# ارائه مدلی جدید برای قیمت‌دهی مصرف‌کننده با در نظر گرفتن نقش آن در مدیریت بار و تاثیر آن بر بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها

محمد خلیلی[۱]،کارشناسی ارشد، مجتبی خدرزاده[۲]،دانشیار، محمد مرادی دالوند[۳]، کارشناسی ارشد

[۱]دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور
khm1366@gmail.com
[۲]دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور
khederzadeh@yahoo.com
[۳] دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور
moradi.dalvand@gmail.com

**چکیده:** با تغییر دیدگاه بهره‌برداری سیستم قدرت از کنترل متمرکز به نامتمرکز در بستر شبکه‌های هوشمند و ریزشبکه‌ها، استفاده از ظرفیت‌های مصرف‌کنندگان در مدیریت بار توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. با توجه به وجود بارهای مختلف از نظر اولویت تغذیه، مصرف‌کنندگان می‌توانند با ارائه میزان بار قابل قطع یا جابجایی خود در قیمت‌های مختلف، به مرکز کنترل ریزشبکه در بهینه‌سازی بهره‌برداری از ریزشبکه و تامین انرژی بارهای بحرانی کمک کنند. قیمت‌دهی مصرف‌کننده می‌تواند در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، مخصوصا زمانی که قیمت‌های بازار بالاست، بسیار مفید باشد. در ضمن با این روش مصرف‌کنندگان می‌توانند از پرداخت هزینه‌های زیاد برای بارهای کم اهمیت خود جلوگیری کنند. در این مقاله مدلی جهت بررسی تاثیر قیمت‌دهی مشترکان بر بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن انواع مصرف‌کننده و اولویت‌های مختلف بار ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده صلاحیت این مدل برای شبیه‌سازی قیمت‌دهی مصرف‌کنندگان می‌باشد.

**واژه های کلیدی:** پاسخ تقاضا، قیمت‌دهی مصرف‌کننده، اولویت بار، ریزشبکه.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۲/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۱۳۹۱/۱۱/۱۷
نام نویسنده‌ی مسئول : محمد خلیلی
نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور

Archive of SID

## ۱- مقدمه

با روند تجدید ساختار در سیستم قدرت و رقابتی شدن بازار و سرمایه-گذاری‌ها برای گسترش شبکه‌های هوشمند، برنامه‌های پاسخ تقاضا[1] اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. این برنامه‌ها در سیستم‌های تجدیدساختار یافته یکی از مهمترین روش‌ها برای بیشینه کردن سود شرکت‌کنندگان در بازار برق و در شبکه‌های هوشمند، یکی از کارآمدترین روش‌ها برای تغییر الگوی مصرف مشترکین می‌باشد.

پاسخ تقاضا را می‌توان ایجاد تغییر در مصرف برق توسط مشترکین از حالت طبیعی مصرف آنها در پاسخ به تغییرات قیمت برق در طول زمان دانست. دپارتمان انرژی آمریکا، پاسخ تقاضا را بدین صورت تعریف کرده است: « تغییر در الگوی مصرف انرژی توسط مصرف‌کنندگان، در پاسخ به تغییر قیمت برق در طول زمان؛ یا برنامه‌های اقتصادی طراحی شده برای تشویق به استفاده نکردن برق در زمانی که قیمت بازار بالاست یا زمانی که قابلیت اطمینان شبکه به خطر افتاده است ».[۱]

امروزه برنامه‌های پاسخ تقاضا به یکی از موثرترین روش‌ها برای بهبود پروفیل بار و کاهش هزینه‌ها تبدیل شده است. گسترش شبکه-های هوشمند و لزوم استفاده از نقش مصرف‌کننده در مدیریت بار، موجب گسترش فناوری‌های مورد نیاز برای ایجاد ارتباط بین مصرف-کننده و شرکت‌های توزیع می‌شود. امروزه کنتورهای هوشمند با ایجاد ارتباط دوطرفه موجب آگاهی مصرف‌کنندگان از قیمت‌ها، جریمه‌ها و مشوق‌های شرکت‌های برق جهت انتخاب بهترین زمان مصرف انرژی الکتریکی شده است. در کشور ما با توجه به ایجاد تغییرات گسترده در زمینه هدفمندسازی یارانه‌ها و لزوم بازنگری در الگوی مصرف، مطالعه برنامه‌های پاسخ تقاضا و نقش مصرف‌کننده در کاهش هزینه‌ها و افزایش سود بازیگران بازار بسیار ضروری است.

در بیشتر بازارهای برق، مصرف‌کنندگان نقش محدودتری نسبت به تولیدکنندگان ایفا می‌کنند. مشارکت فعال مصرف‌کنندگان در بازار برق می‌تواند مزایای بسیاری را به همراه داشته باشد که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد[۲-۷] :

- مصرف‌کنندگانی که بتوانند بار خود را از ساعات گران قیمت به ساعات ارزان منتقل کنند، هزینه انرژی مصرفی خود را کاهش خواهند داد.
- جابجایی بار موجب مسطح شدن منحنی بار روزانه شده و کاهش هزینه کل تولید انرژی را به همراه خواهد داشت.
- مصرف‌کنندگانی هم که سطح بار مصرفی خود را در پاسخ به قیمت برق تنظیم نمی کنند، سود می‌کنند؛ چرا که کاهش هزینه کل تولید انرژی به کاهش قیمت برق می‌انجامد.
- توانایی تولیدکنندگان برای اعمال قدرت بازار کاهش می-یابد.

یکی دیگر از مزایای برنامه‌های پاسخ تقاضا، کمک به اقناع محدودیت‌های کفایت تولید، یعنی برآوردن بخش ویژه‌ای از بار توسط تولیدات محلی و یا کاهش بار به وسیله مشارکت مصرف‌کننده در صورت جزیره‌ای شدن ریزشبکه است. با توجه به رفتار مصرف‌کنندگان، مدلسازی نحوه پاسخ مصرف‌کنندگان به قیمت‌های ساعتی انرژی الکتریکی ضروری است. مصرف‌کنندگان هنگام مواجهه با افزایش قیمت‌های ناگهانی برق، مصرف خود را به صورت موقتی کاهش می‌دهند؛ اما در بلند مدت هنگامی که با نوسانات متناوب قیمت برق روبرو می‌شوند، مایلند که مصرف خود را طوری که موجب کاهش هزینه آنها شود، جابجا کنند. اگر مصرف‌کنندگان بخواهند نقش فعال و موثری را در بازار انرژی الکتریکی ایفا کنند، مکانیزم تسویه بازار باید به گونه‌ای باشد که پیشنهادات حساس به قیمت سمت مصرف و جابجایی بار مصرف‌کنندگان را در نظر بگیرد. این پیشنهادات فرصت اعمال قیود بر مصرف انرژی ساعتی و روزانه خود را به مصرف‌کنندگان می‌دهد؛ همچنان که تولیدکنندگان می‌توانند برای بهره‌برداری واحدهای خود در هر ساعت و روز قیودی را اعمال کنند. نحوه برخورد مصرف-کنندگان با سیگنال‌های قیمتی ممکن است متفاوت باشد و در هر روش به نتایج متفاوتی بیانجامد. در [۸] از روش قیمت‌دهی مصرف-کننده جهت مشارکت در پاسخ تقاضا استفاده شده است. بدین صورت که هر مصرف‌کننده قیمت و توان مورد نظر خود را برای مشارکت در مدیریت سمت مصرف پیشنهاد می‌دهد و در بازار انرژی روز بعد، برنامه‌ریزی زمان‌بندی مصرف هر یک از آنها و میزان جابجایی بار مشخص می‌شود. در این حالت اگر مصرف‌کننده به تعهدات خود در قبال پاسخ تقاضا عمل نکند، با جریمه‌هایی روبرو می‌شود. در [۹] مدلی ارائه شده که طبق آن نوسانات قیمت از یک مقدار معین موجب واکنش مصرف‌کننده به شرایط شده و مصرف‌کننده برای کاهش هزینه‌های تامین انرژی خود، اقدام به جابجایی بار می‌کند؛ یعنی بهره-بردار هیچ تعهدی از مصرف‌کننده برای مشارکت در پاسخ تقاضا نمی-گیرد و مصرف‌کننده نیز به خاطر مشارکت در پاسخ تقاضا از هیچ مشوق پولی برخوردار نمی‌شود. در [۱۰] از توابع قیمتی برای مواجهه با نوسانات قیمت استفاده شده است؛ به طوری که اگر قیمت بازار از میزان مطلوبیت مصرف‌کننده برای استفاده از آن واحد توان بالاتر باشد، ممکن است کاهش بار یا جابجایی اتفاق بیافتد. همچنین در حالاتی که قیمت بازار از مطلوبیت مصرف‌کننده پایین‌تر باشد، علاقه مصرف‌کننده برای مصرف بیشتر، بالاتر می‌رود. در این روش میزان افزایش یا کاهش توان مصرفی طبق یک تابع خطی از قیمت مدل شده است و در نتیجه مقدار آن با محدودیت حاصل از این تابع مواجه است. در تمامی روش‌های بالا، مصرف‌کننده هیچ اختیاری در مورد جداسازی بارهای مختلف خود از لحاظ نوع مصرف ندارد. به بیان دیگر، در این مدل‌ها مصرف‌کننده صرفا یک قیمت را برای تمامی انواع بارهای خود ارائه می‌کند و نمی‌تواند برای انواع بار خود، طبق قیمت‌های مختلف که

Archive of SID

در حقیقت نشان‌دهنده مطلوبیت هر یک از بارها می‌باشد، تصمیم-گیری نماید.

در این مقاله مدلی ارائه شده که بر اساس آن مصرف‌کننده جهت تصمیم‌گیری در مورد اولویت‌دهی به انواع بار خود از لحاظ مطلوبیت مصرف، از آزادی عمل بیشتری برخوردار باشد.

بدین ترتیب مقاله به صورت زیر پی گرفته می‌شود: در قسمت ۲ به مدلسازی اولویت‌های بار مصرف‌کننده و نحوه تسویه بازار در حضور پاسخ تقاضا پرداخته می‌شود. در بخش ۳ شبکه مورد استفاده و سناریوهای مطالعه شده معرفی می‌شوند. در بخش ۴ به ارائه نتایج شبیه‌سازی پرداخته شده و نهایتا در بخش ۵ نتیجه‌گیری از مقاله انجام خواهد شد.

## ۲- مدل‌سازی

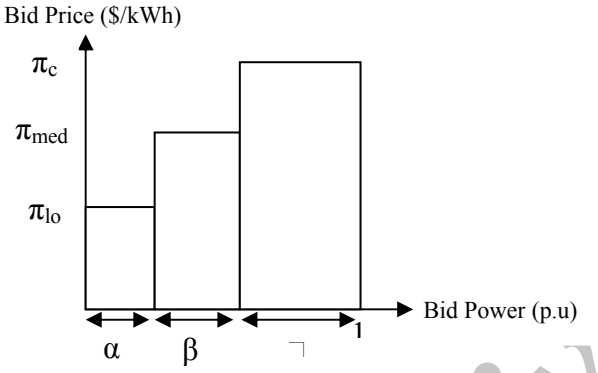
یکی از روش‌های مدیریت بار توسط مصرف‌کننده، قیمت‌دهی مصرف‌کننده می‌باشد. در روش معمول قیمت‌دهی مصرف‌کننده، مصرف‌کنندگان میزان بار مصرفی خود و قیمت مطلوب برای آن مقدار از مصرف را در بلوک‌های جداگانه و به صورت نزولی به بهره‌بردار مستقل سیستم ارائه می‌کنند. در این روش بهره‌بردار مستقل سیستم با توجه به قیمت پیشنهادی مصرف‌کننده و هزینه تولید و همچنین با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه، بخشی از بار مصرف‌کننده را که قیمت پیشنهادی آن بالاتر از حداکثر قیمت پذیرفته شده تولیدکننده باشد، تامین می‌کند. طبیعتا در این حالت چنانچه تولیدکننده‌ای حاضر نباشد که با قیمت پیشنهادی مصرف‌کننده تولید کند، بار مصرف‌کننده تامین نخواهد شد.

در روش ارائه شده برای قیمت‌دهی مصرف‌کننده در این مقاله، فرض شده است که مصرف‌کننده به جای پیشنهاد بلوک‌های توان-قیمت، بلوک‌های توان-اولویت مصرف-قیمت را به بهره‌بردار سیستم ارائه دهد. هر مصرف‌کننده می‌تواند برای بار خود در ساعات مختلف، اولویت مصرف تخصیص دهد. به عنوان مثال می‌تواند مشخص کند که چه میزان از بار خود در هر ساعت دارای چه اولویتی از نظر تامین بار هستند. وجه تمایز اولویت‌های مختلف بار از نظر نحوه تامین آنهاست. به طور کلی اولویت‌های مصرفی می‌توانند با توجه به نوع تعریف برای هر اولویت، بی‌شمار باشند. در این مقاله اولویت‌های مصرف به صورت اولویت کم، متوسط و بحرانی تعریف شده است. فرض شده است که بار با اولویت کم قابل قطع، کاهش یا جابجایی باشد. بار با اولویت متوسط تنها قابل جابجایی باشد و بار با اولویت بحرانی غیر قابل تغییر باشد. اولویت‌های تعریف شده به گونه ای است که کل گستره انواع بار از دیدگاه مصرف‌کننده اعم از خانگی، صنعتی و تجاری را شامل می‌شود.

پارامتر دیگری که در این مدل هر مصرف‌کننده بایستی همراه با پیشنهادهای خود به بهره‌بردار اعلام کند، حداکثر توان قابل مصرف خود در هر ساعت است. با استفاده از این پارامتر مشخص می‌شود که هر مصرف‌کننده تا چه حد می‌تواند بار مصرفی خود را به ساعات دیگر منتقل کند. به بیان دیگر این مقدار محدود کننده حداکثر میزان جابجایی بار از ساعات مختلف به یک ساعت است.

### ۲-۱- مدل‌سازی اولویت‌های بار مصرف‌کننده

در این قسمت به مدلسازی انواع اولویت بار و نحوه پیشنهاددهی مصرف‌کننده برای هر یک از اولویت‌ها پرداخته می‌شود. هر مصرف-کننده میزان بار خود در هر یک از اولویتها را با پیشنهاد سه پارامتر به بهره بردار مستقل سیستم اعلام می‌نماید. $\alpha$ نسبت بار در اولویت کم، $\beta$ نسبت بار در اولویت متوسط و $\gamma$ نسبت بار در اولویت بحرانی می‌باشد (شکل ۱). در واقع این ضرایب[۲] نشان‌دهنده میزان مشارکت مصرف‌کننده در مدیریت بار است. همچنین هر مصرف‌کننده قیمت-های مطلوب هر یک از اولویت‌ها را جهت مصرف بار در آن اولویت اعلام می‌کند. $\pi_{low}$ ، $\pi_{med}$ و $\pi_{crt}$ به ترتیب پیشنهاد قیمت مصرف-کننده برای بارهای با اولویت کم، متوسط و بحرانی می‌باشد.




**شکل ۱: نحوه پیشنهاددهی مصرف‌کننده برای اولویت‌های مختلف مصرف**

بدین ترتیب انواع اولویت‌های مصرفی به صورت زیر مدلسازی می‌شوند:

$$\sum_{t=1}^{T} D_{,low}^{c,t} \le \sum_{t=1}^{T} \alpha^{c} \cdot P_{L}^{c,t} \qquad (۱)$$

$$\sum_{t=1}^{T} D_{,med}^{c,t} = \sum_{t=1}^{T} \beta^{c} \cdot P_{L}^{c,t} \qquad (۲)$$

$$D_{,crt}^{c,t} = \gamma^{c} \cdot P_{L}^{c,t} \qquad (۳)$$

که در آن $D_{,low}^{c,t}$ ، $D_{,med}^{c,t}$ و $D_{,crt}^{c,t}$ به ترتیب میزان بار مصرفی در اولویت‌های کم، متوسط و بحرانی مصرف‌کننده cام در ساعت t و $P_{L}^{c,t}$ میزان بار درخواستی مصرف‌کننده cام در ساعت t می‌باشد. رابطه (۱) نشان دهنده میزان مصرف بار در اولویت کم است که می‌تواند برابر یا کمتر از کل بار درخواستی با اولویت کم باشد. رابطه (۲) میزان بار مصرفی در اولویت متوسط را نشان می‌دهد که بایستی مقدار کل آن در طول دوره برابر با میزان کل بار با اولویت متوسط باشد. رابطه (۳) نیز میزان بار مصرفی با اولویت بحرانی را نشان می‌دهد که در هر ساعت بایستی دقیقا برابر با میزان بار درخواستی در اولویت بحرانی باشد.

Archive of SID

با جمع بار مصرفی هر مصرف‌کننده در هر ساعت و در هر اولویت بار، میزان بار مصرفی کل آن مصرف‌کننده در زمان مربوطه $D^{c,t}$ بدست می‌آید که باید از یک مقدار حداکثر $D^{c,t}_{\max}$ کمتر باشد. این میزان برابر با یک چهارم کل انرژی روزانه درخواستی در نظر گرفته شده است. به بیان دیگر، هر مصرف‌کننده می‌تواند کل بار روزانه خود در اولویت‌های کم و متوسط را در چهار ساعت مصرف کند. این موضوع در روابط (۴) و (۵) نشان داده شده است. بدین ترتیب می‌توان مازاد ناخالص مصرف‌کننده را به صورت رابطه (۶) نشان داد.

$$\sum_{LP\in\{low,med,crt\}} D^{c,t}_{LP} = D^{c,t} \quad (۴)$$

$$D^{c,t} \le D^{c,t}_{\max} \quad (۵)$$

$$GS^t = \sum_{c=1}^{C} \sum_{LP\in\{low,med,crt\}} \pi^{c}_{LP} \cdot D^{c,t}_{LP} \quad (۶)$$

## ۲-۲- مدل بازار

در این قسمت به بررسی مکانیسم بسته شدن بازار در حضور قیمت‌دهی مصرف‌کننده و تولیدکننده به صورت همزمان با در نظر گرفتن قیود مربوط به هر دو طرف پرداخته می‌شود. در اینجا بازار روز بعدی که شامل قیمت‌دهی‌های سمت تولید و مصرف بوده و هدف آن حداکثر کردن رفاه اجتماعی[۳] می‌باشد، مدلسازی می‌شود. برای سادگی مدل از تراکم شبکه انتقال چشم‌پوشی شده و فرض شده است که خدمات جانبی مانند رزرو چرخان در بازار دیگری معامله شود. همچنین اگر میزان تولید و یا مصرف شرکت‌کنندگان در بازار از مقدار بهینه تعیین شده منحرف شود، این تفاوت در بازار متعادل سازی که از بازار انرژی جداست، تنظیم شود.

**تابع هدف**

تابع هدف حداکثر کردن رفاه اجتماعی می‌باشد که به معنی تفاضل بین ارزش انرژی الکتریکی خریداری شده برای مصرف‌کنندگان و هزینه تولید این انرژی می‌باشد. رفاه اجتماعی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\max \sum_{t=1}^{T} \left( GS^t - OC^t \right) \quad (۷)$$

که عبارت اول مازاد ناخالص مصرف‌کننده $GS^t$ و عبارت دوم هزینه بهره‌برداری $OC^t$ در بازه t است.

**هزینه تولیدکنندگان**

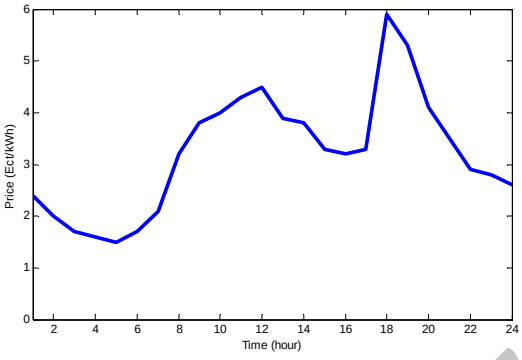
فرض شده است که تولیدکنندگان دارای توابع هزینه خطی می‌باشند و توان خریداری شده از شبکه بالادست به قیمت لحظه‌ای بازار باشد. این قیمت لحظه‌ای برابر با قیمت ساعتی بازار APX در نظر گرفته شده که در شکل (۲) نشان داده شده است[۱۱]. برای سادگی از هزینه روشن و خاموش شدن و هزینه بی‌باری واحدها صرف نظر شده است. محدودیت‌هایی که واحدهای تولیدی با آن روبرو هستند به صورت زیر است:

$$u^{g,t} \cdot P^{g}_{\min} \le P^{g,t} \le u^{g,t} \cdot P^{g}_{\max} \quad (۸)$$

$$C(P^{g,t}) = a^g \cdot P^{g,t} + b^g \quad (۹)$$

که در آن $P^{g,t}$ توان تولیدی، $u^{g,t}$ متغیر باینری حالت روشن یا خاموش بودن و $C(P^{g,t})$ هزینه تولید ژنراتور gام در ساعت t می‌باشد. همچنین هزینه توان تولیدی واحدهای تجدیدپذیر برابر با هزینه بهره‌برداری آنها معادل صفر در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب می‌توان هزینه بهره‌برداری ساعتی را به صورت زیر بیان کرد که در آن $P^t_{usn}$ توان خریداری شده از شبکه بالادست در زمان t و $\lambda^t$ قیمت متناظر با آن است.

$$OC^t = \sum_{g=1}^{G} C(P^{g,t}) + P^t_{usn} \cdot \lambda^t \quad (۱۰)$$




**شکل ۲ : قیمت توان در شبکه بالادست**

**پخش بار بهینه**

مدل استفاده شده در این مقاله برای پخش بار، پخش بار جریان مستقیم می‌باشد که در روابط زیر نشان داده شده است:

$$P^{i,t}_{G} - P^{i,t}_{D} = \sum_{j=1}^{I} \theta^t_{ij} B_{ij} \quad (۱۱)$$

$$P^{i,t}_{D} = \sum_{c=1}^{C} \sum_{LP\in\{low,med,crt\}} \left( D^{c,t}_{LP} \cdot M^{i,c} \right) \quad (۱۲)$$

$$P^{i,t}_{G} = \sum_{g=1}^{G} \left( P^{g,t} \cdot N^{i,g} \right) \quad (۱۳)$$

که در آنها $P^{i,t}_{G}$ و $P^{i,t}_{D}$ توان تولیدی و مصرفی در باس i در زمان t، $\theta^t_{ij}$ اختلاف فاز ولتاژ بین باس i و j در زمان t، $B_{ij}$ ادمیتانس خط بین باس i و j، $M^{i,c}$ ماتریس باینری نگاشت مصرف‌کننده cام به باس iام و $N^{i,g}$ ماتریس باینری نگاشت ژنراتور gام به باس iام است. رابطه (۱۱) بیانگر قید پخش بار در سیستم، رابطه (۱۲) محاسبه مقدار خالص بار مصرف شده در باس iام در ساعت t و رابطه (۱۳) نشان دهنده مقدار توان خالص تزریقی در باس iام در ساعت t می‌باشد.

Archive of SID

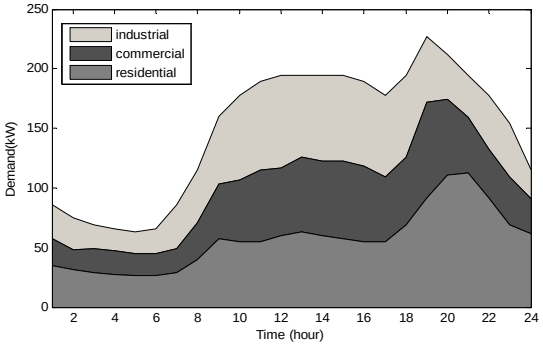
## ۳- سیستم و سناریوهای مورد مطالعه

سیستم مورد بررسی، یک شبکه ولتاژ پایین می‌باشد که دارای ۳ فیدر جهت تغذیه بارهای خانگی، صنعتی و تجاری است[۱۲]. در این شبکه از انواع تولیدکننده‌های پراکنده از قبیل ۱ عدد توربین بادی، ۱ عدد میکروتوربین، ۱ عدد پیل سوختی و ۵ عدد سلول فتوولتاییک استفاده شده است (شکل ۴). همچنین مقدار زیادی از بار مورد نیاز از شبکه بالادست که همان بازار انرژی الکتریکی است، خریداری می‌شود. فرض شده است که تمام DGها در ضریب قدرت یک کار کرده و هیچ توان راکتیو تولید و یا جذب نکنند. هزینه انرژی خریداری شده از واحدهای بادی و خورشیدی برابر با هزینه بهره‌برداری آنها و معادل صفر در نظر گرفته شده است[۹, ۱۳]. سایر مشخصات واحدها به صورت زیر است:

**جدول ۱ : مشخصات واحدهای تولیدکننده**

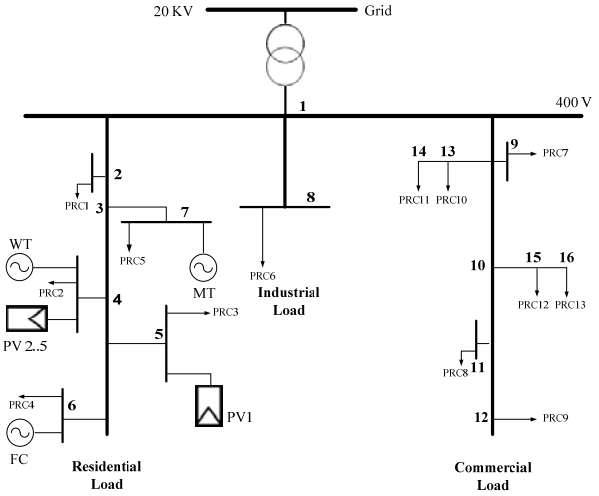
| شماره واحد | نام اختصاری | ظرفیت کمینه (kW) | ظرفیت بیشینه (kW) | قیمت (Ect/kWh) |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | MT | ۶/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۴/۳۷ |
| ۲ | FC | ۳/۰۰ | ۳۰/۰۰ | ۲/۴۱ |
| ۳ | WT | - | ۱۵/۰۰ | ۰/۰۰ |
| ۴ | PV1 | - | ۳/۰۰ | ۰/۰۰ |
| ۵-۸ | PV5-8 | - | ۲/۵۰ | ۰/۰۰ |

شکل (۳) توان درخواستی هر بخش را در ساعات مختلف شبانه روز نشان می‌دهد. همچنین قیمت‌های پیشنهادی از طرف مصرف‌کنندگان پاسخگو به قیمت برای اولویت‌های مختلف مصرف در جدول(۲) ذکر شده است.




شکل ۳ : توان درخواستی مصرف‌کنندگان مختلف در طول شبانه‌روز

جدول (۳) هر یک از سناریوهای مورد مطالعه و ویژگی‌های آنها را نشان می‌دهد. در سناریوهای DR، قیمت‌دهی مصرف‌کننده در بهره-برداری از ریزشبکه در نظر گرفته شده است. با افزایش مقادیر $\alpha$ و $\beta$ میزان مشارکت مصرف‌کننده در مدیریت بار و سهم بارهای با اولویت کم و متوسط افزایش پیدا کرده و بار بحرانی کاهش می‌یابد. در این سناریوها فرض شده است که مصرف‌کننده خانگی بار خود را در هر سه اولویت، مصرف‌کننده تجاری در دو اولویت متوسط و بحرانی و مصرف‌کننده صنعتی بار خود را تنها در اولویت بحرانی به بازار پیشنهاد می‌کند.




**شکل ۴ : ریزشبکه ولتاژ پایین مورد مطالعه[۱۲]**

**جدول ۲ : قیمت‌های پیشنهادی مصرف‌کنندگان**

| مصرف‌کننده پاسخگو به قیمت[۴] | قیمت پیشنهادی مصرف‌کننده (€c/kWh) بار با اولویت بحرانی | بار با اولویت متوسط | بار با اولویت کم |
|---|---|---|---|
| PRC1 | ۱۰۰ | ۲۴/۰۹ | ۵/۹۸ |
| PRC2 | ۱۰۰ | ۴۰/۸۷ | ۱/۳۹ |
| PRC3 | ۱۰۰ | ۱۵/۳۶ | ۳/۲۱ |
| PRC4 | ۱۰۰ | ۱۸/۲۳ | ۱/۵۳ |
| PRC5 | ۱۰۰ | ۱۴/۰۹ | ۵/۸۰ |
| PRC6 | ۱۰۰ | ۱۳/۷۶ | ۱/۰۲ |
| PRC7 | ۱۰۰ | ۳۹/۴۲ | ۴/۸۷ |
| PRC8 | ۱۰۰ | ۲۹/۲۸ | ۵/۰۸ |
| PRC9 | ۱۰۰ | ۲۸/۲۴ | ۵/۳۴ |
| PRC10 | ۱۰۰ | ۱۴/۰۷ | ۱/۴۲ |
| PRC11 | ۱۰۰ | ۳۸/۸۵ | ۲/۹۹ |
| PRC12 | ۱۰۰ | ۳۰/۷۷ | ۲/۲۹ |
| PRC13 | ۱۰۰ | ۲۱/۲۸ | ۵/۰۰ |

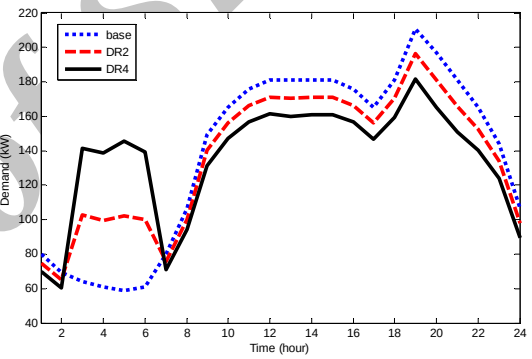
**جدول ۳ : سناریوهای مورد مطالعه**

| سناریو | مخفف | توضیحات | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| حالت پایه | Base | ---- | | | | | |
| بهره‌برداری با حضور پاسخ تقاضا | DR | اولویت‌های مختلف هر یک از انواع بارها | | | | | |
| | | تجاری | | صنعتی | خانگی | | |
| | | □ | β | □ | □ | β | α |
| | DR1 | ۰/۹۷ | ۰/۰۳ | ۱ | ۰/۹۴ | ۰/۰۳ | ۰/۰۳ |
| | DR2 | ۰/۹۴ | ۰/۰۶ | ۱ | ۰/۸۸ | ۰/۰۶ | ۰/۰۶ |
| | DR3 | ۰/۹۱ | ۰/۰۹ | ۱ | ۰/۸۲ | ۰/۰۹ | ۰/۰۹ |
| | DR4 | ۰/۸۸ | ۰/۱۲ | ۱ | ۰/۷۶ | ۰/۱۲ | ۰/۱۲ |
| | DR5 | ۰/۸۵ | ۰/۱۵ | ۱ | ۰/۷۰ | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ |

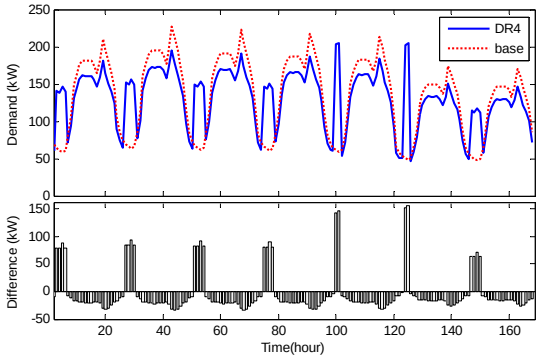
Archive of SID

## ۴- نتایج

شکل (۵) تاثیر افزایش مشارکت مصرف‌کننده بر منحنی روزانه تقاضا را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، تقاضای بار از ساعات پرمصرف به ساعات کم‌مصرف جابجا شده و دره‌های منحنی را پر می‌کند. با افزایش بیشتر ضریب مشارکت مصرف‌کننده، منحنی روزانه تقاضا به یک منحنی مسطح نزدیک می‌شود. از آنجایی که بخش قابل توجهی از بار مصرف‌کننده بحرانی بوده و غیر قابل تغییر است، در نتیجه منحنی بار روزانه در ساعات اوج مصرف شکل کلی خود را حفظ کرده و کمتر به سمت مسطح شدن پیش می‌رود. در حالی که اگر از اولویت‌دهی بار استفاده نشود و مصرف‌کننده نتواند اولویت بار خود را نسبت به قیمت و مطلوبیت آن تعیین کند، اختیار بهره‌بردار در بازتوزیع بار مصرف‌کننده بالا رفته و منحنی روزانه به شدت مسطح شده و شکل کلی خود را از دست می‌دهد. این مساله موجب ایجاد تصور بسیار خوشبینانه نسبت به نتایج اجرای برنامه‌های پاسخ تقاضا می‌شود که به دور از واقعیت است.



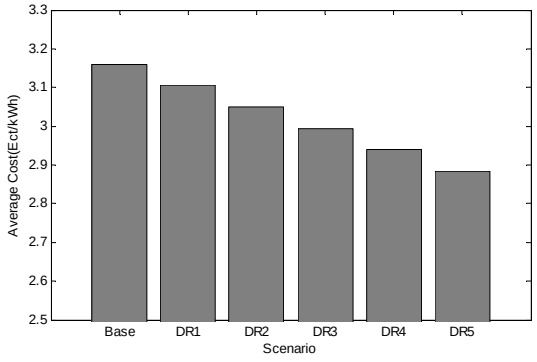

**شکل ۵ : منحنی بار روزانه مصرف‌کننده**




**شکل ۶ : تاثیر پاسخ تقاضا بر منحنی بار هفتگی و تفاوت مصرف**

در شکل (۶) نحوه جابجایی بار و تغییر آن نسبت به حالت پایه در طول هفته نشان داده شده است. همچنانکه در این شکل پیداست، در اکثر ساعات شبانه‌روز که قیمت انرژی الکتریکی بالاتر از حد مطلوب مصرف‌کننده است، میزان مصرف انرژی کاهش می‌یابد. این موضوع در قسمت‌های منفی نمودار دوم از شکل (۶) قابل مشاهده است. در عین حال بخش قابل توجهی از انرژی مصرفی در طول شبانه‌روز به ساعات ابتدایی شبانه‌روز که در آنها قیمت انرژی الکتریکی کاهش می‌یابد، منتقل شده است که در نهایت موجب کاهش هزینه‌های تامین انرژی می‌شود.

در شکل (۷) نیز هزینه متوسط تامین یک کیلووات ساعت انرژی در سناریوهای مختلف نشان داده شده است. با افزایش اندیس سناریوها میزان ضرایب $\alpha$ و $\beta$ برای مصرف‌کنندگان خانگی و تجاری افزایش یافته و از میزان بار بحرانی آنها کاسته می‌شود. این موضوع به معنای افزایش درصد مشارکت آنها در مدیریت بار خود است. از آنجایی که با افزایش مشارکت مصرف‌کننده در مدیریت بار، بخش بیشتری از بار درخواستی قابل جابجایی یا قطع بوده و در نتیجه بخش قابل توجهی از بار به ساعات کم قیمت انرژی جابجا می‌شود، هزینه متوسط تامین انرژی کاهش می‌یابد.




**شکل ۷ : هزینه متوسط تامین بار در سناریوهای مختلف**

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن پاسخ تقاضا مورد بررسی قرار گرفت. هر مصرف‌کننده با قیمت‌دهی خود، ارزش مطلوب جهت مصرف میزان مشخصی از بار را به بهره‌بردار سیستم اعلام می‌دارد. با تعریف قیمت‌دهی مصرف‌کننده برای اولویت‌های مختلف بار، شیوه جدیدی از مدیریت بار توسط مصرف‌کننده ارائه شد. اولویت‌های مختلف بار به هر تعداد و با هر قیمت می‌توانند تعریف شوند. همچنین روش‌های مدل‌سازی انواع اولویت‌های مختلف برای انواع مصرف‌کننده‌ها می‌تواند متفاوت باشد. این اولویت‌ها به صورت اولویت‌های کم، متوسط و بحرانی تعریف شد که به ترتیب به صورت بارهای قابل قطع، قابل جابجایی و غیر قابل تغییر مدل‌سازی شدند. از مهمترین نتایج حاصل از انجام این مقاله، اصلاح روش قیمت‌دهی مصرف‌کننده جهت مشارکت در پاسخ تقاضا و واقعی‌تر شدن منحنی بار روزانه نسبت به روش‌های معمول می‌باشد.

## مراجع

[۱] "US Department of Energy, Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving them," ed: Report to the United States Congress, February 2006.

Archive of SID

[۲] D. S. Kirschen, "Demand-side view of Electricity Markets," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 18, pp. 520-527, May 2003.

[۳] S. J. Rassenti, *et al.*, "Controlling Market Power and Price Spikes in Electricity Networks: Demand-side Bidding," *Proc. Nat. Acad. Sci.* , vol. 100, pp. 2998-3003, May 2003.

[۴] R. L. Earle, "Demand Elasticity in the California Power Echange day-ahead market," *Elect. J.*, vol. 13, pp. 59-65, 2000.

[۵] R. H. Patrick and F. A. Wolak, "Real-time Pricing and Demand-side Participation in Restructured Electricity Markets "in *Proc. Conf. Retail Participation in Competitive Power Markets*, 2001.

[۶] G. Goldman, *et al.*, "Customer Strategies for Responding to Day-Ahead Market Hourly Electricity Pricing, Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Labratoary," 2005.

[۷] S. Borenstein, *et al.*, "Measuring Market inefficiencies in California's Restructured Wholesale Electricity Market," *Amer. Econ. Rev.*, vol. 92, pp. 2998-3003, 2002.

[۸] C. L. Su and D. S. Kirschen, "Quantifying the Effect of Demand Response on Electricity Markets," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 24, pp ,۱۲۰۷-۱۱۹۹ .August 2009.

[۹] A. G. Tsikalakis and N. D. Hatziargyriou, "Operation of Microgrids with Demand Side Bidding and Continuity of Supply for Critical Loads," *Euro. Trans. Electr. Power*, vol. 21, pp. 1238-1254, 2011.

[۱۰] K. Dietrich, *et al.*, "Demand response in an isolated system with high wind integration," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 20-29, 2012.

[۱۱] Amsterdam Power Exchange Available at: http://www.apx.nl [Online]

[۱۲] S. Papathanassiou, *et al.*, "A benchmark LV microgrid for steady state and transient analysis," presented at the Cigre Symposium on Power Systems with Dispersed Generation, Athens, 17–20 April 2005.

[۱۳] A. G. Tsikalakis and N. D. Hatziargyriou, "Centralized control for optimizing microgrids operation," in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, 2011, pp. 1-8.

## زیرنویس‌ها

[1] Demand Response (DR)
[2] Load Participation Factor
[3] Social Welfare (SW)
[4] Price Responsive Consumer (PRC)

Archive of SID