

فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی  
سال سوم / شماره ۸ / پاییز ۱۳۹۶ / صفحات ۳۲-۷

## تأثیر روش‌های پرداخت بر قیمت فروش و هزینه تمام شده برق در بازار برق

### ایران: مطالعه موردی نیروگاه‌های برق خراسان

مسعود همایونی فر

دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد  
homayounifar@um.ac.ir

حامد مرتضی زاده

دانشجوی دکتری دانشگاه فردوسی مشهد  
hamehmh2@gmail.com

مصطفی رجبی مشهدی

مدرس دانشگاه فردوسی مشهد  
mrjabim@yahoo.com

علی اکبر ناجی

دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد  
naji@um.ac.ir

از مهمترین ویژگی‌های بازار برق ایران، روش پرداخت به ازای پیشنهاد به نیروگاه‌های برنده است. این در حالی است که در بسیاری از بازارهای برق کشورهای توسعه یافته از روش پرداخت یکنواخت استفاده می‌شود. این مقاله به مقایسه روش پرداخت یکنواخت و پرداخت به ازای پیشنهاد از نظر قیمت فروش و هزینه تمام شده برق در بازار برق ایران با استفاده از الگوی Q-Learning در سه دوره کم باری، بار عادی و پیک می‌پردازد. به دلیل کمبود شدید و در بسیاری از موارد غیرقابل دسترس بودن منابع اطلاعاتی، نتایج این بررسی بر روی نیروگاه‌های برق استان‌های خراسان متمرکز شده است. نتایج حاکی از آن است که هر چند قیمت فروش برق در روش پرداخت به ازای پیشنهاد کمتر از روش پرداخت یکنواخت است، اما هزینه تمام شده برق در روش یکنواخت کمتر از روش پرداخت به ازای پیشنهاد قیمت می‌باشد. به عبارت دیگر، در روش یکنواخت از نیروگاه‌های با بازدهی بالاتر استفاده می‌شود که کاهش مصرف سوخت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را در پی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** بازار برق، قیمت فروش، هزینه تمام شده، روش یکنواخت، روش پرداخت به ازای پیشنهاد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۶

### ۱. مقدمه

فرآیند تجدید ساختار و مقررات زدایی از دهه ۸۰ میلادی آغاز گردیده است. تجدید ساختار موجب شکل گرفتن دیدگاه‌های اقتصادی و مطرح شدن مفاهیمی همچون بازار برق شده است. اهداف اصلی تجدید ساختار را می‌توان افزایش کارایی اقتصادی، افزایش رفاه اجتماعی و جذب سرمایه‌های بخش خصوصی، ایجاد فضای رقابتی و شفافیت مالی برشمرد.

در ایران تجدید ساختار صنعت برق با راه اندازی بازار برق کشور از پاییز سال ۱۳۸۳ آغاز شد. در ابتدای تأسیس بازار، عمده نیروگاه‌های شرکت‌کننده دولتی بودند که این امر موجب دور افتادن از اهداف اولیه تشکیل بازار شد ولیکن با خصوصی‌سازی نیروگاه‌ها بتدریج از قدرت بازار آنها کاسته شده و به سمت رقابتی شدن در بخش عمده‌فروشی حرکت کرده‌اند.

بازار برق ایران دارای ویژگی‌های خاصی است که از مهمترین ویژگی‌های این بازار می‌توان به پرداخت به نیروگاه‌ها بر اساس قیمت پیشنهادی<sup>۱</sup> در مقابل پرداخت یکنواخت<sup>۲</sup> نام برد. در شیوه پرداخت بر اساس پیشنهاد، به هر نیروگاه در صورت برنده شدن در بازار بر اساس قیمت پیشنهادی خودش پرداخت انجام می‌گیرد، اما در شیوه پرداخت یکنواخت، به تمام نیروگاه‌های برنده، پرداختی بر اساس قیمت تسویه انجام می‌شود. در این تحقیق، به بررسی مقایسه‌ای شیوه پرداخت بر اساس پیشنهاد و قیمت یکنواخت در میزان قیمت فروش برق و هزینه تمام شده برق پرداخته می‌شود.

باید توجه شود که در حال حاضر، بازار برق ایران در سطح عمده‌فروشی اجرا می‌شود و منظور از مصرف، تقاضای برق در سطح تقاضاکنندگان عمده همچون شرکت‌های توزیع (دولت) بوده و تولید توسط نیروگاه‌های حاضر در شبکه انجام می‌شود. دولت اقدام به خرید برق با قیمت استخراج شده از سازوکار بازار کرده و با پرداخت یارانه، قیمت را تا سطح مورد نظر کاهش داده و به دست مصرف‌کننده نهایی می‌رساند. هرچه قیمت فروش برق در بازار کمتر باشد، میزان یارانه

- 
1. Pay As Bid (PAB)
  2. Uniform Price (UP)

پرداختی دولت کمتر خواهد بود و از طرفی، هر چه هزینه تمام شده برق کمتر باشد، تولید با نیروگاه‌های با بازدهی بالاتر صورت می‌گیرد و این به معنای کاهش مصرف سوخت، کاهش یارانه پرداختی دولت به سوخت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است که منجر به افزایش رفاه می‌گردد.

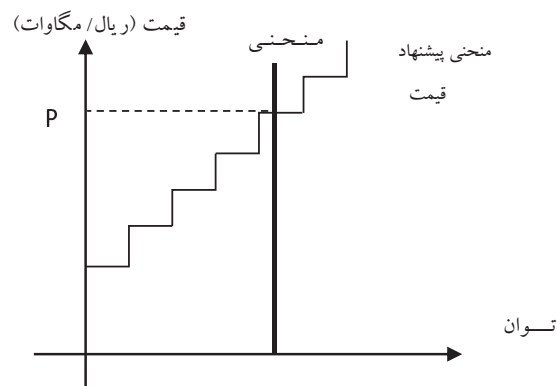
پس از مقدمه، مبانی نظری و سپس پیشینه تحقیق ذکر شده است. در این بخش، مهمترین مطالعات انجام شده داخلی و خارجی که تأثیر شیوه پرداخت را بر قیمت سنجیده اند، مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش بعد، ویژگی‌های بازار برق ایران به طور خلاصه توضیح داده شده است. در بخش مدل تحقیق، روش تحقیق و نمونه مورد استفاده توضیح داده شده است و در بخش پایانی مقاله نیز نتایج استخراج گردیده است.

## ۲. مبانی نظری

روش‌های مختلفی جهت برگزاری مناقصه و تخصیص قیمت به شرکت کنندگان وجود دارد. دو روش که بیشتر از روش‌های دیگر در تمام دنیا کاربرد دارد، روش حراج قیمت یکنواخت و حراج‌های متمایز است که مرسوم‌ترین آنها پرداخت به ازای پیشنهاد فروشنده می‌باشد. در شکل (۱) چگونگی به دست آمدن قیمت تسویه بازار و توان مورد نیاز نشان داده شده است. منحنی پیشنهاد قیمت کل از جمع افقی منحنی پیشنهاد قیمت نیروگاه‌ها به دست آمده است. در دنیای واقعی، منحنی پیشنهاد قیمت نیروگاه‌ها بسته به ویژگی‌های بازار می‌تواند خطی ساده و یا پلکانی باشد. در بسیاری از تحقیقات، منحنی‌های پیشنهاد قیمت به عنوان ضریبی بزرگتر از یک از منحنی هزینه نهایی نیروگاه تعریف می‌شود. این ضریب هم می‌تواند روی عرض از مبدا منحنی یا شیب آن و یا هر دو اعمال گردد.

در این نمودار، نقطه  $p$  قیمت تسویه بازار و نقطه  $q$  مقدار تقاضا در ساعت مورد نظر می‌باشد. باید توجه شود که تقاضای برق به دلیل ویژگی‌های خاص انرژی برق بدون کشش است. از مهمترین

دلایل عمودی بودن منحنی تقاضا، عدم مشاهده و پرداخت آبی هزینه مصرف برق توسط مشترکین است. به عبارت دیگر، تنها زمانی می‌توان مدیریت مصرف را برای مشترکین متصور بود که بتوان از سیستم‌های هوشمند کنترل و قرائت بار مصرفی مشترکین استفاده کرد. از عوامل دیگر بی‌کشش بودن منحنی تقاضا می‌توان به عدم امکان ذخیره سازی برق و ارزان بودن قیمت واقعی آن بویژه در ایران اشاره داشت. در این نمودار، تمام فروشنده‌گانی که در سمت چپ نقطه  $q$  قیمت داده‌اند برنده اعلام می‌شوند و براساس منحنی پیشنهاد قیمت اختصاصی هر نیروگاه، میزان تولید آن مشخص می‌شود.



شکل ۱. چگونگی تعیین قیمت تسویه در بازار برق ایران (در هر ساعت)

در پرداخت یکنواخت، به تمام نیروگاه‌های برنده شده در بازار قیمت تسویه پرداخت می‌شود، اما در روش پرداخت بر مبنای پیشنهاد قیمت، پرداختی به نیروگاه‌های برنده در بازار بر اساس قیمت پیشنهادی آنها خواهد بود. با تجدید ساختار صنعت برق، حراج یکنواخت به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفت، زیرا اقتصاددانان بر این باور بودند که بازار برق توسط این حراج به بیشترین کارایی اقتصادی دست خواهد یافت و در این روش پرداخت، با رفتار بهینه بازیگران، پیشنهاد قیمت از طرف آنان برابر هزینه نهایی خواهد بود، لیکن دغدغه دیگری نیز وجود داشت و آن اینکه عده‌ای

از متخصصان صنعت معتقد بودند چرا در حالی که تولیدکننده حاضر است برای کالای خود مبلغ کمتری درخواست کند، بازار، کالا را گرانتر خریداری نماید. بعلاوه، از منظر اقتصادی نیز در شرایط غیررقابتی، تولیدکنندگان برای دستیابی به سود اقتصادی بالاتر، پیشنهادهای بالاتری ارائه می کنند. بنابراین، ایده جایگزین برای حراج یکنواخت شکل گرفت. در این ایده، طراحی حراج به گونه ای شد که قیمت پرداختی مصرف کنندگان حداقل شده و در عین حال، کل هزینه تولیدکننده را نیز پوشش دهد. بنابراین، حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد قیمت شکل گرفت، اما این نوع حراج نیز دارای معایبی بود که از مهمترین آنها می توان به این سه مورد اشاره داشت: اول، عدم انگیزه کافی تولیدکنندگان برای ارائه پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه نهایی؛ دوم، حدس قیمت تسویه احتمالی توسط تولیدکنندگان و پیشنهاد قیمت در سطحی که بیشترین سود را به دست آورند و سوم اینکه، نیروگاه های با هزینه پایین می توانند قدرت بازاری بسیار بالایی کسب نمایند.

همچنین نیروگاه های شرکت کننده در بازار با روش پرداخت به ازای پیشنهاد می دانند در صورت برنده شدن، امکان فروش انرژی به قیمتی بالاتر از آنچه پیشنهاد داده اند، وجود ندارد که این امر منجر به وابستگی کامل درآمد به استراتژی پیشنهاد قیمت نیروگاه و ایجاد انگیزه برای بازی گرفتن بازار می شود.

در وهله اول به نظر می رسد قیمت فروش در روش پرداخت به ازای پیشنهاد که از میانگین موزون قیمت فروش هر واحد به دست می آید، کمتر باشد، اما رفتار قیمت دهی نیروگاه ها و تعیین استراتژی هایی در راستای افزایش سود منجر می شود که همواره این نتیجه به دست نیاید. نتایج تحقیقات مختلف بیانگر این موضوع است که عملکرد روش پرداخت بستگی به میزان بار مصرفی، محدودیت های شبکه، ظرفیت تولید و ... دارد.

### ۳. پیشینه تحقیق

در این بخش، مهمترین مطالعات انجام شده در زمینه تاثیر روش پرداخت بر قیمت که با کمک الگوریتم Q-learning انجام شده است، ارایه می‌گردد.

مانت<sup>۱</sup> (۱۹۹۹) در مقاله‌ای که می‌توان گفت اولین مطالعه در بازار برق آمریکا در مورد بررسی روشهای پرداخت قیمت است، به این نتیجه رسید که استفاده از روش پرداخت بر اساس پیش‌شهاد قیمت منجر به کاهش نوسانات قیمتی شده و پیش‌بینی قیمت را با خطای کمتری انجام می‌دهد.

در مطالعه‌ای (نصیری، ۱۳۸۷) با استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی سه مدل برای شبیه‌سازی بازار برق ارایه شده است. این مدل‌ها برای بررسی بعضی عوامل تاثیرگذار بر بازار برق استفاده شده‌اند. در مدل‌سازی اول، عامل‌ها با استفاده از الگوریتم Q-Learning برای قیمت دهی در بازار برق با یکدیگر به رقابت می‌پردازند. در این مدل، مسایلی همچون تاثیر تغییرات بار، تغییرات تراکم، افزایش تعداد عامل‌ها بر نحوه قیمت‌دهی عامل‌ها مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه، تاثیر حضور عاملی که برای قیمت‌دهی از استراتژی احتمالی ثابت استفاده می‌کند، مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها در شرایط مشابه نشان می‌دهد عاملی که از الگوریتمی غیر از الگوریتم یادگیری تقویتی برای قیمت‌دهی استفاده می‌کند نسبت به عامل‌های دیگر سود کمتری به دست خواهد آورد. سپس برای بررسی تاثیر تغییر استراتژی شرکت‌کنندگان از حداکثر سود به حداکثر درآمد بر قیمت تسویه، بازار برق به وسیله الگوریتم SA-Q-Learning مدل‌سازی شده و با انجام شبیه‌سازی‌ها به این مساله پرداخته شده است. در بخش انتهایی مطالعه، حراج‌های یکنواخت و تمایزی و تاثیر هر کدام از این حراج‌ها بر قیمت تسویه بازار مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای این منظور با استفاده از الگوریتم SA-Q-Learning یک بازار برق رقابتی که در آن شرکت‌کنندگان به صورت پله‌ای اقدام به قیمت‌دهی می‌کنند مدل‌سازی شده و تفاوت حراج‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج

---

1.Mount

شبیه‌سازی حاکی از بالاتر بودن قیمت تسویه بازار در حراج یکنواخت نسبت به حراج تمایزی در بارهای مختلف بوده است.

در تحقیقی که در سال ۲۰۰۰ توسط بنگال<sup>۱</sup> انجام شده است با شبیه‌سازی بازار برق انگلستان، رفتار بازیگران تحت سازوکارهای قیمت‌گذاری متفاوت بررسی می‌شود. هر عامل باید مبادله‌ای بین دو هدف خود انجام دهد. هدف اول، تعیین استراتژی جهت جلوگیری از ضرر مالی و هدف دوم، پیشینه‌کردن سود می‌باشد. بنابراین، با در نظر گرفتن دو تابع پاداش متناظر با دو هدف ذکر شده و تخمین پاداش دریافتی مورد انتظار از محیط، بهترین عمل انتخاب می‌شود. شبیه‌سازی بازار برق انگلستان در یک مدل ساده شده شامل ۲۱ واحد در ۵ نوع برای دو سازوکار قیمت‌گذاری یکنواخت و پرداخت به ازای پیشنهاد در ۳۰۰۰۰ روز انجام می‌شود. محاسبه هزینه پرداختی برای هر روز نشان می‌دهد در مناقصه یکنواخت، هزینه برق برای مشتری در مقایسه با مناقصه پرداخت به ازای پیشنهاد بیشتر است. از طرفی، مناقصه یکنواخت نوسانات زیادی در قیمت برق ایجاد می‌کند که این موضوع از وابستگی قیمت برق به رفتار بازیگران نشأت می‌گیرد.

باور و بون<sup>۲</sup> (۲۰۰۰ و ۲۰۰۱) در مطالعه‌ای بازار برق انگلستان و ولز را از منظر مقایسه میان سازوکارهای بازار و طرح‌های قیمت‌دهی (قیمت‌گذاری یکنواخت، قیمت‌دهی روزانه و ساعتی در بازار متمرکز و قراردادهای دوطرفه) با استفاده از سیستم‌های چندعاملی مبتنی بر یک الگوریتم یادگیری تقویتی ساده مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق، عامل‌ها استراتژی قیمت‌دهی خود را بر مبنای آخرین مرحله موفقیت‌آمیز تجربه‌شده خود تنظیم می‌نمایند. همچنین از قیود و هزینه‌های سیستم انتقال صرف نظر گردیده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی از طریق مقایسه با مدل‌های کلاسیک انحصار کامل، انحصار دوجانبه و رقابت کامل مورد تایید قرار گرفته است. در قیمت‌گذاری بر اساس پرداخت به ازای پیشنهاد، متوسط قیمت بالاتر بوده و نتایج از بازار رقابتی دورتر می‌باشد.

---

1. Bangal

2. Bower and Bunn

زیانگ، هاشی‌یاما و اوکوما<sup>۱</sup> (۲۰۰۲) در مطالعه‌ای از الگوریتم Q-Learning به منظور مقایسه میزان قیمت و نحوه نوسانات آن در بازار برق در سازوکار قیمت‌گذاری یکنواخت و تمایزی استفاده کرده‌اند. در این مدل، قیمت بازار در مرحله پیشین به عنوان حالت محیط در نظر گرفته شده و مجموعه عمل‌های ممکن هر بازیگر مجموعه‌ای گسسته از قیمت پیشنهادی واحد تولیدی می‌باشد. در این تحقیق برای ایجاد مصالحه میان جستجوی محیط و بهره‌برداری از اطلاعات از روش  $\epsilon$ -greedy استفاده شده است. مدل در قالب ۴ سناریو شبیه‌سازی شده است که دو سناریو مربوط به پرداخت یکنواخت با تقاضای با کشش و بی‌کشش و دو سناریو مربوط به روش پرداخت بر اساس قیمت پیشنهادی با تقاضای کشش‌دار و بی‌کشش است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر کمتر بودن متوسط قیمت برق و نوسانات آن در حراج تمایزی نسبت به حراج یکنواخت است.

فابرا، وان در فر و هاربرد<sup>۲</sup> (۲۰۰۲) در مطالعه خود به مقایسه سه نوع حراج یکنواخت، پرداخت به ازای پیشنهاد و تعمیم یافته قیمت دوم در بازار برق کالیفرنیا پرداخته‌اند. در حراج نوع سوم، برندگان بازار به جهتی پیش می‌روند که هزینه نهایی از آنها اخذ گردد. نتایج نشان می‌دهد حراج نوع سوم منجر به کاهش قیمت و افزایش مازاد رفاه مصرف‌کننده بویژه در بازاری متشکل از بنگاه‌های کوچک می‌شود.

ابینک و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۳) با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و تجربی، خروجی‌های حراج یکنواخت و تبعیض‌آمیز را تحت شرایط عدم قطعیت در تقاضا بررسی کرده‌اند. این مطالعه برای حالتی که تمام فروشندگان اطلاعات یکسانی دارند و شرایطی که برخی اطلاعات بهتری دارند، انجام شده است. آنان دریافتند که در هر دو شرایط، میانگین قیمت‌های معامله و نوسانات قیمتی،

- 
1. Xiong, Hashiyama and Okuma
  2. Fabra, Von Der Fehr and Harbord
  3. Abbink, et al

تحت دو حراج، تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشتند، اما در شرایطی که فروشنده‌گان اطلاعات یکسانی ندارند، حراج تبعیض‌آمیز به طور قابل توجهی ناکارتر است.

زیانگ، اوکوما و فوجیتا (۲۰۰۴) در مطالعه‌ای دو روش قیمت دهی یکنواخت و قیمت بر اساس پیشنهاد را با استفاده از شبیه‌سازی چند عاملی<sup>۱</sup> مقایسه می‌نمایند. هر عامل نماینده یک نیروگاه است که در بازار برق مبتنی بر مناقصه یک روز جلوتر شرکت می‌کند. هر شرکت کننده در بازار با بهره‌گیری از تجربیات گذشته در قیمت دهی، در جهت حداکثر کردن سود خود در بلندمدت تلاش می‌کند. در مناقصه یکنواخت، قیمت بازار همان قیمت نهایی است در حالی که در مناقصه پرداخت به ازای پیشنهاد، قیمت بازار به شکل متوسط قیمت‌های پیشنهادی پذیرفته شده تعریف می‌شود. پیشنهاد قیمت شرکت کنندگان در مناقصه یکنواخت در مقایسه با مناقصه پرداخت به ازای پیشنهاد، بسیار کمتر از قیمت بازار می‌باشد. به عبارت دیگر برای شرکت کنندگان در مناقصه یکنواخت، پذیرش پیشنهاد قیمت آنها از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است در حالی که شرکت کنندگان در مناقصه پرداخت به ازای پیشنهاد سعی می‌کنند پیشنهاد قیمت را در نزدیکی قیمت بازار انجام دهند. نوسانات قیمت در مناقصه پرداخت به ازای پیشنهاد کمتر از مناقصه یکنواخت است.

کراسو و اندرسن<sup>۲</sup> (۲۰۰۶) در مطالعه‌ای نشان داده‌اند رفتار شرکت های تولیدی با استفاده از الگوریتم Q-Learning جهت مقایسه و ارزیابی طرح های مختلف مدیریت تراکم شامل قیمت گذاری حاشیه‌ای محلی، تقسیم بازار و اتصال بازار بر پایه توان انتقالی<sup>۳</sup> مدل سازی شده‌اند. رفاه اجتماعی به عنوان معیار مقایسه میان طرح های مختلف انتخاب شده و شبیه‌سازی برای دو حالت رقابت کامل و انحصار چندجانبه انجام گردیده است. بر اساس نتایج ارائه شده، سازوکار قیمت گذاری

- 
1. Multi-Agent Simulation
  2. Krausi and Andersson
  3. Flow-Based Market Coupling

حاشیه‌ای محلی موجب حصول بیشترین رفاه اجتماعی در هر دو حالت رقابتی و انحصار چندجانبه می‌گردد.

بنگال و اسمیت<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) در مطالعه خود از سیستم طبقه‌بندی کننده یادگیری به منظور دست‌یابی به استراتژی قیمت‌دهی بهینه جهت پیاده‌سازی در بازار برق انگلستان استفاده کرده‌اند. در این مطالعه، رفتار بازیگران به ازای سازوکارهای قیمت‌گذاری یکنواخت و تمایزی تحلیل شده است. هر عامل دو هدف مرتبط با یکدیگر را که توسط دو تابع پاداش مجزا مدل شده‌اند، دنبال می‌نماید. جلوگیری از ضرر و حداکثر نمودن سود از دو سیستم طبقه‌بندی کننده یادگیری جهت یادگیری قواعد دست‌یابی به اهداف استفاده می‌گردد. بنابراین، با در نظر گرفتن دو تابع پاداش متناظر با دو هدف ذکر شده و تخمین پاداش دریافتی مورد انتظار از محیط، بهترین عمل انتخاب می‌شود. در این شبیه‌سازی، سه سوال اساسی پیگیری شده است: اول اینکه، آیا عامل‌ها خواهند آموخت تا رفتاری نظیر آنچه در دنیای واقعی روی می‌دهد، داشته باشند؟ دوم، سازوکار بازار چه تغییر رفتاری در بازیگران ایجاد می‌نماید؟ و سوم اینکه، آیا عامل‌ها همکاری با یکدیگر را خواهند آموخت؟

محاسبه هزینه پرداختی برای هر روز نشان می‌دهد در مناقصه یکنواخت، هزینه برق برای مشتری در مقایسه با مناقصه تمایزی، بیشتر تمام می‌شود. از طرفی، مناقصه یکنواخت، نوسانات زیادی در قیمت برق ایجاد می‌کند که این موضوع از وابستگی قیمت برق به رفتار بازیگران نشأت می‌گیرد. تایرنی، اسشاتزکی و موکرچی<sup>۲</sup> (۲۰۰۷) در تحقیقی به این نتیجه رسیده‌اند که شیوه پرداخت قیمت بر اساس پیشنهاد در مقابل پرداخت یکنواخت منجر به افزایش قیمت‌ها، کاهش در کارایی تولید و کاهش سرمایه‌گذاری می‌گردد.

گنج بخش (۲۰۰۸) به مطالعه خروجی‌های ممکن بازار برق انحصار چند جانبه تحت قیمت‌گذاری پرداخت به ازای پیشنهاد، پرداخته است. در این پژوهش، تولیدکنندگان به دو بخش تولیدکنندگان

---

1. Bangal and Smith  
2. Tierney, Schatzki and Mukerji

نهایی و غیرنهایی تقسیم شده‌اند. منظور از تولیدکننده نهایی، تولیدکننده‌ای است که با ظرفیتی بین حداقل و حداکثر ظرفیت خود تولید کند. نتایج پژوهش او نشان می‌دهد تولیدکنندگان غیرنهایی، سود کمتری به دست می‌آورند ضمن آنکه مصرف‌کنندگان تحت این قیمت‌گذاری، میانگین قیمت‌های پایین‌تری پرداخت می‌کنند.

بری<sup>۱</sup> (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای به مقایسه قیمت‌گذاری یکنواخت و تبعیض‌آمیز در حراج‌های برق پرداخته است. این مقاله نشان می‌دهد در حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد، پیشنهادها بالاتر از هزینه هستند در حالی که در حراج یکنواخت، پیشنهادها با هزینه برابری می‌کنند. همچنین در حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد، با تابع توزیع احتمال یکنواخت، سود نهایی با افزایش پیشنهاد، افزایش می‌یابد. بر اساس این مطالعه، گرچه حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد منجر به میانگین قیمت‌های بالاتری نسبت به حراج یکنواخت می‌شود، اما واریانس کمتری دارد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نظر قاطع و یکسانی در مورد برتری هیچیک از انواع حراج از جنبه‌های مختلف وجود ندارد. کارکرد هر نوع حراج بسته به ساختار بازار مورد مطالعه و همچنین چگونگی رفتار بازیگران نتایج متفاوتی را به دست می‌دهد. بنابراین، به نظر می‌رسد بهترین روش جهت بررسی این موضوع استفاده از الگوریتم‌های هوشمند بوده که شبیه‌سازی‌های خود را بر اساس تجربیات گذشته و اطلاعات واقعی بازار قرار می‌دهند.

#### ۴. ویژگی‌های بازار برق ایران

در بازار برق، پیشنهاد قیمت و توان ممکن است از چند روز قبل تا چند ساعت قبل به صورت ساعتی یا کمتر از یک ساعت بوده و قیمت و توان پیشنهادی فروشندگان و خریداران در اختیار مدیر بازار قرار گیرد. در بازار برق ایران، فرم‌های پیش‌نویس پیشنهاد قیمت و توان سه روز قبل به صورت ساعتی توسط فروشندگان (نیروگاه‌ها) در اختیار مدیر بازار قرار می‌گیرد که ویرایش‌هایی آنها تا

1. Berry

ساعت ده صبح روز قبل می‌باشد. این پیشنهاد قیمت‌ها به صورت محرمانه بوده و سایر تولیدکنندگان از آن بی‌خبر هستند. مدیر بازار پس از دریافت منحنی‌های پیشنهاد قیمت و توان که اغلب به صورت پله‌ای و حداکثر در ده پله تنظیم شده است، آنها را در هر ساعت به صورت نزولی برای خریداران و صعودی برای فروشندگان مرتب نموده و از محل تقاطع آنها که مو سوم به قیمت نهایی تسویه بازار<sup>۱</sup> است، برندگان بازار مشخص می‌شود. مدیر بازار انجام عملیات خرید و فروش برق، ساماندهی تبادل اطلاعات و مبادلات مالی با فروشنده‌ها و خریدارها را انجام می‌دهد.

لازم به ذکر است که بازار برق ایران به صورت حراج<sup>۲</sup> یکطرفه بوده و خریداران برق در تعیین قیمت برق نقشی ندارند. به عبارت دیگر، واحد اجرایی بازار بر اساس پیش‌بینی نیاز مصرف کل خریداران از کمترین قیمت پیشنهاد انرژی اقدام به خرید میزان تقاضای اعلام شده می‌نماید. در قراردادهای دوطرفه، مناظره و بحث بین دو طرف عرضه‌کننده و تقاضاکننده در قیمت و مقدار اتفاق می‌افتد. از آنجا که در بازار برق ایران رقابت اصلی در طرف تولید است و سیستم انتقال همچنان انحصاری بوده و بازار خرده‌فروشی وجود ندارد، مسایل قیمت‌دهی بیشتر متوجه تولیدکنندگان می‌باشد.

بازار برق ایران در فضای عمده فروشی است که عرضه‌کنندگان آن نیروگاه‌ها و تقاضاکنندگان آن شرکت‌های توزیع برق می‌باشد. شرکت‌های برق منطقه‌ای به عنوان مالک شبکه انتقال و فوق‌توزیع وظیفه انتقال برق از تولیدکننده به مصرف‌کننده را دارند. بخش خرده‌فروشی بازار برق ایران که رابط بین شرکت‌های توزیع و مشترکین است، هنوز شکل نگرفته و دولت با پرداخت یارانه، قیمت پرداختی به مصرف‌کننده نهایی را به سطح دستوری می‌رساند.

---

1. Marginal Clearing Price (MCP)

2. Auction

روش پرداخت به نیروگاه های برنده بر اساس پیشنهاد قیمت خودشان بوده که این مقاله سعی دارد به مقایسه این شیوه پرداخت با شیوه پرداخت یکنواخت در قیمت فروش و هزینه تمام شده برق بپردازد.

## ۵. مدل تحقیق

از زمان شکل گیری بازار برق همواره بازیگران بازار به دنبال پیدا کردن روش بهینه جهت حداکثر کردن سود خود بوده اند. با توجه به خصوصیات بازار برق، این بازارها عمدتاً در قالب انحصار چند جانبه فعالیت می نمایند که سود هر بازیگر در این بازار به رفتار سایر بازیگران مرتبط می باشد و رفتار هر بازیگر استراتژی سایر بازیگران را تحت تأثیر قرار می دهد. روش های مختلفی برای تعیین استراتژی قیمت دهی نیروگاه ها وجود دارد که از مهمترین آنها می توان به تخمین قیمت تسویه، پیش بینی رفتار سایر رقبا و نظریه بازی ها اشاره داشت. این روشها به روش های کلاسیک مشهور است که در عین سادگی اجرا، هر کدام دارای معایب محدود کننده فراوان می باشند. در دو روش اول، تعامل بازیگران و تأثیر رفتار بازیگران بر تصمیم گیری های قیمت دهی آنان در نظر گرفته نشده است در حالی که سیستم های اقتصادی پویا بر اساس تعامل بازیگران آن رشد می کند. در روش نظریه بازی ها، به رغم اینکه تعامل بازیگران وارد مدل شده است، اما به دلیل فرض محدود کننده اطلاعات کامل بازیگران، با واقعیات بازارهای برق بسیار فاصله داشته و نمی تواند محیط واقعی بازار را بخوبی نشان دهد. همچنین این روش ها در تبیین پویایی سیستم ناتوان هستند. به دلایل گفته شده، محققان در سال های اخیر به سمت اقتصاد تجربی<sup>۱</sup> روی آورده اند که شالوده آن بر تعیین استراتژی بر اساس تجربیات بنا شده است. ایجاد فضای آزمایشگاهی به عنوان نمونه ای از جامعه جهت آزمون نتایج اجرای یک سیاست از مهمترین ابزارهای کاربردی اقتصاد تجربی است. این روش علاوه بر هزینه بر و زمان بر بودن، دو مشکل اساسی دارد: اول اینکه، تضمین کننده این نیست که انسانها تحت

شرایط آزمایشگاهی رفتار واقعی خود را ابراز کنند و دوم اینکه، محیط تجربی ممکن است از محیط واقعی متفاوت باشد. البته باید یادآور شد که آزمایش‌ها تحت بسیاری از شرایط نمی‌توانند اجرا شوند. با رشد فناوری اطلاعات استفاده از شبیه‌سازی توسط رایارانه متداول گردیده که به الگوریتم‌های هوشمند مشهور هستند. از مهمترین زیر شاخه‌های این الگوریتم‌ها، مدل‌های یادگیری تقویتی است که عوامل آن با کسب تجربه و بازخور محیط (پاداش)، رفتار بهینه را کشف می‌کنند. به طور کلی، آزمایش‌ها در مدل‌های یادگیری تقویتی چهار عنصر خط مشی (سیاست یا استراتژی)، تابع پاداش<sup>۱</sup>، تابع ارزش و مدل محیط وجود دارد. این الگوریتم شامل سه مجموعه عمل‌ها، حالت‌های محیط و پاداش می‌باشد. عمل‌ها یا فعالیت‌ها توسط عامل‌ها انجام می‌شود. انجام این عمل دو واکنش را در بر دارد: اول، حالت محیط تغییر کرده و دوم، پاداشی از طرف محیط به عامل داده می‌شود. عامل با توجه به پاداش دریافتی، میزان مطلوب بودن فعالیت خود را یاد می‌گیرد. هدف عامل حداکثر کردن پاداش‌های دریافتی از محیط می‌باشد. نحوه رفتار عامل جهت رسیدن به هدف را استراتژی می‌گویند. به عبارت دیگر، استراتژی نحوه انتخاب عمل در حالات مختلف را برای عامل تصمیم گیرنده معین می‌کند. استراتژی بزرگترین مجهول مساله یادگیری تقویتی است و عامل باید به دنبال سیاست و استراتژی باشد که میزان پاداش دریافتی او را پس از مدت زمان طولانی از اجرای الگوریتم بیشینه کند. استراتژی انجام عمل، نگاهی از حالات به فضای اعمال است. تابع پاداش، هدف را در مساله یادگیری تعریف می‌کند. تابع پاداش نگاهی از حالت ادراک شده محیط به یک عدد واحد یا همان پاداش می‌باشد. تابع پاداش نشان می‌دهد چه عملی مناسب و چه عملی مناسب نیست و به مفهوم دقیق‌تر، هر عمل تا چه اندازه‌ای مناسب است. تابع ارزش مشخص کننده خوب یا بد بودن عمل انجام شده در بلندمدت است. به عبارت دیگر، تابع ارزش یک حالت، مجموع کل پاداشی است که یک عامل انتظار دارد هنگامی که از این حالت

---

### 1. Reward Function

حرکت را شروع می کند، به دست آورد و آنچه مهم است، مجموع پاداش ها در بلندمدت است، نه پاداش لحظه ای که عامل از انجام یک عمل به دست می آورد. در این مقاله، تابع ارزش از مجموع پاداش ها که با نرخ مناسب کاهشی تنزیل یافته اند، به دست آمده است. در معادله (۱) چگونگی به دست آمدن تابع ارزش بهینه نشان داده شده است.

$$V^*(s) = \max_{\pi} E \left( \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t \right) \quad (1)$$

در این معادله،  $V$  بیانگر تابع ارزش بهینه،  $\pi$  استراتژی معادله، ضریب کاهشی (می توان از آن به نرخ بهره، نرخ مطلوبیت نقدینگی زمانی و... تعبیر کرد)،  $\gamma$  پاداش هر دوره یادگیری می باشد. با استفاده از برنامه ریزی دینامیکی، معادله (۱) را می توان به صورت معادله (۲) نوشت:

$$V^*(s) = \max_a \left( R(s,a) + \gamma \sum_{s' \in S} T(s,a,s') V^*(s') \right), \forall s \in S \quad (2)$$

در این معادله،  $R(s,a)$  تابع پاداش در حالت  $s$  به دلیل فعالیت  $a$  است. تابع ارزش بهینه برابر با مجموع پاداش فعلی و تابع ارزش بهینه دوره های بعد می باشد. در این معادله،  $T(s,a,s')$  بیانگر احتمال رفتن به حالت  $s'$  پس از حالت  $s$  و عمل  $a$  می باشد. مقدار بهینه در هر حالت، مجموع پاداش لحظه ای و مقدار بیشینه کاهش یافته مورد انتظار حالت بعدی می باشد که در اثر انجام عمل بهینه (عملی با بیشترین پاداش) به دست می آید. در نتیجه، بعد از محاسبه تابع مقدار بهینه، استراتژی بهینه از رابطه (۳) تعیین می شود.

$$\pi^*(s) = \arg \max_a \left( R(s,a) + \gamma \sum_{s' \in S} T(s,a,s') V^*(s') \right), \forall s \in S \quad (3)$$

با کمک الگوریتم تکرار می توان استراتژی بهینه را در تکرارهای مورد نظر به دست آورد.

الگوهای یادگیری تقویتی به دو دسته کلی الگوهای مدل محور و مستقل از مدل تقسیم می‌گردند. در الگوهای مدل محور، استراتژی بهینه در قالب یک مدل قابل تبیین بوده و بر آن اساس، ارزش بهینه به دست می‌آید. این الگوها مناسب سیستم‌هایی با متغیرهای تاثیرگذار کمتر می‌باشند که قابلیت تبیین در یک مدل را دارند. در مقابل، در الگوهای مستقل از مدل، مقدار بهینه بر اساس تجربیات و انجام تکرارهای مختلف به دست می‌آید. بازارهای برق بر اساس پیچیدگی‌های درونی، تعدد متغیرهای بیرونی تاثیرگذار و وابستگی به شرایط و ویژگی‌های بازار به کمک الگوهای مستقل از مدل شبیه‌سازی می‌گردند. از مهمترین این الگوها که همگرایی در آنها با سرعت و دقت مناسب تضمین شده است، الگوریتم Q-Learning می‌باشد.

الگوریتم Q-Learning دارای تابعی است که ترکیب حالت-عمل را محاسبه می‌نماید و به آن اصطلاحاً تابع Q گفته می‌شود که همان تابع ارزش یادگیری تقویتی است. به عبارت دیگر، به جای اینکه نگاهی از حالت‌ها به تابع ارزش باشد، از زوج حالت-عمل به تابع Q است و مقدار ارزش را در هر حالت و عمل (Q(s,a)) بیان می‌کند.

قبل از شروع یادگیری، مقدار اولیه و اختیاری به خود می‌گیرد. سپس هر بار که به عامل پاداش داده می‌شود، مقادیر جدیدی برای هر ترکیب حالت-عمل محاسبه می‌گردد. هسته الگوریتم از یک بروزسانی تکراری ساده تشکیل شده است، به این ترتیب که بر اساس اطلاعات جدید، مقادیر قبلی اصلاح می‌شود. میزان اصلاح اطلاعات بستگی به نرخ یادگیری دارد.

استراتژی در این روش با استفاده از رابطه (۴) به دست می‌آید. به عبارتی، در هر حالت استراتژی متناظر با حداکثر  $Q^*$  یعنی  $\pi^*$  انتخاب می‌گردد.

$$\pi^*(s) = \arg \max_a Q^*(s, a) \quad (۴)$$

## 1. Q- Function

بنابراین، تابع مقدار می تواند از معادله زیر به دست آید.

$$Q^*(s, a) = R(s, a) + \gamma \sum_{s' \in S} T(s, a, s') \max_{a'} Q^*(s', a') \quad (5)$$

با توجه به اینکه مقدار تابع Q انتخاب عمل مورد نظر را آسان می کند می توان از روش TD<sup>1</sup> (0) برای تخمین تابع Q مطابق رابطه (6) استفاده کرد.

$$Q(s, a) = Q(s, a) + \alpha(r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)) \quad (6)$$

معادله بالا را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$Q(s, a) = (1 - \alpha)Q(s, a) + \alpha(r + \gamma \max_{a'} Q(s', a')) \quad (7)$$

در این رابطه،  $\alpha$  نرخ یادگیری است که تعیین می کند تا چه میزان اطلاعات بدست آمده جدید بر اطلاعات قدیمی ترجیح داده شود. مقدار صفر باعث می شود عامل چیزی یاد نگیرد و مقدار یک باعث می شود عامل فقط اطلاعات جدید را ملاک قرار دهد.

از مسایل بسیار مهم برای هر عامل، مصالحه بین میزان بهره برداری از اطلاعات<sup>2</sup> و جستجوی محیط<sup>3</sup> می باشد. بهره برداری از اطلاعات در دسترس به این معناست که بهترین عمل با توجه به نتایج و تجربیاتی که تاکنون بدست آمده، انتخاب شود. اما آیا همواره عملی که بهترین نتیجه را در برداشته انتخاب شده یا محیط را بایستی بیشتر جستجو کرده و از اعمال دیگر تجربه بیشتری کسب گردد. روش های زیادی برای انتخاب عمل مناسب با در نظر گرفتن مصالحه وجود دارد. یکی از بهترین روشها که کاربرد زیادی بویژه در الگوی Q-Learning دارد، روش  $\epsilon$ -greedy است. در ابتدای

1. Temporal Difference
2. Exploitation
3. Exploration

جستجوی محیط، ممکن است پاداش ناشی از اجرای عمل بهینه کمتر از سایر اعمال بهینه محلی باشد. بنابراین، یک عامل چنانچه تنها مبنی بر انتخاب عمل با پاداش حداکثر رفتار کند، ممکن است از عمل بهینه دور شده و اصطلاحاً در یک نقطه بهینه محلی توقف کند. در نتیجه، با انتخاب شاخصی تحت عنوان  $\varepsilon$  که مقدار کوچکی است، اعمال غیر از عمل بهینه در هر حالت با احتمال  $\varepsilon$  انتخاب می شوند. با استفاده از این روش، عامل با جستجوی بیشتری، اطمینان خود را در دست یابی به جواب بهینه افزایش می دهد.

مقادیر پارامترهای مدل شامل  $\alpha$ ،  $\gamma$  و  $\varepsilon$  در تکرارهای اولیه به گونه ای انتخاب می شود که یادگیر غیر حریصانه رفتار نماید، اما با افزایش تکرارها یادگیر کم کم حریص شده و جستجوگری را کاهش می دهد. بدین منظور، مقادیر پارامترها در سه مرحله در طول یادگیری تغییر می یابد. یک عامل حریص نسبت به اطلاعات جدید، حریصانه رفتار می کند ( $\alpha$  بزرگ) و برای پاداشی که ممکن است در آینده دریافت کند، ارزش کمی قائل است ( $\gamma$  کوچک). یک عامل با این مشخصه میل زیادی به انتخاب عمل متناظر با حداکثر ارزش دارد و با انجام سایر عمل ها ریسک نمی کند ( $\varepsilon$  کوچک). به عبارت دیگر، عامل ریسک گریز بهره برداری از اطلاعات را به جستجوی بیشتر محیط ترجیح می دهد در حالی که عامل ریسک پذیر نسبت به اطلاعات حریصانه رفتار نمی کند و جهت دست یابی به شانس های بیشتر ریسک بیشتری کرده و جستجوی بیشتری انجام می دهد.

با توجه به آنچه گفته شد، یادگیری در سه مرحله انجام خواهد شد که مقادیر پارامترها در شکل زیر نشان داده شده است.

$$\begin{array}{lll} \text{الف} & \left\{ \begin{array}{l} \alpha = 0.7 \\ \gamma = 0.3 \\ \varepsilon = 0.1 \end{array} \right. & \text{ب} & \left\{ \begin{array}{l} \alpha = 0.8 \\ \gamma = 0.2 \\ \varepsilon = 0.05 \end{array} \right. & \text{ج} & \left\{ \begin{array}{l} \alpha = 0.9 \\ \gamma = 0.1 \\ \varepsilon = 0.0005 \end{array} \right. \end{array}$$

شکل ۲. مقادیر پارامترهای مدل. الف: مرحله اول از تکرار ۰ تا ۶۰۰ ب: مرحله دوم از تکرار ۶۰۰ تا ۸۰۰ ج: مرحله سوم از تکرار ۸۰۰ تا ۱۰۰۰

در مقاله پیش‌رو، محیط مدل بازار برق خراسان است. روش واقعی پرداخت در این بازار به صورت تبعیضی و پرداخت به ازای پیشنهاد می‌باشد. عامل‌های مدل شامل نیروگاه‌های حرارتی در محدوده مذکور است. در بازار برق خراسان، ۸ نیروگاه حرارتی شامل ۴۸ واحد نیروگاهی فعالیت می‌کنند. برای در نظر گرفتن مبادله با شبکه برق سراسری یک واحد ۵۰۰ مگاواتی دیگر نیز در نظر گرفته شده است. شبکه انتقال و فوق توزیع ۱۵۸ باسه وظیفه انتقال برق را بر عهده داشته و محدودیتها و پراکنش بار آن قاعدتا بر روی نتایج تاثیرگذار خواهد بود. عمل در این مدل همان ارایه پیشنهاد قیمت توسط نیروگاه‌هاست. انجام هر عمل دو واکنش دارد: اولاً، حالت محیط تغییر می‌کند، حالت در اینجا، قیمت تسویه بازار در تکرار قبلی است و ثانیاً، پاداشی از طرف محیط به عامل داده می‌شود که برابر با سود تولیدکننده است.

برای رسیدن به تابع هدف و همگرا شدن به سمت آن، مدل در ۱۰۰۰ تکرار اجرا شده که به دلیل ماهیت تصادفی بودن الگوریتم، هر تکرار میانگین ۱۰ تکرار در آن حالت و عمل می‌باشد. برای یافتن تاثیر بار در نتایج، مدل در سه دوره مستقل کم باری، بار عادی و پیک اجرا شده و با ترکیب این دوره‌ها، نتایج برای کل سال تعمیم داده می‌شود. در دوره کم باری میزان تقاضای بار در خراسان ۱۴۰۰ مگاوات، در دوره بار عادی ۲۴۵۰ مگاوات و در دوره پیک ۳۵۰۰ مگاوات در نظر گرفته شده است.

برای بررسی تاثیر روش پرداخت بر قیمت فروش و هزینه تمام شده، مدل در دو سناریو اجرا می‌شود. در یک سناریو، بازار برق خراسان با تمام ویژگی‌های آن همچون روش پرداخت به ازای پیشنهاد، مقدار تقاضای ثابت برای هر دوره، در نظر گرفتن قيود حداقل و حداکثر تولید واحدها، اعمال سقف برای پیشنهاد قیمت و ... اجرا شده و قیمت فروش و هزینه تمام شده برق به دست می‌آید. در این سناریو، قیمت فروش برق برای هر واحد برنده برابر با پیشنهاد قیمت خودش می‌باشد.

بنابراین، جهت یافتن قیمت فروش کل بایستی از میانگین موزون قیمت پرداختی به نیروگاه به نسبت تولید آن استفاده کرد که از معادله زیر حساب می شود.

$$P_{bp} = \frac{\sum_{i=1}^I P_{ni} \times q_i}{\sum_{i=1}^I q_i} \quad (۸)$$

در این معادله،  $P_{bp}$  قیمت فروش برق در روش پرداخت به ازای پیشنهاد،  $P_{ni}$  پیشنهاد قیمت واحد  $i$ ،  $q_i$  تولید نیروگاه  $i$ ام و  $I$  تعداد کل نیروگاهها تعریف می شود.

برای محاسبه هزینه تمام شده، هزینه کل بر مقدار تولید تقسیم می شود. تابع هزینه تابع درجه دو در نظر گرفته شده که بر اساس عملکرد واقعی نیروگاههای مورد بررسی به دست آمده است. شایان ذکر است که محاسبات نشان می دهد سهم بالایی از هزینه های یک نیروگاه، هزینه های سوخت مصرفی می باشد.

در سناریوی دیگر، قیمت فروش و هزینه تمام شده برق برای روش پرداخت یکنواخت محاسبه می شود. در این روش، قیمت فروش برای همه واحدها یکسان و برابر با قیمت تسویه بازار است.

## ۶. نتایج مدل

در این بخش، قیمت فروش برق به دولت و هزینه تمام شده برق برای تولید کننده در سه دوره کم باری، بار عادی و پیک برای دو روش پرداخت یکنواخت و پرداخت به ازای پیشنهاد محاسبه و با هم مقایسه می گردد.

همان طور که گفته شد، در روش پرداخت یکنواخت، قیمت فروش برای همه واحدها یکسان و برابر با قیمت تسویه بازار و در روش پرداخت به ازای پیشنهاد برابر با میانگین موزون پیشنهاد قیمت واحدهای برنده می باشد.

در جدول (۱) قیمت فروش برق برای دوره‌های مختلف در دو روش با هم مقایسه شده است.

### جدول ۱. قیمت فروش برق در روش‌های پرداخت یکنواخت و پرداخت به ازای پیشنهاد

ریال به کیلووات ساعت

| دوره     | پرداخت یکنواخت | پرداخت به ازای پیشنهاد |
|----------|----------------|------------------------|
| کم باری  | ۲۰۲            | ۲۲۵/۸                  |
| بار عادی | ۲۲۱            | ۲۰۲/۶                  |
| پیک      | ۳۰۰/۷۷         | ۲۴۵/۴۶                 |

مأخذ: یافته‌های تحقیق

در دوره کم باری، بر خلاف تصور، قیمت فروش برق در حالت یکنواخت کمتر از روش پرداخت به ازای پیشنهاد می‌باشد، چرا که در ساعات کم باری پیشنهاد قیمت واحدها در پرداخت یکنواخت بسیار پایین‌تر از روش پرداخت به ازای پیشنهاد است. بنابراین، در این دوره در پرداخت یکنواخت، دولت متحمل هزینه کمتر در تامین برق می‌گردد. با توجه به نیاز ۱۴۰۰ مگاواتی بار در این دوره، تامین برق نسبت به روش پرداخت به ازای پیشنهاد، صرفه‌جویی ۳۳ میلیون ریالی برای دولت در بر خواهد داشت.

در دوره بار عادی، قیمت فروش در روش پرداخت به ازای پیشنهاد کمتر از روش یکنواخت است، حتی قیمت فروش در این روش نسبت به ساعت کم باری کمتر شده است، چرا که افزایش تقاضای بار فرصت کافی به نیروگاه‌های کوچکتر داده و منجر به افزایش رقابت بین واحدهای تولیدی شده است. در دوره بار عادی با توجه به نیاز ۲۴۵۰ مگاواتی، روش پرداخت به ازای پیشنهاد، صرفه‌جویی ۴۵ میلیون ریالی در هزینه‌های دولت برای تامین برق خراسان در سطح عمده فروشی به ارمغان می‌آورد.

در دوره پیک بار، قیمت فروش در روش پرداخت به ازای پیشنهاد کمتر است که این روش نسبت به روش یکنواخت منجر به صرفه جویی ۱۹۴ میلیون ریالی در هزینه‌های دولت برای یک ساعت تامین برق استان‌های خراسان می‌گردد.

در روش پرداخت یکنواخت، به طور میانگین افزایش یک واحد تقاضا ۵۱٪. واحد قیمت را افزایش می‌دهد. البته در بارهای کمتر این افزایش قیمت بسیار کمتر بوده و با افزایش بار، این افزایش قیمت افزایش می‌یابد به طوری که بین دوره کم باری تا بار عادی این افزایش قیمت ۱۶٪. واحد و بین بار عادی تا پیک این افزایش قیمت ۸۷٪. واحد می‌باشد.

در روش پرداخت به ازای پیشنهاد، با افزایش یک واحد بار میزان قیمت فروش حدود ۱۷۵٪. افزایش می‌یابد که این تغییرات قیمت بسیار کمتر نسبت به حالت یکنواخت است. به عبارت دیگر، قیمت در این روش کم‌کشش‌تر خواهد بود. در این روش، کشش ابتدا منفی و سپس مثبت می‌شود. اگر فرض شود از ۸۷۶۰ ساعت کل سال، ۲۹۲۰ ساعت کم باری، ۴۳۸۰ ساعت بار عادی و ۱۴۶۰ ساعت پیک باشد، میزان هزینه‌های دولت برای تامین برق خراسان بزرگ در یک سال در دو روش برای حالت با شبکه طبق جدول (۲) به دست می‌آید.

## جدول ۲. هزینه‌های دولت جهت تامین برق در سطح عمده فروشی

میلیون ریال

| دوره             | پرداخت یکنواخت | پرداخت به ازای پیشنهاد | تفاوت روش ۱ به ۲ |
|------------------|----------------|------------------------|------------------|
| کم باری          | ۸۲۵،۷۷۶        | ۹۲۱،۳۵۳                | -۹۵،۵۷۷          |
| عادی             | ۲،۳۷۱،۵۵۱      | ۲،۱۷۴،۱۰۱              | ۱۹۷،۴۵۰          |
| پیک              | ۱،۵۳۶،۹۳۵      | ۱،۲۵۴،۳۰۱              | ۲۸۲،۶۳۴          |
| جمع کل           | ۴،۷۳۴،۲۶۲      | ۴،۳۴۹،۷۵۵              | ۳۸۴،۵۰۷          |
| تفاوت روش ۱ از ۲ |                | ۳۸۴،۵۰۷                |                  |

مأخذ: یافته‌های تحقیق

هزینه تامین برق خراسان بزرگ برای دولت در سطح نیروگاه‌ها برای یک سال، ۴۷۳۰ میلیارد ریال در روش یکنواخت و ۴۳۵۰ میلیارد ریال در روش پرداخت به ازای پیشنهاد است. (این هزینه بر اساس میزان پرداختی دولت به نیروگاه‌های خراسان بر اساس قیمت خرید از بازار است). بنابراین، تامین برق با روش دوم منجر به صرفه جویی ۳۸۰ میلیارد ریالی در هزینه‌های دولت برای یک سال خواهد شد. از این میزان، حدود ۱۰۰- میلیارد ریال در ساعات کم باری، ۲۰۰ میلیارد ریال در ساعات بار عادی و ۲۸۰ میلیارد ریال در ساعات پیک رخ می‌دهد.

در جدول (۳) هزینه تمام شده برق که طبق معادلات (۲) و (۳) به دست آمده است برای دوره‌های مختلف در دو روش با هم مقایسه می‌گردد.

جدول ۳. هزینه تمام شده برق در روش‌های پرداخت یکنواخت و پرداخت به ازای پیشنهاد

ریال به کیلووات ساعت

| دوره     | پرداخت یکنواخت | پرداخت به ازای پیشنهاد |
|----------|----------------|------------------------|
| کم باری  | ۱۹۷/۲          | ۲۱۳/۹                  |
| بار عادی | ۲۱۰/۴۴         | ۲۱۱/۶                  |
| پیک      | ۲۰۵/۹          | ۲۱۴                    |

مأخذ: یافته‌های تحقیق

هزینه تمام شده برق در تمام دوره‌ها در روش پرداخت یکنواخت کمتر از روش پرداخت به ازای پیشنهاد است. به عبارت دیگر، نیروگاه‌های با بازدهی بالاتر در این روش در تولید برق نقش دارند. در روش پرداخت یکنواخت، با افزایش بار از دوره کم باری به پرباری، افزایش هزینه تمام شده برق مشاهده می‌شود که دلیل آن استفاده از نیروگاه‌های با هزینه تولید بالاتر به دلیل افزایش بار است. در دوره پیک، هزینه تمام شده برق کاهش می‌یابد که دلیل آن شکل درجه ۲ توابع هزینه نیروگاه‌ها و افزایش استفاده از ظرفیت این نوع از نیروگاه‌ها می‌باشد.

## ۷. نتیجه‌گیری

این مقاله به مقایسه دو روش پرداخت یکنواخت و به ازای پیشنهاد بر قیمت فروش و هزینه تمام شده برق در بازار برق ایران در محدوده نیروگاه‌های برق خراسان بزرگ می‌پردازد.

نتایج بیانگر آن است که در روش پرداخت به ازای پیشنهاد (روش فعلی مورد استفاده در کشور) قیمت فروش برق و به تبع آن، درآمد تولیدکنندگان بیشتر بوده که معادل افزایش هزینه تامین برق برای مصرف‌کننده نهایی توسط دولت است.

از طرف دیگر، در روش پرداخت یکنواخت، هزینه تمام شده برق کمتر از روش پرداخت به ازای پیشنهاد است که به معنای استفاده از نیروگاه‌های با بازدهی بالاتر در تولید برق می‌باشد. به عبارت دیگر، در روش پرداخت یکنواخت، برای تولید یک میزان مشخص تولید برق، سوخت کمتری نسبت به روش دیگر مصرف شده که منجر به کاهش یارانه پرداختی دولت به سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد.

نتایج نشان می‌دهد در دوره پیک، قیمت پیشنهادی اکثر نیروگاه‌ها در دو روش قیمت سقف بوده است که می‌توان حدس زد با افزایش سقف قیمت، قیمت تسویه بازار افزایش می‌یابد. بنابراین، چنانچه دولت خواستار استفاده از روش پرداخت یکنواخت جهت افزایش کارایی تولید باشد، لازم است جهت افزایش سوددهی نیروگاه‌ها و تضمین سرمایه‌گذاری در این بخش، سقف قیمت را تا میزان مطلوب افزایش دهد.

## منابع

- ۱ ستافت، ا (۲۰۰۲)، *اقتصاد سیستم قدرت، طراحی بازارهای برق*، ترجمه ر. میلانی و ا. جهانبین، تهران: نشر همزبانان، چاپ اول.
- سیاهکلی، ح (۱۳۸۱)، "تجدید ساختار در صنعت برق"، *نشریه علمی برق*، شماره ۳۵، صص ۱۳-۱.
- صادقی شاهدانی، م، "ارزش گذاری اقتصادی بهبود راندمان نیروگاه ها"، *فصلنامه پژوهش های سیاستگذاری و برنامه ریزی انرژی*، سال دوم، شماره ۲، صص ۲۵۴-۲۳۵.
- قاضی زاده، م؛ آریایی، ج و م. ح. جاویدی (۱۳۸۵)، گزارش بازار برق ایران: تاریخچه، دلایل و ویژگی های آن، هیئت تنظیم بازار برق.
- محمدمدی، ت؛ تکلیف، ع و م. بختیار (۱۳۹۴)، "تحلیل ظرفیت بهینه نیروگاهی در ایران و بررسی اثرات صرفه جویی مصرف انرژی بر آن"، *فصلنامه پژوهش های سیاستگذاری و برنامه ریزی انرژی*، سال دوم، شماره ۱، صص ۶۸-۳۹.
- نصیری، ب و ع. کریم پور (۱۳۸۷)، *شبیه سازی چند عاملی بازار برق به کمک الگوریتم یادگیری تقویتی*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی، مشهد.

- Abbink, K; Brandts, J. and T. McDaniel (2003), "Asymmetric Demand Information in Uniform and Discriminatory Call Auction: An Experimental Analysis Motivated by Electricity Markets", *Regular Economics*, 23, pp.125-144.
- Bangnall, A. J. (2000), "A Multi-Adaptive Agent Model of Generator Bidding in The UK Market in Electricity", *Proceedings of The Second Genetic and Evolutionary Computation Conference*, USA.
- Berry, k. (2014), "A Comparison of Pay As Bid And Market Clearing Price Bidding", *Processes in Electric Utility Auctions, Managerial And Decision Economics*, pp. 258-263.
- Bower, J. and D.W. Bunn (2000), "Model-Based Comparisions of Pool and Bilateral Markets for Electricity", *Energy Journal*, 21(3), pp.1-29.
- Bower, J. and D.W. Bunn (2001), "Experimental Analysis of The Efficiency of Uniform-Price Versus Discriminatory Auctions in The England and Wales Electricity Market", *Journal of Economic Dynamics & Control*, 25, pp.561-592.
- Fabra, N; Fehr, V.D. and D.C. Harbord (2006), "Desining Electricity Auctions", *Rand Journal of Economics*, 37 (1), pp.23-46.
- Ganjbakhsh, O. (2008), *Strategic Offers in an Oligopolistic Electricity Market Under Pay As Bid Pricing*, Msc Thesis, McGill University.

- 
- Krause, T. and G. Andersson** (2006), "Evaluating Congestion Management Schemes in Liberalized Electricity Market Using An Agent-Based Simulator", Proceedings of *The Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, USA.
- Mount, T.** (1999), "Market Power and Price Volatility in Restructured Markets for Electricity", IEE Proceeding of *Hawaii International Conference On System Sciences*, USA.
- Tierney, S; Shcatzki, T. and R. Mukerji** (2008), *Uniform- Pricing Versus Pay-As-Bid in Wholesale Electricity Markets: Does it Make Difference?*, New York, ISO, USA.
- Watkins, C. J. C. H.** (1989), *Learning from Delayed Rewards*, Thesis Phd, Kings College, United Kingdom, London.