

۱- مقدمه

تعمیرات و مراجع [۱۶ تا ۲۰] ریسک و عدم قطعیت را در تحلیل رفتار راهبردی بازیگران بازار برق مورد توجه قرار داده‌اند. این مقاله در پی ارائه رویکردی نوین برای تحلیل بازی راهبردی فروشنده‌گان (تولیدکنندگان) برق در بازی برتراند است و در مقایسه با منابع و مأخذ موجود، دارای مزایایی به شرح ذیل می‌باشد:

(۱) در رویکرد پیشنهادی، با تشکیل یک فضای جستجوی ماتریسی، نقطه (نقاط) تعادل نش بازار برق، مستقیماً از روش متداول و شناخته شده‌ای تعیین می‌گردد که در مباحث کلاسیک نظریه بازی مطرح می‌شود. هر درایه از ماتریس مذکور، یک زوج مرتب است که مقادیر سود حاصل از مشارکت شرکت‌های تولید در بازار انرژی الکتریکی - در ازای اتخاذ راهبردهای متاظر با سطر و ستون همان درایه - در آن ذخیره می‌شود. لازم به ذکر است که تا پیش از این، تصور رایج در اکثر مراجع و مأخذ این بوده که چون متغیرهای راهبردی فروشنده‌گان برق از نوع پیوسته هستند، لذا استفاده از فضای ماتریسی (که ماهیت گسسته دارد) برای تعیین نقطه تعادل نش بازار برق موضوعیت ندارد و به همین دلیل، راه حل‌های پیشنهادی آنها عمدتاً بر اساس برنامه-ریزی ریاضی یا روش‌های جستجوی مبتنی بر تکرار بوده است که تعیین نقطه (نقاط) تعادل نش را تضمین نمی‌کنند [۲۱]. این در حالی است که با تغییر پله‌ای (گام به گام) مقدار متغیرهای راهبردی پیوسته می‌توان یک فضای جستجوی ماتریسی برای تعیین مطمئن نقطه (نقاط) تعادل نش ایجاد کرد.

(۲) الگوریتم ارائه شده برای هر دو روش تسویه متداول در بازارهای برق (تسویه یکنواخت یا تمایزی) قابل استفاده است.

(۳) مدل پیشنهادی روی سیستم آزمون استاندارد و معتبر روی-بیلینتون (RBTS)^{۱۱} شیوه‌سازی شده و نتایج حاصله به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در بسیاری از مقالات مرتبط، از سیستم‌های آزمون بسیار کوچک یا غیراستاندارد برای ارائه مثال‌های عددی استفاده شده است [۲۲]. ساختار مقاله حاضر به‌این ترتیب است: پس از مقدمه، در بخش دوم، مفاهیم نظریه بازی و روش‌شناسی تعیین نقطه تعادل نش ارائه می‌گردد. بخش سوم به معرفی اجمالی بازار رقابتی برق اختصاص دارد. رویکرد پیشنهادی در بخش چهارم و مطالعات موردي در بخش پنجم ارائه می‌شوند. بخش ششم به بحث و نتیجه‌گیری می‌پردازد و در انتها، فهرست مراجع و منابع آورده می‌شود.

طی سده گذشته، صنعت برق بیشتر کشورها به صورت انحصاری در اختیار نهادهای دولتی قرار داشته اما حدود دو دهه است که این ساختار سنتی در حال دگرگونی است. خصوصی‌سازی و تغییر مقررات حاکم بر این صنعت موجب تأکید فزاینده بر بهره-وری و ظهور بازارهای رقابتی برای خرید و فروش انرژی الکتریکی شده است. در ساختار رقابتی جدید، شرکت‌های تولید نیرو برای فروش برق با یکدیگر رقابت می‌کنند و طبق قواعد بازار آزاد، آنهایی در این رقابت برنده می‌شوند که قیمت‌های پائین‌تری پیشنهاد کنند [۱ تا ۳]. به‌این ترتیب، شرکت‌های مذکور در گیر یک بازی اقتصادی هستند که در آن، هر بازیگر در پی کسب حداقل سود است. در این عرصه، سود و زیان هر بازیگر تنها تابع تصمیمات وی نیست و به راهبردهای اتخاذ شده توسط رقبا نیز بستگی دارد. باید توجه داشت که بازار برق مثل بازار بسیاری از کالاها و خدمات، بازاری با رقابت کامل^۴ (که در آن تولیدکنندگان بی‌شماری با هم رقابت کنند) نیست، بلکه دارای رقابت ناقص^۵ است که در آن، راهبرد هر فروشنده برای مشارکت در بازار، برآیند یک بازی است که «بازی انحصار چندجانبه» در گفته می‌شود. در متون تخصصی مرتبط، دو مدل برای این بازی بیان شده که عبارتند از مدل کورنو^۶ (یا بازی مقادیر)، مدل برتراند^۷ (یا بازی قیمت‌ها) [۴ تا ۶] و مدل تعادل تابع عرضه^۹ (SFE). در مدل کورنو، فرض می‌شود که متغیر راهبردی در تابع سود هر بازیگر، مقدار تولید وی می‌باشد و بازیگران تلاش می‌کنند تا تنظیم قابلیت تولید خود و ارائه آن به بازار به حداقل سود دست یابند، ولی این فرض، با شرایط واقعی اکثر بازارهای برق سازگار نیست زیرا در آنها، تولیدکنندگان به‌طور همزمان، قیمت فروش خود را به بازار ارائه می‌کنند و میزان تولید آنها - با توجه به قیمت ارائه شده - توسط متولی بازار تعیین می‌شود [۲ و ۷]. به عبارت دیگر، متغیر راهبردی در تصمیم‌گیری تولیدکنندگان برق، قیمت فروش است.

تاکنون، مقالات متعددی درباره کاربردهای نظریه بازی در بازار رقابتی برق ارائه شده است [۷ تا ۲۰]. مرجع [۸] به مقایسه رفتار فروشنده‌گان در بازارهای تسویه یکسان و تمایزی پرداخته است. در مرجع [۹]، تعادل نش در بازار برق با «قراردادهای دوچانبه»^{۱۰} بین فروشنده‌گان و خریداران مورد مطالعه قرار گفته است. همچنین برخی مقالات به کاربرد روش‌های مختلف بهینه-سازی در تعیین راهبرد مشارکت تولیدکنندگان در بازار برق توجه کرده‌اند [۱۰ تا ۱۳]. مراجع [۱۴ و ۱۵] برنامه‌ریزی

۲- نظریه بازی

تصمیم توجه داشت. نظریه تصمیم به مطالعه حالاتی می‌پردازد که در آنها، تصمیم‌گیری بدون توجه به واکنش رقبا انجام می‌گیرد ولی در نظریه بازی، واکنش رقبا نیز در محاسبات بازیگر لحاظ می‌شود. به طور کلی، نظریه بازی کاربرد زیادی در علوم اجتماعی، اقتصاد، علوم سیاسی و روابط بین‌الملل دارد. این نظریه، یکی از حوزه‌های ریاضیات کاربردی است که در بستر علم اقتصاد توسعه یافته است.

بازی‌ها را می‌توان به دو دسته ایستا و پویا تقسیم کرد. در بازی‌های پویا، حرکات بازیگران به صورت متوالی است (مثل شطرنج) و بنابراین، بازیگران از تصمیمات رقبا اطلاع می‌یابند. اما در بازی‌های ایستا، حرکات بازیگران به صورت هم‌زمان انجام می‌شود و بنابراین، هیچ بازیگری از تصمیم رقبای خود مطلع نیست (مثل مزایده یا مناقصه). البته لازم به ذکر است که هم‌زمانی حرکات بازیگران، شرط لازم برای بازی ایستا نیست اما عدم اطلاع آنها از تصمیمات رقبا الزاماً است. از جمله بازی‌های ایستا می‌توان به مزایده اشاره کرد که در آن، مزایده‌گذار می‌خواهد کالایی را به فروش برساند. بنابراین، از داوطلبین خرید دعوت می‌کند که قیمت پیشنهادی خود را در پاکتی مهره‌مومشده به وی تحويل دهند. در اینجا، هیچ بازیگری از قیمت پیشنهادی رقبا اطلاع ندارد و بنابراین، بین آنها یک بازی ایستا در جریان است. به همین ترتیب، مناقصه نیز نوعی بازی ایستا محسوب می‌گردد.

یکی از روش‌های مهم نمایش بازی‌ها، مدل ماتریسی است که در آن، راهبردهای بازیگران و پیامدهای بازی به این صورت نشان داده می‌شوند: (۱) ستون‌های ماتریس نشان‌دهنده راهبردهای بازیگر اول هستند، (۲) سطرهای (دیف‌های) ماتریس نشان‌دهنده راهبردهای بازیگر دوم می‌باشد و (۳) عناصر (درایه‌های) ماتریس بیان‌گر پیامدهای بازی هستند. هر عنصر یک زوج مرتب است یعنی شامل دو عدد است که اولین هر کدام مبین سود یا زیان یکی از بازیگران هستند.

تا کنون روش‌های مختلفی برای تحلیل بازی‌ها ارائه شده‌اند که یکی از مهم‌ترین آنها، روش موسوم به تعادل نش است. در نظریه بازی فرض بر این است که بازیگران رفتار عاقلانه‌ای دارند یعنی راهبرد انتخابی آنها در راستای منافع‌شان است. اگر امکان هیچ‌گونه تبادل نظری بین بازیگران وجود نداشته باشد، یعنی آنها از راهبردهای یکدیگر بی‌اطلاع باشند، هر بازیگر سعی می‌کند تا بینشی درخصوص تصمیمات احتمالی رقبا به دست آورد. «تعادل نش» موقعی است که (۱) هر بازیگر با توجه به بینشی که نسبت به تصمیم حریف دارد، راهبردی را انتخاب کند که مطلوب‌ترین پیامد را عاید وی می‌کند و (۲) بینش بازیگر صحیح باشد، یعنی

امروزه، با توجه به گسترش بازارها و اهمیت رقابت در صنایع مختلف، سازمان‌ها نیازمند درکی صحیح از جایگاه نسبی خود در مقایسه با رقبا می‌باشند تا از آن طریق بتوانند راهبردهای مناسبی با در نظر گرفتن تصمیمات رقبا اتخاذ کنند. اگر به زندگی روزمره انسانها دقت کنیم، متوجه خواهیم شد که انسان در هر لحظه در شرایط بازی قرار دارد و از آن جمله می‌توان به بازی فرزندان با والدین، فرد با دوستان و دشمنان و بالاخره کارگر با کارفرما اشاره کرد.

اولین کسی که نظریه بازی را مورد بحث قرار داد، جیمز والدگراو^{۱۲} بود که در سال ۱۷۱۳ به این موضوع پرداخت. جان وان نیومن^{۱۳} فیزیکدانی بود که با ارائه یک سری از مقالات در سال ۱۹۲۸، نظریه بازی را به عنوان یک شاخه مستقل معرفی کرد. در دهه ۱۹۵۰، جان نش^{۱۴} برنده جایزه نوبل اقتصاد، روش موسوم به تعادل نش را برای تحلیل بازی‌ها ارائه کرد که پیشرفتی انقلابی در این حوزه به شمار می‌رود. توماس شلینگ^{۱۵} یک سری از مسائل عرصه سیاست را در قالب مدل بازی نشان داد [۴ تا ۶].

در نظریه بازی به فرد مهارت‌هایی آموخته می‌شود که به وی کمک می‌کند تا در شرایط تعاملی خود با دیگران، تحریه و تخصص خود را ارتقاء بخشیده و به چگونگی رفتار با دیگران واقف شود. امروزه برای موفقیت بیشتر در امر تجارت، روابط بین‌الملل، جنگ و صلح و غیره ناگزیر به فرآگیری نظریه بازی می‌باشیم. بازی عبارت است از روابط متقابلی که در آن بین تصمیم دو یا چند بازیگر وابستگی وجود داشته باشد. به بیان دیگر، هرگاه مطلوبیت، سود، درآمد، رفاه و هرآنچه که فرد بازیگر به دنبال آن است، نه تنها متأثر از تصمیم خود او باشد، بلکه تحت تأثیر (ثبت یا منفی) تصمیم رقبا نیز باشد، بازی نامیده می‌شود. هر کدام از تصمیم‌گیران در محیط بازی را بازیگر می‌نامند. در شرایط بازی، بازیگر باید قبل از تصمیم‌گیری، واکنش دیگران را نسبت به تصمیم خود تحلیل کند و سپس، تصمیمی اتخاذ کند که وی را به بهترین نتیجه می‌رساند. در یک بازی، به آنچه که در انتهای یک بازی عاید بازیگران می‌گردد (سود یا زیان)، پیامد^{۱۶} بازی گفته می‌شود. راهبرد یک بازیگر نشان‌گر مهارت وی برای خوب بازی کردن است. نظریه بازی علمی است که به مطالعه تصمیم‌گیری بازیگران در شرایط تعامل با دیگران می‌پردازد یعنی در شرایطی که واکنش رقبا هم در انتخاب راهبرد مدنظر قرار می‌گیرد. در اینجا باید به تفاوت نظریه بازی و نظریه



نیز قیمت‌های پیشنهادی خود را به این مرجع ارائه می‌کنند. به همین ترتیب، خریداران عمدۀ هم میزان انرژی مورد نیاز و قیمت‌های پیشنهادی خود را اعلام می‌نمایند. خریداران مذکور عبارتند از: (۱) بنگاههای خردۀ فروش برق و (۲) بعضی از مصرف‌کنندگان عمدۀ (مثلًاً صنایع بزرگی که ترجیح می‌دهند به جای خرید برق از شرکت‌های توزیع یا بنگاههای خردۀ فروش، به طور مستقیم در بازار شرکت کنند). حضور و مشارکت تولیدکنندگان برق در بازار ممکن است به صورت اختیاری یا اجباری باشد. متولی بازار، پس از بررسی قیمت‌های پیشنهادی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی شبکه برق، فهرست فروشنده‌گان و خریداران برنده و بازنده، وضعیت تولید و دریافت انرژی آنها و همین‌طور وضعیت مبادلات مالی بازار را اعلام می‌کند. ساز و کار بازار باید منصفانه و برای همه طرفهای ذینفع شفاف باشد. این الگو، ابتدا به صورت اختیاری در بریتانیا اجرا گردید و سپس سایر کشورها از آن تبعیت کردند. در این جا ذکر این نکته ضروری است که در بازار اشتراکی، معمولاً مبادلات کوتاه‌مدت (ساعت به ساعت) انرژی الکتریکی مورد توجه قرار می‌گیرد [۱ تا ۳].

در بازارهای انرژی الکتریکی، اساساً دو روش برای تنظیم مبادلات مالی (یا اصطلاحاً تسویه بازار) مورد توجه قرار می‌گیرد: (۱) تسویه یکنواخت (بر اساس قیمت تسویه بازار^{۱۸}) و (۲) تسویه تمایزی (بر اساس قیمت‌های پیشنهادی فروشنده‌گان^{۱۹}). در تسویه یکنواخت، بهای پرداختی به همه تولیدکنندگان و همین‌طور بهای دریافتی از همه مصرف‌کنندگان در هر ساعت بر اساس قیمت یکسانی ($\$/MWhr$) محاسبه می‌شود که برابر با قیمت پیشنهادی گران‌ترین فروشندۀ یا ارزان‌ترین خریدار پذیرفته شده در معاملات بازار در آن ساعت است. به عبارت دیگر، قیمت تسویه بازار در هر ساعت از تلاقی مشخصه‌های عرضه و تقاضا در آن ساعت به دست می‌آید و سپس در صورت لزوم (برای انتباخ با شرایط فنی سیستم) توسط بهره‌بردار مستقل سیستم تصحیح می‌شود. به این نقطه تلاقی اصطلاحاً «نقطه تعادل بازار» گفته می‌شود (شکل ۱).

همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، منحنی‌های عرضه و تقاضا به صورت پلکانی هستند زیرا در اکثر بازارها، از فروشنده‌گان و خریداران برق خواسته می‌شود که پیشنهادات^{۲۰} خود را به صورت پلکانی (تعداد پله‌ها به قوانین بازار مربوطه بستگی دارد) در اختیار متولی بازار قرار دهند. بر این اساس، نیروگاهها ابتدا منحنی هزینه سهمی‌شکل خود را به منحنی هزینه افزایشی پلکانی تبدیل کرده (شکل ۲) و سپس با ضرب مقادیر حاصل در

رقبه‌ی همان راهبردی را انتخاب کند که او پیش‌بینی کرده است. در این صورت، راهبردی که بازیگران با این روش انتخاب می‌کنند معرف نقطه تعادل نش است. یک راه ساده تعیین نقطه تعادل نش به این صورت است که ابتدا، هر کدام از راهبردهای یک بازیگر را ثابت در نظر گرفته و بهترین پاسخ حریف را برای آن به دست می‌آوریم. سپس، هر کدام از راهبردهای رقبه را ثابت در نظر گرفته و بهترین پاسخ بازیگر را برای آنها پیدا می‌کنیم. نقطه تعادل نش جایی است که بهترین پاسخ مقابل بازیگران را نشان دهد. برای مثال، دو شرکت خودروساز A و B را در نظر بگیرید که برای کسب حداکثر سود با هم رقابت می‌کنند و می‌خواهند در مورد تجهیز یا عدم تجهیز خودروهایشان به سیستم دوگانه‌سوز تصمیم‌گیری کنند. فرض کنید ارقام سود سالیانه حاصل از فروش محصولات این دو شرکت در صورت اتخاذ هر کدام از راهبردها مطابق جدول ۱ قابل پیش‌بینی باشد.

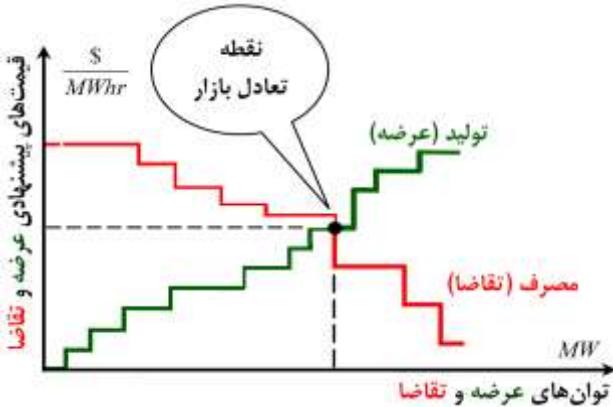
جدول (۱): سود سالیانه ($\$ \times 10^5$) دو شرکت خودروساز رقبه

شرکت B	عدم نصب		نصب
	۴ و ۳	۵ و ۳	
عدم نصب	۳ و ۵	۲ و ۲	

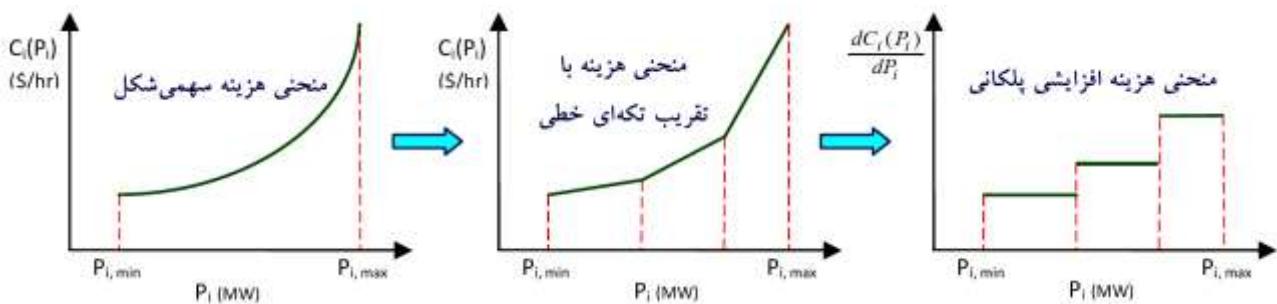
در جدول فوق، اولین عدد از سمت راست میزان فروش خودروهای شرکت A و دومین عدد، میزان فروش شرکت B در سال آینده می‌باشد. برای تعیین نقطه تعادل نش در این بازی به این صورت عمل می‌کنیم: اگر شرکت A تصمیم بگیرد که سیستم را نصب کند، آنگاه بهترین پاسخ شرکت B به تصمیم اوی، نصب سیستم خواهد بود. زیرا در حالت نصب سیستم، شرکت B سود بیشتری نسبت به عدم نصب سیستم خواهد داشت. حال باید دید که آیا عکس حالت فوق برقرار است یا خیر. اگر شرکت B تصمیم به نصب سیستم بگیرد، بهترین پاسخ شرکت A برای داشتن فروش بیشتر، نصب سیستم خواهد بود. لذا طبق قاعده تعادل نش، گزینه نصب سیستم، بهترین پیامد را برای هر دو شرکت رقیب خواهد داشت و بیان‌گر تعادل نش می‌باشدند.

۳- بازار رقابتی برق

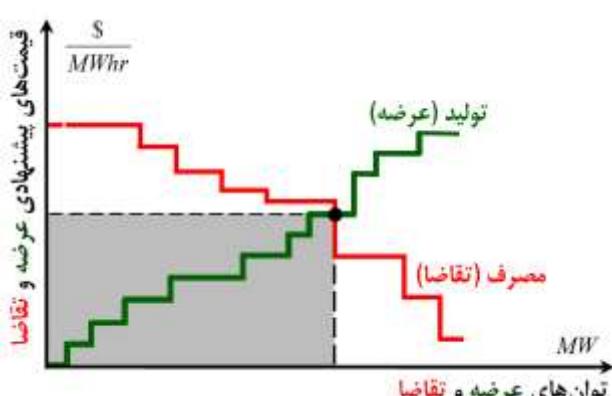
امروزه، یکی از متدائل‌ترین مدل‌های بازار رقابتی خرید و فروش انرژی الکتریکی، بازار اشتراکی^{۱۷} است که در آن، مرجعی که خود در معاملات بازار برق ذینفع نیست، متولی برپایی بازار می‌شود. تولیدکنندگان (فروشنده‌گان) برق میزان انرژی قابل فروش و



شکل (۱): نقطه کار بازار بورس برق (یعنی مقدار و قیمت انرژی تبادلی) از تلاقی منحنی های عرضه و تقاضا به دست می آید. منحنی عرضه به صورت صعودی است زیرا هزینه تولید نیروگاههای حرارتی با افزایش توان الکتریکی تولیدی آنها بیشتر می شود. منحنی تقاضا به صورت نزولی است زیرا با افزایش قیمت انرژی، میزان انرژی مورد تقاضا کاهش می یابد.



شکل (۲): مراحل تبدیل منحنی هزینه سهمی شکل به منحنی هزینه افزایشی پلکانی برای یک واحد نیروگاهی.



شکل(۳): سطح خاکستری معادل مبلغی است که در تسویه یکنواخت از خریداران دریافت و به فروشنده‌گان پرداخت می‌شود.

ساز و کار تسویه تمایزی در کشورهای معده‌دی (از جمله ایران) مورد توجه قرار گرفته و مطابق آن، همان مبلغ پیشنهادی فروشنندگان انرژی به آنها پرداخت می‌شود. بنابراین در این‌گونه بازارها، قیمت خرید انرژی از فروشنندگان با هم متفاوت است. مثلاً در بازار برق ایران، پس از تلاقي دادن منحنی پلکانی عرضه اند^۲؛ یا خط تقاضا (با، سیستم شده کا، سیستم)، سطح زیر

«ضریب راهبرد»، منحنی پلکانی قیمت پیشنهادی خود را تعیین می‌کنند. مقدار ضریب مزبور به راهبرد فروشنده برای شرکت در بازار بستگی دارد و ممکن است ساعت به ساعت تغییر کند. روش تعیین منحنی تقاضا نیز شبیه به منحنی عرضه است با این تفاوت که منحنی تقاضای انرژی هر مصرف‌کننده (عمده) به صورت نزولی است. علت این امر، «کشسانی تقاضا»^{۲۱} است. طبق مباحث اقتصاد کلان، با گران‌تر شدن بهای یک کالا، میزان تقاضا برای آن کالا کاهش می‌یابد. البته باید توجه داشت که در عمل، کشسانی تقاضای برق بسیار ناچیز است، زیرا زندگی و تولید جوامع شدیداً به تأمین انرژی الکتریکی وابسته بوده و خسارت ناشی از قطع برق بسیار بیشتر از قیمت آن است. بنابراین گران‌تر شدن قیمت برق (در حد متعارف) اثر چندانی بر میزان مصرف آن ندارد.

با توجه به مطالب ذکر شده درباره سازوکار تسویه یکنواخت، مبلغی که از خریداران دریافت و به فروشنده‌گان پرداخت می‌شود برابر است با سطح خاکستری که در شکل ۳ نشان داده شده است.

همان طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، ابتدا ضرایب راهبرد بازیگران (شرکت‌های تولید برق) در کمترین مقدار منطقی و معقول (یعنی یک) تنظیم می‌شود و به تدریج، به صورت گام به گام افزایش می‌باید تا به حداقل ممکن (که توسط کاربر تعیین می‌شود) برسد. با توجه به اعلام سقف قیمت^{۲۲} از سوی متولیان بازارهای برق، مقدار حداقل ضریب راهبرد هر تولیدکننده را می‌توان از رابطه زیر تعیین کرد:

$$SF_{i(\max)} = \frac{\rho_{Cap}}{IC_{i(\max)}} \quad (1)$$

که در رابطه فوق، $SF_{i(\max)}$ ، حداقل ضریب راهبرد نیروگاه (شرکت تولید) i ، ρ_{Cap} ، سقف قیمت و $IC_{i(\max)}$ ، پیشنهادهای هزینه افزایشی نیروگاه i است. بنابراین، بازه تغییرات ضریب راهبرد نیروگاه i ام عبارت است از:

$$1 \leq SF_i \leq \frac{\rho_{Cap}}{IC_{i(\max)}} \quad (2)$$

با تغییر پلکانی ضرایب راهبرد بازیگران در بازه تغییرات مورد نظر، می‌توان فضای جستجوی گسترهای با دقت مطلوب ایجاد کرد. کاربر برنامه می‌تواند دقت محاسبات را با تنظیم مقادیر ΔSF_i به میزان دلخواه برساند ولی باید توجه داشت که با افزایش دقت، ابعاد فضای جستجو (یا به عبارت دیگر، تعداد درایه‌های ماتریس نش) و در نتیجه زمان اجرای برنامه افزایش می‌یابد. برای تعیین قیمت پیشنهادی نیروگاه (شرکت تولید) i ام، ضریب راهبرد SF_i در تمام پله‌های هزینه پلکانی آن نیروگاه (شکل ۲) ضرب می‌شود:

$$\rho_i = SF_i \times IC_i \quad (3)$$

که به این ترتیب، نمودار پیشنهاد فروش هر تولیدکننده به صورت پلکانی تعیین می‌شود. در ادامه، پیشنهادات فروش پلکانی فروشنده‌گان به صورت صعودی مرتب می‌شوند تا مشخصه‌های عرضه تعیین شود. سپس، نقطه تعادل بازار از تلاقی مشخصه‌های عرضه و تقاضا (خط بار سیستم) به دست می‌آید (شکل ۱). برای محاسبه سود حاصل از مشارکت تولیدکننده‌گان در بازار انرژی الکتریکی، باید ساز و کار تسويه بازار (یکنواخت یا تمایزی) توسط کاربر تعیین شود. در ساز و کار تسويه یکنواخت، سود حاصل از مشارکت نیروگاه i در بازار انرژی الکتریکی عبارت است از:

$$Benefit_i = MCP \times P_i - C_i(P_i) \quad (4)$$

که در رابطه فوق، $Benefit_i$ سود نیروگاه i در نتیجه مشارکت در تأمین انرژی الکتریکی بر حسب دلار،

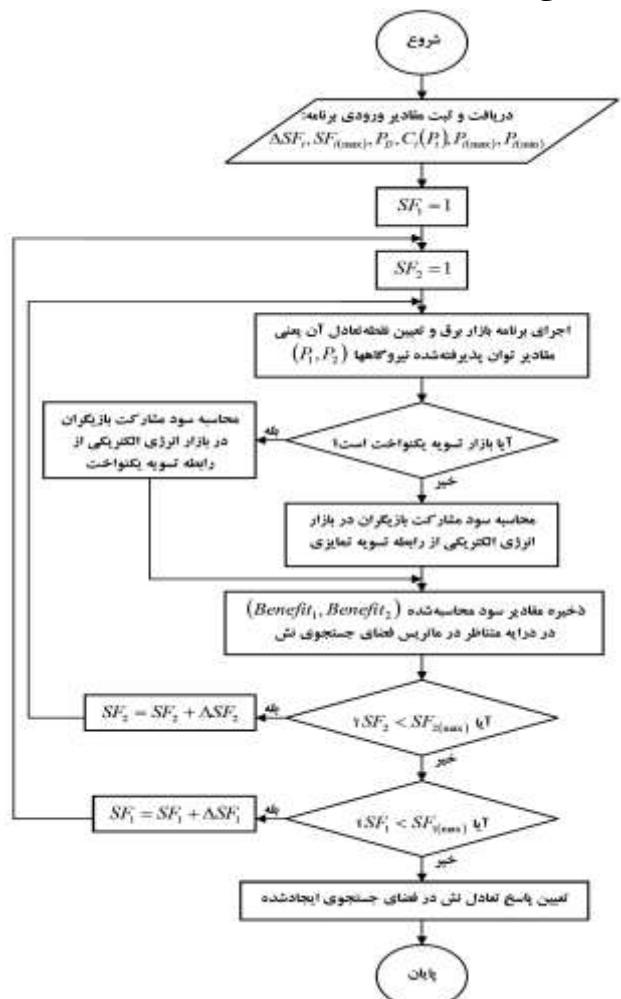
منحنی (بهای انرژی) محاسبه شده و به همراه هزینه‌های انتقال و آمادگی واحدها (ظرفیت) از خریداران اخذ می‌گردد (شکل ۴).



شکل (۴): ساز و کار برای ایجاد بازار انرژی الکتریکی در ایران.

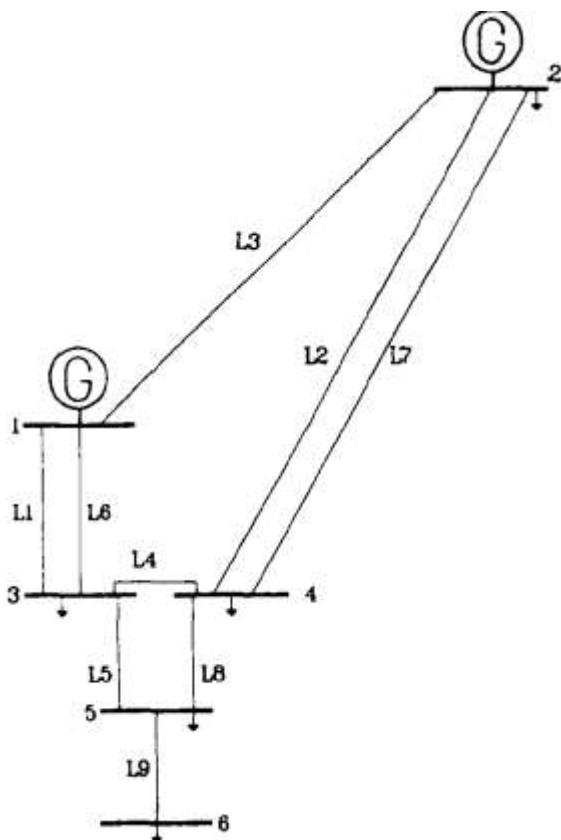
۴- روش حل مسئله

در شکل ۵ فلوچارتی نشان داده شده که بیان گر روش پیشنهادی برای تعیین نقطه (یا نقاط) تعادل نش در بازار رقابتی انرژی الکتریکی است.



شکل (۵): فلوچارت برنامه تعیین نقطه تعادل نش بازار برق

روش مورد استفاده روی «سیستم آزمون روی بیلینتون» (RBTS) - که یکی از سیستم‌های آزمون معتبر و شناخته شده در مطالعات سیستم‌های قدرت الکتریکی است - شبیه‌سازی شده است. این سیستم در شکل ۶ نشان داده شده است [۲۲]. همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، دو نیروگاه برق‌آبی و حرارتی به عنوان فروشنندگان انرژی الکتریکی در این سیستم حضور دارند. نیروگاه برق‌آبی (نیروگاه اول) دارای ۷ واحد با مجموع ظرفیت ۱۳۰ مگاوات و نیروگاه حرارتی (نیروگاه دوم) دارای ۴ واحد با مجموع ظرفیت ۱۱۰ مگاوات است. به این ترتیب، مجموع ظرفیت تولید سیستم ۲۴۰ مگاوات است. فرض همچنین حداکثر بار سیستم معادل ۱۸۵ مگاوات می‌باشد. فرض می‌شود که: (۱) فروشنندگان برق - طبق روال رایج در بازارهای برق سراسر جهان - پیشنهادات فروش خود را به صورت پلکانی به بازار انرژی الکتریکی ارائه می‌کنند و (۲) هر نیروگاه، ضریب راهبرد یکسانی را به پله‌های مختلف هزینه افزایشی خود اعمال می‌کند. نمودار هزینه افزایشی نیروگاه‌های ۱ و ۲ در شکل ۷ نشان داده شده است. توابع هزینه تولید واحدهای RBTS در بخش پیوست آورده شده است.



شکل (۶): سیستم آزمون روی بیلینتون (RBTS)

قیمت تسویه بازار انرژی الکتریکی بر حسب دلار بر مگاوات- ساعت، P_i توان تولیدی (یا پذیرفته شده در بازار) نیروگاه i ام بر حسب مگاوات و (P_i) تابع هزینه نیروگاه i ام بر حسب دلار بر ساعت می‌باشد.

در اینجا یادآور می‌شود که پیشنهادات فروش انرژی نیروگاهها به صورت پلکانی است و از این‌رو، P_i عبارت است از مجموع توان تولیدی (پذیرفته شده) پله‌های نیروگاه i ام. مثلاً با توجه به این‌که پیشنهاد فروش انرژی نیروگاه i ام با توجه به این‌تولیدی آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_i = P_{i1} + P_{i2} + \dots + P_{in} \quad (5)$$

به همین ترتیب، سود حاصل از مشارکت نیروگاه i ام در بازار انرژی الکتریکی با تسويه تمایزی عبارت است از:

$$Benefit_i = (\rho_{i1}P_{i1} + \rho_{i2}P_{i2} + \dots) - C_i(P_i) \quad (6)$$

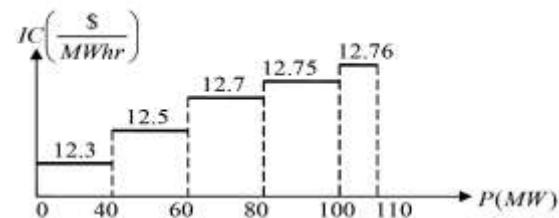
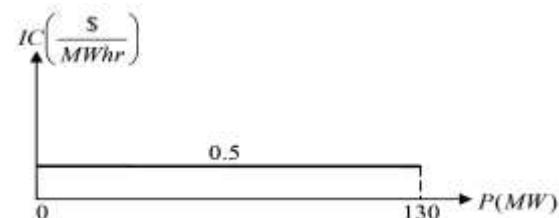
که در رابطه فوق، $Benefit_i$ سود نیروگاه i ام در نتیجه مشارکت در تأمین انرژی الکتریکی بر حسب دلار، ρ_{ii} قیمت پیشنهادی اولین پله پذیرفته شده نیروگاه i ام در بازار انرژی الکتریکی بر حسب مگاوات-ساعت، P_{i1} توان تولیدی اولین پله پذیرفته شده نیروگاه i ام در بازار انرژی الکتریکی بر حسب مگاوات، $P_i = P_{i1} + P_{i2} + \dots$ کل توان تولیدی (مجموع توان تمام پله‌های پذیرفته شده) نیروگاه i ام در بازار انرژی الکتریکی (مگاوات) و $C_i(P_i)$ تابع هزینه نیروگاه i ام بر حسب دلار بر ساعت می‌باشد.

با تعیین مقادیر سود تولیدکنندگان و ذخیره آنها در فضای جستجوی ماتریسی، می‌توان نقطه یا نقاط تعادل نش بازار انرژی الکتریکی را با استفاده از روشی که در بخش دوم مقاله (نظریه بازی) توضیح داده شد، به دست آورد.

۵- مطالعات موردی

در این بخش، تلاش می‌شود تا با ارائه مثال‌های عددی، نحوه اتخاذ راهبردهای بهینه توسط فروشنندگان انرژی الکتریکی در محیط رقابتی بازار برق مورد مطالعه قرار گیرد. در این مثال‌ها: (۱) سناریوهای متفاوتی (ساز و کارهای تسويه یکنواخت و تمایزی و بارهای سیک و سنگین) مورد مطالعه قرار می‌گیرند تا رفتار و نحوه تصمیم‌گیری تولیدکنندگان برق در هر حالت بررسی شود، (۲) از روش تعادل نش برای تعیین راهبردهای بهینه مشارکت بازیگران در بازار رقابتی استفاده می‌شود و (۳)

بسیار کمتر از نیروگاه حرارتی است: (۱) نیروگاه آبی ضریب راهبرد خود را به مقدار $24.6 = \frac{12.3}{0.5}$ نزدیک کند (اندکی کمتر از این مقدار اختیار کند) تا ضمن کسب حداکثر سود، رقیب را از میدان بهدر کند و (۲) نیروگاه حرارتی ضریب راهبرد خود را کمترین حد ممکن (یعنی یک) نزدیک کند تا شاید برای فروش انرژی شناسی داشته باشد. در این مطالعه می خواهیم تا با حل مسأله به کمک روش تعادل نش، صحت و سقم فرضیات فوق را آزمایش کنیم. برای این منظور، فضای جستجو با استفاده از تغییر گام به گام ضرایب راهبرد نیروگاهها در بازه تغییرات آنها ایجاد می گردد. لازم به ذکر است که در این مثال، بازه تغییرات ضرایب راهبرد نیروگاههای آبی و حرارتی به ترتیب $30 \leq SF_1 \leq 1$ و $1 \leq SF_2 \leq 3$ در نظر گرفته شده و فرض می شود که واحدهای حرارتی یکسان (واحدهای ۴۰ مگاواتی) بهمیزان برابر در بازار برنده می شوند. سود حاصل از مشارکت نیروگاهها در بازار انرژی الکتریکی با استفاده از رابطه ۴ تعیین می شود. به عنوان مثال، اگر ضرایب راهبرد نیروگاهها $SF_1 = SF_2 = 1$ باشد، آنگاه قیمت تسویه بازار $MCP = 0.5 \frac{\$/MWhr}{MWhr}$ و توان پذیرفته شده نیروگاههای آبی و حرارتی در بازار انرژی الکتریکی به ترتیب $P_2 = 0, P_1 = 130MW$ خواهد شد که در نتیجه، سودی عاید هیچ یک از نیروگاهها نمی شود. به همین ترتیب می توان مقادیر سود نیروگاههای آبی و حرارتی را در ازای اتخاذ ضرایب راهبرد مختلف توسط آنها تعیین کرد و فضای جستجوی نش را تعیین کرد. این فضای جستجو برای گامهای تغییر ضرایب راهبرد به صورت $\Delta SF_1 = \Delta SF_2 = 0.5$ در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل (۷): نمودار هزینه افزایشی نیروگاهها (بالا) نیروگاه برق آبی و (پایین) نیروگاه حرارتی

۱-۵- بازار تسويه يکنواخت با بار سبك (۱۳۰ مگاوات)

در این مثال، با این فرض که بار سیستم معادل ظرفیت نیروگاه آبی یعنی ۱۳۰ مگاوات باشد، راهبرد تولیدکنندگان برق برای مشارکت در بازار انرژی الکتریکی را با استفاده از روش نقطه تعادل نش تعیین خواهیم کرد. در اینجا باید توجه داشت که: (۱) هزینه افزایشی تمامی واحدهای نیروگاه آبی یکسان و معادل 0.5 دلار بر مگاوات ساعت است که بسیار کمتر از هزینههای مشابه نیروگاه حرارتی می باشد، (۲) کمترین هزینه افزایشی نیروگاه حرارتی (مربوط به اولین پله پیشنهاد فروش واحد ۴۰ مگاواتی) معادل $\frac{12}{3}$ دلار بر مگاوات ساعت است و (۳) ظرفیت نیروگاه آبی معادل بار سیستم است یعنی این نیروگاه قادر است به تنها هیمه نیاز مصرف را تأمین کند. با توجه به موارد مذکور، منطقی به نظر می رسد که با توجه به این که هزینه افزایشی نیروگاه آبی

جدول (۲): فضای جستجوی مثال ۱-۵ به ازای 0.5

$SF_1 \backslash SF_2$	۱	$1/5$	۲	$2/5$	...	$24/5$	۲۵	...	۳۰
۱	(۰۰)	(۰۰۳۲/۵)	(۰۰۶۵)	(۰۰۹۷/۵)	...	(۰۰۹۳۶)	(۰۰۹۶۰)	...	(۰۱۶۲۹۰)
$1/5$	(۰۰)	(۰۰۳۲/۵)	(۰۰۶۵)	(۰۰۹۷/۵)	...	(۰۰۱۵۶۰)	(۰۰۱۵۶۰)	...	(۰۱۸۸۵)
۲	(۰۰)	(۰۰۳۲/۵)	(۰۰۶۵)	(۰۰۹۷/۵)	...	(۰۰۱۵۶۰)	(۰۰۱۵۶۰)	...	(۰۱۸۸۵)
$2/5$	(۰۰)	(۰۰۳۲/۵)	(۰۰۶۵)	(۰۰۹۷/۵)	...	(۰۰۱۵۶۰)	(۰۰۱۵۶۰)	...	(۰۱۸۸۵)
۳	(۰۰)	(۰۰۳۲/۵)	(۰۰۶۵)	(۰۰۹۷/۵)	...	(۰۰۱۵۶۰)	(۰۰۱۵۶۰)	...	(۰۱۸۸۵)

مختلف (SF_2) برای نیروی حرارتی (نیروگاه دوم) هیچ تفاوتی ندارد زیرا در تمامی این حالات، سود وی معادل صفر است. به این ترتیب، نقطه $SF_2 = 1, SF_1 = 24.5$ یک پاسخ تعادل نش است. حال اگر $SF_2 = 1.5$ باشد، بهترین پاسخ نیروگاه اول، انتخاب $SF_1 = 30$ است زیرا همان طور که در سطر دوم جدول هم ملاحظه می شود، با افزایش ضرایب راهبرد نیروگاه اول سود

با توجه به جدول فوق می توان دریافت که در صورت اتخاذ ضرایب راهبرد $SF_2 = 1$ از سوی نیروگاه حرارتی، بهترین پاسخ نیروگاه آبی عبارت است از اتخاذ ضرایب $SF_1 = 24.5$ زیرا سود نیروگاه آبی (نیروگاه اول) از $SF_1 = 24.5$ تا $SF_1 = 1$ در حال افزایش است و در نقطه $SF_1 = 24.5$ به حداکثر مقدار خود می رسد. حال اگر $SF_1 = 24.5$ باشد، آنگاه انتخاب ضرایب راهبرد

سیستم را برآورده کنند و مشارکت هر دو رقیب در تأمین بار الزامی است. با توجه به این ترتیب، تغییر ضرایب راهبرد نیروگاهها فقط در میزان توان پذیرفته شده آنها مؤثر است و منجر به حذف هیچ یک از آنها نمی‌شود. با توجه به مطالب ذکرشده و بر اساس تحلیل ذهنی از رفتار عاقلانه بازیگران، می‌توان پیش‌بینی کرد که دست کم یکی از نیروگاهها، قیمت پیشنهادی خود را در سقف ممکن ارائه نماید و قیمت تسویه بازار را به مقدار حداکثر $MCP = \rho_{Cap}$ برساند. بدینهی است که در صورت بروز چنین حالتی، با توجه به ساز و کارتسویه یکنواخت، هر دو بازیگر رقیب از قیمت بالای برق سود خواهند برد. حال با حل مسئله به کمک روش تعادل نش، صحت و سقم این فرضیه را آزمایش می‌کنیم. $\Delta SF_1 = 0.6$ و $\Delta SF_2 = 0.4$ در ضرایب راهبرد نیروگاهها ایجاد شده است. همانند مثال قبل، فرض می‌شود که واحدهای حرارتی یکسان (واحدهای ۴۰ مگاواتی) به میزان برابر در بازار برنده می‌شوند. در اینجا هم برای محاسبه سود نیروگاهها به ازای اتخاذ ضرایب راهبرد گوناگون، از رابطه ۴ استفاده می‌شود. مثلاً با فرض $P_1 = 130MW$ و $SF_1 = 1.4$ ، $SF_2 = 1$ ، مقدار $MCP = 17.5 \$ / MW h$ و $P_2 = 55MW$ حاصل می‌شود که در نتیجه:

$$Benefit_1 = 130 \times 17.5 - 130 \times 0.5 = 2210\$$$

$$\begin{aligned} Benefit_2 &= 55 \times 17.5 - 2 \times (0.01 \times 27.5^2 + 12 \times 27.5 + 26) \\ &= 235.375\$ \end{aligned}$$

فضای جستجوی مسئله (مقادیر سود بازیگران به ازای اتخاذ راهبردهای مختلف) در جدول ۳ نشان داده شده است.

وی افزایش می‌باید. حال اگر $SF_1 = 30$ توسط نیروگاه اول انتخاب شود، بهترین پاسخ نیروگاه دوم $SF_2 = 1$ است، زیرا در این حالت سود وی نسبت به بقیه حالات بیشتر است (ستون آخر جدول) و بنابراین، پاسخ تعادل نش جدیدی حاصل نمی‌شود. با انجام یک بررسی ساده و ارائه استدلال مشابه می‌توان نشان داد که برای مقادیر $SF_2 > 1.5$ نیز پاسخ تعادل نش وجود ندارد و بنابراین، تنها نقطه تعادل نش این بازی همان $SF_2 = 1, SF_1 = 24.5$ است که فرضیه اولیه ما مبنی بر اتخاذ ضرایب راهبرد $SF_2 = 1, SF_1 \rightarrow 24.6$ توسط نیروگاهها را تأیید می‌کند. به همین ترتیب، اگر ΔSF_1 را از 0.5 به 0.1 کاهش دهیم تا دقیق برنامه افزایش باید، با استدلال مشابه، نقطه $SF_2 = 1, SF_1 = 24.59$ را به عنوان تنها پاسخ تعادل نش به دست خواهیم آورد که باز هم فرضیه اولیه ما را تأیید می‌کند.

۲-۵- بازار تسویه یکنواخت با بارسنگین (۱۸۵ مگاوات)

در این مثال، فرض می‌کنیم که بار سیستم به حداکثر آن یعنی ۱۸۵ مگاوات افزایش باید. در اینجا فرض می‌کنیم که سقف قیمت انرژی الکتریکی به میزان $63/8$ دلار بر مگاوات ساعت تعیین شده باشد. با توجه به اینکه هزینه افزایشی تمامی واحدهای نیروگاه آبی معادل 0.5 دلار بر مگاوات ساعت و هزینه افزایشی گران‌ترین واحد نیروگاه حرارتی (واحد ۱۰ مگاواتی) معادل $12/76$ دلار بر مگاوات ساعت است، در نتیجه با توجه به رابطه ۲، ضرایب راهبرد $1 \leq SF_1 \leq 127.6$ و $1 \leq SF_2 \leq 1$ قابل تغییر است. از آنجا که بار سیستم (۱۸۵ مگاوات) از ظرفیت هر یک از نیروگاهها بیشتر است (ظرفیت نیروگاه‌های آبی و حرارتی به ترتیب 130 و 110 مگاوات است)، لذا هیچ کدام از نیروگاهها نمی‌توانند به تنها یی نیاز بار

جدول (۳): فضای جستجوی مثال ۵

$SF_2 \backslash SF_1$	۱	$1/6$	...	$24/4$	۲۵	$25/6$	...	۱۲۷	$127/6$
۱	(۱۵۶۰)	(۱۵۶۰)	...	(۱۵۶۰)	(۱۵۰۷/۲)	(۹۲۲/۵)	...	(۵۵۳۱ و ۴۷۲۵)	(۵۵۶۴ و ۴۷۴۷/۵)
$1/4$	(۲۳۵/۴ و ۲۲۱۰)	(۲۳۵/۴ و ۲۲۱۰)	...	(۲۳۵/۴ و ۲۲۱۰)	(۲۳۵/۴ و ۲۲۱۰)	(۲۲۵/۴ و ۲۲۱۰)	...	(۵۵۳۱ و ۴۷۲۵)	(۵۵۶۴ و ۴۷۴۷/۵)
$1/8$	(۵۱۰/۴ و ۲۸۶۰)	(۵۱۰/۴ و ۲۸۶۰)	...	(۵۱۰/۴ و ۲۸۶۰)	(۵۱۰/۴ و ۲۸۶۰)	(۵۱۰/۴ و ۲۸۶۰)	...	(۵۵۳۱ و ۴۷۲۵)	(۵۵۶۴ و ۴۷۴۷/۵)
$2/2$	(۷۸۵/۴ و ۳۵۱۰)	(۷۸۵/۴ و ۳۵۱۰)	...	(۷۸۵/۴ و ۳۵۱۰)	(۷۸۵/۴ و ۳۵۱۰)	(۷۸۵/۴ و ۳۵۱۰)	...	(۵۵۳۱ و ۴۷۲۵)	(۵۵۶۴ و ۴۷۴۷/۵)
$2/6$	(۱۰۶۰/۴ و ۴۱۶۰)	(۱۰۶۰/۴ و ۴۱۶۰)	...	(۱۰۶۰/۴ و ۴۱۶۰)	(۱۰۶۰/۴ و ۴۱۶۰)	(۱۰۶۰/۴ و ۴۱۶۰)	...	(۵۵۳۱ و ۴۷۲۵)	(۵۵۶۴ و ۴۷۴۷/۵)
۳	(۱۳۳۵/۴ و ۴۸۱۰)	(۱۳۳۵/۴ و ۴۸۱۰)	...	(۱۳۳۵/۴ و ۴۸۱۰)	(۱۳۳۵/۴ و ۴۸۱۰)	(۱۳۳۵/۴ و ۴۸۱۰)	...	(۵۵۳۱ و ۴۷۲۵)	(۵۵۶۴ و ۴۷۴۷/۵)
$3/4$	(۱۶۱۰/۴ و ۵۴۶۰)	(۱۶۱۰/۴ و ۵۴۶۰)	...	(۱۶۱۰/۴ و ۵۴۶۰)	(۱۶۱۰/۴ و ۵۴۶۰)	(۱۶۱۰/۴ و ۵۴۶۰)	...	(۵۵۳۱ و ۴۷۲۵)	(۵۵۶۴ و ۴۷۴۷/۵)
$3/8$	(۱۸۸۵/۴ و ۶۱۱۰)	(۱۸۸۵/۴ و ۶۱۱۰)	...	(۱۸۸۵/۴ و ۶۱۱۰)	(۱۸۸۵/۴ و ۶۱۱۰)	(۱۸۸۵/۴ و ۶۱۱۰)	...	(۵۵۳۱ و ۴۷۲۵)	(۵۵۶۴ و ۴۷۴۷/۵)
$4/2$	(۲۱۶۰/۴ و ۶۶۷۰)	(۲۱۶۰/۴ و ۶۶۷۰)	...	(۲۱۶۰/۴ و ۶۶۷۰)	(۲۱۶۰/۴ و ۶۶۷۰)	(۲۱۶۰/۴ و ۶۶۷۰)	...	(۵۵۳۱ و ۴۷۲۵)	(۵۵۶۴ و ۴۷۴۷/۵)
$4/6$	(۲۴۳۵/۴ و ۷۲۳۰)	(۲۴۳۵/۴ و ۷۲۳۰)	...	(۲۴۳۵/۴ و ۷۲۳۰)	(۲۴۳۵/۴ و ۷۲۳۰)	(۲۴۳۵/۴ و ۷۲۳۰)	...	(۵۵۳۱ و ۴۷۲۵)	(۵۵۶۴ و ۴۷۴۷/۵)
۵	(۲۷۱۰/۴ و ۷۷۹۰)	(۲۷۱۰/۴ و ۷۷۹۰)	...	(۲۷۱۰/۴ و ۷۷۹۰)	(۲۷۱۰/۴ و ۷۷۹۰)	(۲۷۱۰/۴ و ۷۷۹۰)	...	(۳۸۶۳/۵ و ۶۸۲۹/۲)	(۵۳۶۳/۶ و ۴۹۹۶/۲)



همانطور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، اگر نیروگاه ۱ ضریب راهبرد ۱۲۷/۶ را اتخاذ کند، آنگاه برای نیروگاه ۲ انتخاب ضرایب راهبرد ۴.۶,...,۱.۴ ضریب تفاوتی ندارد، زیرا در تمام این حالات سود نیروگاه ۲ برابر با ۵۵۶۴ دلار می‌باشد. حال اگر نیروگاه ۲ ضریب راهبرد ۱ را اتخاذ کند، بهترین پاسخ نیروگاه ۱، انتخاب ضریب راهبرد ۱۲۷/۶ خواهد بود، زیرا همانطور که در سطر اول مشاهده می‌شود، بیشترین سود نیروگاه ۱ با اتخاذ این ضریب راهبرد حاصل می‌گردد. لذا $SF_1 = 127.6$ و $SF_2 = 1$ با پاسخ تعادل نش می‌باشد. با استدلالی مشابه می‌توان نشان داد که سایر نقاط تعادل نش این مسئله عبارتند از $SF_1 = 127.6$ و $SF_2 = 1.4, 1.8, 2.2, 2.6$ و دسته دیگری از نقاط تعادل نش به صورت $SF_1 = 1, 1.6, \dots, 74.8$ و $SF_2 = 5$ می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مجموعه اول نقاط تعادل نش، ضریب راهبرد نیروگاه آبی و در مجموعه دوم پاسخ‌ها، ضریب راهبرد نیروگاه حرارتی به حداقل ممکن رسیده است، طوری که قیمت تسویه بازار تا سقف ممکن افزایش یافته است. به این ترتیب، صحت فرضیه اولیه ما درباره راهبردهای این دو نیروگاه نشان داده شد.

۴-۵- بازار تسويه تمایزی با بار سنگین (۱۸۵ مگاوات)

در این مثال، باز هم فرض می‌کنیم که بازار انرژی الکتریکی به صورت تمایزی تسويه شود و مجدداً با استفاده از رابطه ۶، مقادیر سود بازیگران را به‌ازای اتخاذ ضرایب راهبرد مختلف محاسبه کرده و آنها را در جدول ۵ مرتب می‌کنیم.

۵-۳- بازار تسويه تمایزی با بار سبک (۱۳۰ مگاوات)

در این قسمت نیز مفروضات مثال ۱-۵ را در نظر گرفته و فرض می‌کنیم تسویه قیمت به صورت تمایزی باشد. همانند مثال ۱-۵،

جدول (۴): فضای جستجوی مثال ۵-۳

SF_2	SF_1	۱	۱/۵	۲	۲/۵	...	۲۴/۵	۲۵	...	۳۰
۱	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	...	(۰۰)	(۰۰)	...	(۰۰)
۱/۵	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	...	(۰۰)	(۰۰)	...	(۰۰)
۲	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	...	(۰۰)	(۰۰)	...	(۰۰)
۲/۵	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	...	(۰۰)	(۰۰)	...	(۰۰)
۳	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	(۰۰)	...	(۰۰)	(۰۰)	...	(۰۰)

جدول (٥): فضای جستجوی مثال ٤-٥

SF_2	SF_1	١	...	٢٤/٤	٢٥	...	١٢٦/٤	١٢٧	١٢٧/٤
١	(٠٩٠)	...	(٠١٥٢١)	(٠١٥٧٢/٢)	...	(٠٤٧٠٢/٥)	(٠٤٧٢٥)	(٠٤٧٤٧٥)	(٠٤٧٤٧٥)
١/٤	(٢٢٤/١٠٠)	...	(٢٢٤/١٥٢١)	(٢٢٤/١٥٦٠)	...	(٤٧٦٣٤٧٠٢/٥)	(٤٧٦٣٤٧٢٥)	(٤٧٦٣٤٧٤٧٥)	(٤٧٦٣٤٧٤٧٥)
١/٨	(٤٩٥/٩٠٠)	...	(٤٩٥/٩١٥٢١)	(٤٩٥/٩١٥٦٠)	...	(١٠٢٧/٥٤٧٠٢/٥)	(١٠٢٧/٥٤٧٢٥)	(١٠٢٧/٥٤٧٤٧٥)	(١٠٢٧/٥٤٧٤٧٥)
٢/٢	(٧٦٧/٧٠٠)	...	(٧٦٧/٧١٥٢١)	(٧٦٧/٧١٥٦٠)	...	(١٥٧٨/٩٤٧٠٢/٥)	(١٥٧٨/٩٤٧٢٥)	(١٥٧٨/٩٤٧٤٧٥)	(١٥٧٨/٩٤٧٤٧٥)
٢/٤	(١٠٣٩/٥٠٠)	...	(١٠٣٩/٥١٥٢١)	(١٠٣٩/٥١٥٦٠)	...	(٢١٣٠/٣٤٧٠٢/٥)	(٢١٣٠/٣٤٧٢٥)	(٢١٣٠/٣٤٧٤٧٥)	(٢١٣٠/٣٤٧٤٧٥)
٣	(١٣١١/٣٠٠)	...	(١٣١١/٣١٥٢١)	(١٣١١/٣١٥٦٠)	...	(٢٨٨١/٨٤٧٠٢/٥)	(٢٨٨١/٨٤٧٢٥)	(٢٨٨١/٨٤٧٤٧٥)	(٢٨٨١/٨٤٧٤٧٥)
٣/٤	(١٥٨٣/١٠٠)	...	(١٥٨٣/١١٥٢١)	(١٥٨٣/١١٥٦٠)	...	(٣٢٣٣/٢٤٧٠٢/٥)	(٣٢٣٣/٢٤٧٢٥)	(٣٢٣٣/٢٤٧٤٧٥)	(٣٢٣٣/٢٤٧٤٧٥)
٣/٨	(١٨٤٤/٩٠٠)	...	(١٨٤٤/٩١٥٢١)	(١٨٤٤/٩١٥٦٠)	...	(٣٧٨٤/٤٤٧٠٢/٥)	(٣٧٨٤/٤٤٧٢٥)	(٣٧٨٤/٤٤٧٤٧٥)	(٣٧٨٤/٤٤٧٤٧٥)
٤/٢	(٢١٢٦/٧٠٠)	...	(٢١٢٦/٧١٥٢١)	(٢١٢٦/٧١٥٦٠)	...	(٤٣٣٦/١٤٧٠٢/٥)	(٤٣٣٦/١٤٧٢٥)	(٤٣٣٦/١٤٧٤٧٥)	(٤٣٣٦/١٤٧٤٧٥)
٤/٦	(٢٣٩٨/٥٠٠)	...	(٢٣٩٨/٥١٥٢١)	(٢٣٩٨/٥١٥٦٠)	...	(٤٨٨٧/٥٤٧٠٢/٥)	(٤٨٨٧/٥٤٧٢٥)	(٤٨٨٧/٥٤٧٤٧٥)	(٤٨٨٧/٥٤٧٤٧٥)
٥	(٢٦٧٠/٣٠٠)	...	(٢٦٧٠/٣١٥٢١)	(٢٦٧٠/٣١٥٦٠)	...	(٣٧٦٣٧٨٢٩/٢)	(٣٧٦٣٧٨٢٩/٢)	(٣٧٦٣٧٨٢٩/٢)	(٣٧٦٣٧٨٢٩/٢)

تصور اولیه، نقطه $SF_1 = 127.6$ و $SF_2 = 5$ پاسخ تعادل نش خواهد بود. مشابه روش ذکر شده و با بررسی سایر حالات جدول می‌توان نشان داد که هیچ‌کدام از نقاط این جدول، شرایط تعادل نش را احراز نمی‌کنند. به عبارت دیگر، بازی این دو نیروگاه در بازار تسویه تمایزی و در شرایط بار سنگین به یک تعادل پایدار و ماندگار نمی‌رسد.

۶- نتیجہ گیری

در این مقاله، روش کلاسیک تعیین نقطه تعادل نش برای تحلیل بازی راهبردی شرکت‌های تولید برق در محیط رقابتی بازار انرژی الکترونیکی مورد استفاده قرار گرفت. الگوریتم پیشنهادی دارای چند ویژگی مهم بود: (۱) با تغییر پله‌ای ضرایب راهبرد بازیگران، فضای گسسته مورد نیاز برای استفاده مستقیم از روش ماتریسی نش را فراهم می‌کرد، (۲) به کاربر امکان می‌داد تا دقیق محاسبات را در حد مطلوب تنظیم کند و (۳) انعطاف‌پذیری لازم برای انطباق با هر کدام از ساز و کارهای تسویه بازار برق (یکنواخت یا تمایزی) را داشت. برای بررسی کارآمدی روش پیشنهادی، از شبیه‌سازی رایانه‌ای روی یک سیستم آزمون معتبر (RBTS) استفاده شد و با تعریف چند ستاربیوی مختلف، نتایج اجرای برنامه با پیش‌فرضهای حاصل از تحلیل ذهنی رفتار عاقلانه بازیگران مقایسه شد. مطالعات موردی انجام‌گرفته نشان داد که در صورت استفاده از ساز و کار تسویه یکنواخت، بازی راهبردی فروشنده‌گان برق هم در شرایط بار سبک (۰-۱۳۰ مگاوات) را

با در نظر گرفتن مفروضات مثال ۲-۵ و بر اساس تحلیل ذهنی از رفتار عاقلانه بازیگران، شاید این طور پیش‌بینی شود که در این حالت، هر دو نیروگاه به طور هم‌زمان، قیمت پیشنهادی خود را در سقف ممکن ارائه خواهند کرد زیرا در ساز و کار تسويه تمایزی، به هر کدام از بازیگران پذیرفته شده در بازار، سطح زیر پله‌های نمودار پیشنهاد فروش همان بازیگر پرداخت می‌گردد (سطح زیر هر پله عبارت است از حاصل ضرب قیمت در توان پذیرفته شده آن پله). در اینجا نیز با حل مسأله به کمک روش تعادل نش، صحت و سقم این فرضیه را آزمایش می‌کنیم. به عنوان مثال اگر $SF_1 = 1$ و $SF_2 = 1.4$ باشند، توان پذیرفته شده نیروگاهها در بازار انرژی الکتریکی $P_2 = 55MW$, $P_1 = 130MW$ خواهد بود که در نتیجه مقادیر سود نیروگاهها به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$Benefit_1 = 130 \times 0.5 - 130 \times 0.5 = 0$$

$$Benefit_2 = 2 \times (20 \times 17.22 + 7.5 \times 17.5)$$

$$= 2 \times (0.01 \times 27.5^2 + 12 \times 27.5 + 26) = 224.1\$$$

همانطور که در ستون آخر (سمت راست) جدول ۵ مشاهده می-شود، اگر نیروگاه ۱ ضریب راهبرد ۱۲۷/۶ را اتخاذ کند، آنگاه برای نیروگاه ۲، انتخاب ضریب راهبرد ۵ بهترین تصمیم خواهد بود، زیرا در این حالت، سود وی از سایر حالات بیشتر می-شود. حال اگر نیروگاه ۲ ضریب راهبرد ۵ را اتخاذ کند (پایین ترین سطح جدول)، آنگاه بهترین راهبرد نیروگاه ۱ انتخاب ضریب راهبرد ۱۲۷/۶ نخواهد بود، زیرا اگر وی ضریب راهبرد ۱۲۶/۴ را اتخاذ کند، سود بیشتری عاید وی می-گردد. در نتیجه، برخلاف

لازم به ذکر است که در سرتاسر این مقاله، بازی‌های غیرهمکارانه با اطلاعات کامل مورد توجه قرار گرفته‌اند. فرض بازی غیرهمکارانه با شرایط واقعی بسیاری از بازارهای رقابتی انطباق دارد ولی بازی با اطلاعات کامل - دست‌کم در بازار برق - مصدق ندارد، زیرا طبق مقررات بازار، بازیگران به اطلاعات حساس یکدیگر دسترسی ندارند و فقط از نتایج خروجی بازار مطلع می‌شوند. بر این اساس، باید توجه داشت که مدل ارائه شده در این مقاله، عمدتاً برای تحلیل رفتار آینده بازیگران توسط «بهره‌بردار بازار» کاربرد دارد (زیرا وی به همه اطلاعات مورد نیاز برنامه دسترسی دارد) و تنها در صورتی می‌تواند توسط خود بازیگران مورد استفاده قرار گیرد که از روش‌های مناسب برای تخمین اطلاعات رقبا (مورد نیاز در برنامه) استفاده کنند.

پیوست

جدول (پ-۱): هزینه افزایشی واحدهای تولید RBTS

Unit (MW)	Type	Incremental cost (\$/MWhr)
5	Hydro	0.50 ; $0 \leq P \leq 5$
20	Hydro	0.50 ; $0 \leq P \leq 20$
40	Hydro	0.50 ; $0 \leq P \leq 40$
10	Thermal	12.76 ; $3 \leq P \leq 10$
20	Thermal	12.75 ; $5 \leq P \leq 20$
40	Thermal	12.30 ; $10 \leq P < 20$
		12.50 ; $20 \leq P < 30$
		12.70 ; $30 \leq P \leq 40$

مراجع

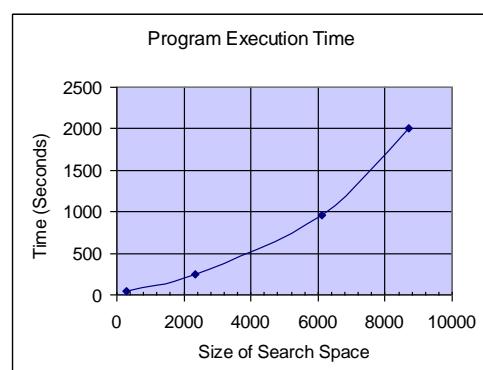
- [۱] والبرگ، بروس و وود، آلن جی، تولید، بهره‌برداری و کنترل در سیستم‌های قدرت، ترجمه سیفی، حسین، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، چاپ اول، ۱۳۷۱.
- [۲] کرشن، دانیل و استربیک، گوران، مبانی اقتصادی سیستم‌های قدرت، ترجمه یوسفی، غلامحسین و اخوین، علی، انتشارات مرجان علم، چاپ اول، ۱۳۸۶.
- [۳] شاهیده‌پور، محمد، یمین، حاتم و لی، زوان، عملیات بازار در سیستم‌های الکتریکی قدرت: پیش‌بینی، برنامه‌ریزی و مدیریت ریسک، ترجمه ح. سیفی، غ. یوسفی و م. پدرام، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۴.
- [۴] عبدالی، ق.، نظریه بازی‌ها و کاربردهای آن: بازی‌های ایستا و پویا با اطلاعات کامل، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشکده اقتصاد دانشگاه تهران، چاپ دوم، ۱۳۸۶.
- [۵] هاشمی‌پرست، س. م.، نظریه بازی‌ها و کاربرد آن، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، چاپ اول، ۱۳۸۵.

و هم در بار سنگین (۱۸۵ مگاوات) به تعادل نش می‌رسد ولی اگر مبادلات مالی بر اساس تسويه تمایزی باشد، بازار برق در بار سنگین فاقد نقطه تعادل نش است. همچنین، نتایج اجرای برنامه، مؤید پیش‌فرض‌های قبلی بود که در خصوص رفتار بازیگران در مثال‌های ۱-۵ تا ۳-۵ مطرح شد. لازم به ذکر است که برنامه مورد نظر برای حل مسئله با استفاده از نرم‌افزار Matlab(R2006a) نوشته شده و زمان اجرای برنامه روی رایانه‌ای با سرعت پردازش ۲GHz و ۳GB حافظه دسترسی تصادفی (RAM) مورد ارزیابی قرار گرفته که نتایج حاصله برای مثال ۱-۵ در سه حالت مختلف در جدول ۶ خلاصه شده است.

جدول (۶): فضای جستجو و زمان اجرای برنامه برای مثال ۱-۵

زمان اجرای برنامه	تعداد نقاط فضای جستجو	گام‌های تغییرات		حالت
		ΔSF_2	ΔSF_1	
۱۰ ثانیه	۲۹۵	۰/۵	۰/۵	۱
۱۶ دقیقه و ۵ ثانیه	۶۱۱۱	۰/۱	۰/۱	۲
۳۳ دقیقه و ۲۳ ثانیه	۸۷۰۳	۱	۰/۰۱	۳

همچنین در مثال ۲-۵، با فرض $\Delta SF_2 = 0.4$ و $\Delta SF_1 = 0.6$ ، فضای جستجو شامل ۲۳۳۲ نقطه و زمان اجرای برنامه ۴ دقیقه و ۱۲ ثانیه می‌باشد. بر اساس اطلاعات حاصل از اجرای برنامه در مثال‌های ۱-۵ و ۲-۵، تغییرات زمان اجرای برنامه با افزایش ابعاد فضای جستجوی مسئله در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با بزرگتر شدن ابعاد مسئله و حجم فضای جستجو، زمان اجرای برنامه هم به‌طور فزاینده‌ای بیشتر می‌شود به‌طوری که با رشد ابعاد فضای جستجو به میزان ۲۹/۵ برابر، زمان اجرای برنامه ۴۸/۸ برابر طولانی‌تر می‌شود. البته باید توجه داشت که چنین برنامه‌ای، عمولاً برای مطالعات منفصل (Off-line) رفتار بازیگران بازار برق مورد استفاده قرار می‌گیرد و بنابراین، طولانی شدن زمان اجرای آن در قیاس با برنامه‌های لحظه‌ای (On-line)، اهمیت کمتری دارد.



شکل ۸: تغییرات زمان اجرای برنامه با بزرگتر شدن فضای جستجو

- Uncertainty", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 29, pp. 609-616, 2007.
- [20] Rajaraman, R. and Alvarado, F., Optimal Bidding Strategy in Electricity Markets under Uncertain Energy and Reserve Prices, Power Systems Engineering Research Center, PSERC Publication 03-05, Apr. 2003.
- [21] K. Lee and R. Baldick, Solving Three-Player Games by the Matrix Approach with Application to an Electric Power Market, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 18, No. 4, Nov. 2003.
- [22] Billinton, R., Kumar, S., Chowdhury, N., Chu, K., Debnath, K., Goel, L., Khan, E., Kos, P., Nourbakhsh, G. and Oteng-Adjei, J., "A Reliability Test System for Educational Purposes – Basic Data", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 1238-1244, Aug. 1989.

زیرنویس‌ها

- ¹ Nash equilibrium
- ² Strategic game
- ³ Game theory
- ⁴ Perfect competition
- ⁵ Imperfect competition
- ⁶ Oligopoly
- ⁷ Cournot
- ⁸ Bertrand
- ⁹ Supply Function Equilibrium (SFE)
- ¹⁰ Bilateral contracts
- ¹¹ Roy Billinton Test System (RBTS)
- ¹² James Waldegrave
- ¹³ John von Neumann
- ¹⁴ John Nash
- ¹⁵ Thomas Schelling
- ¹⁶ Payoff
- ¹⁷ Power-pool
- ¹⁸ Market clearing price (MCP)
- ¹⁹ Pay as bid
- ²⁰ Bids
- ²¹ Demand elasticity
- ²² Price cap

- [6] Ferguson, T. S., Game Theory, University of California at Los Angeles.
- [7] Singh, H., "Introduction to Game Theory and Its Application in Electric Power Markets", IEEE Computer Applications in Power, pp.18-22.
- [8] Seok Son, Y., Baldick, R., Lee, K-Ho and Siddiqi, S., "Short-Term Electricity Market Auction Game Analysis: Uniform and Pay-as-Bid Pricing", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 4, pp. 1990-1997, Nov. 2004.
- [9] Y. S. Son, R. Baldick and S. Siddiqi, "Reanalysis of Nash Equilibrium Bidding Strategies in a Bilateral Electricity Market", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 1243-1244, May 2004.
- [10] Zhang, D., Wang, Y. and Luh, P. B., "Optimization Based Bidding Strategies in the Deregulated Market", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 981-986, Aug. 2000.
- [11] Xiong, G., Hashiyama, T. and Okuma, S., "An Evolutionary Computation for Supplier Bidding Strategy in Electricity Auction Market", Proceedings of the IEEE Conferences, pp. 83-88, 2002.
- [12] Wen, F. and Kumar David, A., "A Genetic Algorithm Based Method for Bidding Strategy Coordination in Energy and Spinning Reserve Markets", Artificial Intelligence in Engineering, Vol. 15, pp. 71-79, Jan. 2001.
- [13] Soleymani, S., Ranjbar, A. M., Shirani, A. R. and Marami, M., "Application of Simulated Annealing Method in Strategic Bidding of Gencos", Proceedings of the 21th International Power System Conference, pp.1588-1595, 2006.
- [14] Kim, J. H., "A New Game-Theoretic Framework for Maintenance Strategy Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, pp. 698-705, May 2003.
- [15] Chattopadhyay, D., "A Game Theoretic Model for Strategic Maintenance and Dispatch Decisions", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 4, pp. 2014-2021, Nov. 2004.
- [16] Li, T., Shahidehpour, M. and Li, Z., "Risk-Constrained Bidding Strategy with Stochastic Unit Commitment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 1, pp. 449-458, Feb. 2007.
- [17] Ni, E., Luh, P. B. and Rourke, S., "Optimal Integrated Generation Bidding and Scheduling with Risk Management under a Deregulated Power Market", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 600-609, Feb. 2004.
- [18] Conejo, A. J., Nogales, F. J. and Arroyo, J. M., "Price-Taker Bidding Strategy under Price Uncertainty", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 4, pp. 1081-1088, Nov. 2002.
- [19] Yamin, H. Y., El-Dwairi, Q. and Shahidehpour, S. M., "A New Approach for Gencos Profit Based Unit Commitment in Day-ahead Competitive Electricity Markets Considering Reserve

