

مقایسه کارایی نسبی مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد با مکانیزم قیمت تسویه کننده بازار در بازارهای برق

جمشید پژویان^۱، تیمور محمدی^۲، فرامرز اتبایی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۲۲

چکیده:

مکانیزم‌های حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد و قیمت تسویه کننده بازار رایج ترین مکانیزم‌های حراج مورد کاربست در بازارهای برق دنیا به شمار می‌روند. هدف مقاله حاضر مقایسه کارایی تولید، کارایی کل و متوسط قیمت انتظاری بازار در شرایط عدم تقارن اطلاعات بازیگران نسبت به هزینه نهایی بازیگر رقیب، تحت برقراری هر کدام از مکانیزم‌های مزبور است. در این راستا برای بررسی مقایسه‌ای مکانیزم‌های حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد و قیمت تسویه کننده بازار - با توجه به ساختار بازار برق ایران - مدلی شامل دو بازیگر با اطلاعات کامل نسبت به هزینه نهایی خود و اطلاعات ناقص در رابطه با هزینه نهایی حریف، طراحی و نتایج حاصله در رابطه با هر کدام از مکانیزم‌ها مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. با فرض پیروی تابع اطلاعات بازیگران از تابع توزیع نرمال، نتایج حاصله حاکی از آن است که گرچه کارایی تولید در هر کدام از مکانیزم‌ها معادل هم است، اما مکانیزم حراج قیمت تسویه کننده بازار، متوسط قیمت انتظاری کمتر و کارایی کل بیشتری را در مقایسه با مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد به همراه دارد.

۱- استاد دانشگاه علامه طباطبایی

j.pajooyan@yahoo.com

۲- استادیار دانشگاه علامه طباطبایی

Mohammadi@atu.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری دانشگاه علامه طباطبایی / نویسنده مسئول

Fatbae@yahoo.com

طبقه‌بندی JEL: D43, D44, D47, L94

کلمات کلیدی: حراج مبتنی بر قیمت تسویه کننده بازار، حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد، طراحی مکانیزم و بازار برق

۱- مقدمه

با توجه به لزوم برقراری لحظه به لحظه تعادل عرضه و تقاضای برق، برای حصول از قابلیت اطمینان سیستم قدرت، بازارهای برق ایجاد شده در کشورهایی که فرآیند تجدید ساختار در صنعت برق را آغاز کردند، بازارهایی با مکانیزم حراج از پیش تعیین شده هستند. از ابتدای شروع راه‌اندازی بازارهای برق، مکانیزم قیمت تسویه کننده بازار^۱ به عنوان یکی از مهم‌ترین گزینه‌های اجرا و تسویه این بازارها مطرح بوده است. با این حال مکانیزم پرداخت بر مبنای پیشنهاد^۲ با هدف کنترل رفتارهای ناشی از قدرت بالای بازار^۳ و کاهش قیمت عمده فروشی در برخی از بازارهای برق (از جمله بازار برق ایران) مورد استفاده قرار گرفته است (لافر و جیوردانو،^۴ ۲۰۰۵).

با توجه به نقش و اهمیت بسیار بالای نوع مکانیزم حراج بر کارایی بازار، بررسی مقایسه‌ای مکانیزم‌های حراج رایج در بازارهای برق دنیا (مکانیزم قیمت تسویه کننده بازار و مکانیزم پرداخت بر مبنای پیشنهاد) یکی از محوری‌ترین و در عین حال چالشی‌ترین مباحث طرح شده در حوزه تجدید ساختار در صنعت برق به شمار می‌رود. با این حال با توجه به نوظهور بودن بازارهای برق، تحقیقات انجام شده در رابطه با تأثیر انتخاب مکانیزم حراج بر کارکرد بازارهای برق حجم کمی از ادبیات حوزه اقتصادی را به خود اختصاص داده است. بالاخص با توجه به عدم امکان استفاده از آزمون‌های آماری برای بررسی مقایسه‌ای مکانیزم‌های حراج یادشده عمده تحقیقات انجام شده در این حوزه

1- System Marginal Price

2- Pay As Bid

3- Market Power

4- Laffer and Giordano

صرفاً از نوع نظری و نتایج آنها به طور عمده تابعی از فروض طرح شده در رابطه با ساختار بازار و اطلاعات بازیگران در رابطه با اجزای بازار بوده است. با این حال ادامه تحقیقات نظری خود علاوه بر زمینه‌سازی برای پژوهش‌های تجربی بیشتر، می‌تواند شمای بهتری از کارکرد مکانیزم‌های انتخابی و تأثیر کاربست آنها بر نتایج بازار و در نتیجه اتخاذ تصمیمات سیاستی بهتر در رابطه با انتخاب آنها در ساختارهای مختلف بازار در اختیار سیاست‌گذاران قرار دهد.

از اوایل دهه ۸۰ خورشیدی تحولات ساختاری مهم و معنی‌داری در صنعت برق ایران به وقوع پیوست؛ مجزاسازی شرکتی و حقوقی بخش‌های تولید و توزیع، تشکیل بازار عمده‌فروشی برای ایجاد رقابت در بخش تولید و مشارکت بخش خصوصی برای احداث نیروگاه در قالب قراردادهای ساخت، مالکیت و بهره‌برداری (*BOO*)^۱ و ساخت، بهره‌برداری و انتقال (*BOT*)^۲ اهم این تحولات به شمار می‌روند. با تشکیل و راه‌اندازی بازار برق ایران در سال ۱۳۸۴، امکان مشارکت نیروگاه‌های دولتی و خصوصی در این بازار بر اساس مبانی رقابتی فراهم شد.

با توجه به ماهیت بازیگران موجود در بازار برق (عمدتاً نیروگاه‌های دولتی تحت مالکیت شرکت‌های برق منطقه‌ای) و جذابیت بیشتر قراردادهای *BOO* و *BOT* در مقایسه با حضور در بازار برق، در حال حاضر عمده بازیگران فعال در این بازار بازیگرانی دولتی و دارای انگیزه‌هایی متفاوت از بازیگران حداکثرکننده سود اقتصادی در بازارهای متداول برق به شمار می‌روند. بدین ترتیب تسریع در روند واگذاری نیروگاه‌های دولتی به بخش خصوصی و اصلاح ساختار بازار برق - به گونه‌ای که بازیگران بازار انگیزه‌های لازم و کافی را برای ورود به این بازار داشته باشند - شرط لازم برای کارکرد صحیح و بهینه بازار برق به شمار می‌رود.

اگرچه در حال حاضر مکانیزم پرداخت بر مبنای پیشنهاد مکانیزم حاکم بر کارکرد بازار برق ایران است اما تحلیل کارایی یا عدم کارایی این مکانیزم (با وجود اهمیت اساسی تأثیر

1- Build, Own, Operate

2- Build, Own, Transfer

مکانیزم های حراج بر کارایی بازار) و مقایسه آن با گزینه های دیگری مانند مکانیزم قیمت تسویه کننده بازار از بحث های مغفول در ادبیات اقتصاددانان و سیاست گذاران در حوزه صنعت برق ایران بوده است.

همانند بسیاری از کشورهایی که در مراحل اولیه تجدید ساختار قرار داشته و بازار برق آنها نوپا محسوب می شود، قدرت بسیار بالای بازار، خصیصه اصلی بازار برق ایران به شمار می رود^۱ و با توجه به تجربه فرآیند تجدید ساختار در سایر کشورها، انتظار می رود حتی پس از واگذاری ۸۰ درصد سهام نیروگاه های دولتی^۲، همچنان رفتار استراتژیک بین بازیگران این بازار برقرار و حاکم باشد. از این رو مقاله حاضر به بررسی مقایسه ای مکانیزم های حراج پیش گفته در شرایطی که بازیگران دارای قدرت بازار بوده و رفتار استراتژیک نسبت به هم دارند، پرداخته است. برای بررسی رفتار استراتژیک بازیگران در هر کدام از مکانیزم های حراج، مدلی ساده شامل دو بازیگر ارائه کرده و رفتار استراتژیک آن ها در چارچوب این مدل ساده مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

یکی از مهم ترین مشخصه های بازار برق همانند بسیاری از بازارها، اطلاعات ناقص در رابطه با اجزای بازار (شامل اجزای سمت عرضه و تقاضا) است. با توجه به اینکه برآورد صحیح بار کوتاه مدت مصرفی مصرف کنندگان، شرط لازم برای موفقیت بازیگران بازار برق به شمار می رود از شروع فرآیند تجدید ساختار و شکل گیری بازارهای برق، پیشرفت های بسیار مهم و اساسی در برآورد بار کوتاه مدت مصرفی مصرف کنندگان به وقوع پیوسته است. در حال حاضر برآوردهای کوتاه مدت انجام شده در ارتباط با مصرف و تولید برق توسط شرکت های توزیع نیروی برق (به عنوان سمت تقاضای بازار برق ایران) و نیروگاه ها (به عنوان سمت عرضه بازار برق ایران) از درجه دقت قابل قبولی برخوردار

۱- بخش بعد به طور تفصیلی به بررسی ساختار بازار برق ایران اختصاص دارد.

۲- بنا به قانون اجرای سیاست های اصل ۴۴ قانون اساسی، نیروگاه ها جزو گروه (۲) محسوب شده و ۲۰ درصد سهام آنها در اختیار دولت خواهد بود.

است^۱. بنابراین در مدل ارائه شده در مقاله حاضر، فرض وجود اطلاعات کامل در رابطه با میزان بار مصرفی مصرف کنندگان برای هر کدام از بازیگران بازار می تواند به عنوان فرضی معقول و قابل قبول تلقی شود. با توجه به غیرقابل ذخیره بودن برق، تقاضای کشش پذیر برای این حامل انرژی تنها در صورت امکان مدیریت بار مصرفی توسط خرده فروشان و مصرف کنندگان طرف قرارداد آنها امکان پذیر و قابل تصور است. مدیریت بار مصرفی به نوبه خود تنها با نصب سیستم های هوشمند کنترل و قرائت بار مصرفی مشترکین توسط خرده فروش ها امکان پذیر است. در حال حاضر فرآیند تجدید ساختار در صنعت برق ایران مراحل اولیه و ابتدایی خود را طی می کند و فاقد هویت مستقل و حرفه ای خرده فروشی است از این رو شرکت های توزیع در حال ایفای نقش این هویت غایب هستند. با این وجود مدیریت بار مصرفی به صورت قراردادهایی بین خرده فروش و مصرف کننده - همانند آنچه در برخی از کشورهای پیشرو در زمینه تجدید ساختار (همانند انگلستان) شایع و معمول است - هنوز در ایران اجرایی نشده است. با توجه به این موضوع شرکت های توزیع صرفاً پیش بینی سرجمع بار مصرفی مشترکین خود را به صورت کاملاً بی کشش برای خرید از بازار به بازار اعلام می کنند، بنابراین در مدل ارائه شده فرض وجود منحنی تقاضای کاملاً بی کشش، می تواند به عنوان فرضی کاملاً قابل قبول تلقی شود.

عدم تقارن اطلاعات هزینه ای بین بازیگران بازار از مهم ترین مشخصه های تمامی بازارها از جمله بازارهای برق به شمار می رود. کیفیت های متفاوت سوخت، کمبود گاز مصرفی نیروگاه ها و اجبار برخی از نیروگاه ها به استفاده از سوخت مایع، اشکال فنی در یک یا چند واحد نیروگاهی، انجام یا عدم انجام تعمیرات اساسی و... از جمله عواملی هستند که منجر

۱- بنا به «آیین نامه تعیین شرایط و روش خرید و فروش برق در شبکه برق کشور»، شرکت های توزیعی که سرجمع بار مصرفی مصرف کنندگان خود را به درستی پیش بینی نکنند، مشمول جریمه مطابق با ساز و کارهای تعیین شده در آیین نامه مزبور می شوند. بر این اساس شرکت های توزیع از انگیزه بسیار بالایی برای پیش بینی سرجمع بار مصرفی مصرف کنندگان خود برخوردار هستند. از طرفی با توجه به اینکه پیش بینی صحیح بار شرط لازم برای موفقیت نیروگاه ها در بازار عمده فروشی برق ایران به شمار می رود، نیروگاه های فعال در بازار برق ایران از انگیزه بسیار بالایی برای پیش بینی کل بار مصرفی شبکه سراسری برخوردار بوده و تمامی پیشنهادات قیمتی خود در بازار برق را بر اساس نتایج پیش بینی کل بار مصرفی در شبکه سراسری ارائه می کنند.

به تفاوت در هزینه‌های نیروگاه‌ها، حتی در وضعیتی که راندمان نیروگاه‌ها در شرایط استاندارد کاملاً معادل هم باشد، می‌توانند شوند. عوامل فوق که تعیین‌کننده هزینه تولید نیروگاه‌ها در هر لحظه از زمان هستند، اطلاعات شخصی نیروگاه‌ها محسوب شده و دسترسی به آنها عملاً برای سایر نیروگاه‌ها امکانپذیر نیست. بر این اساس مدل ارائه شده در مقاله حاضر با فرض عدم تقارن اطلاعاتی بازیگران در رابطه با هزینه تولید رقیب، طرح و مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

وجود سقف بازار از جمله مهم‌ترین مشخصه‌های بسیاری از بازارهای برق در دنیا (از جمله بازار برق ایران) محسوب می‌شود^۱ از این رو وجود سقف قیمتی به عنوان یکی از فروض قابل قبول در مدل ارائه شده در این مقاله در نظر گرفته شده است.

به طور خلاصه، وجود رفتار استراتژیک بین بازیگران، وجود منحنی تقاضای بی‌کشش، عدم تقارن اطلاعاتی بین بازیگران بازار در رابطه با هزینه رقیب و وجود سقف قیمتی در بازار برق عناصر اساسی مدل مورد استفاده در این مقاله را تشکیل می‌دهند. بر این اساس، مقاله حاضر سعی بر آن دارد با استفاده از مدل طرح شده در قالب این فروض مکانیزم‌های حراج رایج در بازارهای برق دنیا را در چارچوب دو سوال اساسی زیر مورد ارزیابی و بررسی مقایسه‌ای قرار دهد:

- کارایی تولید در کدام یک از مکانیزم‌های حراج بیشتر است؟ به عبارتی دیگر در هر سطح قابل تصور تقاضا کدام یک از مکانیزم‌های حراج تأمین تقاضا با هزینه کل کمتری را موجب می‌شوند؟

- متوسط قیمت انتظاری در کدام یک از مکانیزم‌های حراج بیشتر است؟ به عبارتی دیگر نتایج کاربست کدام یک از مکانیزم‌های حراج به نتایج بازار رقابتی نزدیک‌تر است؟

بخش دوم مقاله به ساختار و قواعد بازار برق ایران اشاره دارد. آشنایی با ساختار و قواعد بازار برق ایران شرطی لازم و اساسی برای درک نتایج حاصل از مدل ارائه شده در

۱- محدود کردن قدرت بازار بازیگران و جلوگیری از نوسانات قیمتی، دلایل ارائه شده از سوی سیاست‌گذاران بخش برق در رابطه با اعمال سقف در بازار برق به شمار می‌رود.

چارچوب سوالات مطرح شده محسوب می‌شود. بررسی مطالعات انجام شده، معرفی و ارائه مدل مورد استفاده برای پاسخگویی به سوالات طرح شده و در نهایت جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات سیاستی بخش‌های بعدی این مقاله را تشکیل می‌دهند.

۲- ساختار و قواعد بازار برق ایران

بازار برق ایران در پی فرآیند تجدید ساختار در این صنعت به منظور فراهم ساختن چارچوبی رقابتی برای رقابت فروشندگان از یکسو و خریداران از سوی دیگر در سال ۱۳۸۳ کار خود را آغاز کرد^۱. نحوه تعامل ارکان بازار در بازار برق ایران به شرح زیر است: مالک نیروگاه (شرکت‌های برق منطقه‌ای و نیروگاه‌های متعلق به بخش غیردولتی) تا ۳ روز قبل از روز تحویل، پیشنهاد فروش برق خود را برای هر ساعت از شبانه‌روز موعده تحویل در قالب فرمی استاندارد همراه با قابلیت تولید ابراز شده^۲ و برآورد خود از قابلیت تولید قابل گسیل^۳ به مدیر بازار تحویل می‌دهد. این فرم برای هر ساعت از شبانه‌روز، نمودار عرضه مالک نیروگاه (رابطه حجم انرژی تحویلی و قیمت آن) برای آن ساعت به حساب می‌آید. این نمودار عرضه می‌تواند حداکثر ۱۰ پله داشته باشد. سقف قیمت پیشنهادی مجاز توسط هیأت تنظیم بازار برق ایران اعلام می‌شود. از طرف دیگر، شرکت‌های توزیع به عنوان خریداران تا ۳ روز قبل در قالب فرمی، نیاز مصرف (تقاضای) خود را برای ۲۴ ساعت شبانه‌روز به مدیر بازار اعلام می‌کنند. بنا به «آیین نامه تعیین شرایط و روش خرید و فروش در شبکه برق کشور»، نیاز مصرف هر خریدار می‌تواند بر دو گونه

۱- برای مطالعه بیشتر در مورد بازار برق ایران به پایگاه الکترونیکی شرکت مدیریت شبکه و یا دبیرخانه هیئت تنظیم بازار برق ایران مراجعه شود.

۲- «ظرفیت آماده تولید» واحد نیروگاهی است که مالک نیروگاه با ملحوظ داشتن مشکلات فنی واحد نیروگاهی و شرایط محیطی و بدون در نظر گرفتن اثرات محدودیت‌های خارج از مسئولیت خود (از قبیل محدودیت انتقال، حوادث قهریه و دستور مرکز)، آن را برآورد و به مدیر بازار اعلام می‌کند.

۳- ظرفیت تولیدی است که مالک نیروگاه با در نظر گرفتن اثرات تمام عوامل موثر بر تولید برق مانند شرایط محیطی و محدودیت‌های خارج از مسئولیت خود و مشکلات فنی واحد نیروگاهی، آن را برآورد و به مدیر بازار و مرکز اعلام می‌کند و مرکز بر این اساس و سایر محدودیت‌ها، قابلیت تولید قابل گسیل را تعیین (قطعی) می‌کند.

باشد؛ یکی، نیاز مصرف با نرخ بازار که خریدار تقبل می کند با هر نرخى که در بازار به دست آمد، برق را خریداری کند و دیگری، نیاز مصرف با نرخ پیشنهادی خود خریدار. نیاز مصرف کل هر خریدار برای هر ساعت از حاصلجمع این دو نوع نیاز مصرف به دست می آید. در حال حاضر عملاً خریداران (شرکت های توزیع) کل نیاز مصرف خود را با نرخ بازار اعلام می کنند و سازوکار اجرایی برای خرید با نرخ پیشنهادی موجود نیست، یعنی هر خریدار صرفاً میزان برق مورد نیاز خود را مشخص می کند (تقاضای کاملاً بی کشش). از این رو می توان گفت طرف خرید در این بازار رقابتی نبوده و صرفاً طرف فروش این بازار بر مبنای رقابت استوار است^۱.

مالک نیروگاه تا دو روز قبل از روز مبادله با توجه به اطلاعات جدید خود امکان تغییر در پله های تولید و قابلیت تولید ابراز شده را دارد اما قادر به تغییر نرخ های پیشنهادی خود نخواهد بود^۲. این امر برای روز قبل از مبادله نیز صادق است. مدیر بازار تا ساعت ۱۲ روز قبل، پذیرش و یا عدم پذیرش هر واحد نیروگاهی برای تولید انرژی و نرخ پذیرفته شده انرژی تولیدی آن را به مالک نیروگاه اعلام می کند. مرکز مجاز است در هر زمان کاهش یا افزایش نیاز شبکه به انرژی را به واحد نیروگاهی اعلام کند و بهره بردار نیروگاه مکلف است در حداقل مدتی که از لحاظ فنی مورد نیاز است و براساس دستورالعمل های ثابت بهره برداری، دستورات مرکز را اجرا کند. در این حالت بابت اجرای دستورات مرکز به واحدهایی که آمادگی خود را اعلام و در نتیجه بهای آمادگی را برای قابلیت تولید ابراز شده دریافت می کنند، هزینه اضافی پرداخت نمی شود، اما برای سایر واحدها هزینه اجرای دستورات مرکز محاسبه و پرداخت می شود. در صورتی که درخواست مرکز از بهره بردار نیروگاه مبنی بر افزایش تولید به سقف قابلیت تولید قابل گسیل از سوی

۱- یکی از مهم ترین الزامات گسترش رقابت به سمت تقاضا - به گونه ای که خریداران قسمت عمده نیازهای خود را با نرخ پیشنهادی خریداری کنند - گسترش و نصب لوازم اندازه گیری مناسب است.

۲- در صورت عدم توانایی مالک نیروگاه در عمل به تعهد خود در روز قبل - در صورتی که این امر خارج از کنترل او نباشد - مالک نیروگاه موظف به پرداخت خسارت طبق رویه تعیین خسارت (که توسط هیئت تنظیم تعیین می شود) است.

بهره‌بردار عملی نشود، این امر به آزمون ناموفق ظرفیت منجر شده و مالکک نیروگاه مشمول پرداخت خسارت مطابق رویه تعیین خسارت می‌شود. در صورتی که اجرای دستورات مرکز هزینه‌های اضافی برای واحد نیروگاهی ایجاد و یا موجب کاهش درآمد و یا سلب فرصت کسب درآمد شود، مدیر بازار موظف به جبران آن بر اساس ضوابطی که با پیشنهاد مرکز به تصویب هیئت می‌رسد، خواهد بود.

خریدار باید هرگونه تغییر در نیاز مصرف کل خود را بلافاصله به مرکز اعلام و متعاقباً گزارشی از علل تغییر در نیاز مصرف را نیز ارسال کند. چنانچه نیاز مصرف کل به دلایلی خارج از کنترل خریدار تغییر کند، خریدار با اعلام این تغییرات تا ساعت ۱۲ روز قبل از مبادله به مرکز مشمول پرداخت خسارت نخواهد شد. مدیر بازار تا ساعت ۱۲ روز قبل میزان انرژی قابل گسیل به خریدار را اعلام می‌کند. در صورتی که این میزان کم‌تر از نیاز مصرف خریدار باشد، خریدار مجبور به اعمال خاموشی متناسب با مابه‌التفاوت مزبور است. تخمین دقیق خریدار از نیاز مصرف از اهمیت بسیاری برخوردار است، چراکه در صورت عدم مصرف نیاز مصرف اعلام شده از سوی خریدار، پرداخت خسارت طبق رویه‌های تعیین خسارت الزامی خواهد بود. از سوی دیگر، اگر خریدار نیاز مصرف را کم‌تر از حد واقعی پیش بینی کرده باشد برای جبران مابه‌التفاوت بین نیاز مصرف واقعی و نیاز مصرف کل باید هزینه‌های نهایی مربوطه را پرداخت کند.

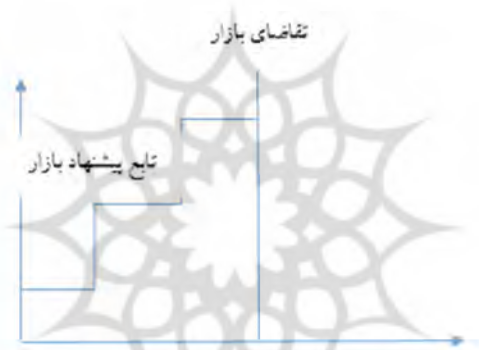
قیمت تعادل بازار به وسیله مدیر بازار تعیین می‌شود. مدیر بازار پس از جمع‌آوری پیشنهادهای فروش و نیازهای مصرف اعلام شده با توجه به اطلاعات مربوط به وضعیت شبکه که از «مرکز» دریافت می‌کند با در نظر گرفتن ملاحظات ایمنی شبکه و رعایت اصل رقابت میان عرضه‌کنندگان، قیمت و مقدار تعادلی بازار^۱ و میزانی را که هر کدام از تولیدکنندگان موظف به تولید آن هستند، محاسبه می‌کند^۲. انتخاب عرضه‌کننده بر مبنای کم‌ترین قیمت‌های ارائه شده صورت می‌گیرد. به عبارتی با توجه به برنامه ارسالی از سوی

۱- محل تقاطع نیاز مصرف کل با نمودار عرضه کل قیمت و مقدار تعادلی بازار را به دست می‌دهد.

۲- برنامه تولید تولیدکنندگان تا ساعت ۱۲ روز قبل از معامله مشخص می‌شود.

فروشنده‌گان، برنامه تولیدی انتخاب می‌شود که مجموع پرداختی به مالکین نیروگاه را حداقل کند.

نمودار (۱) که بیانگر ساختار ساختار فعلی بازار برق ایران است، توابع تقاضا و پیشنهاد اصلاح شده بازار با اعمال قیدها و محدودیت‌های مربوط به شبکه برق را نشان می‌دهد. در این نمودار محل تلاقی آخرین قیمت پیشنهادی بازار با تقاضای بازار تعیین‌کننده آخرین قیمت پذیرفته بازار است. تمامی پرداخت‌های صورت گرفته به بازیگران بر اساس پیشنهادها آنها صورت خواهد گرفت. بر این اساس کل پرداختی به بازیگران بازار معادل سطح زیر تابع پیشنهاد بازار تا نقطه تلاقی آن با تابع تقاضای بازار است.



نمودار (۱) - تابع پیشنهاد در مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد

مبلغ پرداخت شده به مالکین نیروگاه شامل دو جزء است؛ جزء اول، انرژی (که از حاصلضرب قیمت پیشنهادی پذیرفته شده مالک در مقدار تولید او به دست می‌آید) و جزء دوم آمادگی.

بابت جابه‌جایی انرژی مبادله‌شده روی شبکه انتقال، باید مبلغی به مالکان شبکه انتقال (شرکت‌های برق منطقه‌ای) پرداخت شود که در حال حاضر بر اساس تفاوت نقطه تزریقی یا دریافت آنها نسبت به نقطه مرجع شبکه محاسبه شده و توسط مدیر بازار به مالکان شبکه انتقال پرداخت می‌شود.

مقایسه کارایی نسبی مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد... ۱۰۱

مدیر بازار مجموع مبالغ پرداختی خود را محاسبه می کند و در قالب دو هزینه؛ یکی قدرت درخواستی و دیگری هزینه انرژی مصرفی، به خریداران سرشکن می کند. مجموع مبالغی که مدیر بازار از خریداران دریافت می کند برابر است با مجموع مبالغی که به تولیدکنندگان و مالکان شبکه انتقال می پردازد.

در واقع ایجاد بازار عمده فروشی برق با هدف ایجاد فضایی مناسب برای خرید و فروش رقابتی برق بوده و زیرساخت های مناسبی برای استفاده از شبکه برق برای ترانزیت انرژی تولیدکنندگان خصوصی فراهم ساخته است. در عین حال این بازار موجب خواهد شد با واگذاری ظرفیت های نیروگاهی به بخش خصوصی و راه اندازی بورس برق، انرژی برق با کمترین هزینه تأمین شود.

۳- پیشینه تحقیق

با توجه به مؤخر بودن پدیده مقررات زدایی، تجدید ساختار و شکل گیری بازارهای برق، ادبیات ارائه شده حوزه اقتصاد برق به طور عام و مقایسه مکانیزم های حراج متداول در بازارهای برق به طور خاص در مقایسه با سایر حوزه های پژوهشی متداول در علم اقتصاد از غنای کمتری برخوردار است. پژوهش انجام شده توسط عبائی (۱۳۸۹) با طراحی یک بازار برق روباز که در آن بازار تسویه با بازیگران بر مبنای مکانیزم پرداخت بر مبنای پیشنهاد (PAB)^۱ صورت می گرفت به این نتیجه رسیده است که در زمان هایی که شبکه قدرت دارای محدودیت انتقال نبود و همچنین در زمانی که شاخص عرضه باقیمانده (RSI)^۲ هر یک از عرضه کنندگان بیش از صد درصد بود با اجرای مکانیزم بازار برق روباز رقابتی پویا بین عرضه کنندگان بازار شکل گرفت و نگرانی های ناشی از بروز قیمت های غیررقابتی و تبانی در بازار مشاهده نشد، اما در بازار با قیمت گذاری PAB، انتشار قیمت های پذیرفته شده به دلیل قیود امنیت شبکه از لحاظ روانی سبب افزایش قیمت پیشنهادی سایر

1- Pay As Bid

2- Remain Supply Index

بازیگرانی که به صورت رقابتی در بازار پیشنهاد می‌دادند، می‌شود و باعث افزایش قیمت و بروز چسبندگی قیمت می‌شود.

مطالعه صورت گرفته توسط رحمان و فدریکو (۲۰۰۳) از مهم‌ترین و ارزشمندترین کارهای انجام گرفته در زمینه بررسی مقایسه‌ای مکانیزم‌های حراج متداول در بازارهای برق به شمار می‌رود. بررسی مقایسه‌ای مکانیزم حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد و مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت تسویه‌کننده بازار در شرایط رقابتی و انحصاری محور اصلی کار این پژوهشگران را تشکیل می‌دهد. آنها این حراج‌ها را تحت شرایط عدم قطعیت تقاضا و اطلاعات کامل هزینه‌ای مدل‌سازی و به این نتیجه رسیده‌اند که در ساختار رقابتی، مکانیزم حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد در مقایسه با مکانیزم حراج رقیب (مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت تسویه‌کننده بازار) با وجود افزایش مازاد رفاه مصرف‌کنندگان، کاهش در کارایی تولید را به همراه دارد. در واقع پژوهش آنها حاکی از آن است که در شرایط رقابت (و با پذیرش فروش لحاظ شده در مدل) با جایگزینی مکانیزم‌های حراج مزبور به جای همدیگر همواره بده بستانی بین مازاد رفاه مصرف‌کننده و کارایی تولید وجود خواهد داشت. بررسی صورت گرفته در شرایط انحصاری از کارایی تولید کمتر مکانیزم حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد نسبت به مکانیزم حراج تسویه‌کننده قیمت بازار و تأثیر مبهم و غیرقطعی تأثیر مکانیزم حراج انتخابی بر مازاد رفاه مصرف‌کنندگان حکایت دارد.

در مطالعه انجام شده توسط مانت^۱ (۱۹۹۹) مکانیزم‌های حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد و قیمت تسویه‌کننده بازار با هم مقایسه شده‌اند. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که استفاده از مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت تسویه‌کننده بازار موجب بدتر شدن جهش‌های قیمتی در بازار برق در مقایسه با مکانیزم حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد می‌شود. از این رو مکانیزم اخیر به دلیل کاهش اثرات قیمتی خطاهای پیش‌بینی به عنوان مکانیزم جایگزین مکانیزم قیمت تسویه‌کننده بازار در بازارهای برق ارائه شده است.

1- Timothy, Mount

مقایسه کارایی نسبی مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد... ۱۰۳

فابرا، وان درفر و هاریورد (۲۰۰۶) با فرض معین بودن تقاضا به بررسی استراتژی‌های پیشنهاددهی و همچنین تحلیل رفاه و کارایی تولید پرداخته‌اند. این مطالعه در سه بخش مجزا، حراج‌های متداول در بازارهای برق، یعنی حراج‌های با قیمت یکسان، حراج تبعیض‌آمیز و حراج تعمیم یافته قیمت دوم را مورد بررسی قرار داده است. نتایج مطالعه انجام شده دلالت بر آن دارد که حراج تعمیم یافته قیمت دوم همواره منجر به پایین‌ترین هزینه‌های تولید می‌شود؛ زیرا کاراترین تولیدکننده به عنوان اولین بنگاه برای تولید برق انتخاب می‌شود. این امر تنها در صورتی در حراج با قیمت یکسان و حراج تبعیض‌آمیز رخ می‌دهد که یک تولیدکننده بتواند تقاضا را پوشش دهد. در همه موارد دیگر، این امکان وجود دارد که حراج با قیمت یکسان یا حراج تبعیض‌آمیز منجر به هزینه‌های تولید کل کمتر شود. حراج تعمیم یافته قیمت دوم از نظر مازاد مصرف‌کننده به طور ضعیف به دو حراج دیگر برتری دارد به ویژه اگر تولیدکننده با کمترین هزینه نهایی، کمترین ظرفیت تولید را نیز داشته باشد. در این صورت، حراج با قیمت یکسان منجر به نتایج بهتری نسبت به حراج تبعیض‌آمیز نمی‌شود. رتبه‌بندی حراج‌ها در صورتی که تولیدکننده با کمترین هزینه‌های نهایی، ظرفیت تولیدی برابر یا بیشتر از ظرفیت تولید در مقایسه با رقبای خود داشته باشد، متغیر خواهد بود.

مطالعه انجام شده توسط تانیری، شاتزکی و موکرچی (۲۰۰۸) یکی از تحقیقات نسبتاً جدید و مفصل در رابطه با بررسی مقایسه‌ای مکانیزم‌های حراج در بازارهای برق به شمار می‌رود. آنها با بررسی مقایسه‌ای سیستم‌های حراج متداول در بازارهای برق (مکانیزم پرداخت بر مبنای پیشنهاد و مکانیزم قیمت تسویه‌کننده بازار) به این نتیجه رسیده‌اند که بکارگیری مکانیزم پرداخت بر مبنای پیشنهاد (به جای مکانیزم قیمت تسویه‌کننده بازار) موجب افزایش قیمت‌های پرداختی مصرف‌کنندگان و کاهش در کارایی تولید و سرمایه‌گذاری می‌شود.

۴- مدل تحقیق

مکانیزم های حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد و قیمت تسویه کننده بازار، مکانیزم های متداول مورد استفاده برای تسویه بازارهای متمرکز برق به شمار می روند. مکانیزم حراج قیمت تسویه کننده بازار بر مبنای تسویه با نندگان بر اساس بالاترین قیمت پیشنهادی پذیرفته شده در بازار قرار دارد. در این مکانیزم، قیمت ها و میزان ظرفیت پیشنهادی عرضه کنندگان (تابع عرضه) و قیمت ها و نیاز مصرف خریداران (تابع تقاضا) برای موعد معامله، توسط مدیر بازار دریافت و مدیر بازار با لحاظ قیود شبکه عرضه کنندگان با کمترین قیمت پیشنهادی و قیمت تسویه کننده بازار را تعیین می کند. قیمت تسویه کننده بازار، قیمتی است که در آن هیچ عرضه کننده (تقاضا کننده) ای تمایلی به تغییر میزان عرضه (تقاضای) خود در بازار ندارد. در شرایط عدم وجود قیود شبکه، قیمت تسویه کننده بازار از تلاقی منحنی های عرضه و تقاضا حاصل می شود. در این مکانیزم با وجود امکان ارائه پیشنهادهای کاملاً متفاوت از سوی عرضه کنندگان، پرداخت به آنان بر اساس حداکثر قیمت پذیرفته شده در بازار صورت می گیرد.

بر خلاف مکانیزم قیمت تسویه کننده بازار، مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد بر مبنای تسویه با عرضه کنندگان پذیرفته شده (برنده) در بازار بر اساس قیمت پیشنهادی آنان قرار دارد. همانند مکانیزم پیشین در این مکانیزم نیز قیمت ها، میزان ظرفیت پیشنهادی عرضه کنندگان (تابع عرضه) و نیاز مصرف خریداران (تابع تقاضا) برای موعد معامله توسط مدیر بازار دریافت و مدیر بازار با لحاظ قیود شبکه عرضه کنندگان با کمترین قیمت پیشنهادی را تعیین و پرداخت به آنان بر اساس قیمت پیشنهادی ارائه شده از سوی آنان تعیین می کند.

نمودار (۲) توابع تقاضا و پیشنهاد اصلاح شده بازار با اعمال قیدها و محدودیت های مربوط به شبکه برق را نشان می دهد. در این نمودار، محل تلاقی آخرین قیمت پیشنهادی بازار با تقاضای بازار تعیین کننده قیمت بازار است. تمامی پرداخت های صورت گرفته به

مقایسه کارایی نسبی مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد... ۱۰۵

بازیگران بر اساس قیمت مزبور صورت خواهد گرفت. بر این اساس، کل پرداختی به بازیگران بازار معادل قیمت بازار ضرب در مقدار تقاضای ابراز شده در بازار است.



نمودار (۲) - تابع پیشنهاد در مکانیزم حراج قیمت تسویه کننده بازار

در ظاهر امر ممکن است از دیدگاه مصرف کنندگان، مکانیزم پرداخت بر مبنای پیشنهاد نسبت به مکانیزم قیمت تسویه کننده بازار از ارجحیت و مزیت بالاتری برخوردار باشد، چراکه (باز هم در ظاهر امر) پرداخت به تولید کنندگان در مکانیزم نخست نسبت به پرداخت صورت گرفته به آنان در مکانیزم دوم به طور قابل ملاحظه ای بیشتر است. با این حال از آنجایی که رفتار قیمت دهی بازیگران متناسب با تغییر در قواعد بازی تغییر می یابد، اظهار نظر صحیح در این خصوص نیازمند مدل سازی و بررسی دقیق موضوع است. مقاله حاضر - در چارچوب فروض ارائه شده - در صدد نیل به این هدف است.

اشاره به این نکته پیش از ورود به ارائه تفصیلی مدل لازم است که مقاله حاضر صرفاً به بررسی مقایسه ای سیستم های حراج متداول در بازارهای برق پرداخته و طراحی مکانیزم بهینه برای حصول به حداکثر کارایی و مازاد رفاه مصرف کنندگان در دستور کار آن قرار ندارد.^۱ فروض مورد استفاده در مدل ارائه شده در این بخش و منطق و دلایل ارائه شده

۱- به طور کلی تئوری طراحی مکانیزم که یکی از شاخه های بسیار نوپا و در عین حال بسیار کاربردی در علم اقتصاد محسوب می شود به بررسی نحوه طراحی قواعدی از بازی (همانند طراحی حراج) می پردازد که در چارچوب آن قواعد طرح شده، نتیجه تصمیمات بازیگران حداکثر کننده سود معادل نتیجه هدف گذاری شده طراح مکانیزم (طراح قواعد بازی) شود.

برای لحاظ این فروض به صورت اجمالی در بخش مقدمه ارائه شد با این حال حل دقیق مدل ارائه شده و بررسی نتایج حاصله مستلزم ارائه فروض مزبور به صورت دقیق و به زبان ریاضی است:

- (۱) تنها دو بازیگر (نیروگاه) در سمت عرضه بازار وجود دارد.
- (۲) ظرفیت متعلق به هر کدام از بازیگران مساوی و برابر مقدار از قبل تعیین شده (مثلاً k) است.
- (۳) ریسک هر کدام از بازیگران ریسک خنثی است.
- (۴) امکان تبانی بین بازیگران وجود ندارد.
- (۵) تابع هزینه هر کدام از بازیگران به صورت $C_i = c_i q_i$ است. در رابطه مزبور اندیس i معرف بازیگران بوده از این رو هزینه نهایی هر کدام از بازیگران معادل هزینه متغیر آنان است
- (۶) اطلاعات مدیر بازار در رابطه با هزینه نهایی (متغیر) هر کدام از بازیگران ناقص و مدیر بازار تنها اطلاعات مربوط به تابع توزیع چگالی احتمال هزینه نهایی (متغیر) بازیگران را (مطابق خصوصیات عنوان شده در مفروضات) در اختیار دارد.
- (۷) هر کدام از بازیگران اطلاعات کامل در رابطه با هزینه نهایی (متغیر) خود در هر ساعت را دارا بوده و اطلاعات هر کدام از آنها در رابطه با هزینه نهایی (متغیر) رقیب است. هر کدام از بازیگران تنها اطلاعات مربوط به تابع توزیع چگالی احتمال هزینه نهایی (متغیر) رقیب را در اختیار دارند. تابع توزیع چگالی احتمال هزینه نهایی (متغیر) مشترک بازیگران (اطلاعات هر بازیگر در رابطه با هزینه نهایی (متغیر) رقیب) به صورت تابع توزیع نرمال با حداقل مقدار \underline{c} و حداکثر مقدار \bar{c} است.
- (۸) قیمت پیشنهادی هر کدام از بازیگران نمی تواند از سقف تعیین شده توسط مدیر بازار \bar{p} تجاوز کند (\bar{p} بیش از \bar{c} است).
- (۹) اطلاعات بازیگران و مدیر بازار در رابطه با تقاضای بازار کامل و متقارن است. به عبارت دیگر، تقاضای بازار قبل از برگزاری حراج برای تمام بازیگران و مدیر بازار مشخص است.
- (۱۰) تقاضای از پیش تعیین شده بازار (d) نسبت به قیمت کاملاً بی کشش است.

برای بررسی رفتار استراتژیک بازیگران در هر کدام از مکانیزم‌های حراج، بازه تقاضا به سه قسمت تقسیم و نتایج حاصله از کاربست هر کدام از مکانیزم‌ها در هر کدام از بازه‌ها مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد؛ بازه نخست مربوط به شرایطی است که مقدار تقاضای بازار (d) کمتر یا مساوی با حداکثر ظرفیت یکی از تولیدکنندگان (k) است. بدیهی است در این حالت ظرفیت هر کدام از تولیدکنندگان قادر به پوشش تمامی مقدار تقاضای ارائه شده در بازار بوده و لزوم به کارگیری همزمان دو نیروگاه برای تأمین تقاضای بازار وجود ندارد. از نقطه نظر بهره‌برداری بهینه ضروری است تا کل تقاضای بازار با استفاده از نیروگاه با هزینه کمتر تأمین شود^۱ در صورتی که قیمت‌های پیشنهاد هر کدام از بازیگران در هر ساعت تابعی از هزینه نهایی (متغیر) آنان در آن ساعت باشد، شاهد بهینگی در بهره‌برداری از نیروگاه‌های بازار خواهیم بود^۲. بازه دوم، مربوط به شرایطی است که مقدار تقاضای بازار (d) بیش از حداکثر ظرفیت یکی از تولیدکنندگان (k) و کمتر یا مساوی کل ظرفیت بازار ($2k$) است. بدیهی است که در این حالت ضروری است تا به طور همزمان هر دو نیروگاه برای تأمین تقاضای بازار به کار گرفته شوند. با این حال حداقل یکی از نیروگاه‌ها کمتر از حداکثر میزان ظرفیت خود (k) به کار گرفته خواهد شد. همانند حالت قبل در صورتی که قیمت‌های پیشنهاد هر کدام از بازیگران در هر ساعت تابعی از هزینه نهایی (متغیر) آنان در آن ساعت باشد، شاهد بهینگی در بهره‌برداری از نیروگاه‌های بازار خواهیم بود. در این حالت نیروگاه با هزینه کمتر با حداکثر ظرفیت تولید کرده و نیروگاه با هزینه بیشتر تنها معادل مانده تقاضای بازار را پوشش خواهد داد. بازه سوم مربوط به شرایطی است که مقدار تقاضای بازار (d) بیش از کل ظرفیت بازار ($2k$) است. بدیهی است در این حالت ضروری است تا به طور همزمان هر دو نیروگاه با حداکثر ظرفیت خود برای تأمین تقاضای بازار به کار گرفته شوند.

۱- در سیستم‌های بهره‌برداری قبل از تجدید ساختار بهره‌برداری بهینه از طریق گردآوری تمامی اطلاعات مربوط به تمامی واحدهای نیروگاهی و حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری با لحاظ قیود مربوط به شبکه قدرت صورت می‌گرفت. اطلاعات مربوط به شرایط واحدهای نیروگاهی (بجز اطلاعاتی که ممکن است امنیت شبکه برق را تحت‌الشعاع قرار دهد) در فضای مابعد تجدید ساختار اطاعات شخصی بازیگران محسوب شده و بازیگران از هیچ‌گونه الزامی در رابطه با آشکارسازی این اطلاعات برخوردار نیستند.

۲- این موضوع در هر بازه تقاضا و در رابطه با هر کدام از سیستم‌های حراج صدق می‌کند.

در مقاله حاضر از عنوان برنده حراج برای نیروگاهی که سهم بیشتری از کل تقاضای بازار را پوشش می‌دهد، استفاده می‌شود. بر این اساس سهم برنده در یک حراج به صورت کسری از کل تقاضای پوشش داده شده توسط وی اندازه‌گیری می‌شود. سهم برنده از کل تقاضای بازار (α) برابر است با (رابطه (۱)):

(۱)

$$\alpha \in (0, 1] \quad \text{و} \quad \alpha = \min\left(\frac{d}{k}, 1\right)$$

به طور مشابه کسر ظرفیت تولید بازنده برابر است با (رابطه (۲)):

(۲)

$$\beta \in (0, 1] \quad d < 2k \quad \alpha = \min\left(\frac{d}{k} - \alpha, 1\right)$$

$$\beta = 1 \quad d > 2k$$

نسبت تقاضای پوشش داده شده توسط بازیگر بازنده که توسط بازیگر برنده تأمین نمی‌شود بر اساس رابطه (۳) به دست می‌آید:

(۳)

$$d < 2k \quad \text{if} \quad \beta_f = \alpha - \beta \quad \beta_f \in (0, 1]$$

$$d > 2k \quad \text{if} \quad \beta_f = 0$$

۴-۱- متوسط هزینه انتظاری

در صورتی که تابع پیشنهاد قیمتی به کار گرفته شده توسط هر کدام از تولیدکنندگان تابعی فزاینده از هزینه نهایی (متغیر) همان تولیدکننده بوده^۱ و یا مقدار تقاضای کل بازار بزرگ‌تر یا مساوی ظرفیت تولید کل بازار باشد با توجه به اینکه هزینه انتظاری هر واحد

۱- با توجه به توابع پیشنهاد استخراج شده بازیگران (که در این بخش به طور تفصیلی مورد بررسی قرار خواهد گرفت) به طور واضح، فارغ از سیستم حراج انتخاب شده، تابع پیشنهاد هر بازیگر تابعی فزاینده از هزینه نیروگاه متعلق به آن بازیگر است.

مقایسه کارایی نسبی مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد... ۱۰۹

برق تولیدی، میانگین انتظاری کل هزینه‌های تولید هر کدام از بازیگران است، می‌توان هزینه‌های تولید انتظاری را برای بازه‌های مختلف تقاضا برحسب واحد برق به صورت رابطه (۴) به دست آورد:

(۴)

$$E(c) = \frac{1}{\alpha + \beta} E \left\{ \{\alpha c_i + \beta c_j\} I_{\{b(c_i) < b(c_j)\}} + \{\beta c_i + \alpha c_j\} I_{\{b(c_i) > b(c_j)\}} \right\}$$

در رابطه فوق $b(c_i)$ و $b(c_j)$ به ترتیب معرف تابع پیشنهاد بازیگر اول و دوم هستند. بخش اول رابطه معرف حالتی است که قیمت پیشنهادی بازیگر اول کمتر از بازیگر دوم است $I_{\{b(c_i) < b(c_j)\}}$. بخش دوم رابطه مزبور معرف حالتی است که در آن عکس حالت فوق (قیمت پیشنهادی بازیگر دوم کمتر از بازیگر نخست است) برقرار است. با توجه به اینکه تابع پیشنهاد متقارن و نسبت به c صعودی است، رابطه (۴) به صورت رابطه (۵) قابل ساده‌سازی است:

(۵)

$$E(c) = \frac{2}{\alpha + \beta} E \left\{ \{\alpha c_i + \beta c_j\} I_{\{c_i < b(c_j)\}} \right\} = \frac{2}{\alpha + \beta} \int_c^{\bar{c}} \int_c^{\bar{c}} (\alpha c + \beta \tau) f(\tau, c) d\tau dc$$

با توجه به تابع توزیع نرمال انتخاب شده در بازه (۱۴۲، ۲۶۴)، (فرض شماره ۶) رابطه (۵) معادل رابطه (۶) خواهد بود:

(۶)

$$E[c] = \frac{2}{\alpha + \beta} E \left[\{\alpha c_i + \beta c_j\} I_{\{c_i < c_j\}} \right]$$

$$= \frac{2}{\alpha + \beta} \int_c^{\bar{c}} \int_c^{\bar{c}} (\alpha c + \beta \tau) \frac{e^{\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{\tau - \mu_\tau}{\sigma_\tau} \right)^2 + \left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{\tau - \mu_\tau}{\sigma_\tau} \right) \left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \right) \right] \right]}{2\pi\sigma_\tau\sigma_c\sqrt{1-\rho^2}} d\tau dc$$

هزینه متوسط انتظاری با استفاده از رابطه (۶) به دست می‌آید. با توجه به عدم امکان حل پارامتریک رابطه (۶)، هزینه متوسط انتظاری برای بازه‌های مختلف تقاضا به صورت عددی محاسبه می‌شود. در این راستا هزینه متوسط انتظاری برای هر کدام از حالت‌هایی که تولیدکنندگان مختلف برای تأمین تقاضا موفق به فروش برق خود می‌شوند، مورد بررسی قرار گرفته است.

یک تولیدکننده برای تأمین تقاضا مورد نیاز است $(d \in (0, k))$:

در بازه $d \in (0, k)$ نتایج به صورت جدول (۱) است.

جدول (۱) - متوسط هزینه انتظاری $d \in (0, k)$

D	α	β	ضریب همبستگی	δ	$E(c)$
۱۰	.۱	۰	۰	۱	۲۳۴.۷۷۰۱
۳۰	.۳	۰	۰	۱	۲۳۴.۷۷۰۱
۵۰	.۵	۰	۰	۱	۲۳۴.۷۷۰۱
۸۰	.۸	۰	۰	۱	۲۳۴.۷۷۰۱
۱۰۰	۱	۰	۰	۱	۲۳۴.۷۷۰۱

مطابق اطلاعات جدول (۱)، در بازه نخست، میانگین هزینه انتظاری بازار کمتر از میانگین هزینه انتظاری در نظر گرفته شده برای هر کدام از بازیگران است. مسلماً در صورتی که تنها یک نیروگاه در بازار موجود می‌بود، متوسط هزینه انتظاری بازار معادل متوسط هزینه انتظاری در نظر گرفته شده برای بازیگر (۲۳۶) می‌شد. با این حال با توجه به حضور بازیگر دوم در بازار برای هر هزینه قابل تصور برای بازیگر اول، امکان وجود هزینه‌ای پایین‌تر از هزینه مزبور برای بازیگر دوم بزرگ‌تر از صفر است. بنابراین امکان وقوع هزینه‌ای پایین‌تر در حالت وجود دو بازیگر بیشتر از حالت وجود یک بازیگر است.

دو تولیدکننده برای تأمین تقاضا مورد نیاز است $(d \in (k, 2k))$:

برای بازه $d \in (k, 2k)$ نتایج به صورت جدول (۲) است.

جدول (۲) - متوسط هزینه انتظاری $d \in (k, 2k)$

D	α	β	ضریب همبستگی	δ	$E(c)$
۱۰۰	۱	۰	۰	۱	۲۳۴,۷۷۰۱
۱۱۰	۱	.۱	۰	۱	۲۳۴,۸۷۲۶
۱۲۰	۱	.۲	۰	۱	۲۳۴,۹۵۸۱
۱۳۰	۱	.۳	۰	۱	۲۳۵,۰۳۰۵
۱۴۰	۱	.۴	۰	۱	۲۳۵,۰۹۲۵
۱۵۰	۱	.۵	۰	۱	۲۳۵,۱۴۶۲
۱۶۰	۱	.۶	۰	۱	۲۳۵,۱۹۳۲
۱۷۰	۱	.۷	۰	۱	۲۳۵,۲۳۴۷
۱۸۰	۱	.۸	۰	۱	۲۳۵,۲۷۱۶
۱۹۰	۱	.۹	۰	۱	۲۳۵,۳۰۴۶
۲۰۰	۱	۱	۰	۱	۲۳۵,۳۳۴۳

با توجه به جدول (۲)، در بازه مورد بررسی $(d \in (k, 2k))$ متوسط هزینه انتظاری بازار با افزایش در میزان تقاضای بازار افزایش و در حد نهایی آن میل می‌کند. در بازه نخست ظرفیت نیروگاه با هزینه کمتر قادر به پوشش کل تقاضای بازار است. بنابراین در این شرایط لزوم بکارگیری ظرفیت نیروگاه با هزینه بیشتر وجود نخواهد داشت. در بازه دوم و با لزوم به کارگیری ظرفیت نیروگاه با هزینه بیشتر، هزینه انتظاری تولید برق به تبع افزایش سهم بازیگر دوم از کل تقاضای بازار افزایش خواهد یافت. در تمامی مقادیر تقاضای مورد بررسی در این بازه میانگین هزینه انتظاری کمتر از میانگین هزینه انتظاری مربوط به هر کدام از بازیگران (۲۳۶) است، چراکه در این حالت اگرچه از ظرفیت نیروگاهی بازیگر با هزینه بیشتر در تأمین با مورد شبکه استفاده می‌شود، با این حال در

محاسبه متوسط هزینه انتظاری بازار، هزینه‌های منتسب به این بازیگر با ضرایب کمتر از یک در محاسبات وارد می‌شوند از این رو متوسط هزینه انتظاری بازار کمتر از متوسط هزینه انتظاری تک تک بازیگران خواهد بود. تنها در حالت بیشتر بودن میزان تقاضای بازار از کل ظرفیت نیروگاهی، شاهد برابری متوسط هزینه انتظاری بازار با متوسط هزینه انتظاری تک تک بازیگران خواهیم بود، چراکه در این حالت هر دو بازیگران برنده بازار محسوب شده و تمامی ظرفیت بازیگران به طور کامل مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۴-۱-۱- کارایی تولید

بر اساس اطلاعات جداول (۱) و (۲)، امید ریاضی هزینه بازار صرفاً ساختار هزینه‌های بازار را در بازه‌های مختلف تقاضا نمایش می‌دهد و در صورتی که قیمت پیشنهادی ارائه شده از سوی بازیگران تابعی فزاینده از هزینه آنان باشد^۱ مقدار آن مستقل از مکانیزم حراج انتخابی (مکانیزم پرداخت بر مبنای پیشنهاد و مکانیزم قیمت تسویه کننده بازار) در بازار است، بنابراین پاسخ سوال اول طرح شده در رابطه با بیشتر بودن کارایی نسبی مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت تسویه کننده بازار به حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد این است که «با توجه به آنکه قیمت پیشنهادی ارائه شده از سوی بازیگران تابعی فزاینده از هزینه آنان است، در هر سطحی از تقاضای قابل تصور- فارغ از مکانیزم حراج انتخابی- تقاضای ارائه شده در بازار با کمترین هزینه ممکن تولید خواهد شد، بنابراین کارایی تولید در هر کدام از مکانیزم‌های حراج همسنگ و معادل با حداکثر کارایی قابل تصور است.»

۴-۲- مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد

در مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد، پرداخت به تولیدکنندگان بر مبنای پیشنهاد ارائه شده از سوی آنان صورت می‌گیرد، بنابراین در این مکانیزم سود هر بازیگر معادل

۱- این موضوع به طور کامل در این بخش اثبات خواهد شد.

تفاوت بین نرخ پیشنهادی آن بازیگر با هزینه نهایی همان بازیگر است. با تشکیل تابع سود انتظاری هر کدام از بازیگران تابع پیشنهاد هر کدام از آنان قابل حصول است. در صورتی که هزینه بازیگر i ($i \neq j$) معادل c_i باشد، سود انتظاری تولیدکننده i به صورت رابطه (۷) خواهد بود:

$$\begin{aligned} \pi_i(b_i, c_i) &= kE \left[\alpha [b_i - c_i] I_{\{b_i < b_j\}} + \beta [b_i - c_i] I_{\{b_i > b_j\}} \mid C_i = c_i \right] \\ &= k [b_i - c_i] \left\{ \alpha - [\alpha - \beta] E [I_{\{b_i < b_j\}} \mid C_i = c_i] \right\} \\ &= k [b_i - c_i] \left[\alpha - \beta_f \int_{\underline{c}}^{b^{-1}(b_i)} f(\tau | c) d\tau \right] \end{aligned} \quad (7)$$

در رابطه فوق $b^{-1}(b_i)$ تابع معکوس تابع $b(c_i)$ و در حقیقت همان هزینه نهایی (متغیر) بازیگر i است. با جایگذاری تابع توزیع نرمال در معادله (۷) و مشتق‌گیری بر حسب b_i و حل معادله دیفرانسیل حاصله تابع پیشنهادی بازیگر i برای بازه تقاضای $d \in (0, 2k)$ قابل حصول است (رابطه (۸)):

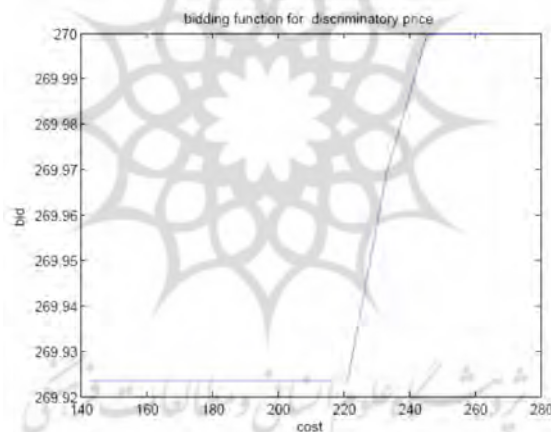
$$\frac{\partial \pi_i}{\partial b_i} = k(\alpha - \beta_f) \int_{\underline{c}}^{c_j} e^{-\frac{\left(\frac{\tau - \mu_i - \rho \frac{\sigma_i}{\sigma_j} (c_j - \mu_j)}{\sigma_i \sqrt{1 - \rho^2}} \right)^2}{\sqrt{2\pi} \sigma_i \sqrt{1 - \rho^2}}} d\tau + \frac{b_i - c_i}{b'(c_j)} (-\beta_f) \frac{e^{-\frac{\left(\frac{c_j - \mu_j - \rho \frac{\sigma_j}{\sigma_i} (c_i - \mu_i)}{\sigma_j \sqrt{1 - \rho^2}} \right)^2}{\sqrt{2\pi} \sigma_j \sqrt{1 - \rho^2}}}}{\sqrt{2\pi} \sigma_j \sqrt{1 - \rho^2}} \quad (8)$$

با توجه به پیچیدگی فرم تبعی مربوطه - به واسطه پیچیدگی فرم تبعی تابع توزیع مشترک - از روش حل عددی برای به دست آوردن تابع پیشنهاد بهینه بازیگران استفاده می‌شود.

یک تولیدکننده برای تأمین تقاضا مورد نیاز است $(d \in (0, k))$:

نتایج حاصل از حل عددی رابطه (۸) برای استخراج تابع پیشنهاد بازیگران با فرض استقلال بین هزینه‌های نهایی بازیگران در نمودار (۳) نمایش داده شده است. صعودی بودن تابع پیشنهاد بازیگران از رابطه شماره (۸) قابل نتیجه‌گیری است.

تابع پیشنهاد هر کدام از بازیگران به عنوان تابعی از هزینه نهایی (متغیر) آنها در دامنه $(142, 264)$ در نمودار (۳) نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، تابع پیشنهاد هر کدام از بازیگران تابعی فزاینده از هزینه نهایی (متغیر) آنان است. این نتیجه از اهمیت بسیار خاصی در بررسی کارایی تولید در بازارهای برق برخوردار است، چرا که بنا به تحلیل ارائه شده در بخش قبل، صعودی بودن تابع پیشنهاد هر کدام از بازیگران شرط لازم برای کارایی بخش تولید به شمار می‌رود.



نمودار ۳- تابع پیشنهاد در مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد $d \in (0, k)$

نتایج به دست آمده از رابطه شماره (۸) تابع پیشنهاد ارائه شده در دامنه $(142, 264)$ توسط هر کدام از بازیگران، مستقل از نسبت ظرفیت نیروگاه‌ها و کل سطح تقاضای بازار است، چراکه در دامنه مورد بحث، کل تقاضای بازار تنها به وسیله کسری از کل ظرفیت

یکی از نیروگاه‌ها قابل پوشش بوده و اساساً لحاظ عامل محدودیت ظرفیت نسبت به تقاضای بازار در تابع پیشنهادی بازیگران فاقد موضوعیت است.

دو تولیدکننده برای تأمین تقاضا مورد نیاز است $(d \in (k, 2k))$:

تابع پیشنهاد هر کدام از بازیگران در بازه دوم مورد بررسی به عنوان تابعی از هزینه نهایی (متغیر) آنها، در دامنه $(۱۴۶, ۲۶۴)$ در نمودار (۴) نمایش داده شده است. با توجه به نمودار (۴)، تابع پیشنهاد هر کدام از بازیگران تابعی فزاینده از هزینه نهایی (متغیر) آنان است. نکته قابل توجه در رابطه با تابع پیشنهادی بازیگران در بازه دوم تقاضا - در مقایسه با بازه نخست - ظهور پارامترهای تقاضا و ظرفیت نیروگاه‌ها در تابع پیشنهادی بازیگران است. به عبارت دیگر، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد در دامنه مورد بحث، تابع پیشنهادی هر بازیگر نه تنها تابعی از هزینه نهایی (متغیر) آن بازیگر، بلکه تابعی از شرایط پارامترهای تعیین‌کننده مازاد ظرفیت بازار نسبت به تقاضای کل نیز است. تابع پیشنهاد هر کدام از بازیگران به عنوان تابعی از تقاضای بازار با فرض مقدار مشخصی از ظرفیت در بازار، در بازه دوم $d \in (k, 2k)$ نشان داده شده است.



نمودار (۴) - تابع پیشنهاد در مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد $d \in (k, 2k)$

متناسب با افزایش نسبت کل تقاضای بازار به کل ظرفیت موجود در بازار (کاهش نسبت ظرفیت بیکار نیروگاه‌ها) افزایش می‌یابد. به طور مسلم افزایش قیمت پیشنهادی

به واسطه افزایش نسبت کل تقاضای بازار به کل ظرفیت موجود در بازار نه به واسطه کمبود ظرفیت در بازار، بلکه به دلیل وجود قدرت بازار هر کدام از بازیگران در بازار اتفاق میفتد، چراکه در بازه مورد بحث ($d \in (k, 2k)$) ظرفیت به اندازه کافی برای پوشش کل تقاضای بازار وجود خواهد داشت. با این حال افزایش با تقاضای بازار (با فرض وجود مقدار معینی از ظرفیت نیروگاهی) احتمال رد پیشنهادهای بالای ارائه شده از سوی بازیگران کمتر و کمتر می شود. با توجه به اینکه در مدل ارائه شده، اطلاعات بازیگران در رابطه با سطح کل تقاضای بازار کامل و متقارن است و همچنین با توجه به کاهش احتمال عدم پذیرش پیشنهادهای قیمتی بالاتر ارائه شده از سوی بازیگران، هرگونه افزایش تقاضایی در بازه یاد شده موجب ارائه پیشنهادهای بالاتر از سوی هر کدام از بازیگران، فارغ از سطح هزینه نهایی (متغیر) آنان خواهد بود.

با توجه به فروض در نظر گرفته شده در مدل ارائه شده، قیمت پیشنهادی بازیگران در بازه سوم ($d > 2k$) معادل حداکثر قیمت مجاز تعیین شده از سوی مدیر بازار (سقف قیمتی) خواهد بود. محدود سازی بازار به سقف قیمتی (حد مجاز پیشنهاد قیمتی بازیگران) از مهم ترین مشخصه های بازارهای برق در اکثر کشورهایی که اقدام به تجدید ساختار و مقررات زدایی (از جمله تشکیل بازار عمده فروشی برق) در صنعت برق کرده اند، محسوب می شود. از آغاز شروع فرآیند تجدید ساختار اعمال سقف قیمتی در بازار برق همواره به عنوان یکی از مهم ترین گزینه های کنترل رفتار انحصاری بازیگران (به خصوص در شرایط قدرت بالای بازار) مطرح بوده است. با این حال برخی از اقتصاددانان و سیاست گذاران بخش برق، ناکارایی های ناشی از اعمال سقف بازار را بسیار بیشتر از اعمال قدرت انحصاری بازیگران در فرآیند تجدید ساختار تلقی می کنند، چراکه به زعم آنها، وجود قدرت انحصاری بازیگران (و به تبع آن قیمت های بالاتر برق در برخی از نقاط شبکه) با ارسال علائم قیمتی درست در رابطه با فرصت های سرمایه گذاری و سودآوری بالا در نقاط دارای کمبود و نقصان عرضه برق، موجب ترغیب و تشویق سرمایه گذاران به احداث نیروگاه ها در این مناطق،

رفع کمبود و نقصان طرف عرضه و ارتقای پایداری و امنیت شبکه برق می‌شود، این در حالی است که اعمال سقف قیمتی با تخفیف یا از بین بردن علائم قیمتی مزبور می‌تواند موجب عدم توازن بلندمدت در عرضه و تقاضا و تهدید امنیت و پایداری شبکه برق شود. از طرفی اعمال سقف قیمتی با اختلال در علائم لازم برای جیره‌بندی در سمت تقاضا و عدم واکنش مصرف‌کنندگان به کمبودهای سمت عرضه می‌تواند تهدیدی جدی برای امنیت و پایداری شبکه برق محسوب شود. بر این اساس سقف قیمتی در برخی از بازارهای برق، مانند استرالیا و ایالت‌های پنسلوانیا، نیوجرسی و مریلند *PJM*^۱ در سطح بسیار بالایی تعیین شده به طوری که موارد بسیار معدودی از برابری قیمت با سقف بازار در این بازارها مشاهده شده است. بررسی مقایسه‌ای سیاست‌های اعمال یا عدم اعمال سقف قیمتی در بازارهای برق و احصاء منافع و مضرات هر کدام از این سیاست‌ها - خارج از حوزه بررسی مقاله حاضر- نیازمند بررسی و پژوهش عمیق‌تر در این زمینه است. با این حال با توجه به اعمال سقف قیمتی در بازار برق ایران، مدل ارائه شده در این مقاله با فرض اعمال سقف قیمتی در بازار برق طرح و ارائه شده است.

وجود قدرت بازار بازیگران - با فرض وجود کارایی در بخش تولید- حاکی از آن است که قیمت‌های انتظاری پایین‌تر به مفهوم کارایی کل بیشتر در بازار است. بر این اساس برای مقایسه کارایی کل هر کدام از مکانیزم‌های حراج، ضروری است متوسط قیمت انتظاری در هر کدام از سیستم‌ها مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد. در این راستا در این قسمت متوسط قیمت انتظاری بازار در مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. بررسی و تجزیه و تحلیل متوسط قیمت انتظاری در مکانیزم قیمت تسویه‌کننده بازار پس از ارائه و حل مدل در مکانیزم مزبور صورت خواهد پذیرفت.

متوسط قیمت انتظاری در بازه $d \in (0, k)$ بر اساس رابطه (۹) قابل حصول است:

$$E[pd] = \frac{1}{\alpha + \beta} E \left[\alpha b_d^*(c_i) I_{\{b_d^*(c_i) < b_d^*(c_j)\}} + \beta b_d^*(c_i) I_{\{b_d^*(c_i) > b_d^*(c_j)\}} \right] \\ + \frac{1}{\alpha + \beta} E \left[\alpha b_d^*(c_j) I_{\{b_d^*(c_j) < b_d^*(c_i)\}} + \beta b_d^*(c_j) I_{\{b_d^*(c_j) > b_d^*(c_i)\}} \right]$$

با توجه به توابع پیشنهادی یکسان بازیگران و همچنین با توجه به اینکه متغیرهای اطلاعاتی از یک تابع توزیع نرمال استخراج می‌شوند قیمت متوسط انتظاری به صورت رابطه (۱۰) خواهد بود:

$$E[pd] = \frac{\gamma \alpha}{\alpha + \beta} E \left[b_d^*(c_i) I_{\{b_d^*(c_i) < b_d^*(c_j)\}} \right] + \frac{\gamma \beta}{\alpha + \beta} E \left[b_d^*(c_i) I_{\{b_d^*(c_i) > b_d^*(c_j)\}} \right] \\ = \frac{\gamma \alpha}{\alpha + \beta} E \left[b_d^*(c_j) \right] - \frac{\alpha - \beta}{\alpha + \beta} E \left[\gamma \beta b_d^*(c_i) I_{\{b_d^*(c_i) > b_d^*(c_j)\}} \right]$$

با توجه به اینکه تابع پیشنهادی نسبت به c اکیداً صعودی است، رابطه (۱۰) به صورت رابطه (۱۱) ساده می‌شود:

$$E[pd] = \frac{\gamma \alpha}{\alpha + \beta} \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} b_d^*(c) \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} f(\tau, c) d\tau dc - \frac{\gamma \beta f}{\alpha + \beta} \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} b_d^*(c) \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} f(\tau, c) d\tau dc$$

با در نظر گرفتن تابع توزیع نرمال و حل رابطه (۱۱) متوسط قیمت انتظاری به صورت رابطه (۱۲) خواهد بود:

$$E[P_d] = \frac{\gamma \alpha}{\alpha + \beta} \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} b_d^*(c) \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} e^{\frac{\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{\xi - \mu_\xi}{\sigma_\xi} \right)^2 + \left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \right)^2 - \gamma \rho \left(\frac{\xi - \mu_\xi}{\sigma_\xi} \right) \left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \right) \right] \right]} d\xi dc \\ - \frac{\gamma \beta f}{\alpha + \beta} \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} b_d^*(c) \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} e^{\frac{\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{\xi - \mu_\xi}{\sigma_\xi} \right)^2 + \left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \right)^2 - \gamma \rho \left(\frac{\xi - \mu_\xi}{\sigma_\xi} \right) \left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \right) \right] \right]} d\xi dc$$

با توجه به عدم امکان حل پارامتریک رابطه (۱۲) از روش شیشه سازی عددی برای محاسبه و بررسی و تجزیه و تحلیل متوسط قیمت انتظاری بازار در بازه‌های مختلف تقاضا استفاده شده است.

یک تولیدکننده برای تأمین تقاضا مورد نیاز است $(d \in (0, k))$:

نتایج حاصل از محاسبات عددی در بازه نخست تقاضا $(d \in (0, k))$ با فرض عدم وجود همبستگی بین هزینه‌های نهایی بازیگران در جدول (۳) آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده از مدل، متوسط قیمت انتظاری در بازه اول مورد بررسی ثابت و مستقل از تغییرات در میزان تقاضا است.

جدول (۳) - متوسط قیمت انتظاری در مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد با فرض استقلال

D	α	β	ضریب همبستگی	δ	$E(Pd)$
۱۰	.۱	۰	۰	۱	۲۶۸,۵۷۰۴
۳۰	.۳	۰	۰	۱	۲۶۸,۵۷۰۴
۵۰	.۵	۰	۰	۱	۲۶۸,۵۷۰۴
۸۰	.۸	۰	۰	۱	۲۶۸,۵۷۰۴
۱۰۰	۱	۰	۰	۱	۲۶۸,۵۷۰۴

دو تولیدکننده برای تأمین تقاضا مورد نیاز است $(d \in (k, 2k))$:

نتایج حاصل از محاسبات عددی در بازه دوم تقاضا $(d \in (k, 2k))$ با فرض عدم وجود همبستگی بین هزینه‌های نهایی بازیگران در جدول (۴) آمده است. همانند حالت قبل (فرض وجود همبستگی بین هزینه‌های نهایی بازیگران)، متوسط قیمت انتظاری در بازه دوم مورد بررسی، تابعی فزاینده از میزان تقاضای بازار است.

جدول ۴- متوسط قیمت انتظاری در مکانیزم حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد با فرض استقلال

D	α	β	ضریب همبستگی	δ	$E(Pd)$
۱۰۰	۱	۰	۰	۱	۲۶۸,۵۷۰۴
۱۱۰	۱	.۱	۰	۱	۲۶۸,۷۴۵۵
۱۲۰	۱	.۲	۰	۱	۲۶۸,۹۸۱۳
۱۳۰	۱	.۳	۰	۱	۲۶۹,۱۷۸۳
۱۴۰	۱	.۴	۰	۱	۲۶۹,۳۴۶۷
۱۵۰	۱	.۵	۰	۱	۲۶۹,۴۹۲۴
۱۶۰	۱	.۶	۰	۱	۲۶۹,۶۱۹۸
۱۷۰	۱	.۷	۰	۱	۲۶۹,۷۳۲۱
۱۸۰	۱	.۸	۰	۱	۲۶۹,۸۳۲۰
۱۹۰	۱	.۹	۰	۱	۲۶۹,۹۲۱۳
۲۰۰	۱	۱	۰	۱	۲۷۰,۰۰۱۷

۴-۳- مکانیزم قیمت تسویه کننده بازار

در مکانیزم قیمت تسویه کننده بازار، قیمت بازار و قیمت پرداختی به هر کدام از بازیگران مساوی و معادل با بیشترین قیمت پیشنهادی پذیرفته شده در بازار خواهد بود. مکانیزم قیمت تسویه کننده بازار دارای تشابه کامل با بازار کالاها در یک بازار طبیعی (سیستم مبادله‌ای که در آن افراد به صورت داوطلبانه و بدون وجود یک حراج کننده مرکزی به مبادله و داد و ستد می‌پردازند) است. در این بازارها عرضه کننده‌ای با بیشترین پیشنهاد قیمتی که در قیمت پیشنهادی ارائه شده موفق به فروش کالای خود می‌شود، تعیین کننده قیمت بازار خواهد بود و در این قیمت، تمامی عرضه کنندگان دیگر موفق به فروش کالای خود به بالاترین قیمت پذیرفته شده در بازار خواهند بود.

در بازارهای برق، تحت مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت تسویه کننده بازار، مدیر بازار پیشنهادات قیمتی ارائه شده از سوی عرضه کنندگان را دریافت و با توجه به کل تقاضای بازار عرضه کنندگان، کمترین قیمت پیشنهادی ارائه شده را انتخاب و بالاترین قیمت

پیشنهادی ارائه شده را مبنای پرداخت و تسویه حساب با عرضه کنندگان پذیرفته شده در بازار قرار می‌دهد.^۱

در مکانیزم قیمت تسویه‌کننده بازار - در صورتی که تقاضای کل بازار از ظرفیت تولید یک تولیدکننده تجاوز نکند - کل تقاضای بازار توسط بازیگر برنده پوشش داده خواهد شد. در این حالت با توجه به اینکه موقعیت رقابتی در بازه نخست (یعنی زمانی که بازه تقاضا بین ۰ و k است) دقیقاً همانند مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت پیشنهادی است، قیمت پیشنهادی هر کدام از بازیگران دقیقاً همانند قیمت پیشنهادی بازیگران در مکانیزم مورد نظر خواهد بود.

در بازه دوم تقاضا با توجه به اینکه ظرفیت تولید در اختیار هر دو بازیگر (البته نه به طور کامل) برای تأمین تقاضا ضروری است، لازم است همه گزینه‌های قابل تصور در بازار از جمله برد و باختن در محاسبه سود انتظاری مد نظر قرار گیرند. سود انتظاری تولیدکننده i با فرض $i \neq j$ معادل رابطه (۱۳) خواهد بود:

$$\begin{aligned} \pi_i(b_i, c_i) &= E \left[k(b_i - c_i) I_{\{b_i < b_j\}} + [d - k][b_i - c_i] I_{\{b_i > b_j\}} \right] \\ &= k \int_{b^{-1}(b_i)}^{\bar{c}} [b(c_i) - c_i] f(c_j | c_i) k \beta[b_i - c_i] \int_{b^{-1}(b_i)}^{b^{-1}(b_j)} f(c_j | c_i) dc_i \end{aligned} \quad (13)$$

با جایگذاری تابع شرطی توزیع نرمال در رابطه (۱۳) و حل شرایط لازم برای حداکثرسازی تابع سود انتظاری، تابع پیشنهاد در بازه دوم تقاضا (شرایطی که تقاضا بین k و $2k$ باشد به صورت رابطه (۱۴) خواهد بود:

۱- طبیعی است که در صورت برقراری شرایط رقابت کامل و فقدان قدرت بازار، قیمت پیشنهادی ارائه شده توسط هر کدام از بازیگران معادل هزینه نهایی آنان خواهد بود، چرا که پیشنهاد قیمتی پایین تر از هزینه نهایی موجب متضرر شدن بازیگران و پیشنهاد قیمتی فراتر از هزینه نهایی موجب عدم پذیرش آنان در بازار خواهد گشت.

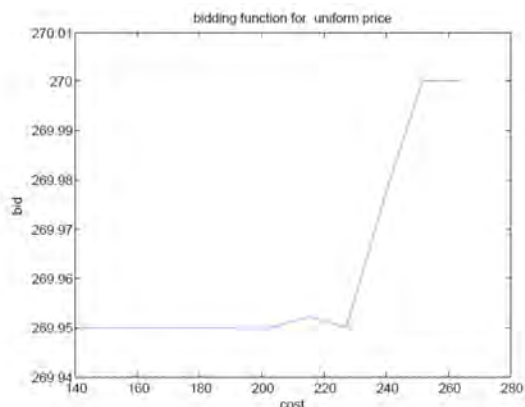
(۱۴)

$$\frac{\partial \pi_i(b_i, c_i)}{\partial b_i} = k \left\{ \beta F(b^{-1}(b_i)|c_i) - [\gamma - \beta][b_i - c_i] \frac{e^{-\frac{1}{\gamma} \left(\frac{b^{-1}(b_i) - \mu_{b^{-1}(b_i)} - \rho \frac{\sigma_{b^{-1}(b_i)}(c_i - \mu_{c_i})}{\sigma_{c_i}}}{\sigma_{b^{-1}(b_i)} \sqrt{1 - \rho^2}} \right)^\gamma}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{b^{-1}(b_i)} \sqrt{1 - \rho^2}}}}{b(b^{-1}(b_i))'} \right\}$$

$$= k \left\{ \beta F(b^{-1}(b_i)|c_i) - \beta_f [b_i - c_i] \frac{e^{-\frac{1}{\gamma} \left(\frac{b^{-1}(b_i) - \mu_{b^{-1}(b_i)} - \rho \frac{\sigma_{b^{-1}(b_i)}(c_i - \mu_{c_i})}{\sigma_{c_i}}}{\sigma_{b^{-1}(b_i)} \sqrt{1 - \rho^2}} \right)^\gamma}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{b^{-1}(b_i)} \sqrt{1 - \rho^2}}}}{b(b^{-1}(b_i))'} \right\}$$

با توجه به پیچیدگی رابطه (۱۴) و عدم امکان حل ریاضی آن، همانند روش به کار برده شده در مکانیزم حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد از روش حل عددی برای استخراج توابع پیشنهاد بازیگران استفاده شده است. نتایج حاصل از حل عددی رابطه (۱۴) برای استخراج تابع پیشنهاد بازیگران در نمودار (۵) نمایش داده شده است. صعودی بودن تابع پیشنهاد بازیگران از رابطه شماره (۱۴) قابل نتیجه گیری است^۱.

۱- قسمت نزولی نمودارهای شماره (۴-۶) و (۴-۷) مربوط به خطای محاسباتی ناشی از فرآیند استخراج تابع پیشنهاد است. خطاهای مزبور با کاهش دامنه تغییر کمتر و کمتر شده و در نهایت به مقدار صفر میل می کند.



نمودار (۵) - تابع پیشنهاد در مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت تسویه کننده بازار $d \in (k, 2k)$

همانند مورد مکانیزم حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد - در بازه دوم تقاضا - با افزایش تقاضا، قیمت‌های پیشنهادی بازیگران افزایش خواهد یافت.

در شرایطی که کل تقاضای بازار بیشتر از ظرفیت یک تولیدکننده اما کمتر از کل ظرفیت موجود در بازار باشد $(d \in (k, 2k))$ ، توابع پیشنهاد بازیگران در حراج مبتنی بر قیمت تسویه کننده بازار متفاوت از پیشنهاد آنان در مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت پیشنهادی خواهد بود، چراکه بازیگر با بالاترین قیمت پیشنهادی پذیرفته شده در بازار تعیین کننده قیمت واحد بازار خواهد بود. تحت چنین شرایطی انگیزه بازیگران برای ارائه قیمت‌های بالا تخفیف می‌یابد، چراکه ارائه قیمت‌های بالا احتمال بازنده شدن بازیگر پیشنهاددهنده قیمت بالا را افزایش خواهد داد این در حالی است که به ازای هر کیلووات ساعت تولیدی مبلغ واحدی به بازیگران (برنده و بازنده) پرداخت خواهد شد، بنابراین در مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت تسویه کننده بازار، بازیگران ترجیح خواهند داد به جای ارائه پیشنهادات قیمتی بالا و افزایش احتمال عدم پذیرش، این امر را به بازیگر دیگر واگذار و از قیمت بالای پیشنهادی ارائه شده توسط آن بازیگر (قیمت تسویه کننده بازار) منتفع شوند.

در شرایطی که هر دو بازیگر استراتژی خود را به این صورت تنظیم کنند، نتیجه نهایی ارائه پیشنهادات قیمتی پایین تر (در مقایسه با مکانیزم حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد) توسط بازیگران خواهد بود. با این حال هیچ تضمینی در رابطه با کمتر (یا بیشتر)

بودن متوسط قیمت انتظاری مصرف کنندگان در این مکانیزم نسبت به مکانیزم حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد وجود نخواهد داشت، چراکه تحت این مکانیزم پرداخت بالاترین قیمت پیشنهادی پذیرفته شده در بازار به همه بازیگران، می تواند قیمت های پیشنهادی پایین تر ارائه شده از سوی بازیگران را جبران و متوسط قیمت انتظاری مصرف کنندگان را افزایش دهد. بررسی و مقایسه دقیق متوسط قیمت انتظاری تحت هر کدام از مکانیزم های حراج مستلزم حل دقیق مدل در مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت تسویه بازار و مقایسه متوسط قیمت انتظاری مصرف کنندگان در این حالت با متوسط قیمت انتظاری مصرف کنندگان در مکانیزم حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد است.

به طور طبیعی در بازه سوم تقاضا و بکارگیری کل ظرفیت موجود در بازار، بازیگران قادر به افزایش قیمت پیشنهادی خود تا سقف قیمتی تعیین شده در بازار، بدون هراس از عدم پذیرش پیشنهاد ارائه شده خواهند بود. بنابراین در بازه سوم تقاضا، تابع پیشنهادی بازیگران در مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت تسویه کننده بازار دقیقاً معادل تابع پیشنهادی آنان در مکانیزم حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد (سقف قیمت بازار) خواهد بود. با توجه به توابع پیشنهاد بازیگران در مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت تسویه کننده بازار در تمامی بازه های تقاضا، متوسط قیمت انتظاری بازار به صورت رابطه (۱۵) خواهد بود:

(۱۵)

$$E[p_a] = E \left[b_a^*(c_i) I_{\{b_a^*(c_i) > b_a^*(c_j)\}} + b_a^*(c_j) I_{\{b_a^*(c_j) > b_a^*(c_i)\}} \right]$$

با توجه به تابع پیشنهاد یکسان، متوسط قیمت انتظاری برابر است با (رابطه (۱۶)):

(۱۶)

$$E[p_a] = 2E \left[b_a^*(c_i) I_{\{b_a^*(c_i) > b_a^*(c_j)\}} \right]$$

با توجه به اینکه تابع پیشنهاد، تابعی اکیداً صعودی از هزینه نهایی (متغیر) بازیگران است، رابطه (۱۶) به صورت رابطه (۱۷) قابل ساده سازی است:

(۱۷)

$$E [p_a] = \gamma E \left[b_a^*(c_i) I_{\{c_i > c_j\}} \right] = \gamma \int_0^{\bar{c}} \int_0^{\bar{c}} b_a^*(c) f(\tau, c) d\tau dc$$

متوسط قیمت انتظاری در حراج با قیمت یکسان و با در نظر گرفتن تابع توزیع نرمال به

صورت رابطه (۱۸) محاسبه می شود:

(۱۸)

$$E [P_d] = \frac{\gamma \alpha}{\alpha + \beta} \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} b_d^*(c) \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} \frac{e^{\left[-\frac{1}{\gamma(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{\xi - \mu_\xi}{\sigma_\xi} \right)^2 + \left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{\xi - \mu_\xi}{\sigma_\xi} \right) \left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \right) \right]}}{\gamma \pi \sigma_\xi \sigma_c \sqrt{1 - \rho^2}} d\xi dc \right. \\ \left. - \gamma \frac{2\beta_f}{\alpha + \beta} \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} b_d^*(c) \int_{\underline{c}}^c \frac{e^{\left[-\frac{1}{\gamma(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{\xi - \mu_\xi}{\sigma_\xi} \right)^2 + \left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{\xi - \mu_\xi}{\sigma_\xi} \right) \left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \right) \right]}}{\gamma \pi \sigma_\xi \sigma_c \sqrt{1 - \rho^2}} d\xi dc \right.$$

رابطه (۱۸) مبنای محاسبه متوسط قیمت تمام شده در هر کدام از بازه های مورد بررسی است.

یک تولیدکننده برای تأمین تقاضا مورد نیاز است $d \in (0, k)$

با توجه به یکسان بودن توابع پیشنهادی بازیگران در بازه نخست، متوسط قیمت انتظاری در حراج مبتنی بر قیمت تسویه کننده بازار دقیقاً معادل متوسط قیمت انتظاری در حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد خواهد بود^۱ بنابراین در این حالت متوسط قیمت انتظاری در بازه اول مورد بررسی ثابت و مستقل از تغییرات در میزان تقاضا است.

دو تولیدکننده برای تأمین تقاضا مورد نیاز است $(d \in (k, 2k))$:

با افزایش تقاضا و قرار گرفتن تقاضا در بازه $d \in (k, 2k)$ در حراج مبتنی بر قیمت تسویه کننده بازار، پیشنهاد تولیدکننده بازنده، قیمت یکسان را تعیین می کند بنابراین با $j \neq i$ ، متوسط قیمت انتظاری در حراج با قیمت یکسان برابر است با (رابطه (۱۹)):

۱- این امر به طور مستقیم از شبیه سازی عددی رابطه (۱۸) نیز قابل احصاء است.

(۱۹)

$$E[p_u] = E \left[b_u^*(c_i) I_{\{b_u^*(c_i) > b_u^*(c_j)\}} + b_u^*(c_j) I_{\{b_u^*(c_j) > b_u^*(c_i)\}} \right]$$

باتوجه به توابع پیشنهاد یکسان، متوسط قیمت انتظاری در این مکانیزم حراج برابر است با (رابطه (۲۰)):

(۲۰)

$$E[p_u] = \nu E \left[b_u^*(c_i) I_{\{b_u^*(c_i) > b_u^*(c_j)\}} \right]$$

چون تابع پیشنهاد نسبت به c اکیداً صعودی است، این عبارت را می توان به صورت رابطه (۲۱) ساده کرد:

(۲۱)

$$E[p_u] = \nu E \left[b_u^*(c_i) I_{\{c_i > c_j\}} \right] \\ = \nu \int_{\underline{c}}^{\bar{c}} \int_{\underline{c}}^c b_u^*(c) \frac{e^{-\left[\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{\tau - \mu_\tau}{\sigma_\tau} \right)^2 + \left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{\tau - \mu_\tau}{\sigma_\tau} \right) \left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \right) \right] \right]}{2\pi\sigma_\tau\sigma_c\sqrt{1-\rho^2}} d\tau dc$$

با توجه به عدم امکان حل ریاضی رابطه (۲۱) از روش حل عددی برای حل این رابطه استفاده شده است.

نتایج حاصل از محاسبات عددی در بازه دوم تقاضا ($d \in (k, 2k)$)، در جدول (۵) نمایش داده شده است. با توجه به اطلاعات جدول (۵) متوسط قیمت انتظاری - در بازه دوم مورد بررسی - تابعی فزاینده از میزان تقاضای بازار است. با توجه به استخراج متوسط قیمت انتظاری بازار از تابع پیشنهاد بازیگران و با توجه به افزایش قیمت پیشنهادی بازیگران (در هر سطح معینی از هزینه) به واسطه افزایش در سطح تقاضای بازار، متوسط قیمت انتظاری بازار متناسب با افزایش در سطح تقاضای بازار، افزایش خواهد یافت.

جدول (۵) - متوسط قیمت انتظاری در مکانیزم حراج قیمت تسویه کننده بازار $d \in (k, 2k)$

D	α	β	ضریب همبستگی	δ	$E(Pu)$
۱۱۰	۱	.۱	۰	۱	۲۶۷,۹۰۶۹
۱۲۰	۱	.۲	۰	۱	۲۶۸,۶۰۸۲
۱۳۰	۱	.۳	۰	۱	۲۶۸,۹۶۰۶
۱۴۰	۱	.۴	۰	۱	۲۶۹,۲۰۶۶
۱۵۰	۱	.۵	۰	۱	۲۶۹,۳۹۹۰
۱۶۰	۱	.۶	۰	۱	۲۶۹,۵۵۷۵
۱۷۰	۱	.۷	۰	۱	۲۶۹,۶۹۲۱
۱۸۰	۱	.۸	۰	۱	۲۶۹,۸۰۸۶
۱۹۰	۱	.۹	۰	۱	۲۶۹,۹۱۰۹
۲۰۰	۱	۱	۰	۱	۲۷۰,۰۰۱۷

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله در راستای تأثیر مکانیزم حراج انتخابی از بین حراج های متداول در بازارهای برق (حراج مبتنی بر قیمت تسویه کننده بازار و حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد) بر کارایی تولید، کارایی کل و متوسط قیمت انتظاری بازار، کل تقاضای بازار (در رابطه با ظرفیت بازار) به سه بازه مجزا تقسیم و رفتار استراتژیک بازیگران در بازه های مورد نظر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تجزیه و تحلیل های ارائه شده در چارچوب مدل، حاکی از برابری کارایی تولید در مکانیزم های حراج پرداخت بر مبنای پیشنهاد و قیمت تسویه کننده بازار است اما در مکانیزم حراج قیمت تسویه کننده بازار، متوسط قیمت انتظاری کمتر و کارایی کل بیشتر است.

در تحلیل ارائه شده، برابری کارایی تولید در مکانیزم های حراج مورد بررسی از حصول حداکثر کارایی ممکن (حداقل هزینه بهره برداری در بازار) در هر کدام از مکانیزم های حراج مورد بررسی، منتج شد. حصول حداکثر کارایی ممکن به نوبه خود از

فرض صعودی بودن تابع پیشنهاد بازیگران نسبت به هزینه نهایی (متغیر) آنان ناشی شد؛ فرضی که با استخراج توابع پیشنهاد بازیگران صحت آن مورد تأیید قرار گرفت. در چارچوب مدل ارائه شده، صعودی بودن تابع پیشنهادی بازیگران نسبت به هزینه نهایی (متغیر) آنان با توجه به تقارن در توابع پیشنهادی بازیگران، حاکی از انتخاب بازیگر با هزینه نهایی (متغیر) کمتر به عنوان برنده بازار و در نتیجه تولید برق با کمترین هزینه ممکن در هر سطح قابل تصوری از تقاضا بود.

با توجه به برابری کارایی تولید در هر کدام از مکانیزم های حراج مبتنی بر قیمت پیشنهادی و قیمت تسویه کننده بازار و همچنین وجود قدرت بازار، مقایسه کارایی کل تنها با مقایسه متوسط قیمت انتظاری تحت هر کدام از مکانیزم های مزبور امکانپذیر بود. با فرض استخراج پیروی تابع اطلاعات بازیگران از تابع توزیع نرمال نتایج حاصله حاکی از آن است که اگرچه کارایی تولید در هر کدام از مکانیزم ها معادل هم است اما مکانیزم حراج قیمت تسویه کننده بازار متوسط قیمت انتظاری کمتر و کارایی کل بیشتری را نتیجه می دهد.

نتایج حاصله از مقاله حاضر مبنی بر کمتر بودن متوسط قیمت انتظاری و بیشتر بودن کارایی کل تحت اعمال مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت تسویه کننده بازار نسبت به مکانیزم حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد است که با لحاظ تمامی محدودیت ها و نواقص مربوط به مطالعه، حاکی از برتری نسبی مکانیزم حراج مبتنی بر قیمت تسویه کننده بازار نسبت به مکانیزم حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد است. در این راستا اگرچه اظهار نظر قاطع در خصوص لزوم تغییر مکانیزم حراج مورد کاربست در بازار برق ایران (مکانیزم حراج مبتنی بر پرداخت بر مبنای پیشنهاد) نیازمند انجام بررسی ها و تحقیقات بیشتری در این زمینه است با این حال نتایج حاصله از مقاله حاضر می تواند نقطه شروع مناسبی مبنی بر ایجاد شک در رابطه با بهینگی مکانیزم حراج مورد استفاده در بازار برق ایران تلقی شود.

۶- منابع

الف) فارسی

- عبائی، محمد (۱۳۸۹)، «طراحی بازار برق روباز»، رساله کارشناسی ارشد برق، دانشگاه تهران.

ب) انگلیسی

- 1- Bower J, Bunn D W (2001), "Experimental Analysis of The Efficiency of Uniform-Price Versus" *Journal of Economic Dynamics and Control*.
- 2- Cramton, P., "Auction Design and Strategy: Principles and Practice", Market Design Inc., University of Maryland.
- 3- Fabra N, (2006), "Von Der Fehr N-H M, Harbord D C Designing Electricity Auctions", *Rand Journal of Economics*, 37(1), pp. 23-46.
- 4- Federico G., Rahman D. (2003), " Bidding in an Electricity Pay-as-Bid Auction", *Journal of Regulatory Economics*; 24:2, pp. 175-211.
- 5- Genc, Talat (2007), "Discriminatory Versus Uniform-Price Auctions With Supply Function Equilibrium", University of Guelph, December.
- 6- Hudson, R., "Analysis of Uniform and Discriminatory Price Auctions in Restructured Electricity Markets", *Energy Division Oak National Laboratory Oak Ridge, Tennessee*.
- 7- Kahn, Alfred, E. et al (2001), "Uniform Pricing or Pay-as-Bid Pricing: A Dilemma for California and Beyond", *The Electricity Journal*, pp. 70- 79 July.
- 8- Laffer, Arthur B. and Patrick N. Giordano (2005), "Exelon Rex, Will Power Deregulation in Illinois Benefit Consumers Or Utilities?" *Wall Street Journal*, Dec. 1,.
- 9- Lawrence M. Ausubel, Peter Cramton (2010), "Using Forward Markets to Improve Electricity Market Design", *Utilities Policy*, vol. 18 (2010) 195e200.
- 10- Mount, Timothy (1999), "Market Power And Price Volatility In Restructured Markets For Electricity", *IEEE Proceedings of The Hawaii International Conference on System Sciences*, Maui, Hawaii, Jan 5-8.
- 11- Peter Cramton (2004), "Competitive Bidding Behavior In Uniform-Price Auction Markets", *Proceedings of The Hawaii International Conference On System Sciences*, January.
- 12- Peter Cramton (2003), "Electricity Market Design: The Good, The Bad, And The Ugly", *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences*, January.

13- Rassenti, S., et al. (2001), “Discriminatory Price Auctions in Electricity Markets: Low Volatility at the Expense of High Price Levels”, George Mason University, October.

14- Tierney, S.F. et al. (2008), “Uniform Pricing Versus Pay-as-Bid in Wholesale Electricity Markets: Does it Make a Difference?” Analysis Group and New York Independent System Operator, March.

