تحلیل بازار انرژی برق در چارچوب رویکرد تعادل نگاشت عرضه (SFE): مطالعه موردی منطقه اصفهان

شهرام معینی[1] علیمراد شریفی[2] رحمان خوش اخلاق[3] کریم آذربایجانی[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۸/۰۵

چکیده

در پی تحولات بازار قدرت در کشورهای صنعتی، تجدید ساختار بازار انرژی برق در ایران نیز پذیرفته و عملی شده‌است. مبنای پذیرش تجدید ساختار، افزایش کارایی از طریق وارد شدن ملاحظات اقتصادی و گذار از انحصار به شرایطی رقابتی‌تر است. با توجه به ساختار بازار، در نهایت، وضعیت رقابت ناقص در این بازار محقق می‌شود و ساز و کار اصلی پرداخت بر اساس پیشنهاد (PAB) در بازار انرژی برق ایران، برقرار شده‌است. یکی از مدل‌های مناسب برای تحلیل بازار برق، مدل‌های تعادل نگاشت عرضه(SFE) است. بر این اساس در این مطالعه، بنگاه‌های منتخب در بازار برق منطقه اصفهان پس از براورد تابع هزینه نهایی و شاخص‌های عدم قطعیت تقاضا در چارچوب رهیافت SFE به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده‌است. نتایج این مطالعه و استخراج نگاشت عرضه تعادلی، نشان می‌دهد که نگاشت عرضه پیشنهادی کنونی با نگاشت عرضه تعادلی نظری، منطبق نبوده و دارای تفاوت قابل ملاحظه‌ای است.

واژگان کلیدی: تجدید ساختار، نظریه بازی، رویکردSFE ، پرداخت بر اساس پیشنهاد، بازار برق ایران.

JEL: *C70 ،D21 ،D40 ،L13 ،Q41*

---

۱. دانشجوی دکتری اقتصاد دانشگاه اصفهان (نویسنده مسئول)، Email: sh.moeeni@ase.ui.ac.ir

۲. دانشیار اقتصاد دانشگاه اصفهان، Email:alimorad@ase.ui.ac.ir

۳. استاد اقتصاد دانشگاه اصفهان، Email: rahmankh44@yahoo.com.

۴. دانشیار اقتصاد دانشگاه اصفهان، Email:azarbaiejani@yahoo.co.in.

۱. مقدمه

صنعت برق در ایران و جهان طی دهه‌های متوالی حالت انحصار کامل داشت و مصرف‌کنندگان برق، برای خرید انرژی الکتریکی ملزم به خرید از شرکت تولیدکننده برق[1] بودند که در منطقه آنها انحصار عرضه برق را در اختیار خود داشت. این شرکت‌های برق، عمدتاً ساختار یکپارچه عمودی[2] داشتند. در این ساختار، این شرکت‌ها همزمان با تولید انرژی الکتریکی، انتقال آن از نیروگاه‌ها به مراکز بار و توزیع انرژی بین متقاضیان را بر عهده داشتند. با این وجود در دهه ۱۹۸۰ تعدادی از اقتصاددانان موضوع به پایان رسیدن دوره این الگو را مطرح کردند. این محققان بر آن بودند که وضعیت انحصاری شرکت‌های برق باعث انجام سرمایه‌گذاری‌های غیرضروری، کاهش انگیزه بهره‌برداری موثر و به طور کلی عملکرد غیر اقتصادی و نابهینه در تولید و توزیع انرژی الکتریکی می‌شود. این شرکت‌ها به‌راحتی هزینه اشتباه‌ها و ناکارایی خود را بر مردم و مصرف‌کنندگان انرژی تحمیل می‌کنند. وابستگی اغلب این شرکت‌ها به دولت‌ها و قیمت‌های دستوری نیز به نوبه خود منشا برخی از مشکلات و ناکارایی‌هاست. به‌عنوان نمونه برخی از شرکت‌های برق ملی و دولتی درامد سرشاری به واسطه وضعیت انحصاری خود دارند، در حالی که برخی دیگر از شرکت‌ها نمی‌توانند نرخ خود را در حدی تنظیم نمایند که هزینه‌های خود را پوشش داده به توان لازم برای سرمایه‌گذاری‌های زیربنایی جدید دست یابند.

این اقتصاددانان پیشنهاد می‌کردند که برق به جای عرضه با مقررات انحصاری یا طبق سیاست‌های دولتی به صورت کالایی طبق قواعد بازار ارائه گردد که نتیجه آن دستیابی به وضع بهینه پرتو[3] و افزایش منفعت کلی خواهد بود. این رویکرد از اواخر دهه هفتاد، منشا فرایند مقررات‌زدایی[4] کلی در اقتصادهای غربی شده بود. قبل از صنعت برق، این رویکرد خطوط هوایی، حمل و نقل و ... را متحول کرده بود. در تمام این بخش‌ها، تصور می‌شد که بازار مقرراتی یا انحصاری، مؤثرترین راه عرضه کالا یا خدمات به مشتریان است. احساس می‌شد که مشخصات خاص این محصولات آنها را برای تجارت در بازارهای آزاد[5]، نامناسب

1. Utility
2. Vertically Integrated
3. Pareto Optimality
4. Deregulation
5. Free Markets

می‌سازد؛ اما طرفداران مقررات‌زدایی ادعا می‌کردند که مشخصات خاص این محصولات، موانعی غیر قابل عبور برای عرضه آزاد و رقابتی نیستند (کرشن و استربک، ۲۰۰۴).

در دهه‌های اخیر در سراسر جهان صنایعی نظیر برق، گاز و مخابرات دچار تغییرات ساختاری در جهت مقررات‌زدایی و خصوصی‌سازی بوده‌اند. چنان که تجربیات در اقتصادهای غربی نشان می‌دهد، تجدید ساختار در نظر گرفته شده برای این صنایع، رقابت در تولید و عرضه را تشویق نموده و در نهایت منجر به صرفه‌جویی و کاهش هزینه‌ها و قیمت محصول و خدمات و نزدیک شدن به کارایی گردد. در حالیکه به طور کلی فرایند تولید و مصرف انرژی برق را می‌توان به سه مرحله تولید، انتقال و توزیع تقسیم نمود و در شرایطی که انتقال، ماهیت انحصار طبیعی دارد، تولید و توزیع انرژی الکتریکی بطور بالقوه می‌تواند به سوی رقابتی‌تر شدن حرکت کند و فناوری اجازه می‌دهد که در بازار بیش از یک بنگاه وجود داشته باشد. از سوی دیگر و علاوه بر مبانی نظری، تجربه کشورهای پیشرو در تجدید ساختار بازار برق، نیز مفید بودن رقابت در تولید و توزیع را نشان می‌دهد. در این مورد، می‌توان به تجربه بازار برق انگلیس از سال ۱۹۸۹ ، بازار برق اسپانیا از ۱۹۹۸ و بازار Nord Pool در منطقه اسکاندیناوی و ... اشاره کرد (قاضی‌زاده، ۱۳۸۸).

در هر حال با گسترش دانش اقتصادی در زمینه عملکرد بازار و فراگیری پارادایم مبتنی بر اهمیت اتکا به ساز و کار بازار در جهت بهبود و تقویت عملکرد اقتصادی در تمام بخش‌ها و زمینه‌ها، دهه‌های اخیر شاهد ایجاد تغییرات اساسی در ساختارها وسیستم‌های قدرت[1] در کشورهای صنعتی جهان در جهت بازاری سازی فعالیت‌ها بوده‌است. این تغییرات اساسی که تحت فرآیندی به نام تجدید ساختار صورت می‌پذیرد، اصطلاحاً به معنای تغییرات وسیع در قوانین و ساختارهای بازار و حرکت به سمت ساختارهای نوین بازارگراست. هدف از تجدید ساختار در صنعت انرژی برق، ایجاد بهره‌وری بالاتر، رسیدن به سطح پایین قیمت و ارائه خدمات بهتر به مصرف‌کننده از طرقی نظیر تقویت رقابت عنوان شده‌است. اگرچه در متون معمولاً سه هدف کارایی اقتصادی[2]، برابری[3] و آزادی انتخاب برای مصرف‌کننده[4]، دلایل حرکت

1. Power
2. Economic Efficiency
3. Equity
4. Customer Freedom of Choice

سیاست‌گذاران به سمت تجدید ساختار در بازارهای برق انگاشته می‌شود(شووپ، ۱۹۸۸)، آشکار است که از منظر اقتصادی، هدف غایی نزدیکی بیشتر به ساز و کار بازار و رقابتی شدن، دستیابی یا نزدیک شدن به کارایی پارتو[1] خواهد بود.

اگر برق واقعا یک کالا قلمداد شود، کیلووات ساعت نیز نظیر هر کالای دیگر باید در لحظه‌ای که مصرف‌کننده آن به‌عنوان کالای مصرفی یا نهاده تولید اراده می‌کند، آماده برای استفاده باشد. اما به‌رغم پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های ذخیره انرژی الکتریکی و تولید خرد[2]، این امر به صورت تجاری، عملی و محقق نشده‌است و عرضه مداوم و مطمئن مقادیر زیاد انرژی الکتریکی، نیازمند نیروگاه‌های بزرگ و اتصال آنها به مصرف‌کننده از طریق شبکه‌های انتقال و توزیع است. در عمل شرایط بهینه ایجاب می‌کند که این انرژی، به میزانی که مصرف می‌شود، در همان لحظه هم تولید شود.

بر این اساس نخستین تفاوت بین انرژی الکتریکی و کالاهای دیگر، این است که معامله انرژی الکتریکی همواره به مقدار معینی کیلووات ساعت که باید طی بازه مشخصی از زمان، به طور همزمان تولید، تحویل و مصرف شود، اطلاق می‌گردد. به عبارت دیگر انرژی الکتریکی به طور جدایی‌ناپذیری با سیستمی فیزیکی(شبکه برق) ممزوج شده‌است که رفتار آن از هر بازاری، بسیار سریع‌تر است. در سیستم فیزیکی قدرت، به ویژه برای کاهش تلفات، مناسب است عرضه و تقاضا یا تولید، در توازن باشند. اگر این تعادل، برقرار نشود، سیستم دچار مشکلاتی اعم از افت ولتاژ، افزایش تلفات شبکه و ... خواهد شد. در این حال، گاهی فقط یک مبادله منتفی نمی‌شود، بلکه احتمال قطع وسیع انرژی الکتریکی همراه با پیامدهای اقتصادی و اجتماعی شدیداً زیانبار هم وجود خواهد داشت. هیچ اقتصادی نمی‌تواند با ساز و کارهای بازاری موافقت کند که احتمال وقوع چنین وقایعی را در پی نبود تعادل‌های هرچند کوتاه‌مدت، محتمل می‌سازد. به علاوه بازیافت[3] سیستم قدرت در پی این مشکلات، فرایندی پیچیده، پرهزینه و زمان‌بر است. بنابراین توازن عرضه و تقاضای انرژی الکتریکی در کوتاه مدت، فرایندی است که نمی‌توان به سادگی و به طور کامل آن را در اختیار نهادی به نسبت کند و غیر قابل اعتماد چون بازار، رها ساخت. انجام توازن در کوتاه مدت، در هر

1. Pareto Efficiency
2. Microgeneration
3. Restoring

هزینه عملی ممکن، از طریق راهکاری که صرفا به بازار در انتخاب و توزیع بار[1] اتکا نکند، الزامی است.

اکنون در سرتاسر جهان، صنعت برق در حال حرکت به سمت بازارهای رقابتی‌تر و فرایند تجدید ساختار است. صنعت برق در ایران نیز در حال گذار از یک ساختار انحصاری به بازارهای رقابتی‌تر و یک ساختار جدید می‌باشد. با نگاهی به گذشته مشاهده می‌شود که نخستین واحدهای تولید انرژی برق در ایران را بخش خصوصی پایه‌گذاری کرده است؛ اما به تدریج نقش دولت در آن تقویت شد، به صورتی که از حدود دهه ۱۹۷۰ اداره کامل آن را دولت بر عهده گرفت. با این حال، طی نه سال اخیر بازار برق ایران نیز بر اساس مصوبات دولت در جهت تجدید ساختار مبتنی بر نظام بازار، حرکت‌هایی داشته‌است، به نحوی که در این ساختار جدید، تولیدکنندگان برای فروش انرژی به رقابت با یکدیگر در چارچوب‌های معین می‌پردازند. هیئت تنظیم بازار، مدیر بازار و مرکز راهبری و پایش شبکه سراسری (دیسپاچینگ) نهادهای مصوب برای سازمان‌دهی عملکرد بازار انرژی برق در ایران در جهت حصول قابلیت اطمینان توام با نزدیک شدن به بهینگی هستند.

مناقصه در بازار انرژی برق ایران یک‌طرفه و الگوی بازار، بازار عمده‌فروشی بر اساس مدل حوضچه توان[2] است. تولیدکنندگان در بازار انرژی برق ایران، تابع پیشنهادی خود را به مدیر بازار (بهره‌بردار سیستم) ارائه می‌کنند. در سوی دیگر نیز تقاضایی توأم با عدم قطعیت قرار دارد و پس از مشخص شدن مقدار انرژی تولیدی کل و مقدار انرژی تولیدی هر بنگاه، پرداخت به تولیدکنندگان بر اساس قیمت پیشنهادی خود آنها و در چارچوب نگاشت عرضه و نه قیمت تعادلی یکنواخت می‌باشد. در روش حراج یکنواخت[3] - که در برخی دیگر از بازارهای انرژی برق در کشورهای دیگر هم به کار می‌رود- پرداخت به صورت یکنواخت و مبتنی بر قیمت تعادلی مذکور است. این مقاله درصدد آن است تا با استخراج نگاشت عرضه نظری ناشی از مدل SFE و ملاحظه نگاشت عرضه تحقق‌یافته در بازار برق برای بنگاه‌های منتخب، انطباق یا انطباق نداشتن آنها را نشان دهد.

1. Dispatch
2. Power Pool
3. Unique Pay Auction

در ادامه این مقاله پس از مروری بر مبانی نظری و پیشینه در قسمت دوم، در قسمت سوم تبیین مدل صورت می‌گیرد. در قسمت چهارم تخمین و نتایج آورده شده و در قسمت پنجم نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه

با توجه به این تفاوت‌ها و برخی از ممیزات دیگر، شکل‌گیری بازار و رقابت در صنعت برق باعث شده تا تغییرات قابل توجهی در عملکرد آن ایجاد شود و طبعاً مسائل جدیدی نیز مطرح گشته‌است؛ از مهم‌ترین این تغییرات موضوع قیمت‌گذاری است که ساختار آن به صورت بنیادی دچار تحول شده‌است. بر این اساس روش حراج[1]، اهمیت ویژه‌ای می‌یابد.

بازارهای برق تجدید ساختاریافته در جهان و نیز در ایران، در بستر ساختار بازار مبتنی بر بنگاه‌های کمابیش محدود و برای دو هدف تامین قابلیت اطمینان[2] از یک‌سو و تضمین حفظ بهینگی انتخاب نگاشت عرضه بنگاه‌ها (عامل‌ها) در شرایط قطعیت نداشتن تقاضا از سوی دیگر، فعالیت می‌کنند و معمولاً از بنگاه‌های برق می‌خواهند که انتخاب خود را برای عرضه برق در قالب نگاشت عرضه یعنی مجموعه‌ای (فهرستی) از قیمت- مقدارهای پیشنهادی به مدیر بازار ارائه نمایند. به عبارت دیگر هر بنگاه، مقادیر ممکن عرضه خود را به همراه قیمت پیشنهادی برای هر مقدار، در قالب تابعی با عنوان نگاشت عرضه پیشنهادی - به مدیر بازار اعلام می‌کند. در واقع در ایران بنگاه‌ها می‌توانند فهرست قیمت- مقدار خود را در قالب ده پله قیمتی ارائه نمایند، آنگاه مدیر بازار، مقدار عرضه هر بنگاه را بر اساس حداقل قیمت پیشنهادی- که صرفه متقاضیان را تامین می‌کند- انتخاب می‌کند. روش حراج نیز پرداخت بر مبنای پیشنهاد[3] یا پرداخت یکنواخت[4] (در ایران پرداخت بر مبنای پیشنهاد) است.

تجدید ساختار و رقابت ایجاد شده با توجه به انتخاب سیستم پیشنهاد نگاشت عرضه و پرداخت بر اساس پیشنهاد و تولیدکنندگان محدود در بازارهای برق من‌جمله بازار برق ایران، به نحوی است که طبعاً تصمیمات هر بنگاه بر روی تصمیم‌گیری رقبای او تأثیر خواهد گذاشت و انتخاب راهبرد هر بنگاه

1. Auction Approach
2. Reliability
3. Pay as Bid
4. Unique

می‌بایست مبتنی بر نظریه‌بازی بوده، با در نظر گرفتن قطعیت نداشتن تقاضا بر اساس حداکثرسازی سود انتظاری باشد. البته باید توجه داشت که مدل SFE- که در ادامه تبیین می‌شود- لزوماً پیش فرضی در خصوص تعداد و اندازه بنگاه‌ها را در نظر نگرفته و تحمیل نکرده‌است و حتی در شرایطی نزدیک به رقابت کامل نیز کماکان برقرار بوده و برای استخراج نگاشت عرضه بنگاه‌ها قابل استفاده است.

راه‌حل نگاشت عرضه، نسبت به راه‌حل‌هایی مانند برتراند و کورنو به ویژه از نظر قابلیت اطمینان شبکه در شرایط قطعیت نداشتن، مناسب‌ترشناخته شده‌است (کلمپرر و میر، ۱۹۸۹). در هر صورت فضای راهبردی یا فضای انتخاب برای عرضه‌کنندگان در بازار برق ایران، ارائه نگاشت عرضه‌است. در این چارچوب سطحی از رقابت بین بنگاه‌ها ایجاد می‌شود که طبعاً به جهت‌گیری قوی‌تر تولید و بنگاه‌ها برای کارایی و تخصیص بهینه در کل اقتصاد کمک می‌کند، بر این اساس از آنجا که در بازار برق، هر بنگاه بایستی هم میزان عرضه و هم قیمت متناظر با هر مقدار عرضه پیشنهادی خود را به بازار ارائه دهد و در مدل مبتنی بر تعادل نگاشت عرضه[1] نیز هر یک از رقبا باید میزان عرضه و قیمت خود را به طور هم‌زمان بهینه کنند، چارچوب مدل تعادل نگاشت عرضه، با بازار انرژی برق تناسب دارد و لذا در این پژوهش برای محاسبه تعادل از این مدل پایه‌ای، استفاده می‌شود.

با توجه به این ساختار، در این مطالعه کوشش می‌شود که ابتدا با در نظر گرفتن مطالعات نظری قبلی و مدل‌های موجود به ویژه مطالعه هولمبری(۲۰۰۹) از یک‌سو و ویژگی‌های بازار انرژی برق ایران، مناسب‌ترین مدل، انتخاب و بر اساس آن نگاشت عرضه بهینه بنگاه مورد تحلیل در این مطالعه در منطقه اصفهان (نیروگاه جنوب اصفهان و شهید منتظری) استخراج شود. چنانکه در ادامه نشان داده خواهد شد، مسئله بهینه‌سازی بنگاه تولیدکننده برق به صورت یک مسئله حداکثر سازی سود انتظاری نوشته خواهد شد و تقاضا نیز توام با قطعیت نداشتن در نظر گرفته می‌شود. فرایند تحلیل، در نهایت به معادلات دیفرانسیلی منجر می‌شوند که با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب، نگاشت عرضه بهینه بنگاه و ترکیب نگاشت‌های عرضه تعادلی را به‌عنوان تعادل یا تعادل نش به دست می‌دهند. استخراج فرم صریح نگاشت عرضه، نیازمند شناخت ساختار هزینه نهایی از یک‌سو و نااطمینانی تقاضا از سوی دیگر است، بنابراین براوردهای لازم در

1. Supply Function Equilibrium (SFE)

این مورد در خصوص بنگاه منتخب از بازار انرژی برق در ایران، صورت می‌گیرد و در نهایت تطابق یا تطابق نداشتن نگاشت عرضه بهینه استخراج‌شده با توابع عرضه پیشنهادی اکنون تحقق‌یافته در بازار انرژی برق تحلیل خواهد شد.

۳. پیشینه پژوهش

مطالعات گسترده‌ای به‌ویژه در سال‌های اخیر در مورد ساختار بازار انرژی برق صورت گرفته‌است. گارسیا[1] و آربلیز[2] (۲۰۰۲)، در مقاله‌ای تحت عنوان "تحلیل قدرت بازار برای بازار برق کلمبیا" شبیه‌سازی‌هایی برای بازار برق کلمبیا انجام داده‌اند. آنها از یک مدل کورنوی پویا استفاده کرده‌اند تا اثرات احتمالی ادغام شدن را در بازار عمده‌فروشی برق این کشور نشان دهند. این شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌است که سطح قیمت‌ها بعد از ادغام شدن[3] به‌طور متوسط ۲۴ درصد بیشتر از قبل آن[4] خواهد بود. در این مطالعه همچنین نشان داده می‌شود که با افزودن تعداد زیادی از قراردادهای پیش‌بینی‌شده به مدل، نه تنها قیمت‌ها افزایش پیدا نخواهد کرد، بلکه حتی در برخی از موارد کاهش خواهند یافت.

اندرسن و فیلپوت (۲۰۰۲) در مقاله‌ای تحت عنوان " کاربرد نگاشت عرضه برای پیشنهاد تولید در بازار برق" به مسئله‌ای که تولیدکننده انرژی به‌واسطه عرضه تولیدش در یک بازار عمده‌فروشی برق با آن روبه‌رو است، پرداخته‌اند. قیمت هر تصفیه‌کننده بازار بوسیله حراج با پیشنهادهای سربسته تعیین می‌شود. تقاضای بازار و رفتار بازیگران توام با نااطمینانی در نظر گرفته می‌شود و مدل‌سازی مبتنی بر تصریح مسئله بهینه‌سازی تولیدکننده‌هاست. در این مقاله، آنها از رهیافت جدیدی برای ارائه نااطمینانی استفاده می‌کنند و از این رو سهم قابل توجهی از این مطالعه مرتبط با تابع توزیع بازار، $\psi(q,p)$، است. این تابع، احتمالی را بیان می‌کند که نقطه(q,p) در فضای قیمت و مقدار بالای تقاضای باقی‌مانده قرار گیرد. فرض می‌شود که $\psi(q,p)$ پیوسته باشد و ثابت می‌شود که یکنواست. بخش دوم مقاله به توسعه دادن شرایط لازم برای بهینه‌سازی سود انتظاری $V(s)=\int_s R(q,p)d\psi(q,p)$ می‌پردازد. مسئله تولیدکننده این است که به

1.Garcia
2. Arbelaez
3. Post-merger
4. Pre-merger

ازای توزیع بازار داده‌شده، منحنیs، یعنی نگاشت عرضه‌ای را بیابد که سود انتظاری اش V(s) را حداکثر کند. از این طریق نگاشت عرضه بهینه نیز استخراج می‌شود.

اندرسن و زو (۲۰۰۲) نیز در مطالعه‌ای تحت عنوان "شرایط لازم و کافی پیشنهادها در بازار انرژی برق" به تحلیل نظری تابع عرضه بهینه یک تامین‌کننده انرژی در یک بازار عمده‌فروشی انرژی برق در چارچوب مدل حوضچه می‌پردازند. تقاضای بازار توام با قطعیت نداشتن و منحنی عرضه غیر نزولی و پیوسته در نظر گرفته می‌شود. وجود سقف قیمت مفروض است. هر بنگاه، تابع توزیع تقاضای باقی‌مانده بازار برای عرضه خود را به‌وسیله آگاهی از توزیع احتمال تقاضا و مشاهدات قبلی از رفتار عرضه رقبا استخراج می‌کند. در نهایت بر این مبنا و در چارچوب حداکثرسازی سود انتظاری، شرط لازم برای استخراج تابع عرضه بهینه و شرط لازم وجود بهینه محلی به دست می‌آید.

فدریکو و رحمان (۲۰۰۳) در مقاله‌ای تحت عنوان "پیشنهاددهی در بازار برق با پرداخت مبتنی بر پیشنهاد" انگیزه اصلی خود را از نگارش این مقاله، اصلاح قوانین مبادله در انگلستان و ولز بیان می‌کنند. در این بازار قیمت‌گذاری از "حراج با قیمت یکنواخت" به "حراج پرداخت بر اساس پیشنهاد" تغییر داده شده‌است، لذا در این مسیر، حراج UPA با حراج PABA در شرایط رقابت کامل و انحصاری مطالعه می‌شود. در پایان نویسندگان نتیجه می‌گیرند که‌استفاده از حراج PABA به افزایش مازاد مصرف‌کننده و کاهش سطح تولید هم در حالت رقابت کامل و هم در شرایط انحصاری، منجر می‌گردد.

نیو[1] (۲۰۰۵) در مقاله‌ای تحت عنوان "استراتژی‌های پیشنهاد تعادل تابع عرضه با پیمان‌های آتی[2] ثابت" به مطالعه بازارهای برق تجدید ساختاریافته می‌پردازد. وی در ابتدای مقاله، یادآور می‌شود که در طول ۱۵ سال گذشته، در بسیاری از کشورها چارچوب تنظیمی بازار انرژی برق با رقابت جایگزین شده‌است. در چنین محیطی بنگاه‌های برق از طریق پیشنهاددهی در بازار لحظه‌ای برق و قراردادهای دوطرفه به رقابت با یکدیگر می‌پردازند. در این مقاله، مدل تعادل تابع عرضه در شرایط نامتقارن برای بازارهای برق تجدید ساختاریافته پیشنهاد شده، تحلیل می‌شود، در حالی‌که توابع عرضه، خطی در نظر گرفته شده‌است.

1. Niu
2. Forward Contracts

محدودیت‌های انتقال و وجود پیمان‌های آتی نیز به مدل اضافه شده‌است و در نهایت مدل پیشنهادی برای بازار برق ERCOT اجرا شده و اثر قراردادها روی بازار ERCOT ارزیابی می‌گردد.

اورن[1] و سیوشانسی[2] (۲۰۰۶)، در مقاله‌ای تحت عنوان "بررسی کارایی مدل‌های تعادل تابع عرضه: تحلیل تجربی بازار برق ERCOT"[3] تحلیلی تجربی از مدل تعادل تابع عرضه در بازار برق لحظه‌ای تگزاس ارائه دادند. ابتدا بازاری با قراردادهای فروش دوجانبه از قبل طراحی‌شده را در نظر گرفته‌اند و سپس شرایط لازم برای ارائه پیشنهادهای بهینه از سوی تولیدکنندگان به دست آمده‌است. سرانجام با تخمین هزینه‌ها، مجموعه‌ای از توابع عرضه بهینه ازقبل طراحی‌شده[4] و تحقق‌یافته استخراج و با استفاده از یک مدل رفتاری غیر پارامتریک، مقایسه‌ای بین توابع عرضه بهینه نظری با پیشنهادهای واقعی انجام شده‌است.

هولمبری[5] (۲۰۰۶)، در مقاله‌ای تحت عنوان "تعادل تابع عرضه یکنوا با محدودیت‌های ظرفیت" یک بازار برق را در شرایط حراج قیمت یکنوا[6] و نااطمینانی تقاضا در نظرگرفته‌است. در این بازار، تولیدکنندگان پیشنهادهای خود را به صورت تابع عرضه ارائه می‌کنند. در حالت تعادل، هر بنگاه با در نظر گرفتن توابع عرضه رقبایش، تابع عرضه‌ای را ارائه می‌دهد که سود مورد انتظارش را حداکثر کند. هولمبری در این مقاله نشان می‌دهد که در این بازار تعادل‌های متعدد، امکان‌پذیر است که با در نظر گرفتن فرض‌هایی می‌توان یکتایی و تقارن تعادل نگاشت عرضه را نتیجه گرفت.

بالاخره در مورد مطالعات مرتبط با بازار برق ایران می‌توان به مطالعات انجام شده در خصوص قدرت بازار اشاره کرد. عسگری و منصف (۲۰۱۰) در مقاله‌ای تحت عنوان "تحلیل قدرت بازار برای بازار برق ایران" از دو شاخص تمرکز بازار و شاخص هریشمن- هرفیندال، مبتنی بر دو سناریو استفاده می‌کنند. در سناریوی اول، وضع جاری بازار برق مدنظر قرار دارد و در سناریوی دوم به، چشم‌انداز آینده بازار برق ایران مبتنی بر استقلال تولیدکنندگان در بازار، مورد توجه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد به دلیل کمیابی

1. Oren
2. Sioshansi
3. Electricity Reliability Council of Texas
4. Ex ante
5. Holmberg
6. Uniform Price

در سمت عرضه بازار، تولیدکنندگان به‌ویژه در زمان پرباری، به‌رغم سهم بازار بعضاً کمی که دارند، از رفتار رقابتی منحرف و قدرت بازار را اعمال می‌کنند، همچنین ناظمی اشنی(۱۳۹۰)، در پایان‌نامه دکتری خود به مطالعه سطح رقابت در بازار برق ایران با استفاده از داده‌های پیک در شش‌ماهه نخست سال ۱۳۸۸ می‌پردازد که این پژوهش نیز در نهایت، رفتار راهبردی بازیگران در بازار برق ایران در پیشنهاددهی را تایید می‌کند. در نهایت می‌توان به مقاله خوش‌اخلاق و دیگران (۱۳۹۰) تحت عنوان "تعیین مبنای معاملات در بازار لحظه‌ای برق، مطالعه موردی بازار برق اصفهان" اشاره کرد که می‌کوشد تا با ارائه مدلی برای بازار تجدید ساختاریافته لحظه‌ای، به محاسبه مبنایی برای معاملات بر اساس برنامه‌ریزی ریاضی و حداقل‌سازی هزینه در حالت تقاضای متغیر بپردازد.

جدول ۱. دسته‌بندی کلی مطالعات

فضای پیشنهاددهی	مقاله	تفاوت ها
کورنو	گارسیا و آربلیز(۲۰۰۲)	
نگاشت عرضه توام با پرداخت یکنوا و عدم قطعیت	اندرسن و فیلپوت(۲۰۰۲)، اندرسن و زو(۲۰۰۲)، نیو(۲۰۰۵)، اورن و سیوشانسی(۲۰۰۶)، هولمبری(۲۰۰۶)	در مقاله اندرسن و زو وجود سقف قیمت و در مقاله نیو و مقاله اورن و شیوسانسی قراردادهای دوجانبه لحاظ‌شده‌است در مقاله هولمبری شرایط تعدد و یکتایی تعادل تحلیل شده‌است.
نگاشت عرضه توام با پرداخت مبتنی بر پیشنهاد و عدم قطعیت	فدریکو و رحمان(۲۰۰۳)، هولمبری(۲۰۰۹)	فدریکو و رحمان حالت رقابت کامل و انحصار و مقاله هولمبری، حالت رقابت چند بنگاهی متقارن را در نظر می‌گیرد.

منبع: یافته‌های تحقیق.

دسته‌بندی کارهای انجام‌شده، در جدول(۱) ارائه شده‌است. چنانکه مشاهده خواهد شد در این مطالعه از مدل هولمبری (۲۰۰۹) استفاده می‌شود. هولمبری پس از بسط مدل، در نهایت بازار را چند بنگاهی هم‌اندازه فرض می‌کند، اما در اینجا برای تناسب با بازار برق ایران، پیشاپیش، فرضی در مورد اندازه بنگاه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود یا به عبارت دیگر، لزوماً حالت بنگاه‌های کاملاً هم‌اندازه مد نظر نیست؛ بنابراین مدل هولمبری (۲۰۰۹)، به صورت بدون پیش‌فرض در خصوص ظرفیت‌ها، استفاده می‌شود. علاوه بر

فروض تصریح‌شده، محدودیت اصلی این مدل‌ها، صرف نظر نمودن از قیود انتقال، به خاطر ساده‌سازی است.

۴. مدل تعادل نگاشت عرضه پیشنهادی در حالت قطعیت نداشتن تقاضا

در این قسمت از مطالعه کوشش می‌شود تا به طور خلاصه مدل منتخب در این پژوهش تبیین شود. برای درک رفتار بهینه در چارچوب تعادل نگاشت عرضه و تحت قطعیت نداشتن تقاضا، مسئله بهینه‌سازی بنگاه‌ها در این حالت در چارچوب یک مدل پایه‌ای مبتنی بر مقاله هولمبری (۲۰۰۹) در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه، در نهایت متناسب با بازار برق ایران، پیش‌فرض هم‌اندازه بودن بنگاه‌های بازار، کنار گذاشته می‌شود که به نوعی یک حالت خاص از مدل هولمبری است، مراحل استخراج در ادامه آورده شده‌است. این اصلاح، تنها تفاوت بین این مقاله و کار هولمبری است و کار تجربی، بر پایه مدل در حالت خاص بنگاه‌های ناهم‌ظرفیت انجام می‌شود. ابتدا فروض و مفهوم علائم و متغیرهای موجود در مدل ارائه می گردد.

مقدار تقاضای بازار با ε نشان داده می‌شود که مقدار آن معلوم و قطعی نبوده، اما احتمال رخداد هر مقدار آن با یک تابع چگالی احتمال نشان داده می‌شود. عرضه کل پیشنهادی مجموع تمام بنگاه‌ها برابر با ε^* است. برای تولیدکننده i ، تعادل نگاشت عرضه با $s_i(p)$ نشان داده می‌شود که p، نشان‌دهنده قیمت است. معکوس این نگاشت عرضه با $p_i(s_i)$ نشان داده می‌شود. $s_{-i}(p)$ و $s(p)$، نیز به ترتیب، برای نمایش دادن نگاشت عرضه رقیب و نگاشت عرضه کل در بازار به کاربرده می‌شوند. هر بنگاه با ارائه نگاشت عرضه بهینه، سود انتظاری را که با π_i نشان داده می‌شود، حداکثر می‌نماید. اگر تقاضای بازار $\varepsilon \leq \varepsilon^*$ باشد، در این مقدار تقاضا، محصول پذیرفته‌شده بنگاه i، $\varepsilon - s_{-i}(p(\varepsilon))$ است. سود پیشنهاد پذیرفته‌شده از یک واحد دیفرانسیلی عرضه، مقدار $(p_i(s_i) - C'(s_i))ds_i$ است. بنابراین سود بنگاه برای مقدار تقاضای ε تحقق‌یافته در بازار، به‌وسیله جمع سود هر واحد تا رسیدن به مقدار محصول پذیرفته‌شده از بنگاه i محاسبه می‌شود. با توجه به واحدهای خیلی کوچک تولید، جمع فوق به انتگرال زیر تبدیل می‌شود:

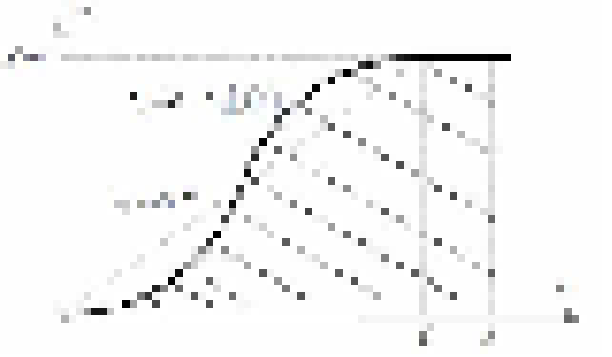
$$\pi_i(\varepsilon) = \int_{\cdot}^{\varepsilon - s_{-i}(p(\varepsilon))} [p_i(s_i) - C'(s_i)]ds_i \quad \text{if } \varepsilon \leq \varepsilon^* \qquad (۱)$$

بنگاه در نظر دارد تا سود انتظاری‌اش را حداکثر نماید. سود مورد انتظار بنگاه i ، با انتگرال‌گیری روی تقاضا با توجه به احتمال تحقق هر مقدار تقاضا، محاسبه می‌شود. بنابراین نتیجه می‌شود که:

$$E(\pi_i) = \int_{.}^{\varepsilon^*} f(\varepsilon) \int_{.}^{\varepsilon - s_i(p(\varepsilon))} [p_i(s_i) - C'(s_i)]\, ds_i\, d\varepsilon \qquad (۲)$$

در حالت تقارن بنگاه‌ها، ظرفیت و نگاشت عرضه همه آنها یکسان است (هولمبری، ۲۰۰۹). همچنین در صورت عدم نامتقارن‌بودن اندازه بنگاه‌ها و فرض متناسب بودن نگاشت عرضه هر بنگاه با ظرفیت‌اش، نگاشت عرضه هر بنگاه با نسبت ظرفیت بنگاه به ظرفیت کل که با $1/N$ ، نشان داده می‌شود، در ارتباط است. حال اگر تقاضا بیشتر از عرضه بازار باشد، در این صورت خواهیم داشت:

$$E(\pi_i) = \int_{.}^{\varepsilon^*} f(\varepsilon) \int_{.}^{\varepsilon - s_i(p(\varepsilon))} [p_i(s_i) - C'(s_i)]\, ds_i\, d\varepsilon + \int_{\varepsilon^*}^{\bar{\varepsilon}} f(\varepsilon) \int_{.}^{\varepsilon^*/N} [p_i(s_i) - C'(s_i)]\, ds_i\, d\varepsilon \qquad (۳)$$



نمودار ۱. دامنه انتگرال‌گیری برای محاسبه سود انتظاری

منبع: هولمبری (۲۰۰۹)

نمودار (۱) برای واضح نمودن دامنه انتگرال‌گیری نمایش داده شده‌است. جمله دوم عبارت فوق نشان می‌دهد که تقاضا بیشتر از عرضه کل پیشنهادی بنگاه‌هاست، که در این صورت مقدار عرضه پذیرفته شده بنگاه i ، ε^*/N است.

حال با تغییر ترتیب انتگرال گیری، عبارت فوق به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$E\{\pi_i[p_i(s_i)]\} = \int_{\cdot}^{\frac{\varepsilon^*}{N}} [p_i(s_i) - C'(s_i)] \int_{s_i+s_{-i}[p_i(s_i)]}^{\varepsilon^*} f(\varepsilon)d\varepsilon\, ds_i$$

$$+ \int_{\cdot}^{\frac{\varepsilon^*}{N}} [p_i(s_i) - C'(s_i)] \int_{\varepsilon^*}^{\hat{\varepsilon}} f(\varepsilon)d\varepsilon\, ds_i$$

$$= \int_{\cdot}^{\frac{\varepsilon^*}{N}} [p_i(s_i) - C'(s_i)] \int_{s_i+s_{-i}[p_i(s_i)]}^{\hat{\varepsilon}} f(\varepsilon)d\varepsilon\, ds_i$$

و در نهایت می‌توان نوشت:

$$E\{\pi_i[p_i(s_i)]\} = \int_{\cdot}^{\frac{\varepsilon^*}{N}} [p_i(s_i) - C'(s_i)][1 - F(s_i + s_{-i}[p_i(s_i)])]ds_i \quad (۴)$$

که در آن عبارت داخل انتگرال، $\varphi_i[s_i, p_i(s_i)]$، به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\varphi_i[s_i, p_i(s_i)] = [p_i(s_i) - C'(s_i)][1 - F(s_i + s_{-i}[p_i(s_i)])]$$

نتیجه مذکور را می‌توان به این صورت تفسیر نمود که سود انتظاری بنگاه، از حاصل جمع سود مورد انتظار واحدهای تولید به دست می‌آید و سود مورد انتظار هر واحد که با $\varphi_i[s_i, p_i(s_i)]$ نشان داده شده‌است، به وسیله $[p_i(s_i) - C'(s_i)]$، ضرب در احتمال این‌که پیشنهاد این واحد پذیرفته شود، حاصل می‌شود. این احتمال در واقع احتمال آن است که تقاضا بیشتر از $s_i + s_{-i}[p_i(s_i)]$ باشد. حال با توجه به این‌که بنگاه در نظر دارد تا تابع عرضه را طوری ارائه نماید که سود انتظاری را حداکثر کند، شرط مرتبه اول حداکثر نمودن سود، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial p_i} = 1 - F[s_{-i}(p_i(s_i)) + s_i]$$

$$-s'_{-i}(p_i(s_i))(p_i(s_i) - C'(s_i))f[s_{-i}(p_i(s_i)) + s_i] = 0 \forall s_i \in [0, \varepsilon^*/N] \quad (۵)$$

از آنجا که بنا به فرض، تنها تعادل‌هایی با توابع عرضه‌ی صعودی و مشتق پذیر در نظر گرفته می‌شود، رابطه (۵) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\begin{aligned} &1 - F[s_{-i}(p) + s_i(p)] \\ &\quad - s'_{-i}(p)\left(p - C'(s_i(p))\right) f[s_{-i}(p) + s_i(p)] \\ &\quad = 0, \\ &\forall p: \; s_i(p) \in (0, \varepsilon^*/N) \end{aligned} \qquad (۶)$$

از آنجا که نگاشت عرضه متناسب با ظرفیت در نظر گرفته می‌شود، خواهیم داشت:

$$s_{-i}(p) \equiv (N-1)s_i(p)$$

و بنابراین رابطه(۶) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\begin{aligned} &1 - F[Ns_i(p)] - (N-1)s_i'(p)\left(p - C'(s_i(p))\right) f[Ns_i(p)] \\ &\quad = 0 \\ &\forall p: \; s_i(p) \in (0, \varepsilon^*/N) \end{aligned} \qquad (۷)$$

برای آسان شدن حل، معادله دیفرانسیل(۷) به صورت یک معادله بر حسب p نوشته می‌شود. بنابراین با توجه به اینکه در تعادل $\varepsilon = Ns_i(p(\varepsilon))$ و $s_i^* = \frac{1}{Np'(\varepsilon)}$ ، رابطه(۷) به صورت زیر درمی‌آید:

$$1 - F(\varepsilon) - \frac{N-1}{Np'(\varepsilon)}\left(p(\varepsilon) - C'\left(\varepsilon/N\right)\right) f(\varepsilon) = 0 \forall \varepsilon \in [0, \varepsilon^*] \qquad (۸)$$

این معادله دیفرانسیل، ابتدا با تغییراتی به یک معادله دیفرانسیل ناکامل که با استفاده از عامل انتگرال‌ساز، کامل می‌شود، تبدیل می‌شود و پس از آن می‌توان جواب عمومی این معادله دیفرانسیل را استخراج کرد که در بردارنده یک ثابت انتگرال‌گیری نامعین A است؛ بنابراین تعادل‌های نگاشت عرضه متعددی را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن و انتساب مقدار معینی به این ثابت، نیاز به یک شرط مرزی وجود دارد. این شرط مرزی، بر این اساس استخراج می‌شود که بالاترین مقدار پیشنهادی یعنی پیشنهاد ظرفیت کل در قیمت حداکثر، ارائه (پیشنهاد) خواهد شد. بنابراین ثابت انتگرال‌گیری دقیقاً به وسیله شرط انتهایی $p(\bar{\varepsilon}) = \bar{p}$

تعیین می گردد (هولمبری، ۲۰۰۹). در آخر رابطه زیر به‌عنوان جواب یکتا به دست می‌آید:

$$p(\varepsilon) = \frac{N[1-F(\bar{\varepsilon})]^{\frac{N-1}{N}}\bar{p} + \int_{\varepsilon}^{\bar{\varepsilon}}(N-1)C'\left(u/N\right)f(u)[1-F(u)]^{\frac{N-1}{N}-1}du}{N[1-F(\varepsilon)]^{\frac{N-1}{N}}}$$

$$\forall \varepsilon \in [\qquad (۹)$$

این رابطه با فرض اینکه تقاضا دارای توزیع پارتو تعمیم یافته‌است (هولمبری، ۲۰۰۹)، و با جای‌گذاری چگالی احتمال و تابع توزیع پارتویی تعمیم‌یافته، به‌جای f و F در رابطه بالا، در نهایت به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$p(\varepsilon) = \frac{N(\alpha\bar{\varepsilon}+\beta)^{\frac{1-N}{\alpha N}}\bar{p} + \int_{\varepsilon}^{\bar{\varepsilon}}(N-1)C'\left(u/N\right)(\alpha u+\beta)^{\frac{1-N}{\alpha N}-1}du}{N(\alpha\varepsilon+\beta)^{\frac{1-N}{\alpha N}}} \qquad (۱۰)$$

که α وβ، شاخص‌های توزیع پاره تویی تعمیم یافته هستند و سایر متغیرها قبلاً توضیح داده شد.

۵. تخمین و نتایج

باید توجه داشت که رابطه (۱۰)، دقیقاً نگاشت عرضه بهینه یا معکوس آن برای تک بنگاه تحت فروض مذکور نیست، زیرا که قیمت را بر حسب تقاضای کل به دست می‌دهد: اما قبلاً در حالت تعادل و تحت فروض مدل، رابطه تقاضای کل با عرضه تک بنگاه خاص، استخراج شد؛ بنابراین معکوس نگاشت عرضه تک بنگاه به صورت نهایی زیر بازنویسی می‌شود:

$$p_i(s_i) = \frac{N(\alpha\bar{\varepsilon}+\beta)^{\frac{1-N}{\alpha N}}\bar{p} + \int_{Ns_i}^{\bar{\varepsilon}}(N-1)C'\left(u/N\right)(\alpha u+\beta)^{\frac{1-N}{\alpha N}-1}du}{N(\alpha Ns_i+\beta)^{\frac{1-N}{\alpha N}}} \qquad (۱۱)$$

بنابراین در نهایت برای تخمین نگاشت عرضه بهینه بنگاه، رابطه اخیر در این مطالعه، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنگاه‌های در نظر گرفته‌شده برای مطالعه تجربی در این مقاله، نیروگاه جنوب اصفهان و نیروگاه شهید منتظری است.این نیروگاه‌ها به‌ترتیب دارای ۷۳۳ و ۱۵۴۰ مگاوات ظرفیت عملی هستند.

جدول ۲. نیروگاه‌های استان اصفهان و چهار محال و بختیاری

ردیف	نام نیروگاه	ظرفیت اسمی MW	ظرفیت عملی MW	درصد از کل ظرفیت اسمی
۱	اصفهان	۸۳۵	۸۳۰	۱۴/۲۲
۲	شهید محمد منتظری	۱۶۰۰	۱۵۴۰	۲۷/۲۵
۳	هسا	۵۸	۴۲	۰/۹۹
۴	نیروگاه نطنز	۴۸	۳۴	۰/۸۲
۵	سد زاینده‌رود	۵۵/۵	۵۵/۵	۰/۹۵
۶	سد کوهرنگ	۳۹/۳	۳۹/۳	۰/۶۷
۷	فولاد مبارکه	۳۰۹	۲۲۵	۵/۲۶
۸	ذوب آهن اصفهان	۱۶۵	۱۳۶	۲/۸۱
۹	جنوب اصفهان	۹۵۴	۷۳۳	۱۶/۲۴
۱۰	کاشان	۳۲۴	۲۵۵	۵/۵۲
۱۱	زواره	۴۸۴	۳۲۴	۸/۲۴
۱۲	سد کارون ۴	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۷/۰۳

منبع: آمار تفضیلی صنعت برق-۱۳۹۰ و شرکت مدیریت شبکه برق اصفهان.

جدول ۳. نیروگاه جنوب و شهید منتظری اصفهان

نام نیروگاه	نوع واحد	گاز مصرفی (متر مکعب)	ظرفیت(قدرت) عملیMW	تولید کل بر حسب میلیون (کیلووات ساعت)	سهم از ظرفیت تولید منطقه (درصد)	سهم از کل تولید منطقه (درصد)
جنوب	گازی	۸۳۵۳۰۱	۷۳۳	۴۰۶۹/۱	۱۶/۲	۱۵/۵
شهیدمنتظری	بخاری	*	۱۵۴۰	۸۶۶۰	۳۴	۳۳

منبع: آمار تفضیلی صنعت برق-۱۳۹۰ و شرکت مدیریت شبکه برق اصفهان(*:ناموجود).

برخی از اطلاعات در خصوص این دو بنگاه و سایر بنگاه‌ها در منطقه اصفهان و چهارمحال و بختیاری در جدول (۲) و (۳) آمده‌است.

در این قسمت برای تخمین نگاشت عرضه بهینه، باید تابع هزینه نهایی نیروگاه‌استخراج گردد. برای این منظور کافی است تا ابتدا تابع هزینه متغیر، استخراج گردد تا پس از آن برای دستیابی به تابع هزینه نهایی، مشتق‌گیری شود. از سوی دیگر می‌دانیم که هزینه‌ی سوخت، عمده‌ترین هزینه‌ی متغیر نیروگاه‌ها است و بین مقدار مصرف سوخت یا در واقع انرژی ورودی در هر ساعت و مقدار تولید واحدها در ساعت، رابطه مستقیم وجود دارد، که تحت عنوان رابطه ورودی- خروجی نیروگاه شناخته می‌شود. مبتنی بر مفاهیم فنی برای تخمین مشخصه ورودی- خروجی نیروگاه، یک رابطه درجه دوم در نیروگاه‌ها به صورت زیر در نظر گرفته می شود.

$$H = a_0 q^2 + a_1 q + a_2 \qquad (۱۲)$$

که در آن H، انرژی ورودی در ساعت (بر حسب مگاکالری) و q، مقدار تولید نیروگاه در ساعت (بر حسب مگاوات ساعت) را نشان می‌دهد. برای براورد این رابطه از آمار مربوط به مصرف سوخت نیروگاه بر حسب مترمکعب و مقدار تولید بر حسب مگاوات استفاده شده‌است. در شرایط مورد مطالعه نیروگاه از گاز به‌عنوان سوخت استفاده کرده‌است و سوخت مصرفی با استفاده از ارزش حرارتی سوخت به انرژی ورودی تبدیل شده‌است. برای این منظور از ارزش حرارتی گاز که معادل ۸/۷۶۳ Mcl/m^3 می‌باشد، استفاده شده‌است. نیروگاه در دمای متعارف فعالیت می‌کند. نتایج در جدول(۴)، تلخیص شده‌است که با برخی از

مطالعات قبلی(دهش، ۱۳۸۸ و ناظمی، اشنی،۱۳۹۰) نیز همخوانی دارد.

بر این اساس برای نیروگاه جنوب می‌توان نوشت:

$$H\left(\frac{Mcl}{h}\right) = ۰.۹۳۸q^{۲} + ۱۸۶۸q + ۲۰۱۰۵۶$$

جدول۴. نتایج براورد منحنی ورودی – خروجی نیروگاه جنوب و شهید منتظری اصفهان

a_2		a_1		a_0	
آماره t	ضریب	آماره t	ضریب	آماره t	ضریب
۲/۳۶	۲۰۱۰۵۶	۱۱/۷۸	۱۸۶۸	۱/۹۶	۰/۹۳۸
۲/۲	۱۶۳۷۵۰	۴/۷	۲۰۸۵	۲/۳	۰/۱۴

منبع: محاسبات تحقیق و ناظمی(۱۳۹۰).

برای به دست آوردن رابطه هزینه کل متغیر، قیمت سوخت تحویلی طبق اعلام، معادل با ۷۰۰ $Rls/m^{۳}$ استفاده می‌شود، (شرکت مدیریت شبکه برق ایران،۱۳۹۰). با توجه به این‌که ارزش حرارتی هر مترمکعب گاز نیز معادل با ۸/۷۶۳ $Mcl/m^{۳}$ Mcl ، می‌باشد (دهش، ۱۳۸۸). رابطه ورودی –خروجی مثلا برای نیروگاه جنوب، به صورت زیر به رابطه هزینه تبدیل خواهد شد.

$$TVC\left(\frac{Rial}{h}\right) = \frac{۷۰۰}{۸.۷۶۳}(۰.۹۳۸q^{۲} + ۱۸۶۸q + ۲۰۱۰۵۶)$$

آنگاه رابطه مربوط به هزینه نهایی نیروگاه به صورت زیر به دست می‌آید. برای نیروگاه شهید منتظری، نیز هزینه نهایی از جدول (۴) به صورت مشابه به دست می‌آید.

$$MC = \frac{۷۰۰}{۸.۷۶۳}(۲ \times ۰.۹۳۸q + ۱۸۶۸)$$

مبتنی بر مدل هولمبری (۲۰۰۹)، تقاضای برق دارای توزیع پارتوی تعمیم یافته در نظر گرفته می‌شود. تابع

توزیع تجمعی پارتوی تعمیم‌یافته و تابع چگالی احتمال آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F(x) = 1 - \sigma^{\frac{1}{k}}(kx + \sigma)^{\frac{-1}{k}}$$

$$f(x) = \sigma^{\frac{1}{k}}(kx + \sigma)^{\frac{-1}{k}-1} \qquad (۱۳)$$

در این پژوهش، با توجه به آمار تقاضا و مصرف برق کل کشور در ساعت پیک در ماه‌های تیر و مرداد ۱۳۹۰ و با استفاده از روش گشتاورهای تعمیم‌یافته، شاخص‌های k و σ در این توزیع، تخمین زده می‌شوند. مقادیر k و σ از روابط زیر استخراج می‌گردد.

$$\hat{k}_{MOM} = \left(1 - \bar{x}^2/s^2\right)/2$$

$$\hat{\sigma}_{MOM} = \bar{x}\left(\bar{x}/s^2 + 1\right) \qquad (۱۴)$$

که $\bar{x}$ و s^2 به ترتیب بیانگر میانگین و واریانس نمونه هستند. مقادیر براوردشده شاخص‌ها در جدول(۵) گزارش شده‌است.

جدول۵. نتایج براورد شاخص‌ها در تیر-مرداد ۱۳۹۰

شاخص	$\hat{k}_{MOM}$	$\hat{\sigma}_{MOM}$	$\bar{x}$	s
براورد	-۵۰۸/۴۱	۱۷۱۶۵۵۰۵	۳۳۶۹۶/۸۶	۱۰۵۶/۲۱

منبع: محاسبات تحقیق.

جدول۶. قدرت و حداکثر قیمت در صنعت و بازار برق ایران

قدرت نامی منصوبه(MW)	قدرت عملی(MW)	قدرت تولید شده در پیک(MW)	حداکثر قیمت مصوب در بازار ریال بر مگاوات
۶۵۲۱۲	۵۷۵۲۲	۴۲۲۴۵	۳۳۰۰۰۰

منبع: شرکت مدیریت شبکه برق ایران و آمار تفصیلی صنعت برق،۱۳۹۰.

حداکثر قیمت ممکن در بازار، ، طبق اعلام شرکت مدیریت شبکه برق ایران در سال ۱۳۹۰، قدرت نامی منصوبه، قدرت عملی و قدرت تولیدشده در پیک نیز در جدول(۶)، آورده شده‌است. در نهایت با استخراج تابع هزینه نهایی و سایر داده‌های لازم در رابطه (۱۱) مشتمل بر اطلاعات بنگاه، اطلاعات تقاضای بازار، ظرفیت رقبا و سقف قیمت، مدل تصریح‌شده در رابطه (۱۱)، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB ، به‌سرعت، قابل اجراست. ساختار بازار برق به گونه‌ای است که برای هر ۲۴ ساعت یک روز، بازار جداگانه‌ای برگزار می‌گردد؛ یعنی تولیدکنندگان برای هر واحد تولیدی خود، روزانه، ۲۴ تابع عرضه (متناسب با هر ساعت روز) به بازار ارائه می‌کنند. فهرست قیمت –مقدار پیشنهادی یک واحد نیروگاه مورد نظر در بازار در روزها و ساعات مختلف موجود است. در اینجا قیمت‌های متناظر با مقادیر تولید مختلف حاصل از اجرای مدل، برای ساعت پیک مصرف در روز ۳۱ تیر ۱۳۹۰، نیز محاسبه و فهرست قیمت – مقدار بهینه مبتنی بر رویکرد تعادل تابع عرضه (SFE) استخراج شده و برای دو نیروگاه، در جدول(۷) و(۸) گزارش شده‌است. در نهایت در نمودار(۲) تابع عرضه پیشنهادی بنگاه‌ها در بازار با تابع عرضه بهینه‌استخراجی مبتنی بر مدل، به صورت نموداری نیز مقایسه شده‌است. گفتنی است که پیشنهاددهی قیمت– مقدار برای نیروگاه جنوب اصفهان، از سوی شرکت برق منطقه‌ای اصفهان انجام می‌شود که تامین سوخت را هم بر عهده دارد. پیشنهاددهی برای نیروگاه منتظری، را نیز نیروگاه انجام می‌دهد.

جدول ۷. مجموعه مقدار– قیمت بهینه‌استخراج‌شده از مدل برای واحد نیروگاهی ۱۵۹ مگاواتی

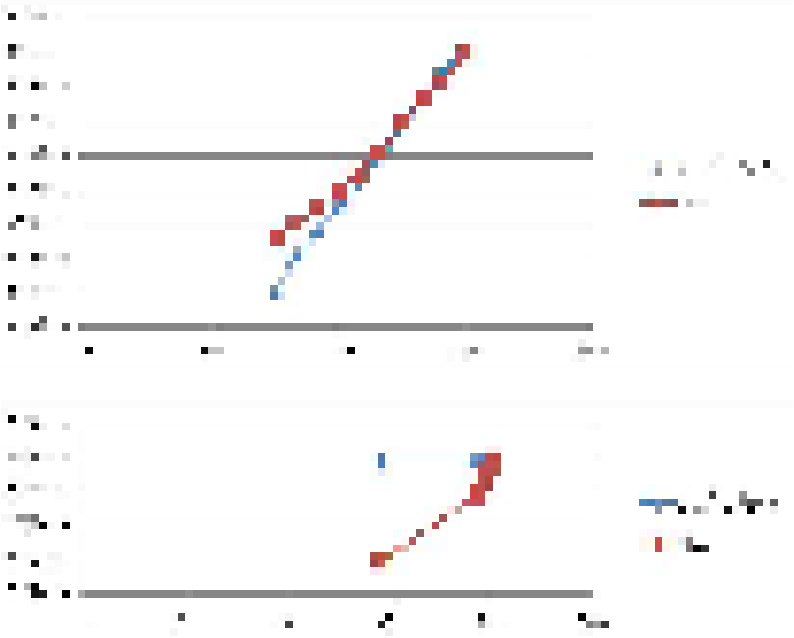
Power	۷۵	۸۳	۹۱	۱۰۰	۱۰۸
Price	۳۲۸۹۲۲	۳۲۹۰۰۵	۳۲۹۱۰۱	۳۲۹۲۱۰	۳۲۹۳۰۷
Power	۱۱۶	۱۲۵	۱۳۳	۱۴۱	۱۵۰
price	۳۲۹۴۲۳	۳۲۹۵۹۱	۳۲۹۷۲۴	۳۲۹۸۴۱	۳۲۹۹۹۹

منبع : محاسبات تحقیق(مقادیر بر حسب مگاوات و قیمت‌ها بر حسب ریال است)

جدول ۸. مجموعه مقدار- قیمت بهینه‌استخراج‌شده از مدل برای واحد نیروگاهی ۲۰۰ مگاواتی

Power	۱۴۵	۱۹۲	۱۹۳	۱۹۴	۱۹۵
Price	۳۲۶۹۳۵	۳۲۸۹۰۳	۳۲۹۰۰۰	۳۲۹۱۰۵	۳۲۹۲۱۸
Power	۱۹۶	۱۹۷	۱۹۸	۱۹۹	۲۰۰
price	۳۲۹۳۴۲	۳۲۹۴۷۹	۳۲۹۶۳۱	۳۲۹۸۰۲	۳۳۰۰۰۰

منبع: محاسبات تحقیق(مقادیر بر حسب مگاوات و قیمت‌ها بر حسب ریال است).



نمودار ۲ . نگاشت قیمت- مقدار پیشنهادی و بهینه استخراج‌شده از مدل به ترتیب برای واحد ۱۵۹ و ۲۰۰ مگاواتی

منبع: محاسبات تحقیق (مقادیر برحسب مگاوات و قیمت‌ها برحسب ریال است).

چنانکه قابل مشاهده‌است، برای نیروگاه جنوب، اگرچه در مقادیر نزدیک به ظرفیت، قیمت‌های پیشنهادی نیروگاه و قیمت‌های محاسبه‌شده ناشی از مدل، تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند؛ اما در مقادیر تولید کمتر از ظرفیت، قیمت‌های پیشنهادی و قیمت‌های محاسبه‌شده ناشی از مدل متفاوت بوده و قیمت‌های اخیر بالاتر هستند. در واقع در مسیر هدف حداکثرسازی سود در بازار برق با وجود سقف قیمت و با ملاحظه هزینه و در فضای ارائه نگاشت عرضه در حالت تعادلی در مقادیر پایین‌تر از ظرفیت، امکان پیشنهاد مجموعه قیمت- مقدار بهینه متضمن حداکثرسازی سود انتظاری به صورت مذکور وجود خواهد داشت. به همین صورت برای نیروگاه منتظری نیز تطابق نداشتن ارقام پیشنهادی و محاسبه‌شده ناشی از مدل در جدول(۸) ملاحظه می‌شود. در اینجا نیز با نزدیکی به ظرفیت، مقادیر بر هم منطبق می‌شوند. این امر نشان می‌دهد که بنگاه‌ها هنوز در فضای جدید، قادر به پیشنهاددهی کاملا بهینه و منطبق بر بهینه‌سازی مبتنی بر مدل‌های نظری نیستند و معمولاً با استفاده از روش‌های سرانگشتی و ساده اقدام می‌کنند و با توجه به داشتن رویه احتیاط‌آمیز و یا غیر احتیاط‌آمیز در قیمت‌دهی، فهرست پیشنهادهایشان متفاوت خواهد بود.

رفتار هر یک از بنگاه‌ها، با نزدیک شدن به سطوح متناظر با ظرفیت همان بنگاه، به رفتار بهینه نزدیک شده و تابع عرضه پیشنهادی به تابع عرضه بهینه تعادلی SFE ، نزدیک می‌شود. در اینجا به‌رغم بهینه نبودن توابع عرضه موجود، تناسب توابع عرضه موجود با اندازه نسبی بنگاه‌ها در سطوح فوق، کمابیش قابل مشاهده‌است. به نحوی که ملاحظه می‌شود، نسبت عرضه پیشنهادی دو بنگاه در سه پله آخر در وضعیت موجود به ترتیب برابر با ۰/۶۸ ، ۰/۷۱ و ۰/۷۵ است که با نسبت اندازه دو بنگاه یعنی ۱۵۰ به ۲۰۰ بسیار نزدیک است و با نزدیک شدن به سطح ظرفیت، تدریجاً انطباق بیشتری ملاحظه می‌گردد.

۶. نتیجه گیری

در بازار برق ایران، تجدید ساختار مبتنی بر پیشنهاد نگاشت عرضه به‌وسیله بنگاه‌ها به مدیر بازار، پذیرفته شده‌است؛ اما به‌رغم آن، ارائه و پیشنهاد فهرست قیمت- مقدار در این بازار غیر مبتنی بر مدل‌های مرتبط با فرایند تجدید ساختار و در عمل مبتنی بر آزمون و خطا صورت می‌گیرد. طبعاً این امر نه تنها متضمن نیل به حداکثر سازی سود برای بنگاه‌ها نیست، پیش‌بینی‌پذیری رفتار بنگاه‌ها را نیز به شدت کاهش می‌دهد. تحت این شرایط همچنین محاسبه اثرات تغییرات به ویژه محاسبه اثرات اصلاحات جدید در مسیر تداوم تجدید ساختار یا اصلاح و آزادسازی قیمت نهاده‌های انرژی، نیز امکان‌پذیر نیست.

در این مطالعه، ضمن مروری بر فرایند و مبانی تجدید ساختار، مدل بهینه پیشنهاددهی قیمت در شرایط پرداخت بر مبنای پیشنهاد، ارائه شد و مبتنی بر آن با محاسبات لازم در خصوص هزینه نهایی، شاخص‌های تقاضا و ...، در نهایت مجموعه قیمت - مقدار بهینه تعادلی برای دو واحد نیروگاهی محاسبه و با قیمت - مقدار پیشنهادی در بازار مقایسه گردید که حاکی از انطباق نداشتن مجموعه قیمت- مقدار پیشنهادی با مجموعه قیمت- مقدار بهینه به‌ویژه در مقادیر پایین نسبت به ظرفیت است.

بر این اساس روشن می‌شود که توام با فرایند تجدید ساختار در بازار انرژی برق در ایران، بایستی استفاده از مدل‌های مرتبط برای پیشنهاددهی قیمت نیز مد نظر قرار گیرد. به‌ویژه که این امر، امکان پیش‌بینی‌پذیری رفتار بنگاه‌ها را فراهم می‌آورد تا که برای طراحی تداوم و تعدیل فرایند تجدید ساختارو دیگر اصلاحات در بازار برق ایران نظیر آزاد سازی قیمت نهاده‌های انرژی نیز کاملاً ضروری است.

منابع و مآخذ

آیین‌نامه تعیین شرایط و روش خرید و فروش برق در شبکه برق کشور (۱۳۸۴)، دبیرخانه هیات تنظیم بازار برق.

آمار تفضیلی صنعت برق (۱۳۹۰)، وزارت نیرو، شرکت مادر تخصصی توانیر.

خوش‌اخلاق، رحمان و مصطفی عمادزاده، علیمراد شریفی و علی ناظمی اشنی(۱۳۹۰)، "تعیین مبنای معاملات در بازار لحظه‌ای برق"، مطالعه موردی بازار برق اصفهان، *مجله تحقیقات اقتصادی*، دوره ۴۶، شماره ۹۶ ، صص۶۵-۸۷.

دهش، محمدحسین(۱۳۸۸)، تعادل تابع عرضه در بازار برق: رویکرد نظریه بازی‌ها، *پایان نامه کارشناسی ارشد، اصفهان*، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم اداری واقتصاد.

پورتال شرکت مدیریت شبکه برق ایران (www.igmc.ir).

کرشن، دانیل و گارن استرابک(۱۳۸۶)،" مبانی اقتصاد سیستم قدرت"، ترجمه مسعود براتی، تهران، *نشر وزارت نیرو*، دبیرخانه هیات تنظیم بازار برق ایران.

قاضی‌زاده، محمد(۱۳۸۸)، بازار برق ایران؛" تاریخچه، دلایل و ویژگی‌های آن"، *مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران*، شماره ۶۰۲، صص ۳۳-۲۲.

ناظمی‌اشنی، علی(۱۳۹۰)، تحلیل قدرت بازار در بازار برق ایران، *پایان‌نامه دکتری*، اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم اداری و اقتصاد.

ناظمی‌اشنی، علی(۱۳۸۵)، "ارائه یک مدل اقتصادی برای بازار برق"، *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*، اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم اداری و اقتصاد.

Asgari, M. H, Monsef, H. (2010), Market *Power Analysis for Iranian Electricity Market*, *Energy Policy*, Vol.38, pp.5582-5599.

Anderson, E. J. and Philpott, A. B.(2002). Using supply functions for offering generation into an electricity market. *Operation Research*, Vol.50, pp.477-496.

Anderson, E. J. and Xu, H.(2002). Necessary and sufficient condition for optimal offers in electricity market. *SIAM Journal on Control and Optimization*, Vol.41, pp.1212-1228.

Federico,G. and Rahman, D. (2003).Bidding in an electricity pay-as-bid auction. *Journal of Regulatory Economics*, Vol.24, No. 2, pp.175-211.

Garcia, A. and Arbeláez, L.E. (2002).Market power analysis for the Colombian electricity market. *Energy Economics*,Vol. 24, pp.217-229.

Holmerg, P. (2008).Uniqe supply function equilibrium with capacity constraint. *Energy Economics*, Vol.30,pp.148-172.

Holmberg, P. (2009). Supply function equilibria of pay-as-bid auctions. *Journal of Regulatory Economics*, Vol.36, pp.154-177.

Klemperer, P. and Meyer, M. (1986). Price competition vs. quantity competition: the role of uncertainty. *Rand Journal Economics*, Vol.17, No.4, pp. 618-638.

Klemperer, P. and Meyer, M. (1989). Supply function equilibria in oligopoly under uncertainty. *Econometrica*, Vol. 57, No.6, pp.243-270.

Niu, H.(2005). Supply function equilibrium bidding strategies with fixed forward contracts. *IEEE Transaction on Power System*, Vol.20, No.4, pp.1859-1867.

Shweppe, F. (1988). *Spot Pricing of Electricity*. Boston, Kluwer Academic Publisher.

Sioshansi, R. andOren, Shmuel S. (2007). How good are supply function equilibrium models: an empirical analysis of the ERCOT balancing market. *Journal of Regulatory Economics*, Vol.31, pp.1-35.

Stoft, s. (2003).*Power System Economics*.New York City: IEEE Press.

Tirole, J. and Fudenberg, D. (1995).*Game Theory*.Cambridge, Massachusetts:MIT Press.