تخمین تابع هزینه‌نهایی نیروگاه نکا با استفاده از قیمت و مقدار توان پیشنهاد شده به بازار برق

داود سوری [۱] ـ حسن مردانی [۲]

چکیده

یکی از چالشهای عمده در طراحی بازار رقابتی برای الکتریسیته، ابداع قوانینی است که توانایی مالکان واحدهای تولیدی را در اعمال قدرت انحصاری در بازار محدود کند. قدرت انحصاری در بازار، به توانایی تولیدکنندگان در افزایش قیمت به سطحی بالاتر از هزینه نهایی تولید گفته می‌شود. از این‌رو تنظیم بازار برق نیاز به برآوردی دقیق از هزینه نهایی تولید برق دارد که در یک بازار رقابتی از دید ناظران بازار پوشیده است. قیمت و مقدار توان پیشنهادی واحدهای نیروگاهی به بازار برق ایران حاوی اطلاعاتی است که می‌تواند در برآورد هزینه نهایی تولید مورد استفاده قرار بگیرد. این مقاله با استفاده از «مدل رفتاری پیشنهاد بهینه» و با به‌کارگیری داده‌های آماری بازار برق ایران، تابع هزینه نهایی دو واحد نیروگاهی نوع بخاری و گازی را برآورد می‌کند.

نتایج تحقیق نشان می‌دهد منحنی هزینه نهایی واحدهای گازی و بخاری نیروگاه نکا، مقعر و افزایشی می‌باشد، که با شکل تجربی آن در بازارهای برق مختلف سازگاری دارد. با توجه به منحنی‌های هزینه نهایی واحدهای گازی و بخاری، اگر مدیر یا بهره‌بردار نیروگاه نکا عقلایی رفتار کند، برای واحد گازی بهترین استراتژی قیمت‌دهی این است که یا اصلاً پذیرفته نشود و یا اگر پذیرفته شد در حداکثر ظرفیت واحد تولید

۱. استادیار دانشگاه صنعتی شریف

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه صنعتی شریف hassan-mardani@gamil.com

کند برعکس برای واحدهای بخاری طوری قیمت بدهد که همیشه در مدار بوده و در حداقل ظرفیت تولید کند.

واژه‌های کلیدی: تابع هزینه نهایی، مدل رفتاری پیشنهاد بهینه، مدل انحصار چندجانبه برتراند.

۱. مقدمه

به‌دنبال موفقیت و تجدیدساختار در بازارهای برق بعضی از کشورها، در حال حاضر اعتقاد کلی براین است که وجود بازار رقابتی در عرضه انرژی برق کارایی بیشتری دارد و بدین منظور شرکتهای تولیدکننده برق برای تأمین برق با کیفیت بالاتر و ارائه خدمات بهتر و متنوع‌تر، با یکدیگر رقابت می‌کنند.

در کشور ما صنعت برق از اواسط سال ۱۳۸۲ دچار تجدیدساختار شده و بخش خصوصی به منظور افزایش رقابت و جلب سرمایه‌گذاری وارد بازار شده است، در شرایط کنونی صنعت برق و تشکیل بازار عمده‌فروشی الکتریسیته، یکی از اهداف مهم طراحان بازار رقابتی به ویژه نهاد تنظیم بازار برق است. ابداع قوانینی برای بازار که توانایی مالکان واحد تولیدی را برای اعمال قدرت بازار محدود کند نیز جزو برنامه است. به منظور محاسبه قدرت بازار یک واحد نیروگاهی خاص با استفاده از شاخص لرنر، نیاز به هزینه نهایی واحد نیروگاهی مربوطه می‌باشد که در این مقاله با استفاده از «مدل رفتاری پیشنهاد بهینه»[1] برای برآورد تابع هزینه نهایی[2] تولید الکتریسیته، در یک بازار برق رقابتی استفاده می‌شود. سپس با استفاده از مدل معرفی شده و داده‌های بازار برق ایران، تابع هزینه نهایی واحد گازی و بخاری نیروگاه نکا برآورد می‌گردد. به نظر می‌رسد که یارانه‌ای بودن قیمت گازطبیعی منجر به پیشنهاد قیمتی خلاف انتظار نیروگاه نکا به بازار برق شده است. چنانچه قیمت گازطبیعی واقعی شده و برحسب عرضه و تقاضا خرید و فروش شود، هزینه متغیر واحد گازی نیروگاه نکا دارای شیب بیشتری نسبت به واحد بخار خواهد شد.

مبانی نظری

اگرچه در دنیای واقعی تنها یک مدل رقابت کامل و انحصار کامل وجود دارد، اما مدلهای

1. Optimal Bidding Behavior Model
2. Marginal Cost Function

مختلفی از انحصار چندجانبه مبتنی بر عدم همکاری وجود دارد که در آن تعداد کمی از بنگاهها به‌طور مستقل فعالیت می‌کنند. برخلاف بنگاههایی که در بازار رقابت کامل و انحصار کامل فعالیت می‌کنند، انحصارگران چندجانبه نمی‌توانند نسبت به عمل دیگر بنگاهها بی‌تفاوت باشند.

نظر به‌اینکه در بازار انحصار چندجانبه تنها تعداد کمی بنگاه وجود دارد، هر بنگاه می‌داند که می‌تواند قیمت بازار و از این‌رو سود رقیب را تحت تاثیر قرار بدهد. بنابراین، بازار انحصار چندجانبه با بازار رقابت کامل و انحصار کامل متفاوت است، به‌طوری که هر بنگاه باید رفتار بنگاه‌های رقیب را برای تعیین بهترین سیاستش در نظر بگیرد. بسته به‌اینکه بنگاهها در بازار، قیمت یا مقدار تولید محصول خود را به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری انتخاب بکنند، مدلهای مختلفی برای انحصارچندجانبه تعریف می‌شود.

مدل برتراند[1]

در مدل برتراند، بنگاهها قیمت را به عنوان متغیر تصمیم‌گیری خود در بازار انتخاب می‌کنند. در حالت خیلی ساده، مدل برتراند بر پایه مفروضات زیر است:

۱. مصرف‌کنندگان قیمت‌پذیرند.

۲. همه بنگاهها محصول همگنی را تولید می‌کنند، و هر بنگاهی می‌تواند در هزینه نهایی ثابت تا جایی که می‌خواهد تولید کند (محدودیت ظرفیت تولید وجود ندارد).

۳. هیچ ورودی به صنعت وجود ندارد، بنابراین تعداد بنگاهها در طی زمان ثابت است.

۴. بنگاهها به‌طور جمعی قدرت انحصاری دارند، به طوری که آنها می‌توانند قیمت را بالاتر از هزینه نهایی تنظیم کنند.

۵. متغیر تصمیم‌گیری هر بنگاهی قیمت است (نه سطح تولید، تبلیغات یا متغیر دیگر).

اگر مصرف‌کنندگان اطلاعات کامل داشته و بدانند که بنگاهها محصولات یکسانی را تولید می‌کنند، کالایی را خریداری خواهند کرد که پایین‌ترین قیمت را داشته باشد. از طرف دیگر، در حالت خیلی ساده در مدل برتراند، هر بنگاهی معتقد است که قیمت رقیبش ثابت است، بنابراین با کمی کاهش قیمت، این بنگاه می‌تواند همه تقاضای بازار را

1. Bertrand Model

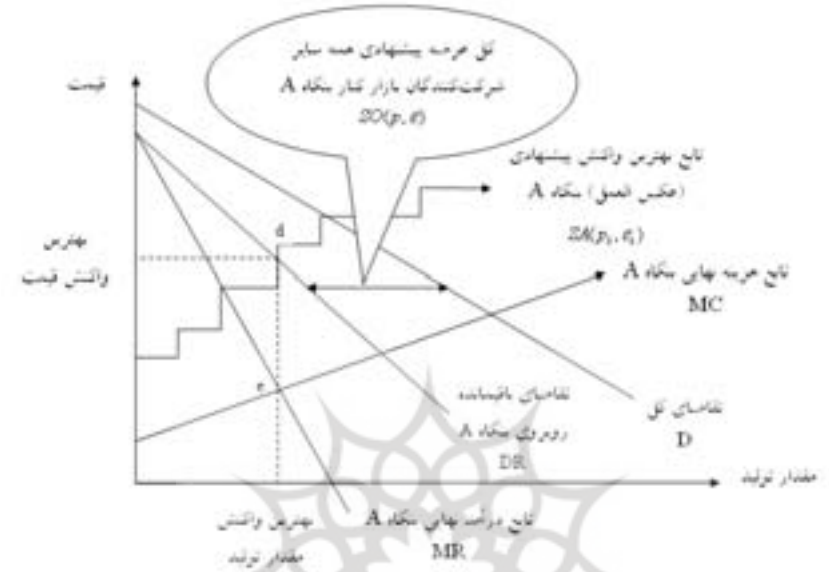
بگیرد. از این‌رو در حالت تعادل نیز، بنگاهها سود صفر دارند و هیچ بنگاهی نمی‌تواند سود خود را با استفاده از افزایش یا کاهش قیمتهایش بالا ببرد. اگر هر یک از مفروضات بالا برداشته شوند، می‌توان مدل برتراند را در حالت واقعی‌تری بررسی کرد، و دیگر قیمت در مدل برتراند مساوی هزینه نهایی نخواهد بود. به‌طور مثال، اگر بنگاهها محصولات ناهمگنی تولید کنند، قیمت برتراند بالاتر از هزینه نهایی قرار می‌گیرد. یا اینکه اگر بازار برای چند دوره پایدار بماند احتمال تبانی بین بنگاهها وجود دارد. و سرانجام اینکه، اگر بنگاهها محدودیت ظرفیت تولید داشته باشند، آنگاه شرط تعادل برتراند، $P = MC$، برقرار نخواهد بود، البته این فرض در صنعت برق به دلیل اینکه ظرفیت تولیدی نیروگاهها محدود است، کاربرد دارد .

مدل برتراند را می‌توان در قالب یک مدل «پیشنهادی» رقابتی نیز بررسی کرد، به طوری که هر بنگاه در مناقصه قیمت شرکت کرده و قیمتی را که حاضر است در آن به خریداران یا مصرف‌کنندگان، کالا یا خدمتی ارایه کند، پیشنهاد می‌دهد.

نمودار ۱، نحوه تصمیم‌گیری یک بنگاه را در شرایط بازار انحصار چندجانبه فروش نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، اگر محور عمودی نشان‌دهندهٔ قیمت و محور افقی نشان‌دهندهٔ مقدار تولید باشد و منحنی تقاضای کل بازار را داده شده فرض کنیم، آنگاه بنگاه A با یک منحنی تقاضای باقیمانده[1] روبرو می‌شود، که با کم کردن جمع تابع پیشنهادها همه بنگاه‌ها به‌غیر از A، از منحنی تقاضای بازار به‌دست می‌آید. بنگاه A سودمندترین سطح تولید را با توجه به تقاضای باقیمانده، انتخاب می‌کند. اگر فرض شود که همه بنگاه‌ها کالای همگنی تولید می‌کنند و با فرض داشتن اطلاعات کامل، این بنگاه شکل تابعی هزینه نهایی خود را می‌داند، و بنابراین با استفاده از شرط تعادل در یک بازار انحصار چندجانبه (MR=MC)، به دنبال قیمت و مقداری خواهد بود که تابع سود وی را حداکثر کند.این مقدار در نقطه d در شکل ۱ نشان داده شده است. فرض دانستن هزینه نهایی، فرضی مهمی است که در عمل یک ناظر بیرونی از آن اطلاعی ندارد و بنگاه خصوصی نیز هیچ الزام و انگیزه‌ای برای ارائه این اطلاعات به غیر ندارد. آنچه که مورد بررسی است مجموعه‌ای از قیمتها و مقادیر پیشنهادی بنگاه به بازار است. در اینجا این سئوال مطرح می‌شود که، آیا می‌توان از این اطلاعات استفاده کرد و تابع هزینه نهایی بنگاه مورد نظر را به دست آورد؟

1. Demand Residual

نمودار ۱. تصمیم‌گیری یک بنگاه در شرایط انحصار چندجانبه فروش



در این مقاله به مسئله بهینه‌سازی بنگاه (حداکثرسازی سود)، از دید یک محقق پرداخته می‌شود، یعنی با فرض عدم دسترسی به اطلاعات کامل، این سئوال مطرح می‌شود که با توجه به معلوم بودن p و q پیشنهادی نیروگاه به بازار (با توجه به مسئله حداکثرسازی سود بنگاه) آیا می‌توان شکل تابعی هزینه نهایی نیروگاه را که سود بنگاه مذکور را حداکثر کرده است مشخص ساخت؟

مروری بر ادبیات موضوع

تاکنون، مطالعات متعددی در مورد برآورد تابع هزینه نهایی بنگاه در شرایط بازار انحصار چندجانبه انجام گرفته است. راس[1] (سال ۱۹۷۰)، روشی برای تخمین تابع هزینه نهایی با استفاده از داده‌های سری زمانی قیمت و مقادیر تسویه‌کننده بازار ابداع کرد. راس به‌منظور تخمین تابع هزینه نهایی یک انحصارگر، از یک نمونه انحصارگر روزنامه محلی در ایالات متحده‌آمریکا طی سالهای ۱۹۶۴-۱۹۵۸، تحت فرض حداکثرسازی سود استفاده کرد.

پورتر[2] (سال ۱۹۸۳)، با استفاده از داده‌های سری‌زمانی هفتگی قیمت و مقادیر

1. Rosse
2. Porter

تسویه‌کننده بازار و کارتل‌های مشترک[1] فعال در صنعت راه‌آهن ایالات متحده، جنگ قیمتها را دراین صنعت در طول سالهای ۱۸۸۶- ۱۸۸۰ مورد مطالعه قرار داد.

برسنان[2] (سال ۱۹۷۸)، با مطالعه صنعت اتومبیل‌سازی ایالات متحده آمریکا و به دنبال بررسی وقایع سال ۱۹۵۵ در صنعت اتومبیل‌سازی، با استفاده از مدل تعادل انحصار چندجانبه انتخاب گسسته و فرض حداکثرسازی سود که در آن برای تابع هزینه نهایی یک شکل تابعی فرض کرده بود، فرضیه وجود جنگ قیمتها را دراین سال مورد آزمون قرار داد.

بری[3] (سال ۱۹۹۴)، بری، لوینسون، و پاک[4] (سال ۱۹۹۵)، یک ساختار تقاضای انتخاب ـ گسسته[5] چندجمله‌ای را در سطح مصرف‌کننده در نظر می‌گیرند و فرض می‌کنند، مطلوبیت نهایی ناشی از مشخصات محصول برای مصرف‌کنندگان تصادفی و غیرقابل مشاهده است. همچنین فرض می‌کنند این مطلوبیت‌های نهایی، بین مشخصات محصول به‌طور مستقل و غیریکسان و بین مصرف‌کنندگان مستقل و یکسان توزیع شده‌اند. جمع تصمیمات خرید در سطح فردی نسبت به‌این توزیع‌های نرمال، سیستم تقاضای کل اتومبیل را به‌دست می‌دهد. بری فرض می‌کند که تابع مطلوبیت غیرمستقیم شرطی برای هر مصرف‌کننده، شامل بردار مشابهی از مشخصات تولید غیرقابل مشاهده (برای محقق) می‌باشد، که‌این مشخصات با تمامی مشخصات محصول قابل مشاهده، بی ارتباط‌اند. این ساختار تصادفی موجب می‌شود بین قیمتهای تعادلی و بردار تصادفی و غیرقابل مشاهده مشخصات محصول، در سیستم تقاضای کل رابطه وجود داشته باشد. بری و همکاران تکنیک برآورد متغیر ابزاری را، در شرایط فقدان رابطه بین مشخصات محصول مشاهده شده و مشاهده نشده، برای برآورد مشترک سیستم تقاضا و تابع هزینه نهایی، تحت فرض رفتاری رقابت نش ـ برتراند[6] بین تولیدکنندگان اتومبیل، پیشنهاد داده و به‌کار می‌برد.

گلدبرگ[7](سال ۱۹۹۵)، به منظور برآورد پارامترهای تابع تقاضا و تابع هزینه نهایی، مدل انتخاب ـ گسسته را برای خرید اتومبیل، با استفاده از داده‌های سطح خانوار مورد استفاده قرار داده است. وی برای ارایه سیستم تقاضای کل اتومبیل که مبتنی بر انتخاب

1. Joint Executive Committee Railroad
2. Bresnahan
3. Berry
4. Berry, Levinsohn, and Pakes
5. Discrete-choice Model
6. Nash-Bertrand Competition
7. Goldberg

احتمالی است، از مدل تقاضای سطح خانوار به صورت وزنی استفاده می‌کند (نماینده هر یک ازاین خانوارها در جمعیت خانوار ایالات متحده به‌صورت وزن در نظر گرفته شده‌اند). و سپس با استفاده از فرض رفتاری رقابت نش ـ برتراند بین تولیدکنندگان اتومبیل، به‌طور ضمنی تابع هزینه نهایی را برای هر مدلی از وسیله نقلیه برآورد می‌کند.

مدل و روش برآورد

به‌منظور اندازه‌گیری قدرت‌انحصاری نیروگاه نکا در بازار برق، احتیاج به تخمین تابع هزینه نهایی تک‌تک واحدهای‌این نیروگاه می‌باشد. با توجه به اینکه تنها، قیمت و مقدار توان پیشنهادی‌این نیروگاه در دسترس است، روش مناسب برای‌این کار روشی است که ولاک (سال ۲۰۰۲) برای تخمین تابع هزینه نهایی واحد نیروگاهی در بازار برق استرالیا به کار برده است.

مدل

فرض می‌شود که بهره‌بردار نیروگاه نکا تابع سود خود را به‌صورت زیر حداکثر می‌کند:

$$\Pi_{id}(\Theta,\varepsilon)=\sum_{i=1}^{24}\left[\begin{array}{l} DR_i(P_i(\varepsilon_i,\Theta),\varepsilon i)P_i(\varepsilon_i,\Theta) \\ -\sum_{j=1}^{6}C_j(SA_{ij}(P_i(\varepsilon_i,\Theta),\Theta),\beta_j)\end{array}\right] \qquad (۱)$$

که در آن:

$\Pi_{id}(\Theta,\varepsilon)$: تابع سود متغیر روزانه نیروگاه نکا در ساعت i و روز d می‌باشد.

$DR_{id}(p)=Q_{id}-SO_{id}(p)$: تقاضای پسماند در ساعت i و روز d که بنگاه A با آن مواجه است.

$Q_{id}(p)$: تقاضای کل بازار در ساعت i و روز d.

$SO_{id}(p)$: مقدار ظرفیت پیشنهادی همه بنگاه‌های رقیب در کنار بنگاه A به بازار در ساعت i و روز d در قیمت p.

$SA_{ij}(P,\Theta)$: پیشنهاد واحد j در قیمت P در طول ساعت i

$C_j(q,\beta_j)$: *هزینه متغیر q محصول تولید شده توسط واحد j.*

β_j: بردار پارامترهای تابع هزینه برای واحد j.

ε، شوک‌های تحقق یافته به تقاضای پسماند برای، I=1,...,24، است، $p_i(\varepsilon_i,\Theta)$، قیمت تسویه‌کننده بازار برای‌دورهٔ بار i می‌باشد، با فرض معین بودن ε، و بردار پیشنهاد

روزانه، Θ، P قیمت تسویه‌کننده‌بازار، ازمعادلهٔ $DR_i(P,\varepsilon_i) = SA_i(P,\Theta)$ به‌دست می‌آید.

ولاک (در سال ۲۰۰۱)[1]، کار مشابهی برای بازار برق استرالیا انجام داده است، با این تفاوت که در بازار برق استرالیا:

۱. تعداد ساعات روزانه i=1,...,48 است.
۲. قیمت پیشنهادی نیروگاهها در طول روز نمی‌تواند تغییر پیدا کند.
۳. در کنار بازار انرژی، قراردادهای مالی نیز وجود دارد.
۴. نوع مناقصه در بازار استرالیا پرداخت یکنواخت[2] می‌باشد.
۵. دامنه پیشنهادها در بازار الکتریسیته استرالیا بین ۹۹۹،۹۹- و ۵۰۰۰ دلار استرالیا برای هر مگاوات ساعت است.

روش گشتاورهای تعمیم‌یافته، محدودیتهای گشتاوری[3] را با استفاده از شرایط مرتبه اول، برای واحد، j، و پله‌های پیشنهادی، K، چنین تعریف می‌کند:

$$E_{\varepsilon}\left(\frac{\partial \Pi_d(\Theta_d,\varepsilon)}{\partial P_{ijk}}\right) = 0 \qquad (۲)$$

علت اینکه Θ با d اندیس گذاری شده این است که، در هر روز مقادیر مختلفی برای Θ وجود دارد. معادله (۲)، دارای $(k\times j)\times 1$ محدودیت گشتاوری است که از آن برای برآورد پارامترهای توابع هزینه نهایی واحد نیروگاهی استفاده خواهد شد. محدودیت گشتاور نمونه به‌صورت زیر است:

$$\frac{\partial \Pi_d(\Theta_d,\varepsilon)}{\partial P_{km}} = \sum_{i=1}^{24}\begin{bmatrix} (DR'_i(p_i(\varepsilon_i,\Theta),\varepsilon_i)P_i(\varepsilon_i,\Theta) + (DR_i(P_i(\varepsilon_i,\Theta),\varepsilon_i)) \\ -\sum_{j=1}^{6} C'j(SA_{ij}(P_i(\varepsilon_i,\Theta)),\beta_j)(\frac{\partial SA_{ij}}{\partial P_i})\frac{\partial P_i}{\partial P_{km}} \\ -\sum_{j=1}^{6} C'_j(SA_{ij}(P_i(\varepsilon_i,\Theta)),\beta_j)\frac{\partial SA_{ij}}{\partial P_{km}} \end{bmatrix} \qquad (۳)$$

که در آن Pi نشان‌دهنده قیمت تسویه‌کننده بازار در ساعت i می‌باشد. فرض کنید که $l_d(\beta)$ نشان‌دهنده بردار $(k\times j)\times 1$ بُعدی از مشتقات جزئی معین در (۲) باشد، که در

1. Wolak, F (2000)
2. Uniform Auction
3. Moment Restrictions

آن β برداری از β_j برای j=1, ..., J است. اگر فرض شود شکل تابعی $C_j(q,\beta_j)$ درست باشد، شرایط مرتبه اول برای حداکثرسازی سود انتظاری با توجه به قیمت‌های پیشنهادی، به‌این معنی است که $E(l_d(\beta^0))=0$، که در آن β^0 مقدار صحیح β می‌باشد. در نتیجه، bای که عبارت زیر را حداقل کند:

$$\left[\frac{1}{D}\sum_{d=1}^{D} l_d(b)\right]'\left[\frac{1}{D}\sum_{d=1}^{D} l_d(b)\right] \qquad (۴)$$

برآورد سازگاری از β خواهد بود، ازاین‌رو، $l_d(b)$، تخمین سازگاری از $l_d(\beta)$ است. درمعادله (۴)، D، تعداد روزهاست و مساوی ۳۶۶ است. مجدداً فرض کنید b(I) نشان دهنده برآورد سازگاری از β باشد، که I نشان‌دهندهٔ ماتریسی است که به عنوان ماتریس وزنی برآوردگر گشتاورهای تعمیم یافته مورد استفاده قرار گرفته است. می‌توان با استفاده ازاین برآورد سازگار به‌صورت‌زیر، برآورد سازگاری نیز از ماتریس وزنی بهینه گشتاورهای تعمیم یافته ساخت:

$$V_D(b(I))=\frac{1}{D}\sum_{d=1}^{D} l_d(b(I))\,l_d(b(I))' \qquad (۵)$$

با استفاده ازاین ماتریس، برآوردگر گشتاورهای تعمیم یافته مقدار bای را به‌دست می‌دهد که، عبارت زیر را حداقل کند :

$$[\frac{1}{D}\sum l_d(b)]'V_D(b(I)^{-1}[\frac{1}{D}\sum_{d=1}^{D} l_d(b)] \qquad (۶)$$

فرض کنید $b(0)$ نشان‌دهنده برآوردگر پارامترهای مدل مبتنی بر برآورد سازگار از ماتریس وزنی بهینه باشد (برای توضیح بیشتراین بخش به پیوست ۱ مراجعه شود.).

آخرین مرحله، انتخاب شکل تابعی برای تابع هزینه نهایی هر واحد نیروگاهی است. نیروگاه نکا دو نوع واحد نیروگاهی دارد، نوع اول دو واحد مشابه گازی دارد که بنگاه در طول دورهٔ نمونه آنها را مورد استفاده قرار می‌دهد. واحدهای نوع اول دارای حداکثر ظرفیت ۱۴۰ مگاوات و حداقل عملکرد ۶۰ مگاوات می‌باشند. نوع دوم، چهار واحد مشابه دارد، که بنگاه A در طول دوره نمونه از آنها بهره‌برداری می‌کند. واحدهای‌این نیروگاه، دارای حداکثر ظرفیت ۴۴۰ مگاوات و حداقل عملکرد ۲۲۰ مگاوات می‌باشند. چون از لحاظ فیزیکی برای نیروگاه، عرضه انرژی‌ایمن در نرخ پایین‌تر از حداقل عملکرد واحد نیروگاهی غیرممکن است، شکل تابع زیر برای هزینه نهایی در نظر گرفته می‌شود:

$$C'_1(q,\beta_1) = \beta_{10} + \beta_{11}(q-60) + \beta_{12}(q-60)^2$$

$$C'_2(q,\beta_2) = \beta_{20} + \beta_{21}(q-220) + \beta_{22}(q-220)^2$$

برای تشکیل محدودیت‌های گشتاور نمونه که برای تابع هدف ضروری است،این شکل‌های تابعی در رابطه (۳) جایگذاری می‌شود. و برای حداقل شدن عبارت ذکر شده بردار پارامترهای زیر برآورد می‌گردد:

$$\beta = (\beta_{10}, \beta_{11}.\beta_{12}, \beta_{20}, \beta_{21}, \beta_{22})'$$

روش گشتاورهای تعمیم‌یافته[1]

این روش در واقع تعمیم‌یافته روش گشتاورها است که از گذشته در برآورد پارامترهای مدل‌های آماری از آن استفاده می‌شد. روش گشتاورهای تعمیم یافته، پارامترها را به‌گونه‌ای برآورد می‌کند که عبارت زیر حداقل شود:

$$J_T = m(\theta)'Wm(\theta)$$

دراین عبارت θ بردار $k\times1$ از پارامترهاست، $m(\theta)$ بردار $L\times1$ از شرایط متعامد بودن می‌باشد، و W یک ماتریس وزنی معین مثبت با بعد $L\times L$ می‌باشد.

اگر به تعداد شرایط گشتاوری، پارامتر وجود داشته باشد، پارامترهای برآورد شده منطبق بر یک رابطه نظری خواهند شد. این حالت را دقیقاً تشخیص‌پذیر گویند، در حالتی که شرایط گشتاوری بیشتر از پارامترها باشد همه محدودیت‌های گشتاوری برآورده نخواهند شد (بیش از حد تشخیص‌پذیر)، بنابراین ماتریس وزنی W اهمیت نسبی شرایط گشتاوری مختلف را تعیین می‌کند.هانسن[2] (در سال ۱۹۸۲)، خاطر نشان می‌کند که باید $W = S^{-1}$ باشد، S معکوس ماتریس واریانس- کوواریانس، ماتریس بهینه‌ای است که $\hat{\theta}$ را با کوچکترین واریانس مجانبی به‌دست می‌دهد.

به‌طور کلی، برای به‌دست آوردن ماتریس وزنی بهینه، تخمین بردار پارامترها مورد نیاز است، و به‌طور همزمان، برای تخمین پارامترها نیز ماتریس وزنی مورد نیاز می‌باشد. برای حل‌این وابستگی همزمان، تجربه رایج این است که ماتریس وزنی اولیه را ماتریس واحد در نظر می‌گیرند و سپس پارامترها را تخمین می‌زنند. با تخمین پارامترهای جدید ماتریس وزنی جدیدی محاسبه می‌شود، و سپس پارامترهای جدید با ماتریس وزنی جدیدتر تخمین زده می‌شود،این فرآیند تا همگرایی در ماتریس‌های وزنی ادامه می‌یابد.

1. Generalized Method of Moments
2. Hansen

$$W_0 = I \qquad (۱۴)$$

$$\hat{\theta}_1 = \arg\min \quad m(\theta)' W_0 m(\theta) \qquad (۱۵)$$

$$W_1 = f(\hat{\theta}_1) \qquad (۱۶)$$

$$\hat{\theta}_2 = \arg\min \quad m(\theta)' W_1 m(\theta) \qquad (۱۷)$$

بدین ترتیب فرآیند می‌تواند با محاسبه W_2 و سپس حداقل کردن عبارت درجه دوم، J_T، برای پیدا کردن $\hat{\theta}_3$ تکرار شود تا جایی که تغییرات در تابع هدف به اندازه کافی کوچک باشد. معمولاً بردار پارامترهای به‌دست آمده از تکرار تا مرحله n را با، $\hat{\theta}_n$، نشان می‌دهند. این روش، به عنوان روش گشتاورهای تعمیم‌یافته n مرحله‌ای، و یا روش گشتاورهای تعمیم‌یافته تکرار شونده معروف است. برنامه این قسمت با استفاده از نرم افزار Matlab نوشته شده است.[۱]

نتایج تخمین

همانطور که گفته شد بنگاه مورد نظر نیروگاه نکا بوده است که دو واحد گازی شبیه به هم و چهار واحد بخاری شبیه به هم دارد، بنابراین دراین تحقیق ضرایب تابع هزینه نهایی شش واحد نیروگاهی با استفاده از تکنیک تعمیم یافته گشتاورها برآورد شده است. ضرایب این واحدهای نیروگاهی با استفاده از هر دو ماتریس واحد و ماتریس وزنی بهینه برآورد شده است. در تخمین این ضرایب فرض شده است که $h = 1400$ هر چند که نتایج تخمین با تغییر مقدار h از ۱۰۰ ریال تا ۲۰۰۰ ریال به‌طور گسسته تغییر زیادی نمی‌کرد.

جدول ۱ در پیوست ۲، نتایج تخمین ضرایب تابع هزینه نهایی واحد گازی را، با استفاده از ماتریس واحد و ماتریس وزنی بهینه نشان می‌دهد. جدول ۲ نتایج تخمین ضرایب تابع هزینه نهایی واحد بخاری را نشان می‌دهد.

همانطورکه انتظار می‌رفت و طبق نتایج جدول ۱ و ۲، به نظر می‌رسد برآوردگر روش گشتاورهای تعمیم‌یافته با استفاده از تخمین سازگاری از ماتریس وزنی بهینه ضرایب، تابع هزینه نهایی را با دقت بیشتری نسبت به ماتریس واحد تخمین زده است.

۱. داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز این تحقیق به‌صورت ساعتی و مربوط به سال ۱۳۸۳ می‌باشد که از معاونت بازار برق و مرکز دیسپاچینگ شرکت مدیریت شبکه برق‌ایران گرفته شده است. همچنین در مورد اعتبارسنجی نتایج تحقیق جلسات متعددی با مسئولین مرکز دیسپاچینگ برگزار شده است.

مقدار بهینه تابع هدف که با استفاده از روش تعمیم یافته گشتاورها و با تخمین سازگاری از ماتریس وزنی بهینه به‌دست می‌آید، می‌تواند برای آزمون بیش از حد تشخیص‌پذیری محدودیت‌ها (معادلات) یا به عبارت دیگر معتبر کردن قیود مورد استفاده قرار گیرد. این آزمون در واقع خوبی برازش را نشان می‌دهد. برای انجام‌این آزمون فرضیه صفر به‌صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$\begin{cases} H_0 : L \succ K \\ H_1 : L \leq K \end{cases}$$

که در آن، L، تعداد معادلات و K، تعداد پارامترها می‌باشد. و فرضیه صفر بر معتبر بودن پارامترهای تخمین زده شده دلالت دارد.

با استفاده از نتایج‌هانسن (در سال ۱۹۸۲)، مقدار بهینه تابع هدف به‌طور مجانبی به‌صورت متغیر تصادفی چی- دو، $\chi^2(q-p)$، با درجه آزادی (تعداد پارامترها- تعداد معادلات) توزیع شده است. و تحت فرضیه صفر که همه محدودیت‌های گشتاور تحمیل شده برای تخمین پارامترها معتبر هستند. مقدار بهینه تابع هدف با استفاده از تخمین سازگار ماتریس وزنی بهینه ۰،۰۰۰۱۲۴ می‌باشد، که از ۰،۰۵ مقدار بحرانی متغیر تصادفی چی ـ دو ($\chi^2(18-6=12)=21.03$) با ۱۲ تا درجه آزادی کمتر است، همچنین مقدار آماره $J=n\times M=1.092$ نیز از ۵٪ مقدار بحرانی متغیر تصادفی چی ـ دو ($\chi^2(18-6=12)=21.03$) با ۱۲ تا درجه آزادی کوچکتر است.این بدین معنی است که فرضیه صفر مبنی بر معتبر بودن محدودیت‌های گشتاور که به‌صورت:

$$E_{\varepsilon}\left(\frac{\partial \Pi_d(\Theta_d,\varepsilon}{\partial P_{ijk}}\right)=0$$

داده شده است را، نمی‌توان توسط داده‌های پیشنهادی واقعی رد کرد. این آزمون فرضیه به‌توابع هزینه پارامتریک واحد نیروگاهی اشاره دارد، بیش از حد تشخیص‌پذیری محدودیت گشتاوری به‌این معنی است که فرض رفتاری حداکثرسازی سود انتظاری نیروگاه نکا را نمی‌توان رد کرد (یعنی نیروگاه نکا به‌طور بهینه عمل می‌کند).

نمودار۱ و ۲ در پیوست ۲، به‌ترتیب توابع هزینه نهایی برآورد شده واحد نیروگاهی گازی و بخاری را در سطح اطمینان ۹۸٪ و برای حالت سازگاری از ماتریس وزنی بهینه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سطح اطمینان ۹۸٪ منحنی‌های هزینه نهایی نسبتاً دقیق تخمین زده شده‌اند.

مهمترین اقلام هزینه متغیر نیروگاهها شامل هزینه سوخت، هزینه تصفیه آب (آب مقطر)، هزینه مواد شیمیایی، سن نیروگاه، هزینه روشن[1] و خاموش شدن[2] و هزینه ناشی از تغییر شرایط محیطی از قبیل تغییر رطوبت هوا و میزان درجه حرارت محیط می‌باشند. درایران با توجه به‌اینکه سوخت با قیمت یارانه‌ای به نیروگاهها پرداخت می‌شود، هزینه سوخت برای هر دو واحد گازی و بخاری تقریباً یکسان و ناچیز می‌باشد، ولی برای واحد گازی هزینه روشن و خاموش شدن و هزینه ناشی از تغییر شرایط آب و هوا بسیار بالاست.

از طرف دیگر واحدهای بخار فعال در بازار برق‌ایران، شدیداً به مواد شیمیایی حساس هستند به‌این معنی‌که با افزایش تولید، مصرف مواد شیمیایی آنها به‌شدت افزایش پیدا می‌کند[3]، از آنجا که مواد شیمیایی وارداتی است لذا هزینه آن خیلی بالاست و تولید برق بالا زمانی مقرون به صرفه است که قیمت بالایی داشته باشد. بنابراین برای نیروگاه نکا هزینه پایین نگه داشتن (در سطح حداقل تولید) واحد بخار، کمتر از هزینه خاموش کردن واحد گازی است. پس، بهتر است بهره‌بردار نیروگاه نکا ترجیح بدهد از واحد گازی به جای واحد بخار در مواقع کمبود تولید (در شرایطی که گازطبیعی به‌صورت یارانه‌ای به نیروگاهها فروخته می‌شود) استفاده کند، ولی واحد بخار در حداقل ظرفیت برق تولید کند. بنابراین هزینه روشن ـ خاموش شدن واحد گازی به دلیل تولید دایمی به صفر می‌رسد.

به نظر می‌رسد که ساختار هزینه واحدهای گازی و بخاری و نوع استراتژی تعیین قیمت نیروگاه نکا باتوجه به شرایط و مقررات بازار برق ایران باعث شده است تا هزینه متغیر واحد بخار برخلاف واقعیت بیشتر از واحد گازی باشد. واین حقایق با نتایج مدل سازگاری دارد چون شیب تابع هزینه نهایی واحد بخار بیشتر از واحد گازی بوده و در کل عرض از مبدا منحنی هم بزرگتر است. چنانچه گازطبیعی با قیمت واقعی و آزاد به نیروگاهها تحویل شود، به نظر می‌رسد که به نتایج معکوسی برسیم. بدین صورت که هزینه متغیر واحد گازی دارای شیب بیشتری نسبت به واحد بخار بشود. آزاد شدن قیمت گازطبیعی باعث می‌شود که نیروگاههای با راندمان بالاتر دارای توجیه اقتصادی بالاتری باشند چون مسئله تبدیل انرژی به دلیل بالا بودن قیمت گازطبیعی معنی‌دار خواهد بود.

1. Start Up
2. Shut Down
۳. مواد شیمیایی به منظور رسوب‌زدایی لوله‌های داخل بویلر در واحدهای بخار، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کاربرد نتایج

از این نتایج در واحد نظارت بازار استفاده‌های زیادی می‌شود، شاید آشکارترین آن تخمین میزان سود متغیر واحد موردنظر در طول دوره موردنظر باشد، به‌طور مثال اینکه آیا سود متغیر به‌دست آمده توسط واحد موردنظر در طول این دوره برای جبران سرمایه کافی است یا خیر؟ این محاسبه باید واحد به واحد برای رتبه‌بندی درجه کارایی بین واحدهای نیروگاهی صورت گیرد. همچنین یکی از بحث‌های مهم بین سیاستگذاران و سرمایه‌گذاران این است که برای مالکان واحد تولید به منظور به‌دست‌آوردن بازدهی مناسب روی میزان سرمایه به کار گرفته شده برای هر امکانات تولیدی جهش‌های قیمتی مورد نیاز است، این بحث به‌ویژه در مورد واحدهایی که تنها در طول دوره پیک(اوج بار) انرژی عرضه می‌کنند بیشتر مورد بحث است.

یکی از کاربردهای مهم دیگر تخمین هزینه نهایی‌که خاص بازار برق ایران می‌باشد این است که اگر به هردلیلی، چه محدودیت شبکه و چه محدودیت تولید، مرکز دیسپاچینگ تصمیم بگیرد که به جای یک واحد خاص، واحد دیگری برق تولید کند به واحدی که برق تولید نکرده است چقدر باید پرداخت شود، چون بهترین حالت این است که به اندازه هزینه نهایی‌اش دریافت کند. بنابراین با معلوم بودن هزینه نهایی میزان این خسارت نیز مشخص می‌شود.

از طرف دیگر تخمین هزینه نهایی برای کاهش دوره اشباع نیز مفید خواهد بود، به دوره زمانی از تاریخی که کثرت نرخ پیشنهادی انرژی تولیدی فروشندگان به حدود تعیین شده برای سقف دامنه مجاز پیشنهاد نرخ انرژی در رویه مصوب هیات تنظیم بازار برق برسد، تا تاریخ اعلام سقف دامنه مجاز پیشنهاد نرخ انرژی جدید یا تایید سقف مصوب قبلی توسط دستگاه ذیصلاح، دوره اشباع گفته می‌شود. و بالاخره یکی از مهمترین کاربردهای تخمین هزینه نهایی در بازار برق که برای واحد نظارت بازار مفید خواهد بود، این است که از هزینه نهایی در اندازه‌گیری میزان قدرت بازار واحد موردنظر در بازار عمده‌فروشی استفاده می‌شود.

نتیجه‌گیری

مهمترین نتیجه تحقیق با توجه به منحنی‌های هزینه نهایی واحد گازی و بخاری‌این است که اگر مدیر یا بهره‌بردار نیروگاه نکا عقلایی رفتار کند، برای واحد گازی احتمالاً به گونه‌ای قیمت می‌دهد که یا اصلاً پذیرفته نشود و در نتیجه تولید نکند و یا اگر پذیرفته شود در حد

ظرفیت واحد تولید کند. برعکس برای واحدهای بخاری طوری قیمت می‌دهد (بالاترین قیمت ممکن را) که همیشه در مدار باشد و در حداقل ظرفیت تولید کند. همچنین اینکه بهره‌بردار نیروگاه نکا واحد گازی را با شدت بیشتری نسبت به واحد بخار مورد استفاده قرار می‌دهد.

نتیجه دیگری که ازاین تحقیق گرفته می‌شود این است که، در همه موارد منحنی‌های هزینه نهایی مقعر و افزایشی می‌باشد، یک دلیل بالقوه برای شکل منحنی‌های هزینه نهایی به‌دست آمده، نتیجه بحث با مدیران ارشد و مسئولین بازار برق ایران می‌باشد، مسئولان و مدیران در بازار عمده‌فروشی ادعا می‌کنند که مالکان واحد نیروگاهی طوری رفتار می‌کنند که گویی منحنی هزینه نهایی‌شان شبیه نمودار ۱ و ۲ در پیوست ۲ است. چون هنگا می‌که آنها مقدار قابل توجهی قرارداد سلف منعقد می‌کنند، خودشان را در مقابل ریسک خاموشی‌های واحد پوشش می‌دهند (در بازار برق ایران این ریسک مشابه جریمه آزمون ناموفقیت ظرفیت می‌باشد، اگر واحد موردنظر در صورت دستور مرکز دیسپاچینگ، نتواند به اندازه ظرفیت ابراز شده تولید کند به اندازه ۲۰ برابر قیمت پیشنهادی جریمه می‌شود). از آنجا که از دست دادن واحد نیروگاهی در زمان واقعی با ریسک مالی بزرگی همراه است و آنها توانایی آوردن سریع واحد دیگر در همان زمان برای رفع این مشکل را ندارند، بنابراین مالکان واحد تولیدی، هزینه فرصت بزرگ و افزایشی را برای ۱/۳ آخر از ۱/۴ ظرفیت هر واحد نیروگاهی را در نظر می‌گیرند. به همین منظور آنها ظرفیت بلا استفاده کافی را روی همه واحدهایشان در ساعت‌هایی که منجر به پیک (اوج مصرف) روزانه می‌شوند، باقی خواهند گذاشت. بدین ترتیب نگران روزهایی که یکی از واحدهایشان اجباراً بی‌استفاده شود، نخواهند بود.

به نظر می‌رسد که، این تمایل مالکان واحدهای نیروگاهی برای استفاده از سایر واحدها به عنوان پوشش فیزیکی در برابر احتمال خاموشی اجباری، توضیح معقولی برای شکل تابعی هزینه نهایی است که دراین مقاله برآورد شده است.

نتایج این مقاله بیان می‌کند که برای بنگاه مورد نظر (نیروگاه نکا) بهتر است واحدهایش را طوری مورد بهره‌برداری قرار دهد که واحد بخاری در حداقل ظرفیت تولید کند و اگر بداند که مشمول کد UL[1] یا اوج بار می‌شود، بیشترین قیمت ممکن را پیشنهاد

۱. کد UL(Unit Limit) به این معنی است که واحد موردنظر را به دلیل محدودیت فنی آن واحد (حداقل توان تولیدی، حداقل ساعت در مدار بودن و حداقل انرژی روزانه) نمی‌توان از مدار خارج کرد.

بدهد. در غیراین صورت طوری پیشنهاد قیمت بدهد که از ۹۰٪ پایین‌ترین قیمت پذیرفته شده بازار بیشتر دریافت کند. از طرف دیگر واحد گازی باید مداوم کار کند و در حد ماکزیمم ظرفیت برق تولید نماید، بنابراین باید قیمت پایینی را پیشنهاد بدهد تا در مناقصه برنده شود. همچنین از واحد گازی برای جبران تولید واحد بخار در مواقعی استفاده کند که آزمون ظرفیت برای واحد بخاری ناموفق است.

منابع

1. Hjalmarsson, E. (2000) "A Power Market without Market Power". Working Paper in Economics no 28, Department of Economics, Goteborg University.

2. Dennis W. Carlton, Jeffrey M. Perloff, (1999) "Modern Industrial Organization". 3rd Ed, New York: Addison-Wesley.

3. Rosse, (1970) "Estimating Cost Function Parameters without Using Cost Data: Illustrated Methodology," Econometrica, 38(2), 256-275.

4. Porter, (1983) "A Study of Cartel Stability: The Joint Executive Committee, 1880-1886, Bell Journal of Economics, 14(2), 301-314.

5. Bresnahan, (1981) "Competition and Collusion in the American Automobile Market: The 1955 Price War," Journal of Industrial Economics, 45(4), 457-482.

6. Berry, Levinsohn, and Pakes, (1995) "Automobile Price in Market Equilibrium, Econometria, 63(4), 841-890.

7. Goldberg, (1995) "Product Differentiation and Oligopoly in International Markets: The Case of the US Automobile Industry," Econometrica, 63(4), 891-952.

8. Wolak, Frank A. (2001) "Identification and Estimation of Cost Functions Using Observed Bid Data: An Application to Electricity Markets," Available from http://www.stanford.edu/~wolak).

9. Cliff, Michael T. (2003) "GMM and MINZ Program Libraries for MATLAB, Available from http://www.mcliff.cob.vt.edu.

پیوست ۱

کاربرد این روش برآورد، نیازمند محاسبه مقادیر مشتقات جزئی $\mathrm{SA_{ij}}(P,\Theta)$ نسبت به P و P_{ijk} و مشتق جزئی $P_i(\varepsilon_i,\Theta)$ نسبت به P_{ijk} است. $\mathrm{SA_{ijh}}(P,\Theta)$ را، که در آن $h=366\times24=8784$، به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$SA_{ij}^{h}(P,\Theta)=\sum_{k=1}^{10}q_{ikj}\,\Phi((P-P_{lj})/h) \qquad (۷)$$

که به طور ضمنی برابر است با:

$$SA_{i}^{h}(P,\Theta)=\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{10}q_{ikj}\,\Phi((P-P_{kj})/h) \qquad (۸)$$

با استفاده ازاین تعریف، مشتقات جزئی زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial SA_{ij}}{\partial P_i}=\frac{1}{h}\sum_{k=1}^{10}q_{ikj}\;\varphi\,((P-P_{lj})\;/\;h) \qquad (۹)$$

$$\frac{\partial S\,A_{ij}}{\partial Pkj}=-\frac{1}{h}q_{ikj}\;\;\varphi((P-P_{kj})\;/\;h) \qquad (۱۰)$$

آخرین مشتق جزئی در رابطه (۳)، نیازمند کاربرد قضیه تابع ضمنی برای معادله $\mathrm{DR(P,}\varepsilon_i\mathrm{)\text{-}SA_i(P,\Theta)}$ می‌باشد، که عبارت زیر را به‌دست می‌دهد:

$$\frac{\partial P_i}{\partial P_{kj}}=\frac{\dfrac{\partial SA_i(P_i(\varepsilon_i,\Theta),\Theta)}{\partial P_{kj}}}{DR'_i\,(P_i(\varepsilon_i,\Theta),\varepsilon_i)-SA'_i\,(P_i(\varepsilon_i,\Theta),\Theta)} \qquad (۱۱)$$

روشهای مختلفی برای محاسبه $DR'(p^E,\varepsilon)$ وجود دارند که نتایج به‌دست‌آمده ازاین تکنیک‌ها یکسان می‌باشد. ولاک (در سال ۲۰۰۲)، $DR'(p^E,\varepsilon)$ را به‌وسیله رابطه $(DR(p^E+\delta,\varepsilon)-DR(p^E,\varepsilon))/\delta$ برآورد کرده است، مقدار δ بین ده سنت و یک دلار استرالیا است، ولاک در همان سال در روش دیگری تابع تقاضای پسماند را بوسیله رابطه زیر برآورد کرده است:

$$DR(p,\varepsilon)=Q_d(\varepsilon)-SO_h(p,\varepsilon) \qquad (۱۲)$$

که تابع عرضه کل پیشنهادی سایر پیشنهاددهندگان در کنار بنگاه A مساوی است با:

$$So_h(P,\varepsilon)=\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{10} qo_{nk}\ \ \Phi((P-Po_{nk})/h) \qquad (۱۳)$$

که در آن:

qo_{nk}، k امین پله پیشنهادی واحد n و

Po_{nk}، قیمت پیشنهادی برای پله Kام و واحد n می‌باشد.

N تعداد کل واحدهای موجود در بازار به جز واحدهای بنگاه A می‌باشد. تابع $\Phi(t)$ تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد است و h پارامتر هموارسازی است، که مورد استفاده قرار گرفته است.این پارامتر، گوشه‌های تابع عرضه پیشنهادی کل سایر پیشنهاددهندگان در کنار بنگاه A را هموار می‌کند. مقادیر کوچک، h، مقدار $DR'(p^E,\varepsilon)$ را کمتر هموار می‌کند. روش دوم ولاک به دلیل ساده بودن تعدیل درجه هموارسازی سازگارتر است که دراین مقاله روش دوم مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده ازاین روش نتیجه زیر به‌دست می‌آید:

$$DR'_h(P,\varepsilon)=-\frac{1}{h}\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{10} qo_{nk}\,\varphi((P-Po_{nk})/h) \qquad (۱۴)$$

که در آن، $\varphi(t)$، تابع چگالی نرمال استاندارد است. با محاسبه $DR'(p^E,\varepsilon)$، می‌توان $C'(DR(p^E,\varepsilon))$، را با استفاده از معادله (۴) برای هر قیمت تسویه‌کننده بازاری محاسبه کرد. بنابراین با مشخص بودن مشتق منحنی تقاضای پسماند نسبت به قیمت در عبارت (۱۰)، با استفاده از معادله (۱۳) و سایر مشتقات جزئی که در معادلات (۹) و (۸) نشان داده شده‌اند و معین بودن، قیمت و مقادیر پیشنهادی و تسویه‌کننده بازار برای همه شرکت‌کنندگان بازار، معادله (۳) قابل محاسبه است. تنها باید مقدار h برای هموار کردن تابع تقاضای پسماند و توابع پیشنهاد بنگاه A (نیروگاه نکا) انتخاب شود.

پیوست ۲

جدول ۱. نتایج تخمین ضرایب تابع هزینه نهایی واحد گازی

نام متغیر	واحد گازی					
	ماتریس واحد			ماتریس وزنی بهینه		
	ضرایب	انحراف معیار	آماره t-student	ضرایب	انحراف معیار	آماره t-student
عرض از مبدأ	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۲۹۶	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۰۶۸	۱۴/۷۸
$(q-60)$	۰/۰۰۱۳۴	۰/۰۰۰۰۲	۴۷/۲	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۱۳۲۰۴	۲/۴۵
$(q-60)^2$	۰/۱۵۸۷۸	۰/۰۰۰۰۰۰۹	۱۶۳۸۷۰	۰/۰۳۸۳۱	۰/۰۰۰۹۸۵۶۰	۳۸/۸۷

توجه : تمام ضرایب برای حالت ماتریس وزنی بهینه در سطح اطمینان ۹۸درصد معنی‌دار هستند. مقدار آماره t در سطح اطمینان ۹۸درصد برابر ۲،۳۲۶ می باشد.

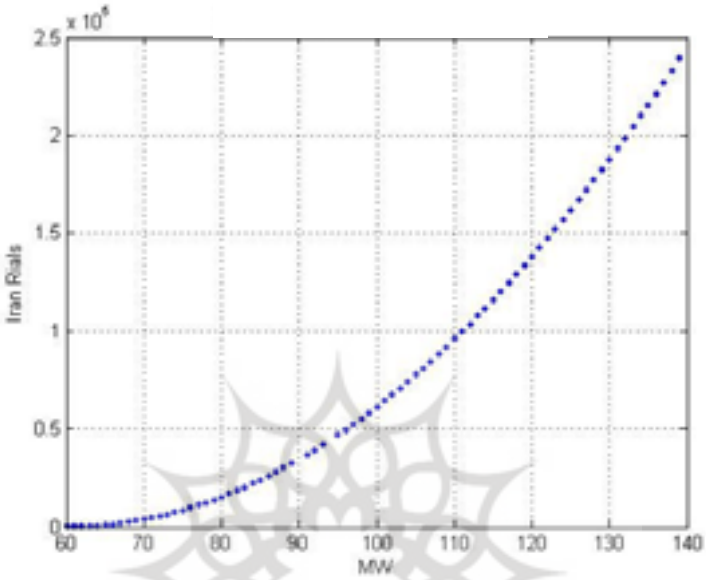
جدول ۲. نتایج تخمین ضرایب تابع هزینه نهایی واحد بخاری

نام متغیر	واحد بخاری					
	ماتریس واحد			ماتریس وزنی بهینه		
	ضرایب	انحراف معیار	آماره t-student	ضرایب	انحراف معیار	آماره t-student
عرض از مبدأ	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۲۹۶۸	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۰۶۷	۱۵/۰۱
$(q-220)$	۰/۰۰۶۸۰	۰/۰۰۰۰۰۹۳	۷۲۸/۱۱	۰/۰۰۱۶۳	۰/۰۰۰۲۰۳۶۰	۸/۰۵
$(q-220)^2$	۱/۴۵۲۷۹	۰/۰۰۰۰۰۰۱	۱۱۴۴۷۵۴۳/۲۳	۰/۳۵۰۴۸	۰/۰۰۰۵۸۶۸۴	۵۹۷/۲۳

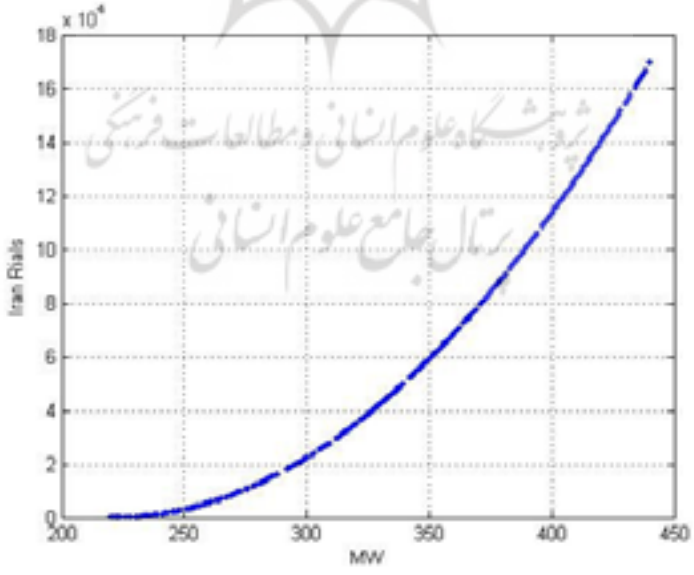
توجه: تمام ضرایب برای حالت ماتریس وزنی بهینه در سطح اطمینان ۹۸درصد معنی‌دار هستند. مقدار آماره t در سطح اطمینان ۹۸٪ برابر ۲،۳۲۶ می‌باشد.

پرتال جامع علوم انسانی

نمودار ۱. منحنی هزینه نهایی واحد گازی



نمودار ۲. منحنی هزینه نهایی واحد بخاری



پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی