اثر روش پرداخت در بازار برق ایران بر کارایی تولید در چاچوب مدل‌های عامل محور

مورد مطالعاتی:نیروگاه‌های برق خراسان

حامد مرتضی زاده[۱]، ، علی اکبر ناجی [۲]،دانشیار، مسعود همایونی فر[۳]، دانشیار، مصطفی رجبی مشهدی، استادیار[۴]

۱- دانشکده علوم اداری و اقتصادی- دانشگاه فردوسی- مشهد- ایران
hamedhmh2@gmail.com
۲- دانشکده علوم اداری و اقتصادی- دانشگاه فردوسی- مشهد- ایران
naji@um.ac.ir
۳- دانشکده علوم اداری و اقتصادی- دانشگاه فردوسی - مشهد- ایران
homayounifar@um.ac.ir
۴- دانشکده علوم اداری و اقتصادی- دانشگاه فردوسی - مشهد- ایران
mrajabim@yahoo.com

چکیده: از بارزترین مشخصات بازار برق در کشور ما شیوه پرداخت به ازای پیشنهاد به برندگان بازار است. در حالی که در اکثر کشورها از شیوه پرداخت یکنواخت جهت تسویه بازار استفاده می‌شود. این مقاله به مقایسه تأثیر این دو شیوه بر بهره‌وری و کارایی صنعت برق در بخش تولید می‌پردازد. برای بررسی دقیق‌تر، مدل در سه ساعت کم باری، میان باری، پیک و سالانه طراحی شده و با کمک الگوریتم Q-Learning مدل بازار برق ایران با تمام ویژگی‌های آن و محدود به نیروگاه‌های برق خراسان با دو شیوه مختلف شبیه سازی و بهره وری در دو سناریو باهم مقایسه می‌شود. نتایج بیانگرآن است که روش پرداخت یکنواخت منجر به استفاده از نیروگاه‌های با کارایی بالاتر جهت تامین برق خواهد شد. بنابراین در این روش قیمت تمام شده برق کمتر از روش پرداخت به ازای پیشنهاد خواهد بود.

واژه های کلیدی: بازار برق، روش پرداخت، کارایی، مدل‌های عامل محور

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۶/۵/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۵/۱۳

نام نویسنده‌ی مسئول : علی اکبر ناجی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.3.7]

۱- مقدمه

روش‌های مختلفی جهت برگزاری مناقصه و تخصیص قیمت به برندگان در بازار وجود دارد. دو روش که بیشتر از روش‌های دیگر در تمام دنیا به کار می‌رود شامل حراج[1] پرداخت یکنواخت[2] و پرداخت به ازای پیشنهاد[3] فروشنده است. در هر دو روش مهمترین عامل در تعیین برندگان بازار و قیمت فروش، قیمت تسویه بازار است.

قیمت تسویه بازار از محل تلاقی منحنی پیشنهاد قیمت تولیدکنندگان و منحنی تقاضا به دست می‌آید. در کشور ما مدیر بازار پس از دریافت پیشنهاد توان و قیمت از تولیدکنندگان در روز قبل، با جمع افقی آنان منحنی پیشنهاد قیمت کل را به دست می‌آورد. شرکت‌های توزیع به عنوان متقاضی، میزان تقاضای خود را به مدیر بازار اعلام می‌کنند. به دلیل حراج یک طرفه بودن بازار، این شرکت‌ها اقدام به قیمت دهی نمی‌کنند. در این نوع حراج‌ها، تنها یک طرف بازار (عرضه کننده یا تولیدکننده) اقدام به پیشنهاد قیمت کرده، که در بازارهای برق معمولاً طرف عرضه‌کننده فرایند پیشنهاد قیمت را انجام می‌دهد. با تلاقی منحنی پیشنهاد قیمت کل و منحنی عمودی تقاضا، میزان بار مورد نیاز و قیمت تسویه به دست می‌آید. تمام تولیدکنندگانی که قیمتی پایین‌تر از قیمت تسویه پیشنهاد داده‌اند، به عنوان برنده بازار شناخته می‌شوند.

در روش پرداخت یکنواخت به تمام برندگان در بازار قیمت یکسان که برابر قیمت تسویه است پرداخت می‌شود. اما در روش پرداخت بر مبنای پیشنهاد قیمت، پرداختی به نیروگاه‌های برنده در بازار بر اساس قیمت پیشنهادی خودشان خواهد بود. با تجدید ساختار صنعت برق، حراج یکنواخت به طورگسترده‌ای مورد توجه قرار گرفت زیرا اقتصاددانان براین 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 نهایی‌شان خواهد شد. لیکن دغدغه دیگری نیز وجودداشت، عده‌ای از متخصصان صنعت معتقد بودندکه چرا درحالی‌که تولیدکننده حاضراست برای کالای خود مبلغ کم‌تری درخواست کند، بازار کالا را گرانتر خریداری نماید. به علاوه از منظر اقتصادی نیز در شرایط غیررقابتی، تولیدکنندگان برای دستیابی به سود اقتصادی بالاتر، پیشنهادهای بالاتری ارائه می‌کنند. بنابراین ایده جایگزین برای حراج یکنواخت شکل گرفت. در این ایده، طراحی حراج به گونه‌ای شد که قیمت پرداختی مصرف‌کنندگان حداقل شده و در عین حال کل هزینه تولیدکننده را هم پوشش دهد. بنابراین حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد قیمت شکل گرفت. این نوع حراج دارای معایبی است که از مهمترین آنان می توان به این موارد اشاره داشت:

۱-عدم انگیزه کافی برای تولیدکنندگان برای ارائه پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه نهایی

۲-حدس قیمت تسویه توسط تولیدکنندگان و پیشنهاد قیمت در سطحی که بیشترین سود را به دست آورند.

۳-نیروگاه‌های با هزینه پایین می‌توانند قدرت بازاری بسیار بالایی کسب نمایند.

همچنین نیروگاه‌های شرکت کننده در بازار با روش پرداخت به ازای پیشنهاد می‌دانند در صورت برنده شدن امکان فروش انرژی به قیمتی بالاتر از آنچه پیشنهاد داده‌اند، وجود ندارد که این منجر به وابستگی کامل درآمد به استراتژی پیشنهاد قیمت نیروگاه و ایجاد انگیزه برای بازی گرفتن بازار می‌شود.

در وهله اول به نظر می‌رسد قیمت فروش در روش پرداخت به ازای پیشنهاد که از میانگین موزون قیمت پیشنهادی هر واحد (که حداکثر برابر با قیمت تسویه است) به دست می‌آید کمتر باشد اما رفتار قیمت‌دهی نیروگاه‌ها و تعیین استراتژی‌هایی در راستای افزایش سود منجر می‌شود که همواره این نتیجه به دست نیاید. نتایج تحقیقات مختلف بیانگر این موضوع است که عملکرد روش پرداخت بستگی به میزان بار مصرفی، محدودیت‌های شبکه، ظرفیت تولید، رفتار عوامل و متغیرهای برون‌زای دیگر دارد که باید مورد توجه قرار گیرند. در هر صورت هر چه قیمت فروش برق بالاتر باشد، هزینه تأمین برق در سطح عمده‌فروشی برای دولت بیشتر خواهد بود که منجر به عدم تخصیص بهینه منابع با توجه به یارانه‌ای بودن قیمت برق در کشور خواهد شد.

در این مقاله به بررسی تاثیر روش پرداخت بر میزان کارایی تولید در قالب الگوریتم Q-Learning پرداخته می‌شود. شاخص کارایی تولید از میزان قیمت تمام شده برق به دست می آید. در هر روش که قیمت تمام شده برق برای نیروگاه‌ها کمتر باشد مبین آن است که در تولید آن، از نیروگاه‌هایی با کارایی بالاتر استفاده شده است که به معنی کاهش مصرف سوخت،کاهش انتشار آلاینده های زیست محیطی و کارایی بالاتر است. با کسر قیمت تمام شده از نرخ فروش، نرخ سود واحدهای نیروگاهی به دست می‌آید.

در این تحقیق برای اولین بار در کشور نسبت به مطالعات مشابه استفاده شده از این مدل، از نمونه واقعی (نیروگاه‌های فعال در شبکه خراسان) و با شرایط مشابه واقعی (ساز و کارهای اعمال شده در بازار برق کشور) استفاده شده است که نتایج مدل با توجه به انطباق بالای خروجی‌های الگوریتم‌های Q-Learning با واقعیت، می‌تواند راهنمای مناسبی جهت سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی باشد.

پس از مقدمه پیشینه تحقیق شامل مطالعات انجام شده در این زمینه بررسی می شود. در بخش سوم مدل تحقیق شامل روش تحقیق، نمونه مورد استفاده و سناریوهای تحقیق توضیح داده می‌شود. در بخش بعد ، تحلیل و نتایج آورده شده است. بخش انتهایی مقاله در برگیرنده نتیجه‌گیری است.

[1] Auction
[2] Uniform Payment
[3] Pay as Bid

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.3.7]

۲- پیشینه تحقیق

در این بخش مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر روش پرداخت بر کارایی تولید مورد بررسی قرار می گیرد.

در مطالعه‌ای باور و بون[4] (۲۰۰۰ و۲۰۰۱) بازار برق انگلستان و ولز را از منظر مقایسه میان ساز و کارهای بازار و طرح‌های قیمت‌دهی (قیمت گذاری 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 صرف‌نظر شده‌است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی از طریق مقایسه با مدل‌های کلاسیک انحصارکامل، انحصار دوجانبه و رقابت‌کامل مورد تأیید قرار گرفته‌است. در قیمت‌گذاری بر اساس پرداخت به ازای پیشنهاد، متوسط قیمت بالاتر بوده و نتایج از بازار رقابتی دورتر و در نتیجه کارایی کمتر است.

ابینک و همکاران[5] (۲۰۰۳) با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و تجربی، خروجی‌های حراج یکنواخت و تبعیض آمیز 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 در هر دو شرایط، میانگین قیمت‌های معامله و نوسانات قیمتی، تحت دو حراج تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشتند. اما در شرایطی که فروشندگان اطلاعات یکسانی ندارند، حراج تبعیض‌آمیز به طور قابل توجهی ناکاراتر است.

فدریکو و رحمان[6] (۲۰۰۳) در مطالعه خود به مقایسه دو نوع پرداخت مبتنی بر قیمت تسویه بازار در شرایط رقابتی و انحصاری در بازار برق انگلستان در سطح عمده‌فروشی پرداخته‌اند. در روش پرداخت بر مبنای پیشنهاد در مقابل پرداخت یکنواخت در ساختار رقابت کامل، مازاد رفاه مصرف‌کننده بیشتر و کارایی تولید کمتر است. در شرایط انحصاری وضعیت کارایی تولید همانند شرایط رقابتی است اما وضعیت رفاه مصرف‌کننده مبهم است.

تایرنی و همکاران[7] (۲۰۰۸) در تحقیق‌شان 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.

بِری[8] (۲۰۱۴)، در مطالعه‌ای به مقایسه قیمت‌گذاری یکنواخت و تبعیض‌آمیز درحراج‌های برق پرداخته است. این مقاله نشان می‌دهد که در حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد، پیشنهادها بالاتر از هزینه هستند در حالی که در حراج یکنواخت، پیشنهادها با هزینه برابری می‌کنند. هم چنین در حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد با تابع توزیع احتمال یکنواخت، سود نهایی با افزایش پیشنهاد، افزایش می‌یابد. بر اساس این مطالعه، اگرچه حراج پرداخت براساس پیشنهاد منجر به میانگین قیمت‌های بالاتری نسبت به حراج یکنواخت می‌شود، اما واریانس کمتری دارد.

۳- مدل تحقیق

از زمان شکل‌گیری بازار برق همواره بازیگران بازار به دنبال پیدا کردن روش بهینه جهت حداکثرکردن سود خود بوده‌اند با توجه به خصوصیات بازار برق، این بازارها عمدتاً در قالب انحصار چند جانبه فعالیت می‌نمایند که سود هر بازیگر در این بازار به رفتار سایر بازیگران مرتبط می‌باشد و رفتار هر بازیگر استراتژی سایر بازیگران را تحت تاثیر قرار می‌دهد. روش‌های مختلفی جهت تعیین استراتژی قیمت دهی نیروگاه ها وجود دارد که از مهمترین آن‌ها می‌توان به تخمین قیمت تسویه، پیش‌بینی رفتار سایر رقبا و نظریه بازی‌ها اشاره داشت. این روش‌ها به روشهای کلاسیک مشهور است که در عین سادگی اجرا، هرکدام دارای معایب محدودکننده فراوان می‌باشند. در سال‌های اخیر با رشد فناوری اطلاعات، الگوهای هوشمند جایگزین روش‌های قبلی شده است. در این الگوریتم‌ها با شبیه‌سازی دنیای واقعی، عوامل با توجه به تعامل با یکدیگر رفتار خود را برای رسیدن به تابع هدف در طول زمان بهینه می‌کنند. از مهمترین مدل‌های پیاده شده در قالب این سیستم‌های عامل محور، می‌توان از مدل‌های یادگیری تقویتی[9] نام برد. در این مدل‌ها عوامل با انجام عمل، پاداشی دریافت می‌کنند که میزان این پاداش بیانگر میزان مطلوب بودن عمل انجام شده می‌باشد. عوامل در طی زمان با توجه به پاداش دریافتی، استراتژی بهینه را جهت رسیدن به تابع هدف یاد می‌گیرند. هدف عوامل حداکثر کردن پاداش دریافتی در بلند مدت است. عوامل با انجام هر عمل علاوه بر دریافت پاداش، حالت محیط را تغییر می‌دهند. تغییر حالت بازخور محیط به عمل انجام شده توسط عامل است.

الگوهای های یادگیری تقویتی به دو دسته الگوهای مدل محور و بدون مدل تقسیم می‌شوند. در الگوهای با مدل، استراتژی بهینه و چگونگی رفتار توسط عوامل برای رسیدن به هدف قابل بیان توسط مدل‌های ریاضی بوده و عوامل بر اساس آن روابط ریاضی به سمت تابع هدف حرکت می‌کنند. در الگوهای بدون مدل، به دلیل پیچیدگی رفتار بازیگران، استراتژی آنان قابل بیان در یک مدل ریاضی نبوده و بازیگران با کسب تجربه پاداش‌های دریافتی خود را حداکثر می‌کنند. بازارهای برق به دلیل پیچیدگی فراوان، تأثیر زیاد رفتار بازیگران بر هم و تأثیر سایر متغیرها توسط الگوهای بدون مدل شبیه سازی می‌گردند. از

[4] Bower & Bunn

[5] Abbink et al

[6] Fedrico & Rahman

[7] Tierney et al.

[8] Berry

[9] Reinforcement Learning

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.3.7]

بهترین این الگوها، الگوریتم Q-Learning است که ترکیب سه شاخه علمی آزمایش و خطا، کنترل بهینه و تفاوت گذرا[10] است.

در این الگو تعیین استراتژی بهینه از طریق معادله (۱) به دست می آید.

$$\pi^*(s) = \arg\max_a Q^*(s,a) \quad (۱)$$

در این معادله $\pi^*(s)$ بیانگر استراتژی بهینه در حالت s است. $Q^*(s,a)$ نشان دهنده مقدار ارزش بهینه در حالت s و عمل a می‌باشد. استراتژی بهینه آن استراتژی است که مقدار ارزش را حداکثر کند.

در معادله (۲) تابع ارزش بهینه به عنوان مجموع پاداش دریافتی در حالت s و مقدار a و میزان تابع ارزش بهینه در حالتهای بعدی تا رسیدن به تابع هدف تعریف می‌شود. در این معادله γ نرخ کاهشی است و اهمیت پاداش‌های آینده را تعیین می‌کند. مقدار صفر باعث می‌شود عامل ماهیت فرصت طلبانه یا کوتاه‌مدت گرفته و فقط پاداش‌های فعلی را مد نظر قرار دهد. در حالی که مقدار یک، عامل را ترغیب می‌کند دوره زمانی طولانی‌تری را برای پاداش تقلا کند. اگر این ضریب، یک یا بیشتر از یک باشد مقادیر واگرا می‌شود. $T(s,a,s')$ احتمال تغییر حالت از s به s' با انجام عمل a است.

$$Q^*(s,a) = R(s,a) + \gamma \sum_{s' \in S}^{\infty} T(s,a,s') \max_{a'} Q^*(s',a') \quad (۲)$$

با توجه به اینکه مقدار تابع Q انتخاب عمل مورد نظر را آسان می‌کند می توان از روش تفاوت گذرا مرتبه صفر برای تخمین تابع Q مطابق رابطه (۳) استفاده کرد.

$$Q(s,a) = Q(s,a) + \alpha(r + \gamma \max_{a'} Q(s',a') - Q(s,a)) \quad (۳)$$

ادله بالا را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$Q(s.a) = (1-\alpha)Q(s.a) + \alpha(r + \gamma \max Q(s`.a`)) \quad (۴)$$

در معادله (۴)، α نرخ یادگیری است. نرخ یادگیری تعیین می‌کند که تا چه میزان اطلاعات بدست آمده جدید بر اطلاعات قدیمی ترجیح داده شود. مقدار صفر باعث می‌شود عامل چیزی یاد نگیرد و مقدار یک باعث می‌شود عامل فقط اطلاعات جدید را ملاک قرار دهد. چنانچه در هر حالت یک عمل ثابت برای زمان نامحدود انجام شود و مقدار ضریب α به شکل مناسبی کاهش یابد مقادیر Q با احتمال ۱ به مقدار Q* همگرا می‌شود. ضریب یادگیری ارتباط بین حافظه قدیم و جدید است و میزان توجه به عمل‌های آتی را مشخص می‌کند.

ابتدا یک جدول حالت – عمل تعریف کرده که بیانگر مقدار ارزش در هر حالت و عمل است. مقادیر اولیه این جدول صفر بوده که با انجام تکرار مقادیر آن طبق معادله (۴) به روز می‌گردد. تکرارها تا رسیدن به تابع هدف ادامه دارد. این تابع هدف می توان به عنوان یک همگرایی به یک عدد مشخص یا تعیین یک مقدار در اختلاف بین مقادیر در تکرارهای مختلف مشخص شود.

از مسائل بسیار مهم برای هر عامل مصالحه بین میزان بهره‌بردای از اطلاعات و جستجوی محیط می‌باشد. بهره برداری از اطلاعات در دسترس، به این معناست که بهترین عمل را با توجه به معادلات بالا انتخاب کنیم. 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 کنیم. روش‌های زیادی جهت انتخاب عمل مناسب با در نظر گرفتن مصالحه وجود دارد. یکی از بهترین روش‌ها که کاربرد زیادی به خصوص در الگوی Q-Learning دارد روش ε-greedy است. در ابتدای 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 ماکزیمم رفتار کند ممکن است از عمل بهینه دور شده و اصطلاحاً در یک نقطه بهینه محلی‌گیر کند. در نتیجه با انتخاب شاخصی تحت عنوان ε که مقدار کوچکی است اعمال غیر از عمل بهینه در هر حالت با احتمال آن انتخاب می‌شوند. با استفاده از این روش عامل با جستجوی بیشتری، اطمینان خود را در دستیابی به جواب بهینه افزایش می‌دهد. انتخاب مقادیر نرخ یادگیری، ضریب کاهشی و اپسیلون بستگی به رفتار عوامل دارد. یک عامل حریص نسبت به اطلاعات جدید، حریصانه رفتار می‌کند (α بزرگ) و برای پاداشی که ممکن است در آینده دریافت کند ارزش کمی قائل است (γکوچک). یک عامل با این مشخصه میل زیادی به انتخاب عمل متناظر با ماکزیمم ارزش دارد و با انجام سایر عمل‌ها ریسک نمی کند (εکوچک). به عبارت دیگر عامل ریسک‌گریز بهره‌برداری از اطلاعات را به جستجوی بیشتر محیط، ترجیح می‌دهد. در حالی که عامل ریسک‌پذیر نسبت به اطلاعات حریصانه رفتار نمی‌کند و جهت دستیابی به شانس‌های بیشتر ریسک بیشتری کرده و جستجوی بیشتری انجام می‌دهد.

در مقاله پیش رو، محیط مدل بازار برق ایران با تمام ویژگی‌های واقعی آن است. روش واقعی پرداخت در این بازار به صورت پرداخت به ازای پیشنهاد می‌باشد. از قیود در نظر گرفته شده برای مدل می‌توان به تعیین سقف قیمت و تعیین حداقل و حداکثر تولید برای واحدهای نیروگاهی اشاره داشت.

عامل‌های مدل شامل نیروگاه‌های حرارتی در محدوده استان‌های خراسان تعریف شده 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 به این شبکه اضافه شده است. شبکه انتقال و فوق توزیع با ۱۵۸ باس وظیفه انتقال انرژی از عرضه کنندگان به متقاضیان را بر عهده دارد. عمل در این مدل ارائه پیشنهاد قیمت توسط نیروگاه‌ها است. پیشنهاد قیمت نیروگاه‌ها به صورت ضریبی بزرگتر از یک برای عرض از مبدأ منحنی هزینه نهایی

[10] Temporal Difference

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.3.7]

واحدها با همان شیب و فاصله ۰.۲ از هم تعریف شده که تا سقف قیمت ادامه دارد و پس از آن به صورت منحنی افقی در آن سطح باقی می‌ماند.

انجام هر عمل توسط عامل دو واکنش دارد. اولاً حالت محیط تغییر می‌کند. حالت در اینجا، قیمت تسویه بازار در تکرار قبلی است. ثانیاً پاداشی از طرف محیط به عامل داده می‌شود. این پاداش برابر با سود تولیدکننده است. سود تولیدکننده از کسر هزینه‌های تولید از درآمدهای آن به دست می‌آید. هزینه‌های تولید با توجه به تابع هزینه درجه ۲ در مقدار تولید برنده شده به دست آمده و میزان درآمد از حاصل ضرب قیمت فروش در تولید محاسبه می‌شود. در روش پرداخت یکنواخت قیمت فروش برای همه واحدها برابر با قیمت تسویه و در روش پرداخت به ازای پیشنهاد، قیمت فروش برابر با پیشنهاد قیمت هر واحد است. تابع هدف واحدها حداکثر کردن سود با توجه به قیود آن می‌باشد.

$$\begin{aligned} &\text{Max:} && \pi = TR - TC \\ &St_1 : && q_{min\,(i)} \le q_i \le q_{max\,(i)} \\ &St_2 : && P_n \le P_c \end{aligned} \qquad (۵)$$

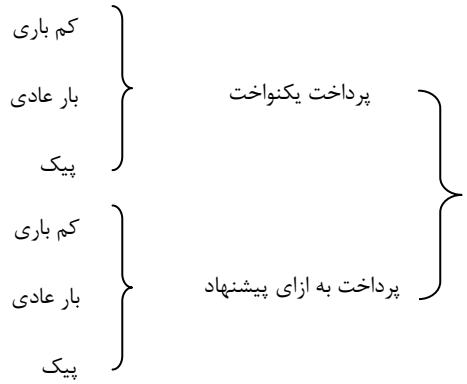
در این معادله i، بیانگر شماره نیروگاه، π سود، TR درآمد، TC هزینه، q تولید و p_c سقف قیمت است. تابع هدف حداکثر کردن سود و دو قید حداقل و حداکثر ظرفیت واحد و قیمت سقف است.

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 است. بنابراین برای رسیدن به هدف هر عامل ۱۰۰۰۰ تکرار انجام خواهد داد. همچنین یادگیری در سه مرحله انجام خواهد شد و پارامترهای مدل شامل آلفا، گاما و اپسیلون طوری تعیین می‌گردند که در تکرارهای اولیه عامل حریصانه و ریسک گریز رفتار می‌کند اما با افزایش تکرارها رفتار عامل به سمت رفتار غیر حریصانه و ریسک پذیر تغییر می‌کند.

جهت در نظر گرفتن تأثیر میزان بار بر نتایج، مدل در سه ساعت کم باری، میان باری و پیک اجرا شده و با تعمیم آن می توان نتایج را برای یک‌سال به دست آورد. میزان تقاضای بار در منطقه خراسان در ساعت کم باری، میان باری و پیک به ترتیب ۱۴۰۰، ۲۴۵۰ و ۳۵۰۰ مگاوات است. از کل ۸۷۶۰ ساعت سال، تقریباً ۲۹۲۰ ساعت کم‌باری، ۴۳۸۰ ساعت میان باری و ۱۴۶۰ ساعت پیک داریم که با این حساب ۱۹۹۲۹ میلیون کیلووات ساعت تقاضای برق در یک سال برای استان‌های خراسان تخمین زده می‌شود که با دقت بالایی برابر با مقدار واقعی است. سوخت تمام نیروگاه‌ها گاز طبیعی با قیمت یارانه‌ای ۷۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب در نظر گرفته شده است. در شکل شماره ۱ سناریوهای مقاله به طور خلاصه نشان داده شده است.

به دلیل استفاده از ساعات غیر پیوسته قید هزینه‌های خاموش و روشن کردن و همچنین زمان سپری شده برای سرد شدن واحد بی‌معنی بوده و از این قید صرفنظر می‌کنیم. این قید در تصمیمات قیمت دهی عوامل مؤثر است اما با توجه به اینکه هزینه‌های آن نسبت به هزینه کل در نیروگاه های گازی بسیار ناچیز و برای نیروگاه‌های بخار ناچیز است نمی تواند تأثیر محسوسی در نتایج داشته باشد.

برای بررسی تأثیر روش پرداخت بر کارایی تولید باید هزینه‌های تولید میزان مشخص برق در هر سناریو با هم سنجیده شود و هر روش که برق را با هزینه کمتری تولید کند آن روش کاراتر است و از آنجا که بیش از ۹۵ درصد هزینه‌های یک نیروگاه، هزینه‌های سوخت آن است کارایی بالاتر معادل مصرف سوخت پایین‌تر خواهد بود.



شکل شماره (۱): سناریوهای مختلف اجرا شده برای مدل

۴- نتایج و تحلیل

برای بررسی تأثیر روش پرداخت بر کارایی تولید باید آرایش تولید برق در هر روش و هر ساعت به دست آید. به عبارت دیگر بایستی مشخص شود در هر سناریو چه نیروگاه‌هایی برنده شده و هر نیروگاه به چه میزان تولید می‌کند. برای محاسبه قیمت تمام شده صنعت، می‌توان از میانگین موزون هزینه تولید برای نیروگاه‌های برنده استفاده کرد.

در ساعت کم‌باری، برای روش پرداخت یکنواخت از ۴۸ واحد نیروگاهی، ۱۵ واحد برنده شده و ۱۴۰۰ مگاوات برق مورد نیاز را تأمین می‌نمایند.کل سوخت مصرفی نیروگاه‌های برنده حدود ۳۹۴ هزار مترمکعب گاز و هزینه تولید برابر با ۲۷۶ میلیون ریال تخمین زده می‌شود. قیمت تمام شده برق برابر با ۱۹۷ ریال به ازای هر کیلووات ساعت به دست می‌آید. در جدول شماره ۱، قیمت تمام شده برق در دو روش با هم مقایسه شده است.

جدول (۱): قیمت تمام شده برق در ساعت کم باری

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.3.7]

قیمت تمام شده (ریال به کیلووات ساعت)	هزینه (میلیون ریال)	مصرف گاز (هزار مترمکعب)	تولید (مگاوات)	روش
۱۹۷	۲۷۶	۳۹۴	۱۴۰۰	یکنواخت
۲۱۴	۲۹۹	۴۵۴		به ازای پیشنهاد

همانطور که مشاهده می‌شود در ساعات کم باری، تولید برق در روش یکنواخت توسط نیروگاه‌های با بازدهی بالاتر انجام شده که منجر به کاهش مصرف سوخت و کاهش هزینه‌های تولید می‌شود. این روش موجب کاهش ۱۳ درصدی مصرف سوخت و کاهش ۲۱ درصدی هزینه تولید می‌گردد.

در جدول شماره ۲ قیمت تمام شده برق برای ساعات میان باری برای دو روش مقایسه شده است.

جدول (۲): قیمت تمام شده برق در ساعت میان باری

قیمت تمام شده (ریال به کیلووات ساعت)	هزینه (میلیون ریال)	مصرف گاز (هزار مترمکعب)	تولید (مگاوات)	روش
۲۱۰	۵۱۶	۷۳۵	۲۴۵۰	یکنواخت
۲۱۲	۵۱۹	۷۴۰		به ازای پیشنهاد

در ساعت میان باری، قیمت تمام شده در روش یکنواخت کمتر از روش پرداخت به ازای پیشنهاد است. در این ساعت، نسبت به ساعت کم باری قیمت تمام شده برق افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش بار و استفاده از نیروگاه‌های با بازدهی کمتر است. روش پرداخت یکنواخت منجر به کاهش ۰/۶ درصدی سوخت و یک درصدی قیمت تمام شده می‌گردد. همانطور که ملاحظه می‌شود تفاوت دو روش در این ساعت بسیار کمتر از ساعت کم باری است.

در جدول شماره ۳، قیمت تمام شده در ساعت پیک با هم مقایسه شده است.

جدول (۳): قیمت تمام شده برق در ساعت پیک

قیمت تمام شده (ریال به کیلووات ساعت)	هزینه (میلیون ریال)	مصرف گاز (هزار مترمکعب)	تولید (مگاوات)	روش
۲۰۶	۷۲۰	۱۱۱۷	۳۵۰۰	یکنواخت
۲۱۴	۷۴۹	۱۱۵۸		به ازای پیشنهاد

در این ساعت نیز، قیمت تمام شده در روش پرداخت یکنواخت کمتر از روش پرداخت به ازای پیشنهاد است. در روش پرداخت یکنواخت قیمت تمام شده برق کمتر از ساعت با میان باری و در روش پرداخت به ازای پیشنهاد بیش از ساعت میان باری است.

در این ساعت، روش پرداخت یکنواخت منجر به کاهش ۰/۷ درصدی مصرف سوخت و ۲ درصدی قیمت تمام شده شده است.

در روش پرداخت به ازای پیشنهاد، تولیدکنندگان می دانند حتی در صورت برنده شدن در بازار برق، حداکثر به میزان قیمت پیشنهادی خودشان درآمد دارند، بنابراین اقدام به استفاده از استراتژی‌های مختلف جهت حداکثر کردن درآمد خود می کنند. رفتار تولیدکنندگان در این روش منجر به فاصله گرفتن بازار از شرایط بازار رقابتی شده و برنده شدن نیروگاه‌ها در این شرایط به جز هزینه‌های تولید به عوامل دیگر نیز مرتبط می‌گردد.

در جدول شماره ۴ با تعمیم ساعات مختلف به یک سال، وضعیت قیمت تمام شده در روش پرداخت یکنواخت را برای یک سال به دست می‌آوریم.

برای این کار، تولید در ساعات مختلف بار را به دست آورده و با توجه به قیمت تمام شده هر ساعت، هزینه کل تولید در ساعت‌های مختلف تقاضا محاسبه می‌شود. با جمع هزینه‌های کل ساعت‌های مختلف، کل هزینه سالانه تأمین برق به دست می‌آید. با استفاده از میانگین‌گیری موزون، متوسط قیمت تمام شده برق برای یک سال در روش پرداخت یکنواخت به دست می‌آید.

جدول (۴): قیمت تمام شده برق در روش پرداخت یکنواخت برای یک سال

قیمت تمام شده (ریال به کیلووات ساعت)	هزینه (میلیارد ریال)	تولید (میلیون کیلووات ساعت)	ساعت / سال	
۱۹۷	۸۰۶	۴۰۸۸	۲۹۲۰	کم باری
۲۱۰	۲۲۶۰	۱۰۷۳۱	۴۳۸۰	میان باری
۲۰۶	۱۰۵۱	۵۱۱۰	۱۴۶۰	پیک
۲۰۶.۵	۴۱۱۷	۱۹۹۲۹	۸۷۶۰	کل سال

هزینه کل تأمین برق در سطح نیروگاه‌ها برای یک سال استان‌های خراسان حدود ۴۱۲ میلیارد تومان در روش پرداخت یکنواخت است و متوسط قیمت تمام شده هر کیلووات ساعت برق برابر با ۲۰۶.۵ ریال می باشد.

در جدول شماره ۵، قیمت تمام شده برق برای یک سال در روش پرداخت به ازای پیشنهاد محاسبه شده است.

جدول (۵): قیمت تمام شده برق در روش پرداخت به ازای پیشنهاد برای یک سال

قیمت تمام شده (ریال به کیلووات ساعت)	هزینه (میلیارد ریال)	تولید (میلیون کیلووات ساعت)	ساعت / سال	
۲۱۴	۸۷۳	۴۰۸۸	۲۹۲۰	کم باری
۲۱۲	۲۲۷۳	۱۰۷۳۱	۴۳۸۰	عادی
۲۱۴	۱۰۹۴	۵۱۱۰	۱۴۶۰	پیک
۲۱۳	۴۲۴۰	۱۹۹۲۹	۸۷۶۰	کل سال

هزینه تأمین برق در روش پرداخت به ازای پیشنهاد برای یک سال ۴۲۴ میلیارد تومان و قیمت تمام شده ۲۱۳ ریال به ازای هر کیلووات ساعت است.

هزینه تأمین برق در روش پرداخت یکنواخت ۱۲ میلیارد تومان کمتر از روش پرداخت به ازای پیشنهاد است. همچنین قیمت تمام شده برق در روش پرداخت یکنواخت کمتر از روش پرداخت به ازای پیشنهاد می‌باشد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.3.7]

نتایج به دست آمده در این مدل منطبق با سایر مطالعات انجام شده در کشورهای دیگر است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی هزینه تولید برق در دو روش پرداخت یکنواخت و پرداخت به ازای پیشنهاد برای بازار برق ایران و در سطح نیروگاه‌های خراسان می‌پردازیم. برای بررسی تأثیر میزان بار بر نتایج، مدل را برای سه ساعت کم باری، میان باری و پیک به صورت جداگانه برای هر روش اجرا می‌کنیم. با تعمیم این ساعت‌ها، نتایج برای یک سال قابل محاسبه خواهد بود.

نتایج بیانگر این است که قیمت تمام شده در روش پرداخت یکنواخت برای همه ساعات کمتر از روش پرداخت به ازای پیشنهاد است. با این اوصاف میزان سوخت مصرفی نیروگاه‌ها نیز در این روش کمتر خواهد بود.

مراجع

[۱] ابونوری،ا. لاجوردی،ح. "تاثیر تشکیل بازار برق ایران بر کارایی نیروگاه های برق" کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران. سال دوم، شماره ۳، ۵۷-۵۰، تهران، ۱۳۹۲

[۲] استافت، ا. "اقتصاد سیستم قدرت، طراحی بازارهای برق" ترجمه ر.میلانی ،ا. جهانبین، تهران: نشر همزبانان.چاپ اول، ۲۰۰۲

[۳] سیاهکلی، ح. "تجدید ساختار در صنعت برق" نشریه علمی برق، ۳۵، ۱۳-۱، ۱۳۸۸

[۴] کاکولاریمی ، ر، قیمت‌دهی در بازار برق به کمک الگوریتم-Q Leraning تطبیقی و قدرت بازار، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی، مشهد، ۱۳۹۱

[۵] نقیبی سیستانی،م.ب. ،یادگیری در سیستم‌های چندعاملی. رساله دکتری دانشگاه فردوسی، مشهد، ۱۳۸۴

[6] Abbink, K; Brandts, J; Mcdaniel, T. (2003). Asymmetric demand information in uniform and discriminatory call auction: ac experimental analysis motivated by electricity markets. Regulary Economics, 23, 125-144

[7] Bangnall,A.J. ,A Multi-Adaptive Agent Model of Generator Bidding in the UK Market in Electricity. In Proceedings of the Second Genetic and Evolutionary Computation Conference,USA,2000

[8] Berry,k, A comparison of pay as bid and market clearing price bidding processes in electric utility auctions, managerial and decision economics. 258-263,2014

[9] Bower,J;Bunn,D.W.,Experimental analysis of the efficiency of uniform-price versus discriminatory auctions in the England and Wales electricity market. Journal of Economic Dynamics & Control, 25, 561-592,2001

[10] Daroudi,A;Yekyai,N;Javidi,M.H.,Bidding behavior analysis of generating companies in iran's electricity market. 13th international conference on *environment and electrical engineering. IEEE,319-323,2013*

[11] Federico,G; Rahman,D, Bidding in an Electricity Pay-as-Bid Auction.Journal of Regulatory Economics, 24(3) , 175-211,2003

[12] Li, G; Shi,J,Agent-based modeling for trading wind power with uncertainty in the day-ahead wholesale electricity markets of single-sided auction. Applied Energy, Vol. 99, pp. 13-22 ,2012

[13] Pourebadollahan Covich and Archana Aggarwal, *Reform and Efficiency: An Application to Iranian Regional Electricity Companies*, Iranian Economic Review, Vol.15, No.26, 83-104,2012

[14] Rahimiyan,M; Rajabi Mashhadi,H, Supplier's optimal bidding strategy in electricity pay-as-bid auction :Comparison of the Q-learning and a model-based approach.Electric Power System Research, 78, 165-178,2008

[15] Rahimiyan,M ; Rajabi Mashhadi,H.,An adaptive Q-Learning algorithm developed for agent-based computational modeling of electricity market. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part C:Applications& Reviews, 40(5), 547-556,2010

[16] Ren, y,A comparison of pay as bid and marginal pricing in electricity markets. Ph.D thesis, McGill University,2008

[17] Soleymani,S,Strategic Bidding of Gencos Under Two Pricing Mechanisms: Pay as Bid and Uniform Pricing.IEE GCC Conference and Exhibition, Dubi,UAE,2011

[18] Tierney, S; Shcatzki, T; Mukerji, R. (2008, Mar). Uniform- Pricing versus Pay-as-Bid in Wholesale Electricity Markets: Does it Make Difference? New York ISO, USA.

[19] Yu,N; Liu,C; Price,J,Evaluation of market rules using a multi-agent system method.IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 25, No. 1, pp. 470-479,2010

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.3.7]