

# مدل‌سازی تاثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر تعامل خرده‌فروش و مصرف‌کننده

تکتم شریفیان عطار  
کارشناس محاسبات و مطالعات سیستم  
شرکت برق منطقه‌ای خراسان  
مشهد، ایران  
t.sharifian@ieee.org

سید احسان حسینی منش، محمدحسین جاویدی دشت‌بیاض  
گروه مهندسی برق  
دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد  
مشهد، ایران  
ehsan.hossayni@gmail.com

## ۱. مقدمه

با پیدایش تحولات عظیم در صنعت برق، مدیریت سمت تقاضا<sup>۱</sup> برای بهره‌برداری بهتر از بازارهای برق و شبکه‌های برق‌رسانی، شکل تازه‌ای به خود گرفته است. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، از جمله ابزارهایی هستند که به مدیریت سمت تقاضا کمک شایانی می‌کنند.

برای پاسخ‌گویی بار، تعاریف متعددی وجود دارد. به‌طور کلی، به مدیریت و اصلاح رفتار مصرف‌کنندگان در زمان بالا رفتن قیمت انرژی و یا تهدید شدن قابلیت اطمینان<sup>۲</sup> شبکه، مدیریت بار یا پاسخ‌گویی بار می‌گویند. این مدیریت، بیشتر از طریق سیگنال قیمت و با هدف کاهش بار در دوره‌های اوج تقاضا و یا شیفت بار، صورت می‌پذیرد. در این میان، تعریف دپارتمان انرژی آمریکا از پاسخ‌گویی بار، بیش از سایر تعاریف بکار می‌رود [۱]: "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 و یا زمانی که قابلیت اطمینان شبکه به خطر افتاده است." براساس این تعریف، سیگنال قیمت و پرداخت‌های مشوقانه، ابزارهای مورد نیاز برای اجرای برنامه‌های

چکیده — بازار برق از نهادهای مختلفی تشکیل می‌شود که هر کدام از آنها، اهداف و انگیزه‌های مختلفی از اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار<sup>۱</sup> دارند. از سوی دیگر، اجرای کامل پاسخ‌گویی بار، نیازمند هماهنگی و ارتباط تمامی نهادها و بازیگران بازار است. این هماهنگی، تنها از بستر وضع قوانین و مقررات مناسب و از طریق شناخت رفتار بازیگران بازار حاصل می‌شود. در بین نهادهای مختلف، خرده‌فروشان<sup>۲</sup> انرژی الکتریکی بیشترین تعامل را با مصرف‌کنندگان دارند. آنچه خرده‌فروشان در بازار برق انجام می‌دهند، خرید انرژی الکتریکی در بازارهای عمده‌فروشی<sup>۳</sup> و فروش آن به مصرف‌کنندگان است. روشن است که یک خرده‌فروش در ساعت‌هایی که قیمت برق در بازار بیش از قیمت فروش او به مصرف‌کننده است، زیان خواهد دید. در این مقاله، تعامل بین خرده‌فروش و مصرف‌کننده با استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و در راستای حداکثر کردن سود خرده‌فروش و کسب رضایت مصرف‌کننده، مدل‌سازی می‌شود.

واژه‌های کلیدی — بازار برق؛ خرده‌فروش؛ برنامه‌های پاسخ‌گویی بار؛ مدل‌سازی اقتصادی بار؛ چانه‌زنی<sup>۴</sup>

<sup>5</sup> Demand Side Management  
<sup>6</sup> Reliability

<sup>1</sup> Demand Response Programs  
<sup>2</sup> Retailers  
<sup>3</sup> Wholesale Market  
<sup>4</sup> Bargaining

## ۲. مرور مقالات

نویسندگان مرجع [۳]، روشی را برای اولویت‌بندی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ارائه کرده‌اند. یکی از وظایف قانون‌گذاران، ایجاد قوانینی برای انتخاب و اولویت‌بندی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار است. در اینجا، اولویت‌بندی برنامه‌ها از دید قانون‌گذار، با استفاده از تکنیک‌های MADM<sup>۱۱</sup> که اهداف بهره‌بردار مستقل سیستم<sup>۱۲</sup>، شرکت‌های برق و مصرف‌کنندگان را به عنوان بازیگران اصلی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در نظر می‌گیرد، انجام می‌شود.

در مرجع [۴]، مدل جامعی برای تعیین میزان بهینه‌ی مصرف مشترکین در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ارائه شده‌است. بر همین اساس، تعامل خرده‌فروش با مشترکین با استفاده از روش یادگیری تقویتی<sup>۱۳</sup> مدل‌سازی شده‌است. در این مرجع، تنها برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار در زمان واقعی<sup>۱۴</sup>، در نظر گرفته شده‌است.

در مرجع [۵]، برای مصرف‌کنندگان، سناریوهای مختلفی با استفاده از توابع تقاضای ریاضی، برای مطالعه‌ی پاسخ‌گویی بار تعریف شده‌است. این توابع ریاضی برای شبیه‌سازی تغییرات ساعتی بار مصرف‌کنندگان در اثر تغییرات قیمت، تعریف می‌شوند. در این مرجع، رفتار مدل بهینه‌سازی، به طور جداگانه و تحت دو تابع هدف مختلف ارزیابی شده‌است: سود شرکت برق و رفاه اجتماعی<sup>۱۵</sup>.

مرجع [۶]، یک مدل بهینه‌سازی برای تطبیق مصرف ساعتی مشترکین بر قیمت‌های ساعتی ارائه کرده‌است و مرجع [۷] نیز به بررسی پاسخ‌گویی بار در شبکه‌ی هوشمند<sup>۱۶</sup> پرداخته‌است.

## ۳. فرمول‌بندی مسئله

### ۳.۱. تعریف مسئله

قبل از هر چیز، باید ساختار بازار خرده‌فروشی را مشخص کنیم. معمولاً خرده‌فروشان، برق را در بازارهای عمده‌فروشی برای دوره‌های مشخصی در آینده خریداری می‌کنند. این میزان خرید، به پیش‌بینی آنها از میزان مصرف

پاسخ‌گویی بار هستند. بنابراین می‌توان برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را در دو دسته‌ی کلی جای داد: برنامه‌های تشویقی<sup>۷</sup> و برنامه‌های تعرفه‌ی زمانی<sup>۸</sup> [۲].

در تمام تعاریف پاسخ‌گویی بار، به اصلاح میزان مصرف در پاسخ به تغییرات قیمت اشاره شده‌است که بر لزوم به‌هم پیوستگی بازارهای عمده‌فروشی و خرده‌فروشی تاکید می‌کند. در بین بازیگران بازار، خرده‌فروشان انرژی الکتریکی، حلقه‌ی اتصال بازارهای عمده‌فروشی و مصرف‌کنندگان هستند. آنچه خرده‌فروشان انجام می‌دهند، خرید برق در بازارهای عمده‌فروشی و فروش آن به مصرف‌کنندگان است. بنابراین نقش مهمی در بالابردن حساسیت<sup>۹</sup> مصرف‌کنندگان به تغییرات قیمت و پیاده‌سازی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار دارند.

برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، به یک خرده‌فروش کمک می‌کنند تا بتواند به سود بیشتری دست یابد. یک خرده‌فروش، مصرف‌کننده را ترغیب می‌کند تا مصرفش را از دوره‌هایی که قیمت انرژی بالاست، به دوره‌هایی که قیمت انرژی پایین است، منتقل کند. این کار از طریق افزایش قیمت فروش خرده‌فروش در دوره‌هایی که قیمت برق در بازار بالاست، و یا از طریق پرداخت‌های مشوقانه به مصرف‌کننده، صورت می‌پذیرد.

با آزادسازی قیمت‌ها<sup>۱۰</sup>، مصرف‌کنندگان برق نیز تمایل به شرکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار دارند؛ چراکه که از این راه می‌توانند هزینه‌ی مصرف انرژی الکتریکی خود را کاهش دهند. مصرف‌کنندگان آزاد هستند تا با هر خرده‌فروشی وارد معامله شوند؛ بنابراین خرده‌فروشی که بتواند تنوع بیشتری در ارائه‌ی خدمات به مصرف‌کنندگان داشته باشد، سهم بیشتری از بازار را به خود اختصاص می‌دهد و مصرف‌کنندگان بیشتری با او قرارداد می‌بندند. به بیان دیگر، در مدل خرده‌فروشی، مصرف‌کنندگان به جای قانون‌گذار، تصمیم‌گیرنده‌ی ترکیب اختصاص یافته بین قیمت و کیفیت خدمات هستند.

در ادامه‌ی مقاله، در بخش ۲، مقالات مربوط به پاسخ‌گویی بار و تاثیر آن بر بهره‌برداری از شبکه‌های برق‌رسانی و بازارهای برق، مرور شده‌است. در بخش ۳، مدل‌سازی تاثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر تعامل خرده‌فروش و مصرف‌کننده و در بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی به‌همراه تحلیل نتایج و نتیجه‌گیری ارائه شده‌است.

<sup>11</sup> Multi Attribute Decision Making

<sup>12</sup> Independent System Operator

<sup>13</sup> Reinforcement Learning

<sup>14</sup> Real Time

<sup>15</sup> Social Welfare

<sup>16</sup> Smart Grid

<sup>7</sup> Incentive Based Demand Response

<sup>8</sup> Time Based Demand Response

<sup>9</sup> Elasticity

<sup>10</sup> Deregulation

خوبی می‌تواند قیمت‌های بازار عمده‌فروشی را پیش‌بینی کند. بنابراین، قیمت‌های عمده‌فروشی در هر ساعت  $i$  یا  $p_w(i)$ ، ثابت فرض شده‌است.

- برای هر مصرف‌کننده یک الگوی مصرف ۲۴ ساعته (منحنی بار اولیه) وجود دارد که به‌ازای نرخ‌های پایه در هر ساعت  $(p_0(i))$ ، توان مصرفی در هر ساعت  $(d_0(i))$  را مشخص می‌کند.

- هدف خرده‌فروش تعیین قیمت  $(p(i))$  و میزان تشویقی  $(inc(i))$  است که باید برای هر ساعت روز بعد، برای مصرف‌کننده ارسال کند.

- میزان توان مصرف‌کننده در هر ساعت  $(d(i))$ ، تابعی از قیمت و تشویق تعیین شده از سوی خرده‌فروش است.

- خرده‌فروش از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار که مصرف‌کننده را جریمه می‌کنند، استفاده نمی‌کند و تنها از طریق سیگنال قیمت و پرداخت‌های مشوقانه، به دنبال مدیریت بار مصرف‌کننده است. این مدیریت بار، در راستای حداکثر کردن سود خرده‌فروش و کسب رضایت مصرف‌کننده است.

- فعالیت اقتصادی خرده‌فروش، دربرگیرنده‌ی هزینه‌های مختلفی برای اوست. در این مقاله، هزینه‌ی خرید انرژی از بازار، به عنوان هزینه‌ی عمده‌ی خرده‌فروش در نظر گرفته شده‌است و سایر هزینه‌ها ناچیز فرض شده‌است.

- مشتریان خرده‌فروش، طوری دسته‌بندی شده‌اند که هر دسته تقریباً از مصرف‌کنندگانی همگن تشکیل شده‌باشد.

- اساساً خرده‌فروش با مصرف‌کنندگانی سروکار دارد که آرامش ذهنی می‌خواهند و بالا و پایین شدن بیش از اندازه‌ی قیمت‌ها را نمی‌پسندند. بنابراین حداکثر قیمت پیشنهادی به مصرف‌کنندگان در هر ساعت،  $1/5$  برابر قیمت بازار در آن ساعت فرض شده‌است.

- معیار تعیین‌کننده‌ی حساسیت بار نسبت به تغییرات قیمت، کشش‌های تقاضای خودی<sup>۲۰</sup> در هر ساعت  $(E(i, i))$  و

بستگی دارد. هرچه قدر این پیش‌بینی دقیق‌تر باشد، ریسک خرده‌فروش کاهش می‌یابد. در صورت عدم پیش‌بینی درست، خرده‌فروش ناچار است که از طریق بازارهای لحظه‌ای<sup>۱۷</sup>، به متعادل‌سازی تقاضای مشتریانش در زمان واقعی بپردازد. ریسک بالا و نوسانات شدید قیمتی در بازارهای لحظه‌ای، احتمال زیان خرده‌فروش را افزایش می‌دهد. بنابراین یک خرده‌فروش بسیار علاقه‌مند است که از طریق به الگوی مصرف مشتریانش پی ببرد. به‌همین جهت او مشتریان خود را به نصب تجهیزات اندازه‌گیری ترغیب می‌کند تا میزان مصرف را در بازه‌های زمانی مختلف ثبت کنند [۳]. پیشرفت‌های حاصل شده در زیرساخت‌های مخابراتی و ارتباطاتی، این امکان را فراهم می‌آورد تا خرده‌فروش بتواند در یک سیستم بلادرنگ، به خرید و فروش انرژی بپردازد.

مصرف‌کنندگان به عقد قرارداد با خرده‌فروشان علاقه‌مندند که پیشنهادات و تعرفه‌های متنوع‌تری ارائه کنند. این پیشنهادات باید به‌گونه‌ای باشند که ضمن حفظ رفاه مصرف‌کننده، موجب کاهش قابل قبول در قبوض برق آنها شوند. در همین راستا، خرده‌فروش می‌تواند با پرداخت‌های مشوقانه و نرخ‌های متغیر در زمان (کمیت‌های اصلی یک برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار) مصرف‌کنندگان را به کاهش مصرفشان در ساعات گرانی قیمت بازار و انتقال آن به ساعات ارزان‌ی، دعوت کند. در این صورت، خرده‌فروش بهای کمتری برای خرید انرژی پرداخت می‌کند و مصرف‌کنندگان نیز در کنار صرفه‌جویی در هزینه‌ی برقشان، از تخفیفات یا نرخ‌های تشویقی، بهره‌مند می‌شوند.

### ۳.۲. فرضیات و متغیرهای مسئله

از جمله روش‌های عقد قرارداد برای کاهش ریسک نوسان قیمت در بازار، قراردادهای دوطرفه است. یک خرده‌فروش می‌تواند برق مورد نیازش را مستقیماً از تولیدکنندگان انرژی الکتریکی تهیه کند. برخی مصرف‌کنندگان بزرگ نیز، قراردادهای دوطرفه را ترجیح می‌دهند. در این مقاله، فرض شده‌است که یک خرده‌فروش، صرفاً در بازار روز بعد<sup>۱۸</sup>، توان مشتریانش را تامین می‌کند. سایر فرضیات به شرح زیر است:

- قیمت بازار در هر ساعت، براساس پیشنهادهای<sup>۱۹</sup> خرید و فروش سمت عرضه و تقاضا تعیین می‌شود. از آنجایی که افق زمانی برنامه‌ریزی کوتاه است، فرض می‌شود که خرده‌فروش با دقت

<sup>17</sup> Spot Markets  
<sup>18</sup> Day Ahead  
<sup>19</sup> Bid

<sup>20</sup> Self - elasticity

کشش های تقاضای متقابل<sup>۲۱</sup> بین ساعت های مختلف

$(E(i, j))$ ، می باشد که در مرجع [۸]، تعریف شده است.

- واحد متغیرهای  $d_0(i)$  و  $d(i)$ ، مگاوات و واحد متغیرهای  $p_0(i)$ ،  $p_w(i)$  و  $p(i)$ ، دلار بر مگاوات ساعت است.

## ۴. شبیه سازی و تحلیل نتایج

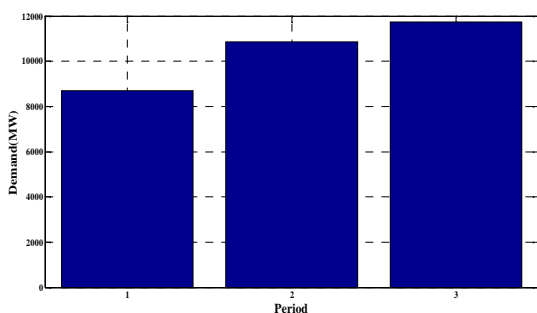
### ۴.۱. داده های شبیه سازی

در این بخش، نتایج شبیه سازی ارائه شده است. این شبیه سازی بر روی داده های ایالت Portland، در بازار New England انجام شده است [۱۱]. این داده ها، شامل قیمت های حدى محلی<sup>۲۲</sup>  $(p_w(i))$  و میزان تقاضا  $(d_0(i))$  در تاریخ ۲۰۱۳/۱/۱ است. پیش از این گفته شد که مصرف کنندگان به دنبال آرامش ذهنی اند و تمامی آنها نمی توانند به قیمت های ساعتی پاسخ گو باشند. به همین دلیل و بدون از دست دادن کلیت مسئله، مقادیر بار و قیمت بازار، به سه دوره ی کم باری، میان باری و پر باری، تقسیم می شود. جدول (۱)، ساعت های متناظر با هر دوره را نشان می دهد. دوره های ۱ و ۲ و ۳، به ترتیب معرف دوره های بی باری، کم باری و پر باری هستند.

جدول ۱: ساعت های متناظر با هر دوره

بی باری (دوره ۱)	کم باری (دوره ۲)	پر باری (دوره ۳)
۸ و ۷ و ۶ و ۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱	۱۶ و ۱۵ و ۱۴ و ۱۳ و ۱۲ و ۱۱ و ۱۰ و ۹	۲۴ و ۲۳ و ۲۲ و ۲۱ و ۲۰ و ۱۹ و ۱۸ و ۱۷

مقدار بار در هر یک از سه دوره، برابر مجموع توان های ساعتی آن دوره است. قیمت بازار نیز در هر دوره، به صورت میانگین موزون قیمت در ساعات آن دوره تعریف می شود. شکل های (۱) و (۲)، به ترتیب میزان بار و قیمت برق را در دوره های ذکر شده، نشان می دهند.



شکل ۱: منحنی بار اولیه در دوره های کم باری، میان باری و پر باری

### ۳.۳. فرمول بندی مسئله ی بهینه سازی

فرمول بندی مسئله ی بهینه سازی، مطابق روابط ۱ تا ۴ است. متغیرهای  $i$  و  $j$ ، دوره های در نظر گرفته شده برای مصرف توان هستند که می توانند به صورت ساعتی از ۱ تا ۲۴ و یا سه تعرفه ی کم باری، میان باری و پر باری تعریف شوند.

$$\text{Max}_{p(i), inc(i)} F = \sum_i [p(i) - p_w(i)] d(i) - inc(i) [d_0(i) - d(i)] \quad (1)$$

s.t:

$$d(i) = d_0(i) \left[ 1 + \sum_j E(i, j) \frac{p(j) - p_0(j) + inc(j)}{p_0(j)} \right] \quad (2)$$

$$\sum_i B(d(i)) - d(i) p(i) + inc(i) [d_0(i) - d(i)] = S \quad (3)$$

$$p_w(i) \leq p(i) \leq 1.5 p_w(i) \quad (4)$$

معادله ی (۱)، تابع هدف یا سود خرده فروش است که باید حداکثر شود. متغیرهای بهینه سازی، قیمت و میزان تشویق در هر دوره ی برنامه ریزی است. بر اساس این رابطه، سود خرده فروش برابر است با تفاضل هزینه های خرید توان و پرداخت های مشوقانه از درآمد حاصل از فروش توان. معادله های (۲) و (۳)، قیود تساوی مسئله ی بهینه سازی هستند. معادله ی (۲)، مصرف بهینه ی مشتری را به صورت تابعی از متغیرهای بهینه سازی نشان می دهد. این رابطه در مرجع [۳] تحت عنوان مدل جامع بار پاسخ گو، اثبات شده است. در معادله ی (۳)، سود مصرف کننده برابر است با مجموع مازاد خالص و دریافت های مشوقانه. این سود برابر با مقدار مشخص  $S$  فرض شده است.  $B(d(i))$  مازاد ناخالص مصرف کننده است که با محاسبه ی سطح زیر منحنی تقاضای مصرف کننده و از (۵) بدست می آید [۹-۱۰]. در واقع این معادله، مدل سازی انتظار مصرف کننده از خرده فروش است. معادله ی (۴) نیز، حدود بالا و پایین قیمت برق مصرف کننده را نشان می دهد.

$$B(d(i)) = B_0(d_0(i)) + p_0(i) [d(i) - d_0(i)] \left[ 1 + \frac{d(i) - d_0(i)}{2E(i, i)d_0(i)} \right] \quad (5)$$

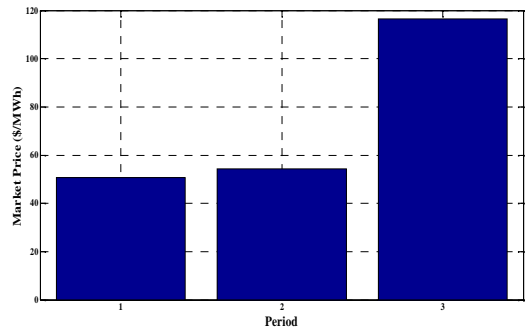
<sup>22</sup> Locational Marginal Price

<sup>21</sup> Cross - elasticity

جدول ۳: مقایسه‌ی سود مصرف‌کننده، سود خرده‌فروش، قیمت،

مقدار تشویق و بار در سناریوهای مختلف

سناریو ۵	سناریو ۴	سناریو ۳	سناریو ۲	سناریو ۱	سناریو ۰	
۱۲۶۲۰۰۰۰	۱۲۵۵۰۰۰۰	۱۲۵۰۶۴۰۰	۱۲۰۰۰۰۰۰	۱۱۵۰۰۰۰۰	۱۲۵۰۶۴۰۰	$S(\$)$
۵۸۳۹	۷۵۷۴۷	۱۱۶۷۳۰	۶۲۲۰۰۰	۱۱۰۳۹۰۰	۱۰۵۳۶۸	$R(\$)$
۷۱/۱۸۵	۷۵/۸۱۷	۷۴/۷۷۴	۷۵/۴۱۶	۷۶/۰۷۷	۸۰	$p1$ (\$/MW)
۷۷/۴۱۸	۷۶/۱۵۴	۸۰/۶۱۶	۸۱/۳۸۵	۸۱/۳۸۵	۸۰	$p2$ (\$/MW)
۷۹/۷۰۶	۸۳/۴۹۵	۸۳/۶۱۴	۱۲۷/۶۵۶	۱۷۲/۸۳۸	۸۰	$p3$ (\$/MW)
۲۶/۹۵۳	۲۶/۲۵۴	۱۸/۵۴۸	۱۴/۵۴۹	۱/۴۴۹	۰	$inc$ (\$/MW)
۸۸۱۵	۸۷۶۸	۸۷۷۴	۸۸۲۰	۸۸۵۵	۸۶۸۸	$d1$ (MW)
۱۰۹۳۴	۱۰۹۶۴	۱۰۸۸۶	۱۰۹۶۳	۱۱۰۳۴	۱۰۸۵۳	$d2$ (MW)
۱۱۳۱۳	۱۱۲۷۳	۱۱۳۹۲	۱۰۸۰۸	۱۰۳۳۹	۱۱۷۲۵	$d3$ (MW)
۳۱۰۶۲	۳۱۰۰۵	۳۱۰۵۲	۳۰۵۹۱	۳۰۲۲۸	۳۱۲۶۶	$d$ (MW)



شکل ۲: قیمت بازار در دوره‌های کم‌باری، میان‌باری و پرباری

کشش‌های تقاضای خودی و متقابل نیز در جدول (۲) ثبت شده‌است.

جدول ۲: کشش‌های خودی و متقابل [۳]

	Peak	Off-peak	Valley
Peak	-0.10	0.016	0.012
Off-Peak	0.016	-0.10	0.01
Valley	0.012	0.01	-0.10

در تمام سناریوها در مقایسه با سناریوی ۰، بار مصرف‌کننده در دوره‌ی پرباری، کاهش و در عوض، بار سایر دوره‌ها به تناسب افزایش یافته‌است. سود مصرف‌کنندگان در سناریوی ۰، برابر با ۱۲۵۰۶۴۰۰ دلار است. در همین وضعیت، سود خرده‌فروش برابر با ۱۰۵۳۶۸ دلار خواهد بود. این در حالیست که سناریوی ۳ در جدول (۳)، نشان می‌دهد که خرده‌فروش می‌تواند با استفاده از ارائه‌ی قیمت‌های بیشتر در ساعت‌های اوج مصرف و استفاده از پرداخت‌های مشوقانه در این ساعت‌ها، سود خود را به ۱۱۶۷۳۰ دلار افزایش دهد. توجه شود که در سناریوی ۳، سود مصرف‌کننده همان مقدار سود در حالت پایه است.

### ۴.۳. چانه‌زنی بین خرده‌فروش و مصرف‌کننده

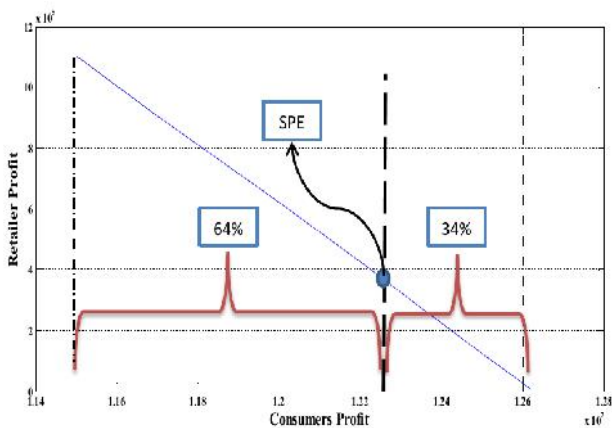
همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، افزایش سود مصرف‌کننده، با کاهش سود خرده‌فروش همراه است. توجه به این نکته، بسیار حائز اهمیت است که تا جایی می‌توان سود مصرف‌کننده را افزایش داد که خرده‌فروش ضرر نکند. در مقابل، کاهش سود مصرف‌کننده نیز حد مشخصی دارد. این حد، با توجه به مقادیر مجاز قیمت‌دهی خرده‌فروش و ضرایب کشش قیمتی تقاضا تعیین می‌شود. سوال این است، که اگر یک خرده‌فروش و مصرف‌کننده با یکدیگر وارد مذاکره شوند، در چه قیمتی و چه نرخ تشویقی، به توافق می‌رسند؟ روشن است که براساس جدول (۳)، توافق در هر مقدار  $S$  که مابین مقادیر سناریوهای ۱ و ۵ قرار می‌گیرد، هم

متغیرهای بهینه‌سازی،  $p(1)$ ،  $p(2)$ ،  $p(3)$  و  $inc(3)$  می‌باشند. توجه شود که خرده‌فروش تنها در دوره‌ی پرباری، از گزینه‌ی تشویق برای انتقال بار مصرف‌کنندگان به دوره‌های دیگر بهره می‌برد. قیمت پایه‌ی پیشنهادی خرده‌فروش به مصرف‌کنندگان نیز، برابر با نرخ ثابت  $80 \$/MWh$  برای تمامی ساعت‌های روز است.

### ۴.۲. تحلیل نتایج بهینه‌سازی

جدول (۳)، نتایج بهینه‌سازی را در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. بهینه‌سازی‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در جعبه‌ابزار نرم‌افزار MATLAB، انجام شده‌است در هر سناریو، برای سود مصرف‌کنندگان  $S$ ، مقداری مشخص فرض شده‌است. در این جدول،  $R$ ،  $p1$ ،  $p2$ ،  $p3$ ،  $inc$ ،  $d1$ ،  $d2$  و  $d3$ ، به ترتیب سود خرده‌فروش، قیمت در دوره‌ی ۱، قیمت در دوره‌ی ۲، قیمت در دوره‌ی ۳، تشویق در دوره‌ی ۳، بار در دوره‌ی ۱، بار در دوره‌ی ۲، بار در دوره‌ی ۳ و مجموع بار در طول روز، می‌باشند. سناریوی ۰، حالتی است که خرده‌فروش از پاسخ‌گویی بار استفاده نمی‌کند و تنها قیمت ثابت  $80 \$/MWh$  را برای تمام دوره‌ها در نظر می‌گیرد.

مصرف‌کننده از خرده‌فروش بیشتر است. برای نمونه،  $u_1 = 0.9434$  و  $u_2 = 0.97087$  و تعداد دوره‌های بازی، ۱۰۰ دوره در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از روابط فوق،  $S_1 = 0.34$  و  $S_2 = 0.66$  محاسبه می‌شود. در شکل (۳)، روش تعیین نقطه‌ی تعادل چانه‌زنی بر روی منحنی سود خرده‌فروش - سود مصرف‌کننده، مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خرده‌فروش درصدد کاهش سود مصرف‌کننده است و مصرف‌کننده نیز به دنبال افزایش مازاد خالص خود می‌باشد. از آنجایی که قدرت چانه‌زنی بزرگتری برای مصرف‌کننده فرض شده‌است، سهم بیشتری از مازاد را به خود اختصاص داده‌است.



شکل ۳: بدست آوردن نقطه‌ی تعادل با استفاده از چانه‌زنی

#### ۴.۴. نتیجه‌گیری

در این بخش، تاثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در تعامل خرده‌فروش و مصرف‌کننده، مدل‌سازی شد. در این مدل‌سازی، نشان داده‌شد که سود خرده‌فروش در نتیجه‌ی بکارگیری برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، افزایش می‌یابد. این نتیجه، با فرض سود یکسان برای مصرف‌کننده در دو وضعیت بکارگیری نرخ‌های متغیر در زمان و نرخ ثابت بدست آمد. با کاهش سود مصرف‌کننده، تحت سناریوهای مختلف، خرده‌فروش می‌تواند به سود بیشتری دست یابد.

نکته‌ی مهم در تعامل خرده‌فروش با مصرف‌کننده، تعیین میزان سود مصرف‌کننده و در نتیجه سود خرده‌فروش است. بدین منظور، از مدل چانه‌زنی در نظریه‌ی بازی‌ها استفاده شد. در چانه‌زنی، بازیکنی که قدرت چانه‌زنی بالاتری دارد، سهم بیشتری از مازاد خالص را به خود اختصاص می‌دهد. بر این اساس، می‌توان سناریوی پاسخ‌گویی بار بهینه را پیدا کرد.

از نتایج بدست آمده در این مدل‌سازی، می‌توان در برنامه‌ریزی‌های کلان پاسخ‌گویی بار استفاده کرد. قانون‌گذار، برای اجرای فراگیر پاسخ‌گویی

برای مصرف‌کننده و هم برای خرده‌فروش منافع خالصی به‌همراه دارد. اما این دو، بر سر سودی که می‌توانند کسب کنند، با هم در تعارض‌اند. کاربرد مبحث چانه‌زنی در تئوری بازی‌ها<sup>۲۳</sup>، یافتن نقطه‌ی تعادل در چنین وضعیتی است.

در چانه‌زنی، مازاد خالصی وجود دارد، که هر یک از طرفین چانه‌زنی (خریدار و فروشنده) به‌دنبال سهم بیشتری از این مازاد است. معمولاً، کل مازاد خالص را به یک نرمالیزه می‌کنند و دو مقدار  $u_1$  و  $u_2$ ، به ترتیب به فروشنده و خریدار، نسبت داده می‌شود. این مقادیر، بین ۰ و ۱ تغییر می‌کنند و معیاری از قدرت چانه‌زنی طرفین معامله می‌باشند. کسی که قدرت چانه‌زنی بالاتری دارد، سهم بیشتری از مازاد را به خود اختصاص می‌دهد.

در فرآیند چانه‌زنی، یکی از طرفین شروع‌کننده‌ی بازی است و بازی در تعداد دوره‌های مشخصی انجام می‌شود. در هر دوره، یکی از طرفین، پیشنهاد دهنده‌ی قیمت است و طرف مقابل، باید در مورد قبول یا رد آن پیشنهاد، تصمیم‌گیری کند. اگر پیشنهاد رد شود، فرد ردکننده در دوره‌ی بعد پیشنهاد خود را ارائه می‌کند. بازی به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا به مرحله‌ی آخر برسد.

دو بازیکن ۱ و ۲ را در نظر می‌گیریم که درباره‌ی تقسیم یک مازاد (که به یک نرمالیزه شده) از طریق قبول و رد پیشنهاد یکدیگر، تصمیم‌گیری می‌کنند. تعداد دوره‌های بازی برابر با  $T$  است. بازیکن ۱ شروع‌کننده‌ی بازی است. قدرت چانه‌زنی بازیکن ۱، برابر  $0 < u_1 < 1$  و بازیکن ۲ برابر با  $0 < u_2 < 1$  است. بازیکنان موقعی پیشنهاد یکدیگر را می‌پذیرند که بین قبول و رد بی‌تفاوت باشند. این بازی دارای تعادل SPE<sup>۲۴</sup> یکتایی است که در آن سهم بازیکن ۱ ( $S_1$ ) و سهم بازیکن ۲ ( $S_2$ )، از (۶) و (۷) بدست می‌آید [۱۲]:

$$S_1 = \frac{(1-u_2)[1-u_1u_2^{T/2}]}{1-u_1u_2} \quad (6)$$

$$S_2 = \frac{u_2(1-u_1) - [1-u_2](u_1u_2^{T/2})}{1-u_1u_2} \quad (7)$$

برای مثال، فرض کنید بازیکن ۱، خرده‌فروش و بازیکن ۲ مصرف‌کننده است. با توجه به مقدار قابل توجه بار مصرف‌کننده و با فرض تعداد نسبتاً زیاد خرده‌فروشان دیگر به عنوان گزینه‌های بیرونی، قدرت چانه‌زنی

<sup>23</sup> Game Theory

<sup>24</sup> Subgame Perfect Equilibrium

بار، باید به وضع قوانینی در بازار بپردازد که برای تمام نهادهای بازار، حاشیه سود قابل قبولی را دربرداشته باشد. این مهم در بستر شناخت درست رفتار بازیگران بازار مقدور است. از جمله‌ی این بازیگران، خرده‌فروشان برق هستند که رفتار آنها در این مقاله، بررسی شد.

## منابع

- [1] U. S. Department of Energy, "Energy policy Act of 2005," section 1252, ebruary 2006.
- [2] US Department of Energy. Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them. Report to the United States Congress, February 2006.
- [3] Aalami HA, Parsa Moghaddam M, Yousefi GR. "Modeling and prioritizing demand response programs in power markets," Electric Power Systems Research 80, pp. 426-435, 2010.
- [4] Shaghayegh Yousefi, Mohsen Parsa Moghaddam, Vahid Johari Majid. , "Optimal real time pricing in an agent-based retail market using a comprehensive demand response model," Energy 36, pp. 5716-5727, 2011.
- [5] J.M. Yusta , H.M. Khodr , A.J. Urdaneta. , "Optimal pricing of default customers in electrical distribution systems: Effect behavior performance of demand response models," Electric Power Systems Research 77, pp. 548-558, 2007.
- [6] Antonio J. Conejo , Juan M. Morales. , "Real-Time Demand Response Model," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 3, pp. 236-242, December. 2010.
- [7] F. Rahimi and A. Ipakchi, "Demand response as a market resource under the smart grid paradigm," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 1, pp. 82-88, Jun. 2010.
- [8] D.S. Kirschen, G. Strbac, Fundamentals of power system economics, John Wiley & Sons Ltd, 2004. R. Associates, Primer on demand side management, Report for the World Bank, pp.6-9, February 2005.
- [9] Schweppe F, Caramanis M, Tabors R. Evaluation of spot price based electricity rates. IEEE Transaction on Power Apparatus Systems PAS1985;104(7):1644e55.
- [10] Schweppe FC, Caramanis MC, Tabors RD, Bohn RE. Spot pricing of electricity. Boston MA: kluwer Ltd; 1989.
- [11] Independent System Operator (ISO) New England. Hourly zonal information, available at: [http://www.iso-ne.com/markets/hstdata/znl\\_info](http://www.iso-ne.com/markets/hstdata/znl_info).
- [12] Rubinstein A (1982), Perfect Equilibrium in a Bargaining Model, Econometrica 50, 97-109.