

فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی

سال چهارم / شماره ۱۰ / بهار ۱۳۹۷ / صفحات ۹۹-۱۳۳

شبیه‌سازی حراج پرداخت براساس پیشنهاد و حراج یکنواخت در بازار برق ایران: الگوریتم راث-ارو

مجید فشاری

استادیار اقتصاد دانشگاه خوارزمی

(نویسنده مسئول)

majid.feshari@gmail.com

علی ناظمی

استادیار اقتصاد دانشگاه خوارزمی

a_nazemi78@yahoo.com

شبیوا فرهی

کارشناس ارشد برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی دانشگاه خوارزمی

shivafaa23@yahoo.com

طی سال‌های پس از تجدید ساختار صنعت برق یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، نوع حراج مورد استفاده در بازار برق تجدید ساختار شده بوده است. به صورت کلی، دو نوع حراج یکنواخت و پرداخت بر اساس پیشنهاد در بازارهای برق استفاده می‌شود. هدف از مطالعه حاضر، مقایسه حراج یکنواخت و حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد با استفاده از مدل‌سازی مبتنی بر عامل می‌باشد. بدین منظور، بر مبنای نظریه‌های اقتصاد و مدل‌سازی مبتنی بر عامل، با استفاده از تابع هزینه و الگوریتم راث-ارو، شبیه‌سازی انجام شده و با بهره‌گیری از داده‌های بازار برق ایران در سال ۱۳۹۳، دو حراج با هم مقایسه شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد، پتانسیل انحراف بازیگران از هزینه نهایی را به واسطه ساختار تسویه و قوانین موجود افزایش می‌دهد. لذا از آنجا که بازار برق ایران بر اساس حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد فعالیت دارد، لزوم بازنگری و دقت نظر در این خصوص بیش از پیش اهمیت دارد.

واژه‌های کلیدی: حراج یکنواخت، حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد، مدل‌سازی مبتنی بر عامل، الگوریتم تقویتی، کارایی بازار

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۹

۱. مقدمه

صنعت برق یکی از صنایع استراتژیک و بسیار پویاست که نقش اساسی و محوری در تحقق برنامه‌های توسعه ملی هر کشور ایفا می‌کند. از این رو، حکومت‌ها به طور سنتی به صنعت برق به عنوان یک صنعت پیشرو نگریده‌اند. از سوی دیگر، به دلیل اثرات اجتماعی، محیطی و نیاز به حجم بالای سرمایه‌گذاری در این صنعت، دولت‌ها سعی نموده‌اند آن را به صورت متمرکز کنترل نمایند. در سیستم متمرکز عواملی مانند فقدان رقابت در زمینه تولید و عرضه برق، عدم اعمال محدودیت‌های مالی، بالا بودن هزینه‌ها، سیاسی کردن تصمیم‌گذاری‌های سرمایه‌گیری و نبود انگیزه باعث کاهش کارایی و تنزل ارائه خدمات به مصرف‌کنندگان می‌شود. لذا در جهت رفع موانع سیستم متمرکز و افزایش آهنگ رشد و شکوفایی صنعت برق و همچنین افزایش کارایی، تلاش‌هایی در جهت تغییر ساختار انحصارهای دولتی در صنعت برق انجام گرفته است. بنابراین، از حدود دو دهه قبل برخی از کشورها با دو رویکرد خصوصی‌سازی و رقابت‌پذیری در صنعت برق، تجدید ساختار را آغاز نموده‌اند. نگاهی تاریخی به تحولات صنعت برق ایران نشان می‌دهد که پایه‌گذاری این صنعت به صورت خصوصی انجام گرفت و در ادامه با مشارکت شهرداری‌ها و سرمایه‌گذاران خارجی، یک فضای رقابتی در عرضه و تولید برق به وجود آمد. اما بتدریج انگیزه‌های بخش خصوصی کاهش یافت و با حاکمیت یک دولت مرکزی در کشور که از درآمدهای سرشار نفتی بهره‌مند بود، ضرورت پاسخگویی به تقاضای فزاینده برق توسط دولت احساس شد و در نهایت، صنعت برق کشور ملی گردید. اما در دهه‌های اخیر، عوامل دیگری در عرصه اجتماعی و اقتصادی کشور باعث شده مسئولین به سمت خصوصی‌سازی، تجدید ساختار و رقابت‌پذیری حرکت نمایند. برخی از این عوامل شامل کاهش درآمدهای دولت برای پاسخگویی به تقاضاهای جدید، رشد فناوری و استفاده از مولدهای پراکنده و وجود نظریه‌های جدید اقتصادی در زمینه عدم کارایی بخش دولتی و کارا بودن بخش خصوصی می‌باشند.

با توجه به موارد بر شمرده، ایران با بکارگیری تجارب سایر کشورها و در جهت تجدید ساختار در صنعت برق، اقدام به تشکیل بازار برق نمود. بازار برق ایران با تهیه و ابلاغ آیین‌نامه تعیین روش، نرخ و شرایط خرید و فروش برق در شبکه برق کشور در ابتدای آبان ماه سال ۱۳۸۲ شروع به کار کرد. پس از تجدید ساختار، تمامی بازارهای برق بر مبنای دو نوع حراج یکنواخت و تبعیض‌آمیز طراحی شده‌اند. در حراج یکنواخت به تمام تولیدکنندگان در بازار معادل قیمت تعادلی پرداخت می‌شود در حالی که در حراج تبعیض‌آمیز به فروشندگان مقدار پیشنهادی پرداخت می‌شود. بازار برق ایران بر اساس شکل حراج تبعیض‌آمیز فعالیت می‌کند و یکی از معدود بازارهای جهان است که بر اساس این نوع از حراج طراحی شده است. در کنار این تفاوت، سایر ویژگی‌های بازار برق ایران به شرح زیر قابل اشاره است:

۱. مدل بازار در بازار برق ایران بازار روز قبل می‌باشد.
 ۲. مدل حراج در بازار برق ایران حراج یک‌طرفه می‌باشد.
 ۳. پرداخت به فروشندگان بر مبنای روش پرداخت بر مبنای پیشنهاد می‌باشد.
 ۴. نرخ خرید از بازار برق ایران به شکل یکنواخت و بر اساس قیمت تسویه بازار می‌باشد.
 ۵. پرداخت بابت خدمات انتقال بر مبنای آمادگی می‌باشد.
- همانگونه که اشاره شد، بازارهای برق عمدتاً بر اساس مدل یکنواخت فعالیت می‌کنند. استفاده از حراج تبعیض‌آمیز در بازار برق ایران به عنوان یک ویژگی متمایزکننده نیازمند مطالعه و ارزیابی بیشتر است. از آنجا که نمونه تجربی عملی در سایر کشورها در خصوص نتایج حاصل از اجرای یک بازار برق یکنواخت وجود ندارد، مطالعات زیادی نیز در این حوزه انجام نشده و مطالعات موجود نیز بر اساس داده‌های آزمایشگاهی طراحی گردیده است.
- بر این اساس، همچنان این سؤال اساسی وجود دارد که نوع حراج چه تاثیری بر رفتار بازیگران و نتایج حاصل از یک بازار خواهد داشت. به عبارت دیگر، چالش مربوط به طراحی بازار بر اساس

نوع حراج به عنوان یک مساله اساسی همچنان قابل اشاره و توجه است. لذا تحقیق حاضر با هدف مقایسه و شبیه‌سازی این دو نوع حراج انجام شده است و در صدد پاسخ به این سؤال اساسی است که تغییر قوانین مربوط به حراج و به طور مشخص نوع حراج چگونه نتایج تعادلی حاصل را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بعلاوه شبیه‌سازی این موضوع که کدام نوع حراج برای بازار برق ایران نتایج کارا تر از بعد تولید به همراه خواهد داشت نیز با استفاده از مدل شبیه‌سازی اجرا شده قابل ارزیابی است.

این نکته اهمیت دارد که چالش اساسی در مقایسه این دو حراج به مساله رفتاری بازیگران و نگاه سیستمی در این زمینه بازمی‌گردد. تغییر قوانین بازی در هر شرایطی بازیگران را بلافاصله در موضع متفاوت قرار داده و منطق رفتاری آنها را در یک بازی متفاوت خواهد ساخت. بدون شک چالش اصلی موضوع مقایسه دو بازار از همین منظر باید مورد توجه قرار گیرد. در حالی که بازیگران و تولیدکنندگان امکان سواری مجانی^۱ و دریافت قیمت تعادلی در بازار را دارند (حراج یکنواخت)، اولویت رفتاری آنها در پیشنهاددهی کاملاً متفاوت از حالتی است که بازیگران امکان استفاده از تفاوت بین قیمت پیشنهادی و قیمت تعادلی را نخواهند داشت. در حالت اول، بازیگران صرفاً به دنبال ارائه پیشنهادها برای قرارگیری در لیست برندگان هستند و بر اساس این منطق، پیشنهاددهی مبتنی بر هزینه نهایی^۲ دور از ذهن نخواهد بود. اما به محض تغییر قوانین بازی، بازیگران نیز با هدف حداکثرسازی سود خود رفتار متفاوتی بروز می‌دهند و نحوه پیشنهاددهی آنها بر اساس پیش‌بینی هر یک از قیمت نهایی یا بالاترین قیمت بازار است. همین موضوع به این نکته می‌انجامد که سطح عمومی پیشنهادها در یک بازار پرداخت بر اساس پیشنهاد عموماً بالاتر از بازارهای یکنواخت است. همین تغییر منطق رفتاری به عنوان مهم‌ترین چالش در مقایسه این دو حراج شناخته شده و باعث بروز

-
1. Free Riding
 2. Marginal Cost Bidding

رویکردهای مختلف می‌گردد. بازارها به فراخور سایر ویژگی‌ها و ساختار موجود به انتخاب یکی از این دو رویکرد می‌پردازند و از همین رو، نسخه جامع و فراگیری ارائه نشده است.

بخشی از چالش و دغدغه مورد اشاره در بخش فوق، به تنگنای موجود در روش‌های شبیه‌سازی باز می‌گردد. ابزاری که امکان مدل نمودن ویژگی‌های ساختاری بازارها را داشته باشد و در عین حال از انعطاف کافی به منظور تغییر منطق بازیگران برخوردار باشد متفاوت از ابزار مرسوم و روش‌های متداول خواهد بود. بر این مبناست که روش شبیه‌سازی عامل‌محور به عنوان یک ابزار مناسب در این تحقیق مد نظر قرار گرفته است. در این روش، هر عامل به عنوان یک بازیگر یا نماینده‌ای بخشی از بازیگران وارد بازی می‌شود. در گام دوم، ویژگی‌های مربوط به بازیگر به عامل مربوطه الصاق شده و نسبت داده می‌شود. بنابراین، چالش مربوط به مدل کردن ویژگی‌های ساختاری بازار که مرتبط با تنوع بازیگران است، مرتفع می‌شود. در گام بعدی با توجه به وجود یک سازوکار یادگیری و شبیه‌سازی، امکان مدل شدن تغییرات رفتاری بازیگران در قوانین مختلف به وجود می‌آید. به همین دلیل است که بازیگران در این مدل شبیه‌سازی با تغییر قانون تسویه بازار از روش یکنواخت به تبعیض‌آمیز، رفتار خود را نیز تغییر داده و نحوه بهینه‌سازی و پیشنهاددهی متفاوت می‌شود. لذا اهمیت استفاده از این ابزار ضروری و به عنوان یک گام اساسی قابل اشاره است.

در بخش نوآوری، بدون تردید مهم‌ترین بحث به مدل‌سازی نتایج مربوط به دو نوع حراج با استفاده از داده‌های واقعی بازمی‌گردد. به بیان دیگر، از آنجا که تقریباً تمامی بازارهای برق دنیا بر اساس مدل حراج یکنواخت فعالیت می‌کنند، استفاده از یک حراج واقعی تبعیض‌آمیز و شبیه‌سازی نتایج حاصل با مدل حراج یکنواخت وجه تمایز و مهم‌ترین نوآوری مقاله حاضر محسوب می‌شود. در همین حال، استفاده از روش شبیه‌سازی عامل‌محور نیز از منظر روش تحقیق وجه تمایز این مطالعه می‌باشد.

در اغلب مطالعات انجام شده صرفاً مسأله نوع حراج مدنظر است، لیکن نکته قابل توجه که ابزار سیاستگذاری از منظر اقتصادی است موضوع کارایی بازار است. به دیگر سخن، سیاست‌گذاران بیش از هر چیز در طراحی و معماری یک بازار موضوع کارایی بازار را مورد توجه قرار می‌دهند. لذا شبیه‌سازی رفتار بازیگران در مدل واقعی از بازار می‌تواند به عنوان یک ابزار سیاستگذاری و تصمیم‌گیری مورد توجه قرار گیرد. ارزیابی کارایی بازار و مقایسه نتایج در دو ساختار مرسوم و متداول موجود، راهگشای برنامه‌ریزی به منظور طراحی سایر قوانین و نیل به اهداف موجود در فضای رقابتی است.

مدل مورد استفاده در این پژوهش، روش شبیه‌سازی مبتنی بر عامل است. بر اساس این مدل، دو حراج یکنواخت و حراج تبعیض‌آمیز مقایسه شده‌اند. بدین منظور، هر عامل به عنوان نماینده مجموعه‌ای از نیروگاه‌ها معرفی می‌شود و تلاش شده است که با استفاده از الگوریتم یادگیری، لیست پیشنهاد-قیمت برآورد و در یک ساختار شبیه‌سازی به بازار ارسال شود. در بازار طراحی شده، منحنی‌های عرضه و تقاضای بازار شبیه‌سازی خواهد شد و از این طریق، نتایج حاصل از دو ساختار مورد اشاره مقایسه می‌شوند. در ادامه، مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است:

در بخش دوم، به ادبیات تحقیق پرداخته شده و در قسمت سوم، روش‌شناسی تحقیق ارائه می‌شود. قسمت چهارم به ارائه نتایج تجربی تحقیق اختصاص یافته و در نهایت، نتیجه‌گیری مقاله آورده می‌شود.

۲. ادبیات تحقیق

در این بخش، ابتدا به مبانی نظری در خصوص انواع روش‌های تسویه بازار و دو حراج متداول در بازارهای برق پرداخته شده و سپس مرور کوتاهی نیز بر الگوریتم راث-ارو انجام خواهد شد.

مطابق با آنچه در بخش مقدمه مقاله مطرح شد، فرایند تسویه بازارهای برق بر اساس دو ساختار یکنواخت و تبعیض آمیز خواهد بود. تفاوت ساختاری موجود در نحوه تخصیص منافع در این دو بازار باعث بروز رفتارهای متفاوت از سوی بازیگران می‌شود. در ادامه، مرور کوتاهی بر مهم‌ترین ویژگی‌های آنها انجام خواهد شد.

حراج یکنواخت

در حراج یکنواخت، به تمامی تولیدکنندگان که کمتر یا مساوی قیمت تسویه بازار پیشنهاد داده باشند، قیمت تسویه پرداخت می‌شود.

این سیستم قیمت‌گذاری به طور گسترده در صنعت برق تجدید ساختار شده مورد توجه قرار گرفت، چرا که اقتصاددانان بر این باور بودند که از این طریق، بازار برق به کارایی اقتصادی^۱ دست می‌یابد. به عبارت دیگر، بهترین تخصیص منابع^۲ در بلندمدت، از این طریق میسر است. (رن، ۲۰۰۸) از آنجایی که در حراج یکنواخت، قیمت پرداختی به تولیدکنندگان، مستقل از پیشنهادشان می‌باشد؛ حداکثرسازی تابع سود ایجاب می‌کند که پیشنهاد هزینه برای تولید هر تولیدکننده، پیشنهاد بهینه باشد. بنابراین، تابع پیشنهاد بهینه صنعت، تابع هزینه نهایی صنعت خواهد بود. (فدریکو و رحمان، ۲۰۰۳)

در این حالت، تولیدکنندگان می‌دانند اگر پیشنهادشان رد شود، بدین معناست که پیشنهادهای پایین‌تری برای پوشش تقاضا موجود بوده است و بهتر است آنها خاموش بمانند، زیرا که با قیمت کمتر، هزینه‌های آنها پوشش داده نمی‌شود. از طرفی، در صورتی که پیشنهادشان پذیرفته شود، سود ناشی از اختلاف قیمت تسویه بازار و هزینه‌شان را دریافت خواهند کرد. در این حالت، فشار رقابت،

1. Performance Economic

2. Resources Attribution

تولیدکنندگان را مجبور می‌کند هزینه‌های خود را کمینه کنند تا به بیشترین سود دست یابند.

(فدریکو و رحمان، ۲۰۰۳)، (رن، ۲۰۰۸)، (کاهن و همکاران، ۲۰۰۱)

از طرفی، بیشتر اقتصاددانان بر این باورند که در شرایط غیررقابتی، شرکت‌های تولیدی، پیشنهادی بالاتر از هزینه واقعی خود به بازار ارائه می‌کنند تا سود اقتصادی به دست آورند. بنابراین، از آنجا که ممکن است شرکت‌های تولیدی، پیشنهادهایی بالاتر از هزینه خود ارائه کرده باشند، لذا مجموع پیشنهادها لزوماً نشان‌دهنده رفاه اجتماعی نیست.

از آنجایی که در حراج یکنواخت قیمت پیشنهادی شرکت‌های تولیدی صرفاً برای تعیین برندگان بازار است و مستقل از قیمت پرداختی به آنها می‌باشد، شرکت‌های تولیدی برای حداکثرسازی سود در واقع می‌توانند به دنبال پیشنهاد بهینه باشند. (فدریکو و رحمان، ۲۰۰۳)

حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد

در این حراج، به تمامی تولیدکنندگانی که کمتر یا مساوی قیمت تسویه بازار پیشنهاد داده باشند، قیمتی برابر با پیشنهادشان پرداخت خواهد شد.

اگرچه بسیاری از اقتصاددانان معتقدند که در حراج یکنواخت کارایی بازار بیشتر است، اما در برخی کشورها از حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد استفاده می‌شود. در واقع، در این حراج به علت اینکه هر نیروگاه در صورت برنده شدن، قیمت پیشنهادی خود را دریافت می‌کند، نیروگاه‌هایی سود بیشتری کسب می‌کنند که قیمتی نزدیک به قیمت تسویه بازار پیشنهاد دهند، یعنی نیروگاه‌ها برای کسب سود بیشتر در این نوع حراج باید توانایی پیش‌بینی قیمت تسویه بازار را داشته باشند.

در نگاه اول، به نظر می‌رسد که در حراج تبعیض‌آمیز نیروگاه‌ها برای ماندن در مدار، قیمت پایین‌تری و یا هزینه نهایی خود را پیشنهاد می‌دهند، اما با استفاده از شبیه‌سازی می‌توان قیمت تسویه را پیش‌بینی کرد و قیمتی نزدیک به آن پیشنهاد داد. (بوئر و بان، ۲۰۰۱)

اقتصاددانان با بررسی دو حراج در بیشتر بازارهای جهان به این نتیجه رسیدند که قدرت بازار که با کارایی بازار رابطه معکوسی دارد، در حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد برای برخی تولیدکنندگان زیاد است، یعنی کارایی بازار نیز پایین می‌باشد، چرا که نیروگاه‌ها قادر به پیش‌بینی قیمت تسویه می‌باشند. بنابراین، قیمت پیشنهادی در حراج تبعیض‌آمیز بیشتر از حراج یکنواخت می‌باشد. (ویسدهیفان، ۲۰۰۳)

با توجه به تحقیقات برخی اقتصاددانان، در بعضی موارد که عرضه‌کنندگان محدودیت‌های ظرفیت دارند، امکان دارد پرداخت‌های انجام شده به عرضه‌کنندگان در حراج تبعیض‌آمیز پایین‌تر از پرداخت‌ها در حراج یکنواخت باشد. (جنک، ۲۰۰۷)

به طور خلاصه، در حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد، کارایی بازار و رفاه مصرف‌کننده پایین و قدرت بازار بالاست که این ممکن است در صورت بالا بودن بیش از اندازه قدرت بازار، یعنی وجود بازار غیر رقابتی، به نابودی بازار منجر شود. (منسا- بونسو و اورن، ۲۰۰۲)

هدف از این پژوهش، مطالعه رفتار تولیدکنندگان تحت هر دو حراج است. با کمک الگوریتم یادگیری تقویتی و بهره‌گیری از ویژگی‌های انسانی، امکان بررسی دقیق‌تر پیشنهاد قیمتی تولیدکنندگان فراهم شده است.

الگوریتم راث-ارو^۱

در یک مجموعه از مطالعات راث^۲ و ارو^۳ دریافتند که مردم چگونه می‌توانند بیاموزند تا بتوانند در بازی‌هایی با استراتژی‌های چندگانه و تحت تاثیر سایر بازیگران، رفتار کنند. بدین منظور، آنها یک الگوریتم یادگیری تقویتی سه پارامتری را توسعه دادند که بعد از آن به الگوریتم RE معروف گردید. (راث و ارو، ۱۹۹۸)

-
1. Roth-Erev
 2. Ido Erev
 3. Alvin E. Roth

پایه اصلی هر الگوریتم یادگیری تقویتی میل به تقویت اعمالی است که باعث ایجاد نتایج دلخواه می‌شوند و در مقابل، تضعیف نمودن اعمالی است که نتایج دلخواه را سبب نمی‌شوند. راث-ارو این اصل را به عنوان نقطه شروع تحقیقات خود برای ایجاد یک مدل قوی در یادگیری شخصی پذیرفتند. علاوه بر این، آنها یک اصل مهم دیگر تحت عنوان قانون قدرت تمرین و تکرار در یادگیری را مورد توجه خود قرار دادند. (راث و ارو ۱۹۹۸)

روان شناسان عموماً بر یادگیری شخصی در "بازی‌های مقابل طبیعت" تحت شرایطی که تنها یک تصمیم‌گیرنده وجود دارد، تمرکز می‌کنند. در مقابل راث-ارو به یادگیری شخصی در استراتژی محیطی با تصمیم‌گیرندگان متعدد علاقه‌مند بودند. راث-ارو به این بحث پرداختند که در این گونه موارد، قانون تاثیر و قانون قدرت تمرین و تکرار نمی‌توانند به صورت کارآ تاثیر واکنش‌هایی را که سایر تصمیم‌گیرندگان مشاهده نموده‌اند برای تصمیم‌گیری دیگر بازیگران در محیط نشان دهند. (نیکولایسن^۱ و همکاران، ۲۰۰۱)

بر اساس مشاهدات گسترده‌تر یادگیری شخصی در بازی‌های چندعاملی، راث-ارو دو اصل یادگیری دیگر را تحت عنوان های تاثیر آزمایش^۲ و تاثیر تازگی^۳ (تاخر) برای کمک به این موضوع در نظر گرفتند. چارچوب کلی اصل آزمایش بر این موضوع دلالت دارد که تنها انتخاب‌هایی که در گذشته به موفقیت ختم شده‌اند به احتمال زیاد در آینده نیز اخذ خواهند گردید، بلکه انتخاب‌های مشابه آنها نیز در اغلب موارد به کار گرفته خواهند شد. اصل تازگی نیز بر این موضوع تاکید دارد که تجربه اخیر عموماً نقش بیشتری در تعیین رفتار نسبت به تجربیات قبلی دارد. (نیکولایسن^۴ و همکاران، ۲۰۰۱)

-
1. James Nicolaisen
 2. Experimentation Effect
 3. Regency Effect
 4. James Nicolaisen

الگوریتم راث-ارو با بهره‌گیری از این چهار اصل یادگیری با درجات متفاوتی می‌تواند به بررسی رفتار افراد در بازی‌های چندعامله و تکراری پردازد.

• شکل الگوریتم راث-ارو:

سه پارامتر اصلی که الگوریتم RE را مشخص می‌نمایند عبارتند از:

- پارامتر مقیاس‌گذاری (s)

- پارامتر تازگی (t)

- پارامتر آزمایش (e)

• الگوریتم اصلاح‌شده راث-ارو

الگوریتم RE دارای دو مشکل می‌باشد؛ اول اینکه، در صورتی که e نزدیک به $\frac{[K-1]}{K}$ تنظیم شود، بروزسانی انتخاب احتمالاً آهسته خواهد بود، همچنین اگر e دقیقاً برابر با $\frac{[K-1]}{K}$ باشد، بروزسانی انتخاب احتمالات به طور کامل متوقف خواهد گردید. در نتیجه، باید در انتخاب e و K بسیار دقت کرد.

دوم اینکه، سختی اصلی در موضوع حراج دوطرفه این است که هر عامل تنها به بروزسانی انتخاب احتمالات خودش برای دستیابی به سودی غیر از صفر می‌پردازد. در حراج دوطرفه، عاملان باید برای پیشنهاد قیمتی برای تصاحب قسمتی از بازار آموزش ببینند و در صورت عدم بروزسانی در واکنش نسبت به سود صفر باعث از دست دادن سهم بازار می‌شود.

یک اصلاح ساده در الگوریتم راث-ارو با در نظر گرفتن پایه اصلی آن باعث حل این دو مشکل خواهد بود. بدین منظور، با ایجاد یک تغییر در بروزسانی تابع $E(.)$ به صورت زیر، این اصلاح صورت گرفته است.

1. Scaling Parameter

$$ME(j, k, k', n, K, e) = \begin{cases} R(j, k', n)(1 - e) & k = k' \\ \frac{q_{jk}(n)e}{K-1} & k \neq k' \end{cases} \quad (1)$$

این اصلاح به معرفی یک ارزش متفاوت برای پارامتر تازگی (r) برای انتخاب در مقابل سایر عمل‌های انتخاب نشده می‌پردازد. به عبارت دیگر، تاثیر پارامتر تازگی برای عمل‌های انتخاب نشده از r به $r' = \frac{r-e}{[K-1]}$ کاهش می‌یابد.

مطالعات تجربی

یانگ^۱ و همکاران در مقاله خود (۲۰۱۶) یک مدل *SWEM* را توسعه دادند. هدف آنها ساخت یک مدل عامل محور با استفاده از الگوریتم اصلاح شده راث-ارو برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت قیمت‌ها با ورودی‌های پایه‌ای (مانند ذخیره آبی) در فضای واقعی بازار برق بود. آنها از الگوریتم اصلاح شده راث-ارو برای ۱۹ گره از بازار برق نیوزیلند استفاده کردند. مطابق با نتایج حاصل، الگوریتم اصلاح شده راث-ارو برای بازار برق معتبر می‌باشد. همچنین از نظر این مقاله، دلیل استفاده نشدن این الگوریتم در گذشته، عدم توجه به ضرورت بخش برق برای سایر پژوهش‌گران و جدید بودن این حوزه بوده است. همچنین آنها بیان کردند که این الگوریتم اصلاح شده بسیاری از فرضیات رفتاری را تسخیر می‌کند و همچنین نشان دادند که این الگوریتم در شبکه‌های بزرگتر بسیار کارآتر عمل می‌نماید.

ماریگرازا^۲ و همکاران در مقاله (۲۰۱۴) یک مدل شبیه‌سازی براساس تعادل نش برای ارزیابی رقابتی مزایده در بازار برق ارائه دادند. تفاوت عمده این مدل با سایر مدل‌های پیشین در فرض ظرفیت‌های متفاوت تامین‌کنندگان بود که باعث اثربخشی آن شده بود. هدف از این رویکرد،

1. David Young

2. Mariagrazia

ارزیابی کیفیت رقابتی بازار با در نظر گرفتن استراتژی‌های پیشنهاد قیمت (قیمت گذاری) برای جلوگیری از رفتارهای غیررقابتی بود. این رویکرد با یک سری داده‌های واقعی با تعداد متعددی از اعضای پیشنهاددهنده با ظرفیت‌های مختلف در کشور ایتالیا مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل می‌تواند به عنوان یک ابزار پشتیبانی در فرایند تصمیم‌گیری هم برای اعضای بازار (در تعیین استراتژی‌های بهینه قیمت پیشنهادی) و هم برای تنظیم‌کنندگان (جلوگیری از استراتژی‌های فریبنده) به کار رود. همچنین این مدل امکان تحلیل پویا برای پیگیری رفتار بازیگران و اعمال تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند تا در سایه آن بتوان قدرت بازار را افزایش و در نتیجه، کیفیت رقابتی را بهبود بخشید. اما این مدل به دلیل پایه‌ای بودن آن کمبودهایی نیز داشت که از جمله این کمبودها می‌توان به اعتبارسنجی این رویکرد در مقایسه آن با سایر راه‌حل‌های کامل پرداخت. همچنین به دلیل ارزیابی بهتر اثر ظرفیت‌های مختلف تولید در هزینه‌های آن، نیاز به ایجاد تمایز میان پیشنهاددهندگان قیمت در بازار برق (پیشنهاددهندگان عمده به علت اثر اقتصاد به مقیاس، هزینه کمتری نسبت به پیشنهاددهندگان کوچکتر متحمل می‌شوند) می‌باشد.

نیلسن^۱ و همکاران در مقاله (۲۰۱۱) با توجه به اینکه مسیر سیاست انرژی دانمارک رو به بی‌نیازی از سوخت‌های فسیلی و افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد، بازار برق دانمارک را با دو مدل تحت دو سازوکار بازار مورد بررسی قرار دادند. در بازار برق دانمارک از سیستم حراج بر مبنای قیمت نهایی استفاده می‌شود که با توجه به این سیستم، پیشنهاد عرضه‌کنندگان برق تجدیدپذیر صفر یا نزدیک به صفر می‌باشد. از این رو، قیمت‌های بازار در زمان وجود این عرضه‌کنندگان در حراج، کاهش و درآمد آنها نیز کاهش می‌یابد. در این پژوهش به منظور رفع این مشکل، حراج تبعیض‌آمیز پیشنهاد شده است. بنابراین، دو تنظیم مختلف بازار را با سهم‌های متفاوتی از منابع

تجدیدپذیر در نظر گرفتند تا امکان بررسی اثر تغییرات در نوع حراج فراهم شود. نتایج حاصل نشان داد که برای این نوع بازار، حراج بر مبنای هزینه نهایی مناسب‌تر از هر سازوکار دیگری است. گورسی^۱ و رستگار^۲ در مقاله (۲۰۰۹) بازار برق ایتالیا را تحت دو سازوکار حراج یکنواخت و پرداخت بر اساس پیشنهاد بررسی کردند. در این مقاله، ۵۳ نماینده به عنوان عوامل شبیه‌سازی مورد توجه قرار گرفته و هر نماینده، مجموعه‌ای از نیروگاه را شامل می‌شود. منطق اصلی در دسته‌بندی نیروگاه‌ها ویژگی جغرافیایی و فنی آنهاست. در این تحقیق همچنین از الگوریتم تقویتی راث-ارو برای یادگیری نماینده‌ها استفاده شده و نتایج نشان می‌دهد که حراج یکنواخت در مقایسه با حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد کارایی بیشتری دارد.

جنک^۳ در مقاله خود (۲۰۰۷) نتایج حراج تبعیض‌آمیز با یکنواخت را با وجود محدودیت ظرفیت عرضه مقایسه می‌کند. او برای مقایسه دو حراج با وجود محدودیت‌های ظرفیت، مدل تابع تعادل عرضه با برنامه پیشنهاد مستمر با تقاضای کشش‌پذیر و متغیر با زمان و تابع هزینه نهایی تک‌گامی مدل‌سازی کرد. جنک نشان می‌دهد که پرداخت‌های انجام‌شده به عرضه‌کنندگان در تعادل حراج تبعیض‌آمیز پایین‌تر از حراج یکنواخت می‌باشد.

سون^۴ و همکاران در مقاله (۲۰۰۴) سازوکارهای قیمت رقابتی را در دو حراج یکنواخت و تبعیض‌آمیز مقایسه کرده و همچنین با استفاده از نظریه بازی‌ها و نظریه حراج، رفتار استراتژیک یک بازیگر بزرگ و بازیگر کوچک را در بازی حراج کوتاه‌مدت مورد بررسی قرار دادند. آنها مدلی با استفاده از تعادل نش شبیه‌سازی کردند و مدل را با در نظر گرفتن تقاضای کشش‌پذیر توسعه و نشان دادند که قیمت‌گذاری تبعیض‌آمیز منجر به تقاضای کلی انتظاری بزرگتری می‌شود.

-
1. Guerci
 2. Rastegar
 3. Genc
 4. Seok Son

فدریکو^۱ و رحمان^۲ در مقاله (۲۰۰۳) تغییرات حاصل از بازار انگلستان را از بازار یکنواخت به بازار تبعیض‌آمیز تحت دو ساختار کلی بازار، رقابت کامل و انحصاری تحلیل کردند. آنها نشان دادند که تحت رقابت کامل یک موازنه میان بهره‌وری و مازاد مصرف‌کننده در دو حراج وجود دارد. آنان همچنین نشان دادند که تغییر سازوکار بازار از یکنواخت به تبعیض‌آمیز تحت شرایط انحصاری اثر منفی بر سود و توان خروجی و اثر مثبت بر مازاد مصرف‌کننده دارد، لیکن اثرات رفاهی و میانگین قیمت‌ها در مقایسه دو حراج به صورت قطعی قابل تشخیص نیست و نتایج با ابهام روبرو می‌باشد. به بیان دیگر، سایر ویژگی‌های موجود در یک بازار می‌تواند نتایج حاصل را در یک ساختار انحصاری متفاوت از یک بازار دیگر نماید.

بوئر^۳ و بان^۴ در مقاله خود (۲۰۰۱) تحت عنوان تحلیل تجربی بهره‌وری قیمت یکنواخت در مقابل حراج تبعیض‌آمیز در بازار برق انگلستان و ولز، شبیه‌سازی مبتنی بر عامل بازار برق انگلستان و ولز را برای سال ۲۰۰۰ ارائه کردند. این شبیه‌سازی برای مقایسه دو سازوکار مختلف بازار طراحی شده است. در این مقاله، مقایسه پیشنهادهای روزانه در مقابل پیشنهادهای ساعتی و مقایسه تنظیم قیمت یکنواخت در مقابل تبعیض‌آمیز صورت گرفته است. در این شبیه‌سازی، نماینده‌های تولید با الگوریتم یادگیری تقویتی ساده با هدف، افزایش سود و رسیدن به نرخ بهره‌وری مشخص، پیشنهادهای خود را می‌دهند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که قیمت‌های بازار در حراج تبعیض‌آمیز بیشتر از قیمت‌های یکنواخت می‌باشد.

-
1. Federico
 2. Rahman
 3. Bower
 4. Bunn

در مقاله‌ای دیگر، نیکولایسن^۱ و همکاران (۲۰۰۱)، بهره‌وری و قدرت بازار را تحت سازوکار بازار برق دوطرفه و وجود حراج تبعیض‌آمیز بررسی کردند. در این مطالعه، دو نوع نماینده^۲ خریداران و فروشندگان در نظر گرفته شده که فروشندگان برای تعیین قیمت و مقدار پیشنهادی خود در هر دور حراج از الگوریتم راث-ارو استفاده می‌کنند. خریداران و فروشندگان اطلاعات خود را در هر دوره بازی به‌روز می‌کنند و در واقع، عمل یادگیری اتفاق می‌افتد.

حقیقت و همکاران در مقاله (۱۳۹۱) قیمت تبعیض‌آمیز را با قیمت نهایی با توجه به رفتار استراتژیک عرضه‌کنندگان مقایسه کردند و نشان دادند که استراتژی‌های پیشنهاددهی بهینه و قیمت تسویه بازار بسیار پایین‌تر از سازوکار تبعیض‌آمیز بوده و حداکثر سود هر واحد ژنراتور تحت دو سازوکار یکسان نمی‌باشد. آنها همچنین توزیع تجمعی سود و زیان انتظاری تحت سازوکارهای تبعیض‌آمیز و نهایی مقایسه کردند و نشان دادند در صورتی که محدودیت‌های شبکه انتقال نادیده گرفته شود، هر ژنراتور سود و زیان انتظاری بیشتری تحت سازوکار تبعیض‌آمیز دارد. در غیر این صورت، ممکن است سود و زیان کمتری تحت این سازوکار حاصل شود.

آزاده و همکاران در مقاله (۱۳۸۹) برای اولین بار در مدل‌سازی مبتنی بر عامل با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی کلونی مورچه، سه سازوکار حراج بازار، یکنواخت، تبعیض‌آمیز و ویکری را با هم مقایسه کردند. آنها در این بررسی معیارهای اقتصادی مختلفی مانند میانگین قیمت تسویه، بهره‌وری تخصیص و نوسانات قیمت را در نظر گرفتند. با در نظر گرفتن میانگین قیمت، حراج تبعیض‌آمیز کمترین و حراج یکنواخت بیشترین قیمت را داشته است. از نظر نوسانات، حراج ویکری کمترین نوسانات قیمت را داشته و از نظر بهره‌وری تخصیص، حراج ویکری بهترین حراج است و در نهایت، با نرمالیزه کردن معیارها حراج یکنواخت بهترین حراج مشخص شد.

1. Nicolaisen

2. Agent

رحیمیان و رجیبی مشهدی در مقاله (۱۳۸۷) مساله تصمیم‌گیری در مورد پیشنهادها در حراج تبعیض‌آمیز از نگاه عرضه‌کننده را بررسی می‌کنند. آنها در این بررسی قیمت تسویه بازار به عنوان یک متغیر تصادفی پیوسته با تابع توزیع احتمال مشخص را در نظر گرفته و در راه‌حل پیشنهاد شده اثرات قدرت بازار عرضه‌کننده را که منجر به تراکم انتقال می‌شود، در نظر گرفتند و بنابراین، یک معادله جبری به منظور محاسبه قیمت پیشنهادی ارائه دادند. این روش که روش مبتنی بر مدل نامیده شده است مناسب شرایط واقعی نبوده و بنابراین، عرضه‌کنندگان از تجربیات گذشته با استفاده از الگوریتم یادگیری Q به دنبال یافتن قیمت پیشنهادی بهینه می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد عرضه‌کنندگانی که از الگوریتم یادگیری Q استفاده کردند، استراتژی پیشنهادی بهینه مشابه همان استراتژی رویکرد مبتنی بر مدل یافتند.

در مقاله‌ای با عنوان بررسی تاثیر حضور عامل‌های قیمت‌دهنده با استراتژی‌های معین در کنار عامل‌های یادگیرنده تقویتی در یک بازار برق رقابتی، نصیری و همکاران (۱۳۸۷) تاثیر حضور عامل‌های قیمت‌دهنده با استراتژی معین در بازار برق رقابتی را شبه‌سازی کرده‌اند. نتایج شبه‌سازی آنان نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری احتمالی تأثیری در نحوه قیمت‌دهی واحدها ندارد، اما پس از بررسی سود هر واحد در طولانی‌مدت به این نتیجه رسیدند که استفاده از یک الگوریتم دیگر باعث می‌شود که بازار از نقطه تعادل خارج شده و سود برخی از واحدها افزایش و سود برخی از واحدها کاهش یابد.

محمدی و همکاران (۱۳۹۴) با بهره‌گیری از مدل MESSAGE به ارزیابی اثرات صرفه‌جویی انرژی بر توسعه بخش نیروگاهی کشور طی سال‌های ۱۴۳۰-۱۳۹۵ می‌پردازند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد ظرفیت نصب شده از حدود ۷۳ هزار مگاوات در سال ۱۳۹۳ با رشد سالانه ۶/۳ درصد در پایان دوره براساس سناریوی مرجع به ۲۵۰ گیگاوات خواهد رسید که این رقم براساس سناریوی

صرفه‌جویی انرژی به میزان ۹۰ گیگاوات کاهش یافته و در پایان دوره با رشد سالانه‌ای معادل ۴/۲ درصد به ۱۶۰ گیگاوات خواهد رسید.

محمدی بوساری و همکاران (۱۳۹۶) با ارائه یک مساله ریاضی چندهدفه به مدل‌سازی تامین انرژی الکتریکی پایدار در ریز شبکه متصل به شبکه می‌پردازند. نتایج تحلیل حساسیت برآورد مدل نشان می‌دهد مدل ریاضی پیشنهادی با استفاده از روش حل بکارگرفته شده با نگاهی جامع بر ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی بهره‌برداری از واحدهای تولید مختلف یک ریز شبکه در افق زمانی ۲۴ ساعته رویکردی کارا و موثر جهت توسعه، بهبود و کاربردی نمودن زمان‌بندی عملیات ریز شبکه‌ها فراهم می‌نماید.

همانگونه که در بررسی پیشینه تحقیق مشخص است، مطالعات متعددی به بررسی تمایز بین دو نوع حراج و نتایج حاصل پرداخته‌اند. مطابق با بررسی روند مورد اشاره، تمامی مطالعات مربوط به بازارهای برق در کشورهایی است که بازار برق آنها بر اساس روش حراج یکنواخت می‌باشد.

بدیهی است مهم‌ترین وجه تمایز بین مطالعه حاضر با مطالعات انجام شده، مدل‌سازی با استفاده از داده‌های بازاری است که به صورت عملی به صورت پرداخت بر اساس پیشنهاد فعالیت می‌کند و بنابراین، نتایج حاصل می‌تواند با مطالعات مشابه متفاوت باشد.

از سوی دیگر، استفاده از روش تحلیل عامل محور به دلیل ویژگی ذاتی فنی و پیچیدگی‌های مدل‌سازی که از آن برخوردار است، از نوآوری دیگر این پژوهش در مقایسه با مطالعات مشابه داخلی محسوب می‌شود.

۳. روش‌شناسی تحقیق

در این بخش به معرفی روش تحقیق در چارچوب الگوریتم راث-ارو و فرایند مدل‌سازی آن پرداخته می‌شود.

این الگوریتم برای هر استراتژی (عمل) $a_j \in A_j$ ، یک مقدار گرایش^۱ تعریف کرده است. در هر دور t ، مقادیر $S_{j,t-1}(a_j)$ طبق فرمول زیر به‌روز می‌شوند.

$$S_{j,t}(a_j) = (1-r) \cdot S_{j,t-1}(a_j) + E_{j,t}(a_j) \quad (۲)$$

$r \in [0,1]$ پارامتر اثر تاخیر می‌باشد که اثر نتایج گذشته را به صورت نمایی کاهش می‌دهد.

عبارت دوم در معادله (۲) تابع آزمایش^۲ نامیده می‌شود که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$E_{j,t}(a_j) = \begin{cases} \Pi_{j,t}(\widehat{a}_j) \cdot (1-e) & a_j = \widehat{a}_j \\ S_{j,t}(a_j) \cdot \frac{e}{M-1} & a_j \neq \widehat{a}_j \end{cases} \quad (۳)$$

$e \in [0,1]$ پارامتر اثر آزمایش می‌باشد که وزن‌های مختلفی بین عمل‌های انجام‌شده و نشده

می‌دهد، M تعداد عمل‌های موجود می‌باشد و $\Pi_{j,t}(\widehat{a}_j)$ پاداشی است که با انجام شدن عمل a_j در دور t به دست آمده است که طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$\Pi_{j,t}(\widehat{a}_j) = R_j(\widehat{a}_j) / \bar{R}_j \quad (۴)$$

\bar{R}_j حداکثر سودی که عامل j می‌تواند، داشته باشد. (هنگامی که قیمت و مقدار پیشنهادی در

حداکثر مقدار ممکن باشد)

مقادیر گرایش برای تعیین احتمالات عمل‌های انتخابی برای دوره بعدی به صورت زیر نرمالیزه

می‌شوند.

$$\Pi_{j,t+1}(a_j) = \frac{e^{S_{j,t}(a_j)/\lambda_t}}{\sum_{a_j} e^{S_{j,t}(a_j)/\lambda_t}} \quad (۵)$$

-
1. Propensity Value
 2. Experimentation Function

$$\lambda t = c \cdot t - d \quad (۶)$$

λt پارامتر تفاوت زمانی^۱ است که در واقع پارامتر یکسان‌سازی می‌باشد و مشخص می‌کند کدام عامل زام در تعیین سیاست انتخاب عمل احتمالی از مقادیر گرایش استفاده کرده است. زمانی که پارامتر تفاوت زمانی (λt) به سمت صفر میل کند، نشان‌دهنده این است که سیاست انتخاب عمل احتمالی به سرعت افزایش یافته است و عمل احتمالی a_j بالاترین مقادیر گرایش را داشته و در نتیجه، احتمال افزایش می‌یابد و این عمل انتخاب می‌شود.

فرایند مدل‌سازی

بر اساس توضیحات ارائه‌شده در بخش قبلی، نیروگاه‌ها مجموعه‌ای از عمل‌ها دارند که همان عددی است که در هزینه نهایی نیروگاه ضرب می‌شود و قیمت پیشنهادی به دست می‌آید. (در بخش قبلی نحوه تشخیص m توضیح داده شده است)

$$P_{j,i} = m_j \cdot MC_{j,i} \quad (۷)$$

$m_j \in A_j$ (فضای عمل نماینده m_j باشد)، $MC_{j,i}$ هزینه نهایی نیروگاه i ام تحت مالکیت عامل j ام است.

فرض شده است که $A_j = \{1.00, 1.05, 1.10, \dots, 3.00\}$ می‌باشد. با توجه به انواع پرداخت‌ها به مشتریان، بسیاری از هزینه‌های نیروگاه‌ها پوشش داده می‌شود. بنابراین، برای ساده کردن مدل از وارد کردن آن دسته از پرداخت‌ها در محاسبه چشم‌پوشی می‌شود. به این منظور، برای حداکثر قیمت پیشنهادی محدودیتی در نظر گرفته شده است.

$$P_{j,i} = m_j \cdot MC_{j,i} \leq ۳۳۰ \quad (۸)$$

هر عمل را با a_j نشان می‌دهیم $\{a_1, a_2, \dots, a_{41}\}$ و $a_j \in A_j$ می‌باشد.

1. Time Varying Parameter

در این مطالعه، نیروگاه‌های گازی، بخاری و چرخه ترکیبی کشور ایران که هزینه نهایی آنها کمتر از ۳۳۰ باشند، در دو سناریو متفاوت در نظر گرفته شده است. در سناریو اول، هر شرکت برق منطقه‌ای به عنوان یک نماینده در نظر گرفته شده که به این ترتیب، ۱۶ نماینده در این سناریو وجود دارد و در سناریو دوم، هر نیروگاه به عنوان یک نماینده در نظر گرفته شده است که به این ترتیب، ۵۵ نماینده در این سناریو وجود دارد.

هر نیروگاه قیمت و مقدار برق تولیدی پیشنهادی خود را به بازار ارائه می‌دهد و نتایج بازار تحت دو حراج یکنواخت و پرداخت براساس پیشنهاد مقایسه می‌شوند.

هر عامل z ام، ($z = 1, 2, \dots, 15$)، مقادیر قیمت و مقدار برق تولیدی (در این مطالعه فرض شده است که هر نیروگاه قدرت نامی خود را به عنوان مقدار تمایل تولیدی خود پیشنهاد می‌دهد) خود که تمایل به تولید آن را دارد، به بازار ارائه می‌دهد و در ادامه، تسویه بازار انجام می‌شود. ابتدا با استفاده از تابع هزینه (که در بخش بعدی توضیح داده خواهد شد) هزینه نیروگاه‌ها محاسبه می‌شود.

سپس سود نیروگاه‌ها محاسبه شده و به همین ترتیب، سود هر عامل که برابر با جمع سود نیروگاه‌های تحت مالکیت آن می‌باشد، به دست می‌آید.

$$R_i = P_t \cdot Q_i - TC_i(Q_i) \quad (\text{کیلووات ساعت/ریال}) \quad (9)$$

$$R_i = P_i \cdot Q_i - TC(Q_i) \quad (\text{کیلووات ساعت/ریال}) \quad (10)$$

از معادله‌های (۸) و (۹) به ترتیب سود از حراج یکنواخت و پرداخت براساس پیشنهاد محاسبه می‌شود.

که P_t قیمت تسویه در هر دور حراج می‌باشد، P_i قیمت پیشنهادی نیروگاه i ام می‌باشد و $TC_i(Q_i)$ هزینه کل نیروگاه i ام می‌باشد.

$$R_j = \sum R_i \quad (11)$$

سپس با داده‌های بدست آمده، الگوریتم مربوطه را اجرا کرده و با محاسبه m_j ، قیمت پیشنهادی بعدی را محاسبه می‌کند.

تسویه بازار

به فرایند برخورد منحنی عرضه و تقاضا در بازار، تسویه بازار می‌گویند. قیمت و مقدار نقطه تسویه، قیمت و مقدار تسویه نام دارد. تسویه بازار در دو حراج یکسان می‌باشد، اما نوع حراج بسیار مهم است، چرا که در قیمت پیشنهادی نیروگاه‌ها موثر است. به همین منظور، در این نوشتار با استفاده از شبیه‌سازی مبتنی بر عامل سعی در تعیین قیمت پیشنهادی نیروگاه‌ها در هر دو حراج می‌شود. در گام نخست، به منظور اجرای مدل شبیه‌سازی مساله، تابع هزینه به عنوان یک عامل اساس در برآورد منافع بازیگران مورد توجه قرار خواهد گرفت.

تابع هزینه تولید

در صنعت برق، هزینه‌های یک نیروگاه به هزینه‌های ثابت^۱ و هزینه‌های متغیر^۲ تقسیم می‌شود. هزینه‌های ثابت، آن دسته از هزینه‌ها هستند که به مقدار تولید بستگی ندارند، یعنی اگر مقدار تولید تغییر کند و یا تولیدی صورت نگیرد، این هزینه‌ها وجود دارند. هزینه‌های متغیر، آن دسته از هزینه‌ها هستند که به مقدار تولید بستگی دارند، یعنی با تغییرات در سطح تولید، این هزینه‌ها تغییر می‌کند. در واقع، همان پرداخت‌های نیروگاه‌ها هستند.

در فناوری‌های مختلف، سهم بخش‌های مختلف هزینه‌های تولید متفاوت است. نیروگاه‌هایی که در تمام روز فعالند، نیروگاه بار پایه^۳، غالباً دارای هزینه ثابت بالا (هزینه روشن و خاموش شدنشان بالاست) و هزینه متغیر کم می‌باشند و نیروگاه‌های بار پیک^۴ دارای هزینه ثابت کم و هزینه متغیر

-
1. Fixed Costs
 2. Variable Costs
 3. Base Load
 4. Peak Load

بالا هستند (براحتی وارد مدار و خارج می‌شوند). بنابراین در ساعاتی از روز فعالند. نیروگاه‌های بار میانی، هزینه‌های ثابت و هزینه‌های متغیر نه خیلی کم و نه خیلی بالا دارند.

در این مطالعه، نیاز است تا هزینه نهایی برای هر نیروگاه محاسبه شود. هزینه نهایی، هزینه پرداختی برای آخرین واحد کالا یا خدمت است و به تعبیری تخمینی است از چگونگی تاثیر تغییر در خروجی بر تغییر هزینه‌های اقتصادی. به عبارت دیگر، هزینه نهایی، میزان افزایش در هزینه کل بنگاه، ناشی از تولید یک واحد اضافی محصول می‌باشد. از لحاظ محاسباتی، این مقدار برابر اختلاف دو هزینه کل متوالی است. لذا با توجه به اینکه هزینه ثابت در سطوح مختلف تولید تغییر نمی‌کند، هزینه نهایی برابر اختلاف دو هزینه متغیر کل متوالی می‌باشد.

در کوتاه‌مدت، ظرفیت و فناوری در یک نیروگاه ساخته‌شده و در حال فعالیت ثابت است و امکان تغییر ندارد. بنابراین، اجزای اصلی هزینه‌های متغیر در صنعت برق شامل هزینه‌های سوخت و هزینه‌های تعمیر و نگهداری^۱ می‌شود.

تصریح غیرخطی تابع هزینه کوتاه‌مدت

نظریه دوگانگی گام مهمی در برآورد توابع هزینه و تولید محسوب می‌شود. بر این اساس، تحت قوانین مشخص، تابع تولید و هزینه‌ای وجود دارد که دوگان یکدیگر هستند و تصریح تابع تولید بیانگر تابع هزینه است و برعکس. بنابراین، هزینه‌ها را می‌توان در قالب تابع تولید و یا تابع هزینه مورد تحلیل قرار داد. تخمین مستقیم تابع تولید زمانی می‌تواند جذاب باشد که مقدار تولید یک متغیر درون‌زا در بخش مورد مطالعه محسوب شود و طبیعتاً در صورتی که تولید متغیر برون‌زا باشد، تعیین تابع هزینه روش منطقی‌تری است. قبل از تجدید ساختار در صنعت برق، تولید یک متغیر برون‌زا محسوب می‌شد که در یک فضای قانونمند از طریق برنامه‌ریزی متمرکز تعیین می‌شد. در این دوره، برآورد تابع هزینه در صنعت برق بسیار مرسوم بود. با تشکیل بازارهای برق، تولید به عنوان

1. Maintenance Costs

متغیر تصمیم‌بنگاه‌ها مورد اهمیت قرار گرفت و بر این اساس، برآورد تابع هزینه کوتاه‌مدت با استفاده از تابع تولید روش متداول‌تری است.

در مدل‌سازی غیرخطی، در تصریح رابطه بین سوخت و تولید از یک رابطه ترمودینامیکی منطبق بر ویژگی‌های واحدهای حرارتی استفاده می‌شود. این رابطه که منحنی ورودی-خروجی^۱ واحد حرارتی نام دارد، بر حسب یک رابطه غیرخطی درجه دوم یا درجه سوم، نرخ تبدیل انرژی ورودی به خروجی را تصریح می‌کند. (رن، ۲۰۰۸)

هزینه‌های شروع اولیه، در این مدل‌سازی لحاظ می‌شوند. در تصریح غیرخطی به فرم درجه دوم، در کوتاه‌مدت این تابع به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$Cit = Wit (ai Q2it + bi Qit + ci) \quad (۱۲)$$

در معادله (۱۲)، Cit هزینه کوتاه‌مدت، Wit هزینه سوخت برای واحد i و ai ، bi و ci ضرایب معکوس تابع تولید می‌باشند.

تصریح خطی تابع هزینه کوتاه‌مدت

استفاده از رابطه فنی که توضیح داده شد، نیازمند حجم بالایی از اطلاعات و آمار است. این مساله بزرگترین محدودیت مربوط به برآورد منحنی ورودی-خروجی به صورت غیرخطی است. بنابراین، در مطالعات کاربردی و برآوردهای انجام شده در صنعت برق از یک تصریح خطی برای تعیین هزینه‌های کوتاه‌مدت تولید استفاده می‌شود.

در برآورد خطی، از ویژگی‌های فنی واحدهای تولیدی حرارتی استفاده می‌شود. برای این منظور از بازده حرارتی نیروگاه‌ها که تعیین‌کننده ضریب تبدیل انرژی ورودی به انرژی خروجی برای هر واحد می‌باشد، استفاده می‌شود. منحنی غیرخطی در صدد تبیین رفتار این نرخ حرارتی در زمان‌های مختلف است. در حقیقت، به دلیل وجود محدودیت‌های ناشی از هزینه‌های شروع اولیه و دیگر

1. Input Output Curve

محدودیت‌های فنی و تکنولوژی در صنعت برق، نرخ حرارتی در همه دامنه تولید از مقدار ثابتی برخوردار نیست. لیکن با توجه به محدودیت‌های موجود در مدل‌سازی تابع غیر خطی، از تصریح خطی به عنوان جایگزین در مدل‌های تجربی استفاده می‌شود.

در تصریح خطی، تابع هزینه به صورت زیر برآورده می‌شود:

$$TC_i(Q_i) = FPL_i \cdot Q_i + HR_i \cdot (1/HV) + MC_{mi} \cdot Q_i \quad (۱۳)$$

در معادله فوق، منظور از FPL، قیمت سوختی می‌باشد که توسط ژنراتور نام استفاده شده، HR_i بازده حرارتی نیروگاه نام و HV نرخ حرارتی سوخت می‌باشد.

۴. نتایج تجربی

به منظور مقایسه دو حراج یکنواخت و پرداخت براساس پیشنهاد در بازار برق ایران، هزینه نهایی و قیمت پیشنهادی برای هر یک از نیروگاه‌ها برای ساعات اوج مصرف برق و افت مصرف برق در هر فصل محاسبه شده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه توجه نیروگاه‌هایی که هزینه نهایی آنها بالای ۳۳۰ ریال می‌باشد، حذف شده‌اند، زیرا به این نیروگاه‌ها مابقی هزینه اضافی آنها با پرداخت بر مبنای آمادگی پوشانده می‌شود^۱.

به منظور برآورد مدل، قیمت سوخت بر اساس تعرفه‌های شرکت ملی گاز ایران برای نیروگاه‌ها و همچنین پیش‌بینی هزینه‌های سوخت کشور در بودجه سال ۱۳۹۳ در مدل استفاده شده است^۲.

۱. با توجه به آیین‌نامه تعیین شرایط و روش خرید و فروش برق در شبکه برق کشور، در شرایطی که امکان ذخیره منبع وجود ندارد و یا در شرایطی که بالا بودن نرخ پیشنهادی موجب عدم اولویت تولید این واحدها شده باشد، بازار برق موظف به خرید برق از این واحدها می‌باشد.

۲. از آنجا که ترازنامه انرژی کل کشور با تاخیر بیش از ۲ سال و نزدیک به ۳ ساله منتشر می‌شود، لذا امکان استفاده از داده‌های به‌روزتر میسر نیست. شایان ذکر است با توجه به اینکه بخش عمده اطلاعات مانند ارزش حرارتی و نرخ حرارتی که از عوامل اصلی تاثیرگذار است در دسته ویژگی‌های فنی نیروگاه‌هاست، موضوع به‌روزرسانی این بخش را تحت تاثیر قرار نخواهد داد و از قوت مدل مورد استفاده نمی‌کاهد.

جدول ۱. هزینه‌های سوخت مصرفی

سوخت	گاز طبیعی (ریال به مترمکعب)	نفت کوره (ریال به لیتر)	گازوئیل (ریال به لیتر)
قیمت	۷۰۰	۲۰۰۰	۳۵۰۰

منبع: ترازنامه انرژی

برای محاسبه هزینه نهایی نیروگاه‌ها، به اطلاعات ارزش حرارتی نیروگاه‌ها نیاز است که از آمار تفصیلی تولید نیروی برق در سال ۱۳۹۳ به دست آمده است. در جداول زیر به ترتیب اطلاعات مربوط به ارزش حرارتی گاز طبیعی در استان‌های مختلف و ارزش حرارتی سایر سوخت‌ها گزارش شده است:

جدول ۲. ارزش حرارتی گاز طبیعی

نیروگاه‌ها	ارزش حرارتی (کیلو کالری بر مترمکعب)
نیروگاه‌های واقع در هرمزگان و کرمان	۸۶۲۲
نیروگاه‌های واقع در رامین، زرگان و خرمشهر	۸۴۸۶
نیروگاه‌های استان خراسان	۸۵۴۱
نیروگاه‌های استان مازندران	۸۷۶۳
سایر نیروگاه‌ها	۸۷۶۳

منبع: آمار تفصیلی تولید نیروی برق سال ۱۳۹۳

جدول ۳. ارزش حرارتی سایر سوخت‌ها

سوخت	ارزش حرارتی (کیلو کالری بر لیتر)
نفت کوره	۹۲۰۰
گازوئیل	۸۶۰۰

منبع: آمار تفصیلی تولید نیروی برق سال ۱۳۹۳

از جمله هزینه‌هایی که در محاسبه هزینه نهایی نیروگاه‌ها وارد می‌شود، هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشد که در جدول (۴) گزارش شده است.

جدول ۴. هزینه‌های تعمیر و نگهداری بر حسب نوع نیروگاه در سال ۱۳۹۳

هزینه‌های تعمیر و نگهداری (بدون سوخت)		نیروگاه
ریال بر کیلووات‌ساعت	یورو بر کیلووات‌ساعت	
۶۰/۴۷	۰/۱۷۶۱	گازی بزرگ (بیشتر از ۱۶۰ مگاوات)
۱۵۲/۹۵	۰/۱۷	گازی کوچک
۱۶/۰۹۱	۰/۱۷۱۸	بخاری
۴۰/۳۲	۰/۱۶۰۲	سیکل ترکیبی

منبع: دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو

برای شروع اجرای الگوریتم راث-ارو به مقادیر اولیه نیاز می‌باشد که طبق جدول (۵) در مدل استفاده شده است.

جدول ۵. مقادیر اولیه در الگوریتم راث-ارو

$S_{j,0}$	r	e	c	d
۰/۶	۰/۹۷	۰/۰۴	۰/۰۳۵	۰/۰۵

منبع: (گورسی و رستگار، ۲۰۰۹)

در این مطالعه برای درک بیشتر نتایج دو حراج پرداخت براساس پیشنهاد و یکنواخت در بازار برق ایران، دو سناریو در نظر گرفته می‌شود. علت استناد به دو سناریوی مختلف، تفاوت ذاتی و منطبق رفتار بازار برق است. در حال حاضر، در بازار برق ایران شرکت‌های برق منطقه‌ای به عنوان نماینده بخش تولید رفتار می‌کنند و به همین دلیل سناریوی اول عملاً بیان‌کننده وضعیت کنونی کشور است. سناریوی دوم حالتی است که در چشم انداز بازار برق به منظور افزایش تعداد بازیگران مورد توجه و هدف‌گذاری است. بنابراین، تلاش شده است موضوع در هر دو سناریو مورد توجه قرار گیرد. همچنین مدل براساس روزهای منتخب سال به عنوان حداکثر بار و حداقل بار در فصول مختلف اجرا خواهد شد.

در بخش ارائه نتایج و مقایسه دو حراج از دو شاخص استفاده می‌شود: شاخص اول مربوط به انحراف معیار بین قیمت شبیه‌سازی و هزینه‌های تولیدکنندگان است. از آنجا که منطبق بر نظریه

بازار رقابتی، معیار کارایی تولید هزینه‌های تولیدکننده محسوب می‌شود، بنابراین، میزان انحراف از هزینه نهایی تولید به عنوان مبنای کارایی در نظر گرفته شده است. سود تولیدکننده نیز به عنوان معیار مازاد تولیدکننده بیانگر شاخص رفتاری بخش تولید محسوب می‌شود. بنابراین، در این تحقیق از معیار کارایی تولید و مازاد تولیدکننده به عنوان مبانی مقایسه دو حراج استفاده خواهد شد.

سناریو اول

در سناریو اول، همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شده، هر یک از شرکت‌های برق منطقه‌ای به عنوان یک نماینده در نظر گرفته می‌شوند.

همان‌طور که در بخش روش‌شناسی تحقیق توضیح داده شد، در این شبیه‌سازی تعدادی نماینده وجود دارد که شامل مجموعه‌ای از واحدهای نیروگاه‌ها می‌باشند. در این مطالعه ۱۶ نماینده در نظر گرفته شده است که در واقع، همان شرکت‌های برق منطقه‌ای می‌باشند. الگوریتم برای هر نماینده تحت دو حراج یکنواخت و تبعیض آمیز، ۲۰۰۰ مرتبه اجرا می‌شود. طی این اجراها، برای نماینده‌ها یا به عبارتی نیروگاه‌ها، با توجه به اطلاعات بدست‌آمده از اجراهای قبلی، عمل یادگیری اتفاق می‌افتد.

جدول ۶. میانگین انحراف معیار بین قیمت‌های پیشنهادی و

هزینه نهایی در حالت گروه بندی نیروگاه‌ها

		زمان اوج مصرف برق	زمان کم باری برق
بهار	یکنواخت	۱۵/۲۲۷	۱۹/۲۱۹
	براساس پیشنهاد	۲۶/۹۶۱	۲۹/۹۸۱
تابستان	یکنواخت	۱۴/۱۸۷	۱۶/۵۵۱
	براساس پیشنهاد	۲۴/۶۲۳	۲۵/۴۷۸
پاییز	یکنواخت	۲۱/۶۲۱	۲۰/۹۰۱
	براساس پیشنهاد	۲۷/۷۸۸	۳۳/۴۹۲
زمستان	یکنواخت	۱۴/۹۳۶	۲۰/۰۷۱
	براساس پیشنهاد	۲۶/۸۹۱	۳۱/۳۷۲

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول ۷. میانگین سود نیروگاه‌ها در حالت گروه بندی نیروگاه‌ها (میلیون ریال)

		زمان اوج مصرف برق	زمان کم باری برق
بهار	یکنواخت	۴۱۷۶۴/۲۱	۹۵۱۱/۱۱
	براساس پیشنهاد	۲۰۵۴۴/۷۶	۶۰۲۳/۴۲
تابستان	یکنواخت	۵۶۸۱۵/۳۸	۱۶۴۷۴/۷
	براساس پیشنهاد	۲۷۱۷۴/۶۴	۱۲۱۴۳/۶۵
پاییز	یکنواخت	۴۱۹۴۳/۳	۱۰۷۰۳/۳
	براساس پیشنهاد	۱۷۷۵۴/۸۲	۶۷۸۲/۱۳
زمستان	یکنواخت	۱۸۲۰۳/۴۷	۱۱۲۶۵/۵۲
	براساس پیشنهاد	۱۲۶۱۶/۷۳	۹۳۰۳/۰۲

منبع: یافته‌های تحقیق

سناریو دوم

در سناریو دوم، هر نیروگاه خود به عنوان یک نماینده در نظر گرفته شده است. در این صورت، ضریب تعیین قیمتی که توسط الگوریتم تقویتی به دست می‌آید برای هر نیروگاه متفاوت می‌باشد.

جدول ۸. میانگین انحراف معیار قیمت‌های پیشنهادی و هزینه نهایی

		زمان اوج مصرف برق	زمان افت مصرف برق
بهار	یکنواخت	۲۸/۲۴۵	۲۱/۹۳۸
	براساس پیشنهاد	۳۴/۷۳۳	۳۶/۴۷۶
تابستان	یکنواخت	۲۳/۳۸۱	۲۹/۰۰۵
	براساس پیشنهاد	۳۰/۳۱۵	۳۹/۱۲۲
پاییز	یکنواخت	۲۳/۴۳۳	۲۸/۸۷۳
	براساس پیشنهاد	۳۵/۴۸۴	۳۸/۰۳۱
زمستان	یکنواخت	۲۲/۸۵۸	۲۵/۸۳۲
	براساس پیشنهاد	۳۶/۴۷۶	۳۴/۹۹۶

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول ۹. میانگین سود نیروگاه‌ها (میلیون ریال)

زمان افت مصرف برق	زمان اوج مصرف برق	زمان	
		یکنواخت	براساس پیشنهاد
۱۰۱۳۹/۵۷	۴۲۸۲۶/۱۵۳۹۵	بهار	یکنواخت
			براساس پیشنهاد
۸۱۵۲/۱	۳۱۳۱۴/۵۸	تابستان	یکنواخت
			براساس پیشنهاد
۱۸۷۳۹/۷۵	۵۳۲۱۶/۱۹	پاییز	یکنواخت
			براساس پیشنهاد
۱۸۱۹۸/۰۲	۳۰۳۰۵/۹۵	زمستان	یکنواخت
			براساس پیشنهاد
۹۳۹۲/۳۸	۴۰۴۷۹/۹		یکنواخت
			براساس پیشنهاد
۱۱۴۲۸/۵۵	۲۳۹۲۶/۴۳		یکنواخت
			براساس پیشنهاد
۱۱۸۶۰/۰۷	۲۸۳۳۹/۷۲		یکنواخت
			براساس پیشنهاد
۱۰۱۰۹/۷۴	۱۸۴۱۳/۷۳		یکنواخت
			براساس پیشنهاد

منبع: یافته‌های تحقیق

همان‌طور که در جداول (۶) و (۸) مشاهده می‌شود، در هر دو سناریو، انحراف معیار در حراج یکنواخت کمتر می‌باشد. بنابراین، همان‌طور که انتظار می‌رفت، حراج یکنواخت از بعد تولید کارایی بالاتری از حراج پرداخت براساس پیشنهاد می‌باشد. در جداول (۷) و (۹) سود نیروگاه‌ها آورده شده که مشاهده می‌شود در حراج یکنواخت میانگین سود بالاتر می‌باشد. در ادامه و در جدول زیر ساعات و تقاضای روزهای شبیه‌سازی گزارش شده است.

جدول ۱۰. تقاضا و ساعات روزهای شبیه‌سازی شده

روز و تاریخ	تقاضا (مگاوات)		روز و تاریخ
	ساعت اوج مصرف برق	ساعت افت مصرف برق	
۲ فروردین ساعت ۸	۳۴۷۵۴	۱۲۱۴۶/۵	بهار
۲۹ شهریور ساعت ۸	۶۲۶۸۸	۲۱۳۴۷/۵	تابستان
۲۳ آبان ساعت ۸	۳۱۷۳۶	۱۲۲۷۹/۵	پاییز
۲۹ اسفند ساعت ۷	۲۶۱۶۹	۱۴۰۰۳/۵	زمستان

منبع: یافته‌های تحقیق

اولین بررسی مربوط به ساعت ۸ روز ۱۳۹۳/۰۱/۰۲ بوده که کمترین تقاضا در فصل بهار در این روز در این ساعت اتفاق افتاده است.

مطابق با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در هر دو سناریوی مورد اشاره، حراج یکنواخت از میانگین انحراف معیار پایین‌تری در قیاس با حراج پرداخت براساس پیشنهاد یا تبعیض‌آمیز برخوردار است. نظریه‌های موجود در باب مقایسه این دو سازوکار نیز اگرچه محدود و دارای محدودیت‌ها و فروش متعددی است، لیکن نتایج مشابهی برای سایر بازارها به همراه داشته است.

۵. نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف شبیه‌سازی حراج پرداخت براساس پیشنهاد و حراج یکنواخت در بازار برق ایران با بهره‌گیری از الگوریتم راث-ارو در سال ۱۳۹۳ انجام شده است. در این تحقیق، تلاش شده است در یک قالب شبیه‌سازی شده رفتار بازیگران در دو سازوکار اجرایی متفاوت مقایسه شود و از این طریق در خصوص کارایی حاصل قضاوت شود. از آنجا که چالش اصلی در مقایسه نتایج حاصل از این دو نوع حراج به تغییر رفتار بازیگران همگام با تغییر قوانین باز می‌گردد، بنابراین، ابزارهای متداول امکان ارزیابی موضوع را نخواهد داشت. به همین منظور، با استفاده از الگوریتم تقویتی در مدل‌سازی مبتنی بر عامل و بهره‌گیری از عامل‌های انسانی در این شبیه‌سازی در هر دو حراج سعی بر یافتن پیشنهادهای بازیگران بر فرض رفتار عقلایی حداکثرکننده سود می‌شود. برای مقایسه این دو حراج در فضای رقابتی، در هر فصل کمترین تقاضا و بیشترین تقاضا در نظر گرفته شده است. همچنین این مقایسه نیازمند محاسبه هزینه نهایی است، زیرا به عنوان پیشنهاد اولیه در هر دو حراج مورد استفاده می‌باشد و سپس با یافتن ضریب تعیین قیمت در هر حراج و بررسی سود بدست آمده نیروگاه‌ها، بهترین ضریب تعیین قیمت یافت می‌شود. نتایج مدل‌سازی تحقیق نشان داد که ضریب تعیین قیمت به طور عمده در حراج پرداخت براساس پیشنهاد بالاتر از حراج یکنواخت است و با

توجه به نتایج بدست آمده از مقایسه قیمت‌های پیشنهادی در هر دو حراج، نتایج بازار در حراج یکنواخت نزدیک به رقابت کامل است. بنابراین، حراج یکنواخت از این منظر کاراتر از حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد می‌باشد. مبنای مقایسه در خصوص نتایج حاصل از انواع حراج به منظور تعیین کارایی تولید مقایسه انحراف از هزینه نهایی تولید کنندگان است. لذا بازاری که نتایج حاصل از آن انحراف کمتری نسبت به نتایج حاصل از یک بازار رقابتی (تابع عرضه بر اساس هزینه نهایی) داشته باشد، از بعد کارایی تولید و وضعیت مناسب تری خواهد داشت. با عنایت به این موضوع مهم که بازار برق ایران متفاوت از سایر کشورها و مبتنی بر حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد است، لزوم سیاستگذاری و توجه به سایر ابعاد موضوع بسیار مهم و بااهمیت است. بدیهی است توجه به کارایی بازار یکی از اهداف متصور در مجموعه موارد پیش روی سیاست‌گذاران است، لیکن نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر توجه و استفاده از پتانسیل مدل مورد استفاده در ارزیابی موضوع و تصمیم‌گیری خواهد بود.

منابع

- آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه تولید در سال ۱۳۹۳، شرکت توانیر.
- افشار، کریم و رضا ریاحی (۱۳۸۸)، تجدید ساختار در صنعت برق و گذری بر بازار برق، شرکت مدیریت شبکه برق ایران، دفتر روابط عمومی و امور بین‌الملل شرکت توانیر.
- ابونوری، اسماعیل و حسن لاجوردی (۱۳۹۲)، "تاثیر تشکیل بازار برق ایران بر کارایی نیروگاه‌های برق"، کیفیت و بهره‌وری صنعت برق/ایران، شماره سوم، صص ۵۵-۵۰.
- پور سلیمی، جاغرق (۱۳۸۹)، بهبود عملکرد الگوریتم Q-Learning با استفاده از تابع مطلوبیت برای مدل‌سازی عامل محور بازار برق، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۳، وزارت نیرو، معاونت برق و انرژی.
- لطفعلی پور، محمدرضا؛ ذبیحی، اعظم و محمدعلی شعبانی (۱۳۸۹)، "تاثیر تجدید ساختار بر بهره‌وری در صنعت برق ایران"، دانش توسعه، سال هفدهم، شماره ۳۲، صص ۳۷-۱۲.
- محمدی، تیمور؛ تکلیف، عاطفه و محسن بختیار (۱۳۹۴)، "تحلیل ظرفیت بهینه نیروگاهی در ایران و بررسی اثرات صرفه‌جویی مصرف انرژی بر آن"، فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، ۲(۱)، صص ۱۳۷-۱۰۹.
- محمدی بوساری، اعظم؛ قادری، فرید، فکری، رکسانا و محمود نعیمی (۱۳۹۶)، "ارائه یک مدل ریاضی تامین انرژی الکتریکی پایدار در ریزشبکه متصل به شبکه"، فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، ۳(۷)، صص ۴۲-۷.
- ناظمی، علی؛ خوش اخلاق، رحمان؛ عمادزاده، مصطفی و علیمیراد شریفی (۱۳۹۰)، "برآورد قدرت بازار در بازار برق عمده فروشی ایران"، تحقیقات مدل‌سازی اقتصادی، شماره ۴، صص ۵۵-۳۱.
- نصیری، بهزاد؛ نقیعی سیستانی، محمد باقر و علی کریم پور (۱۳۸۷)، "بررسی تاثیر حضور عامل‌های قیمت‌دهنده با استراتژی‌های معین در کنار عامل‌های یادگیرنده تقویتی در یک بازار برق رقابتی"، کنفرانس شبکه‌های توزیع برق، دوره ۱۳.

Azadeh, A; Skandari, M. R. and B. Maleki-Shoja (2010), "An Integrated Ant Colony Optimization Approach to Compare Strategies of Clearing Market in Electricity Market: Agent-based Simulation", *Energy Policy*, 38, pp. 6307-6319.

- Bower, J. and D. Bunn** (2001), "Experimental Analysis of the Efficiency of Uniform-Price versus Discriminatory Auctions in the England and Wales Electricity Market", *Economic Dynamics & Control*, 25, pp.561-592.
- Dotoli, M; Epicoco, N; Falagario, M. and F. Sciancalepore** (2014), "Nash Equilibrium Simulation Models for the Competitiveness Evaluation of the Auction Based Day Ahead Electricity Market", *Computers in Industry*, pp. 774-785.
- Federico, G. and D. Rahman** (2003), "Bidding in an Electricity Pay-as-Bid Auction", *Regulatory Economics*, 24, pp. 175-211.
- Genco, t.** (2007), "Discriminatory versus Uniform-Price Electricity Auctions with Supply Function Equilibrium", *Optimization Theory and Application*, 140(1), pp. 9-31.
- Guerci, E. and M. Rastegar** (2009), "From Uniform Auction to Discriminatory Auction: Assessment of the Restructuring Proposal for the Italian Electricity Day-Ahead Market", *European University Institute Papers*.
- Ganjbakhsh, O.** (2008), *Strategic Offers in Oligopolistic Electricity Market under Pay- as- Bid Pricing*, M.S. thesis, McGill University.
- Haghighat, H; saifi, H. and A. RahimiKian** (2012), "Pay-as-Bid versus Marginal Pricing: The Role of Suppliers Strategic Behavior", *Electrical Power and Energy Systems*, 42, pp. 350-358.
- Kahn, A. E; Cramton, P. C; Porter, R. H. and R. D. Tabors** (2001), "Uniform Pricing or Pay- as- Bid Pricing: A Dilemma for California and Beyond", *Electricity Journal*, pp.70-79.
- Mensah- Bonsu, C. and S. Oren** (2002), "California Electricity Market Crisis: Causes, Remedies and Prevention", *IEEE Power Engineering Review*, pp. 4-11.
- Nicolaisen, J; Petrov, V. and L. Tesfatsion** (2001), "Market Power and Efficiency in a Computational Electricity Market with Discriminatory Double-Auction Pricing", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 5(5), pp.504-523.
- Nielsen, S; Sorknaes, P. and P. AlbergQstergaard** (2011), "Electricity Market Auction Settings in a Future Danish Electricity System with a High Penetration of Renewable Energy Sources Comparison of Marginal Pricing and Pay-as-Bid", *Energy*, 36, pp. 4434-4444.
- North, M. and C. Macal** (2007), *Managing Business Complexity, Discovering Strategic Solution with Agent-Based Modeling and Simulation*, Oxford University Press.
- Rahimiyan, M. and H. RajabiMashhadi** (2008), "Supplier's Optimal Bidding Strategy in Electricity Pay-as-Bid Auction: Comparison of the Q-learning and Model-Based Approach", *Electric Power Systems Research*, 78, pp. 165-175.

-
- Rajabi Mashhadi, H; Sadeh, J. and M. A. Latifi** (2005), "Optimal Supply Bidding with Risk Management in an Electricity Pay- as- Bid Auction", *15th PSCC*, Liege.
- Seok Son, Y; Baldick, R; Lee, k. and S. Saddiqi** (2004), "Short-Term Electricity Market Auction Game Analysis: Uniform and Pay-as-Bid Pricing", *Power Systems*, 19, pp.1990-1998.
- Sutton, R. and A. Barto** (2012), *Reinforcement Learning: An introduction*, Second Edition, A Bradford Book.
- Visudhiphan, P.** (2003), "An Agent-Based Approach to Modeling electricity Spot Markets", *Dissertation Massachusetts Institute of Technology*.
- Young, D; Poletti, S. and O. Browne** (2014), "Can Agent-Based Models Forecast Spot Prices in Electricity Markets? Evidence from the New Zealand Electricity Markets", *Energy Economics*, pp. 419-434.