مصرف‌کنندگان اعم از بارهای انعطاف‌پذیر و غیر قابل انعطاف قیمت بازار خرده‌فروشی را به LSE پرداخت می‌نمایند. در واقع مسئله بصورت یک بهینه‌سازی تک هدفه مدل شده است.
- **سناریوی دوم:** در این طرح مصرف‌کنندگان بارهای غیرقابل انعطاف قیمت بازار خرده‌فروشی را می‌پردازند و بارهای انعطاف‌پذیر ملزم به پرداخت هزینه متناسب با قیمت طراحی شده

توسط LSE می‌باشند. در واقع این سناریوی دوم طرح پیشنهادی ما می‌باشد و مدل دو سطحی و چند هدفه حل شده است.

منحنی قیمت روزانه طراحی شده توسط LSE برای بارهای انعطاف‌پذیر به ازای قیمت‌های مختلف بازار خرده‌فروشی در شکل ۷ آورده شده است.



شکل (۷): قیمت تعیین شده توسط LSE برای بارهای انعطاف‌پذیر

همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود، قیمت طراحی شده برای بارهای انعطاف‌پذیر (به ازای قیمت‌های مختلف بازار خرده‌فروشی) کمتر از قیمت بازار خرده‌فروشی می‌باشد. همچنین در زمان‌های t_1 تا t_8 بعلت اینکه رفاه بدست آمده از مصرف انرژی برای مصرف‌کنندگان کمتر از سایر زمان‌ها می‌باشد، LSE قیمت برق را پایین اعلام می‌کند تا مصرف‌کنندگان به انتقال بخشی از بارهای انعطاف‌پذیر خود به این زمان‌ها تشویق شوند. از طرفی در زمان‌های t_{18} تا t_{24} که مصرف انرژی بیش از سایر اوقات می‌باشد، قیمت برق درحداکثر مقدار خود تعیین می‌شود تا مصرف‌کنندگان انرژی کمتری را در این زمان‌ها مصرف نمایند. جدول ۵ مقایسه دو طرح را نشان می‌دهد.

جدول (۵): سود LSE، مصرف‌کنندگان و ضریب بار شبکه

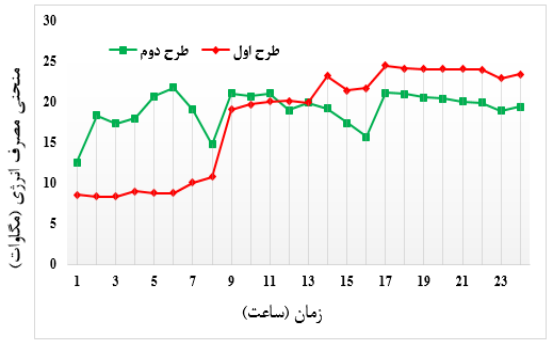
طرح	قیمت بازار خرده‌فروشی (دلار)	سود LSE (دلار)	سود مصرف-کنندگان (دلار)	ضریب بار (درصد)
اول	۶۵	-۳۰۱۷۱/۴۸	-۷۴۷/۲	۷۳
دوم	۶۵	۷۰۲۲/۰۱	۳۴۸	۸۸
اول	۷۰	-۲۸۰۵۵/۳۵	-۱۵۸۷/۲	۷۳
دوم	۷۰	۹۱۸۲/۷۲	-۱۸۷/۸	۸۷

مطابق جدول ۵ به ازای قیمت‌های بازار خرده‌فروشی ۶۵ و ۷۰ دلار بر مگاوات ساعت، طرح دوم سود بیشتری را عاید مصرف‌کنندگان و LSE کرده است. اگر چه قیمت فروش انرژی در ساعات اولیه روز در طرح دوم کمتر از طرح اول است ولی LSE با پایین اعلام کردن قیمت برق برای مصرف‌کنندگان انعطاف‌پذیر سبب شده است تا مصرف‌کنندگان انرژی بیشتری را در این ساعات مصرف کنند.

از طرفی LSE عمده توان خود را از شبکه تامین می‌نماید و قیمت خرید انرژی از شبکه در ساعات اولیه روز پایین می‌باشد. به همین علت LSE انرژی را ارزان قیمت خریداری نموده و با کمی افزایش آن را به مصرف‌کنندگان می‌فروشد و از این طریق سود می‌کند. همچنین رفاه مصرف‌کنندگان در طرح دوم افزایش یافته زیرا که قیمت کمتری برای مصرف انرژی پرداخت می‌کنند.

همانطور که جدول ۵ نشان می‌دهد هنگامی که قیمت بازار خرده‌فروشی از ۶۵ به ۷۰ دلار افزایش یابد سود LSE افزایش یافته است ولی رفاه مصرف‌کنندگان کمتر شده است. با افزایش قیمت برق، مصرف‌کنندگان هزینه بیشتری را پرداخت می‌کنند در حالیکه رفاه آن‌ها از مصرف انرژی ثابت است به همین علت میزان سود آنها کاهش می‌یابد. بعلت اینکه با افزایش قیمت بازار خرده‌فروشی LSE هزینه بیشتری را دریافت می‌کند، سود آن نیز افزایش می‌یابد. همچنین طرح دوم ضریب بار شبکه را بهبود بخشیده است و مقدار ضریب بار را از ۷۳ درصد به ۸۷ درصد رسانده است.

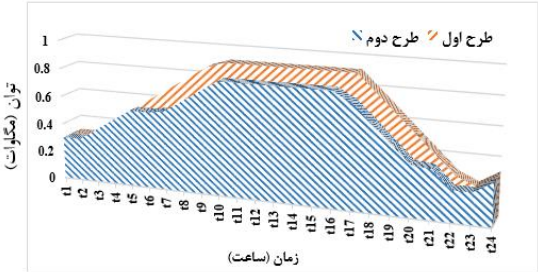
منحنی مصرف انرژی طرح اول و دوم در شکل ۸ نشان داده شده است. بعلت اینکه سطح رفاه بدست آمده از مصرف انرژی برای مصرف-کنندگان در t_{18} تا t_{24} بیشتر از سایر زمان‌هاست و قیمت بازار خرده-فروشی ثابت فرض شده است، میزان مصرف انرژی در t_{18} تا t_{24} بسیار زیاد می‌باشد. ولی در طرح دوم با تعیین قیمت زمان حقیقی برای بارهای انعطاف‌پذیر و اینکه قیمت در بعضی از زمان‌ها پایین اعلام شده است مصرف‌کنندگان برای افزایش سود خودشان بخشی از بارهایشان را به دوره‌های کم باری منتقل نموده‌اند.



شکل (۸): منحنی مصرف انرژی با π^R =65 $/MWh

همانطور که از شکل ۸ مشخص است، این انتقال مصرف به گونه-ای انجام شده است تا اوج بار جدیدی در شبکه بوجود نیاید. که این امر با قیمت طراحی شده توسط LSE محقق شده است. همانطور که اشاره شد بعلت آنکه LSE یک شرکت خصوصی می‌باشد، اولویت اول آن حداکثرسازی سود می‌باشد و یکنواخت نمودن منحنی مصرف اولویت دوم این شرکت می‌باشد بگونه‌ای که در سود آن تغییری بوجود نیاورد.

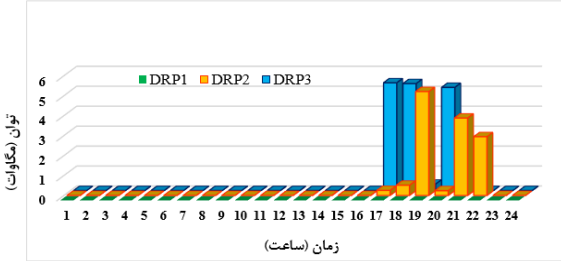
یکی دیگر از راه‌های افزایش سود LSE استفاده از باتری‌ها می-باشند. شکل ۹ منحنی حالت شارژ باتری‌ها را در هر دو طرح نشان می‌دهد. در زمان‌هایی که قیمت انرژی الکتریکی در بازار عمده‌فروشی پایین می‌باشد، LSE انرژی را خریداری نموده و درباتری‌ها ذخیره می‌نماید و در زمان‌هایی که قیمت بازار بالا می‌باشد این انرژی را استفاده کرده و به قیمت بالاتری به مصرف‌کنندگان عرضه می‌نماید.



شکل (۹): منحنی حالت شارژ باتری‌ها با π^R =65 $/MWh

در صورتی‌که LSE از باتری‌ها استفاده نکند، میزان سود بدست آمده (در صورتی که قیمت بازار در ۶۵ دلار بر مگاوات ساعت باشد) برای LSE در طرح دوم برابر با ۶۵۸۶/۷۷ دلار می‌گردد. که با توجه جدول ۵ میزان سود بدست آمده از آربیتراژ انرژی بوسیله باتری‌ها ۴۳۵/۳۳ دلار می‌باشد.

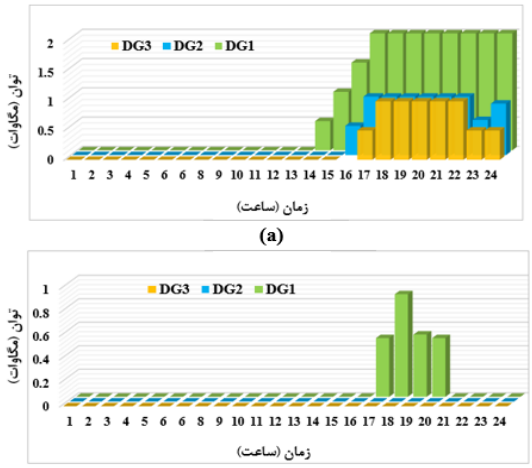
میزان انرژی تامین نشده برای DRP ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل (۱۰): انرژی تامین نشده مصرف‌کنندگان در طرح اول

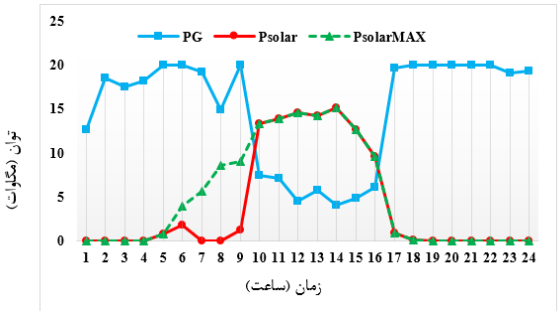
در واقع شکل ۱۰ میزان انرژی تامین نشده DRP ها را برای طرح اول را نشان می‌دهد. همانطور مشخص است مقدار زیادی از انرژی مصرف‌کنندگان فراهم‌کنندگان دوم و سوم تامین نشده است. در حالی که درصورت اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار و ارائه قیمت توسط LSE هیچ باری قطع نمی‌شود. علت آن این است که مصرف‌کنندگان بخشی از میزان مصرف خود از دوره‌های اوج به دوره‌های کم باری منتقل کرده‌اند.

توان تولیدی دیزل ژنراتورها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در طرح اول بعلت اینکه میزان مصرف انرژی بیشتر از توان قابل خرید از شبکه و سلول‌های خورشیدی می‌باشد، هر سه واحد دیزل ژنراتور توسط LSE مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. ولی در طرح دوم فقط واحد اول مورد بهره‌برداری قرار گرفته است که دارای هزینه راه‌اندازی و بهره‌برداری کمتری نسبت دو واحد دیگر می‌باشد. در طرح دوم نیاز به بهره‌برداری از واحدهای دوم و سوم نمی‌باشد زیرا که بار اوج کاهش یافته است. ضمن آنکه واحد اول نیز هنوز ظرفیت تولید توان را دارد و به حداکثر تولید خود نرسیده است.



شکل (۱۱): خروجی دیزل ژنراتورها: (a) طرح اول- (b) طرح دوم

شکل ۱۲ میزان حداکثر توان تولیدی توسط سلول‌های خورشیدی، توان خریداری شده از مالکان سلول‌های خورشیدی و توان خریداری شده از شبکه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): توان خریداری شده از شبکه و سلول‌های خورشیدی

مطابق شکل ۱۲، LSE ابتدا قیمت‌های ارائه شده توسط منابع تولید انرژی را با هم مقایسه می‌کند و ابتدا انرژی را از تولید کننده‌ای که قیمت کمتری ارائه داده است خریداری می‌کند و سپس به سراغ دیگر منابع می‌رود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک طرح قیمت‌گذاری زمان حقیقی ارائه گردید که یک بازی برد-برد را برای LSE و مصرف‌کنندگان بوجود آورده است و هر دو طرف از این طرح سود می‌برند. این طرح به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه و دو سطحی مدل گردید. طرح پیشنهاد شده در این مقاله علاوه بر اینکه باعث افزایش سود LSE و مصرف‌کنندگان می‌شود، ضریب بار شبکه را افزایش و انرژی تامین نشده مصرف‌کننده را کاهش داده است. همچنین واحدهای دیزل ژنراتور ساعات کمتری وارد مدار شده و میزان آلودگی هوا نیز کاهش می‌یابد. در این مقاله تنها یک LSE وجود دارد برای کسب سود در بازار مشارکت می‌کند. در نظرگیری چندین LSE و ایجاد رقابت بین آنها و همچنین در نظرگیری عدم قطعیت‌های موجود در بازارهای عمده و خرده‌فروشی در کارهای بعدی در نظر گرفته خواهد شد.

منابع

[۱] سعید سلمانی، شهرام جدید، "بهره برداری بهینه شبکه توزیع هوشمند در حضور منابع انرژی پراکنده"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۳، شماره ۳، ۱۳۹۵.

[2] Hossain, M. S., et al. "Role of smart grid in renewable energy: An overview." Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 60, pp. 1168-1184, 2016.

[3] 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.

[4] 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.

[5] Q. Yang and X. Fang, "Demand response under real-time pricing for domestic households with renewable DGs and storage," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, pp. 1910-1918, 2017.

[۶] میثم خجسته، شهرام جدید، " مدل پاسخ بار الکتریکی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۲، شماره ۱، ۱۳۹۴.

[7] N .A. Amleh and A. T. Al Awami, "Optimal demand response bidding and pricing mechanism with fuzzy optimization: Application for a virtual power plant," in Power Systems Conference (PSC), 2016 Clemson University, pp. 1-6, 2016.

[8] M. Asensio, G. Muñoz-Delgado, and J. Contreras, "Bi-Level Approach to Distribution Network and Renewable Energy Expansion Planning Considering Demand Response," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, pp. 4298-4309, 2017.

[9] C. Vivekananthan, Y. Mishra, G. Ledwich, and F. Li , "Demand response for residential appliances via customer reward scheme," IEEE transactions on smart grid, vol. 5, pp. 809-820, 2014.

[10] W. Wei, F. Liu, and S. Mei, "Energy pricing and dispatch for smart grid retailers under demand response and market price uncertainty," IEEE transactions on smart grid, vol. 6, pp. 1364-1374, 2015.

[11] Zhang, Dong, et al. "An optimal and learning-based demand response and home energy management system." IEEE Transactions on Smart Grid, vol. pp. 1790-1801, 2016.

[12] G. Gutiérrez-Alcaraz, J. Tovar-Hernández, and C.-N. Lu, "Effects of demand response programs on distribution system operation," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 74, pp. 230-237, 2016.

[13] G. Derakhshan ,H. A. Shayanfar, and A. Kazemi, "The optimization of demand response programs in smart grids," Energy Policy, vol. 94, pp. 295-306, 2016.

[14] 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.

[15] E. Shirazi, A. Zakariazadeh, and S. Jadid, "Optimal joint scheduling of electrical and thermal appliances in a smart home environment," Energy Conversion and Management, vol. 106, pp. 181-193, 2015.

[16] Nehi, H. Mishmast, and F. Hamidi. "Upper and lower bounds for the optimal values of the interval bilevel linear programming problem." Applied Mathematical Modelling, vol. 39, no. 5-6 pp. 1650-1664, 2015.

[17] Zhongping, Wan, Wang Guangmin, and Lv Yibing. "A dual-relax penalty function approach for solving nonlinear bilevel programming with linear lower level problem." Acta Mathematica Scientia, vol. 31, no. 2, pp. 652-660, 2011.

[18] Sakawa, Masatoshi, and Takeshi Matsui. "Stackelberg solutions for random fuzzy two-level linear programming through possibility-based probability model." Expert Systems with Applications, vol. 39, no. 12, pp. 10898-10903, 2012.

[19] Jiang, Yan, et al. "Application of particle swarm optimization based on CHKS smoothing function for solving nonlinear bilevel programming problem." Applied Mathematics and Computation, vol. 219, no. 9, pp. 4332-4339, 2013.

[20] Branke, Jürgen, Kalyanmoy Deb, and Kaisa Miettinen, eds. Multiobjective optimization: Interactive and evolutionary approaches. Vol. 5252. Springer Science & Business Media, 2008.

[21] Majidi, Majid, et al. "A multi-objective model for optimal operation of a battery/PV/fuel cell/grid hybrid energy system using weighted sum technique and fuzzy satisfying approach considering responsible load management." Solar Energy, vol. 144, pp. 79-89, 2017.

[22] Ahmadi, Abdollah, et al. "Reliability-based model for generation and transmission expansion planning." IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 2, pp. 504-511, 2017.

[23] J. Branke, K. Deb, and K. Miettinen, Multiobjective optimization: Interactive and evolutionary approaches vol. 5252: Springer Science & Business Media, 2008.

[24] D. Jones and M. Tamiz, "A review of goal programming," in Multiple Criteria Decision Analysis, Springer, pp. 903-92, 2016.

[25] M. S. Bazaraa, H. D. Sherali, and C. M. Shetty, Nonlinear programming: theory and algorithms: John Wiley & Sons, 2013.

[26] C.-L. Hwang and A. S. M. Masud, Multiple objective decision making—methods and applications: a state-of-the-art survey vol. 164: Springer Science & Business Media, 2012.

[27] Cococcioni, Marco, Massimo Pappalardo, and Yaroslav D. Sergeyev. "Lexicographic multi-objective linear programming using grossone methodology: Theory and algorithm." Applied Mathematics and Computation, vol. 318, pp. 298-311, 2018.

[28] Http://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php.

[29] D. T. Nguyen and L. B. Le, "Risk-constrained profit maximization for microgrid aggregators with demand response," IEEE Transactions on smart grid, vol. 6, pp. 135-146, 2015.

[30] motor.ece.iit.edu/data/6bus_Data_DR.pdf.

[1] Load Serving Enity

[2] Demand Response Providers

[3] Deviation from Mean