



دانشگاه صنعت آب و برق
(شهید عباسپور)

دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

گرایش تجدید ساختار

راهبرد بهینه پیشنهاددهی واحدهای نیروگاهی در بازار انرژی الکتریکی و ذخیره گردان

تحقیق و تدوین :

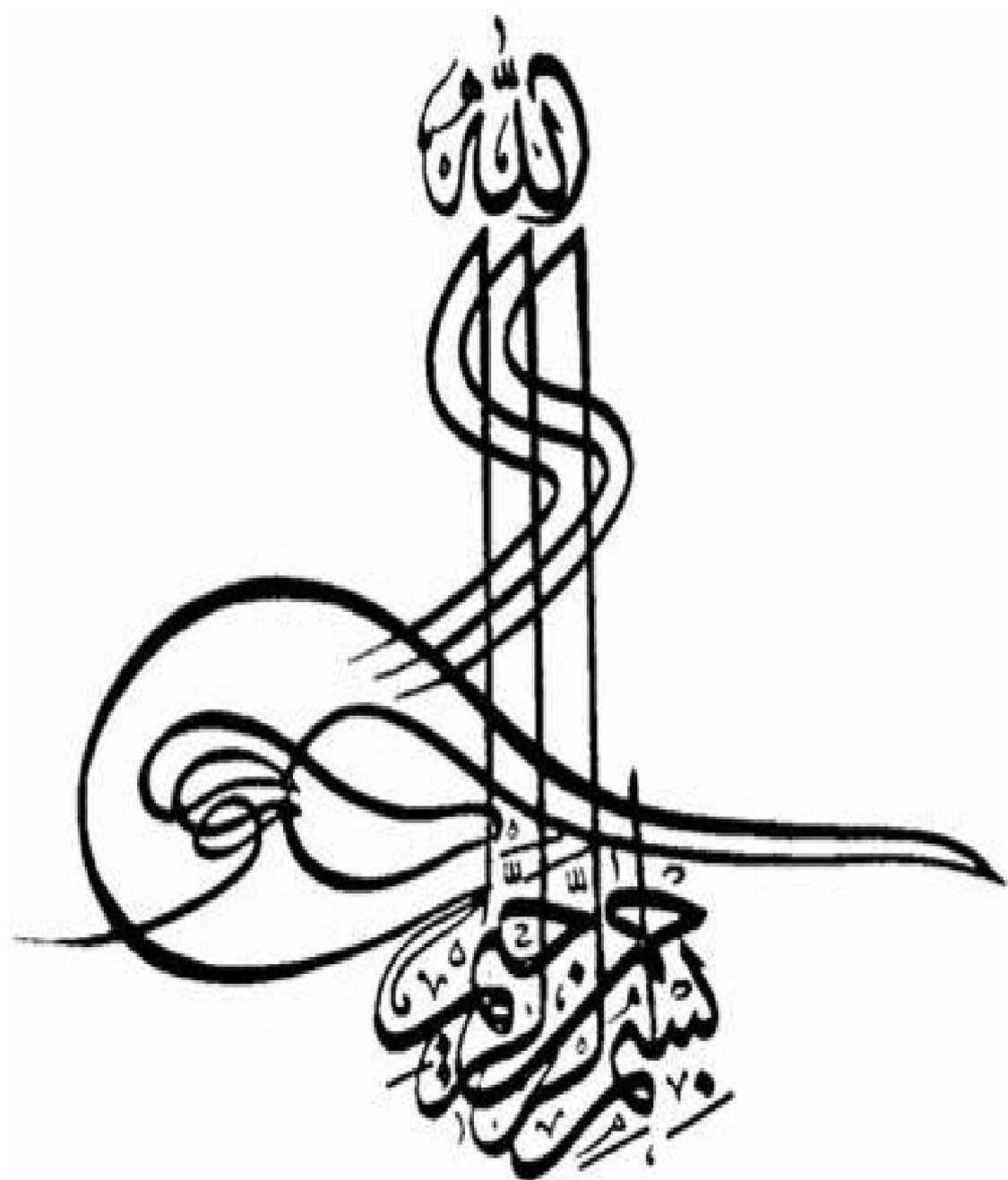
امین کریمی زاده

اساتید راهنما :

دکتر محمدتقی عاملی

دکتر آرش احسانی

مهر ماه ۱۳۸۸



تشر و قدردانی

از جناب آقای دکتر محمد تقی عاملی و جناب آقای دکتر آرش احسانی اساتید محترم راهنما که در تمامی مراحل انجام و پیشبرد پایان نامه، دلسوزانه و بی دریغ مرا هدایت و راهنمایی نموده‌اند.

به نام خدا

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب امین کریمی زاده تائید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه، حاصل کار پژوهشی اینجانب می‌باشد و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است.

این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح، پایین تر و بالاتر ارائه نشده است. کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) می‌باشد.

امین کریمی زاده

برای آنها

که وجودم با نعمت بودن ایشان آغاز شد پیش از آنکه موجودی قابل ذکر باشم.

برای آنها

که با بودنشان رویش را تجربه کردم و کامیابی امروزم مدیون وجود آنهاست.

برای آنها

که امتداد آسمانی نورانی بر سرنوشت خاکیم بودند.

پدر و مادر بزرگوارم

و برای **خواهران و برادران** مهربان و عزیزم که حضور آنها گامهای تعالیم را استحکام بخشید.

چکیده

در بازار رقابتی برق، شرکت کنندگان در بازار به دنبال یافتن نقطه تعادلی بازار برای انتخاب استراتژی خود هستند. رقابت بین تولیدکنندگان توان برای تأمین بار سیستم با یک بازی با اطلاعات ناکامل مدل می‌شود. با افزایش رقابت در بازار، تولیدکنندگان علاوه بر اینکه اطلاعات مربوط به هزینه‌های خود را از دید دیگر تولیدکنندگان مخفی نگه می‌دارند، تلاش می‌کنند تا اطلاعات هزینه رقبا را با توجه به نوع و مدل واحدها، ظرفیت، سوخت مصرفی، اطلاعات گذشته بازار و ... مدل‌سازی کنند. با مدل‌سازی اطلاعات هزینه رقبا، بازی از یک بازی با اطلاعات ناکامل به یک بازی با اطلاعات کامل که در آن تولیدکنندگان از اطلاعات هزینه‌ای یکدیگر اطلاع دارند، تبدیل می‌شود. اگر تولیدکنندگان دارای واحدهای حرارتی باشند، مهمترین اطلاعات در مورد هزینه آنها، منحنی هزینه درجه دو تولید می‌باشد. تولیدکنندگان علاوه بر اینکه ظرفیت تولید خود به تأمین انرژی سیستم اختصاص می‌دهند، می‌توانند بخشی از ظرفیت خود را در بازارهای خدمات جانبی عرضه نمایند. از بین خدمات جانبی، تأمین ذخیره گردان با توجه به هم‌نوع بودن با انرژی، بیشترین وابستگی را با تأمین انرژی دارد. از این رو در نظر گرفتن این خدمات جانبی در تعیین استراتژی تولیدکنندگان در بازار انرژی منجر به تخصیص بهینه ظرفیت تولیدکنندگان در بازارهای انرژی و ذخیره گردان می‌شود و مجموع سود تولیدکنندگان در دو بازار را افزایش می‌دهد. در بسیاری از تحقیقاتی که برای یافتن نقطه تعادل بازار انجام شده است، کمتر به ذخیره گردان توجه شده است. در این پایان نامه الگوریتمی براساس تئوری نش پیشنهاد شده است که به شبیه‌سازی رفتار متقابل تولیدکنندگان در بازار انرژی و ذخیره گردان ۱۰ دقیقه‌ای تا رسیدن به نقطه تعادل بازار می‌پردازد. در این الگوریتم ضرائب هزینه حاشیه‌ای تولیدکنندگان در ضرائب غیر یک ضرب می‌شود. با تعریف ضریب مشارکت در بازار انرژی، تولیدکنندگان می‌توانند بخشی از ظرفیت تولید خود را جهت شرکت در بازار ذخیره، در بازار انرژی شرکت ندهند. قیمت پیشنهادی تولیدکنندگان برای ذخیره هم‌زمان با پیشنهاد قیمت انرژی به بازار ارائه می‌شود. مسئله به صورت یک بهینه‌سازی دو سطحی مدل می‌شود که در سطح بالایی سود بازیگران را بیشینه می‌کند و در سطح پایینی بازار را تسویه می‌نماید. جهت حل این مسئله ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تجمع ذرات مورد استفاده قرار گرفته است. محدودیت‌های شبکه انتقال با اجرای برنامه پخش بار بهینه مستقیم در الگوریتم مد نظر قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: استراتژی پیشنهاد قیمت، ضرائب استراتژیک، تئوری تعادل نش، پخش بار بهینه مستقیم، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تجمع ذرات

فهرست مطالب

فصل اول	۱
مقدمه	۱
فصل دوم	۷
تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت	۷
۱-۲ مقدمه	۷
۲-۲ صنعت برق سنتی	۹
۳-۲ انگیزه‌های تجدید ساختار صنعت برق	۹
۴-۲ تاریخچه تجدید ساختار	۱۰
۵-۲ عوامل مؤثر بر روند تجدید ساختار	۱۰
۶-۲ مراحل هشتگانه اصلاحات در صنعت برق	۱۲
۱-۶-۲ جدا سازی انحصارات عمودی	۱۳
۲-۶-۲ ایجاد بازار عمده فروشی برق	۱۳
۳-۶-۲ تضمین دسترسی به شبکه انتقال	۱۵
۴-۶-۲ ایجاد یک ناظر مستقل	۱۵
۵-۶-۲ در نظر گرفتن مسایل مربوط به اصلاحات در قانون	۱۶
۶-۶-۲ حمایت از تولید کنندگان مستقل برق	۱۶
۷-۶-۲ توجه به مشارکت بخش خصوصی، ثبت شرکت‌ها و خصوصی سازی	۱۶
۸-۶-۲ کسب حمایت عمومی	۱۷
۷-۲ اجزای سیستم‌های تجدید ساختار شده	۱۸
۱-۷-۲ شرکت‌های تولید	۱۸
۲-۷-۲ شرکت‌های توزیع و فروشندگان جزء	۱۸
۳-۷-۲ مالکین شبکه انتقال	۱۹
۴-۷-۲ بهره‌بردار مستقل سیستم	۱۹
۵-۷-۲ بورس برق	۲۳
۶-۷-۲ هماهنگی کننده‌های زمانبندی	۲۴
۸-۲ جمع بندی فصل	۲۵
فصل سوم	۲۶
نظریه بازی‌ها و کاربرد آن در بازار برق	۲۶
۱-۳ مقدمه	۲۶

۲۸	۲-۳ طبقه بندی نظریه بازی ها
۲۸	۱-۲-۳ ایستایی یا پویایی بازی
۲۸	۲-۲-۳ تضاد منافع یا امکان تشریک مساعی و همکاری
۲۹	۳-۲-۳ تعداد دفعات انجام بازی
۲۹	۴-۲-۳ تقسیم بندی بازی ها از نظر اطلاعات
۳۰	۵-۲-۳ ثابت یا متغیر بودن قواعد بازی
۳۱	۶-۲-۳ همکارانه یا غیر همکارانه بودن بازی
۳۱	۳-۳ تعادل نش
۳۳	۴-۳ مدل های رقابت ناکامل
۳۳	۱-۴-۳ مدل کورنات
۳۶	۲-۴-۳ مدل برتراند
۳۹	۳-۴-۳ مدل تابع تعادلی عرضه
۳۹	۵-۳ رقابت ناکامل در بازار برق
۴۰	۶-۳ تعادل توابع عرضه
۴۲	۷-۳ جمع بندی فصل

فصل چهارم ۴۴

۴۴	مدلسازی رفتار قیمت دهی تولیدکنندگان
۴۴	۱-۴ مقدمه
۴۵	۲-۴ پیشنهاد قیمت در بازار
۴۶	۳-۴ قیمت دهی در هزینه حاشیه ای
۴۷	۱-۳-۴ بازار با تسویه یکنواخت
۴۸	۲-۳-۴ بازار با تسویه بر مبنای پیشنهاد
۴۹	۴-۴ قیمت دهی استراتژیک در بازار انرژی
۵۱	۵-۴ قیمت دهی استراتژیک در بازار انرژی و ذخیره گردان
۵۲	۶-۴ مدل های تسویه بازار در بازار ذخیره گردان
۵۵	۷-۴ الگوریتم پیشنهادی برای یافتن نقطه تعادل بازار
۶۲	۸-۴ جمع بندی فصل

فصل پنجم ۶۳

۶۳	نتایج شبیه سازی
۶۳	۱-۵ مقدمه
۶۳	۲-۵ شبکه آزمون
۶۴	۳-۵ نقطه تعادل بازار در بازار انرژی

۶۵	..... ۱-۳-۵ بازار انرژی با تسویه بر مبنای پیشنهاد
۶۸	..... ۲-۳-۵ بازار انرژی با تسویه یکنواخت
۷۱	..... ۴-۵ نقطه تعادل در بازار انرژی و ذخیره گردان
۷۲	..... ۱-۴-۵ نقطه تعادل در بازار با تسویه یکنواخت
۷۶	..... ۲-۴-۵ نقطه تعادل در بازار با تسویه بر مبنای پیشنهاد
۸۱	..... ۵-۵ جمع بندی فصل
۸۲	..... فصل ششم
۸۲	..... نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۵	..... پیوست الف
۸۵	..... الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات
۹۱	..... پیوست ب
۹۱	..... الگوریتم ژنتیک
۱۰۲	..... مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل شماره ۱-۳: سطح رقابت و مدل‌های رقابت ۴۳
- شکل شماره ۱-۴: تابع هزینه تولیدکننده ۴۵
- شکل شماره ۲-۴: پرداختی به تولیدکنندگان در بازار پرداخت بر اساس نقطه تسویه بازار ۴۷
- شکل شماره ۳-۴: پرداختی به تولیدکنندگان در بازار پرداخت بر مبنای پیشنهاد ۴۹
- شکل شماره ۴-۴: منحنی هزینه استراتژیک با ضرائب متفاوت ۵۰
- شکل شماره ۵-۴: پیشنهادات قیمت تولیدکنندگان در بازار انرژی و ذخیره گردان ۵۴
- شکل شماره ۶-۴: فلوچارت مرحله اول الگوریتم ۵۹
- شکل شماره ۷-۴: فلوچارت مرحله دوم الگوریتم ۶۱
- شکل شماره ۱-۵: شبکه نه شینه WSCC ۶۴
- شکل شماره ۲-۵: تغییرات قیمت آخرین بلوک پذیرفته شده بازار انرژی در مرحله اول با تسویه بر مبنای پیشنهاد ۶۶
- شکل شماره ۳-۵: تغییرات سود بازیگران در بازار انرژی در مرحله اول با تسویه بر مبنای پیشنهاد (بر حسب دلار) ۶۶
- شکل شماره ۴-۵: تغییرات انرژی برنده شده هر یک از تولیدکنندگان در مرحله اول با تسویه بر مبنای پیشنهاد ۶۷
- شکل شماره ۵-۵: تغییرات قیمت آخرین بلوک پذیرفته شده بازار انرژی در مرحله اول با تسویه یکنواخت ۶۹
- شکل شماره ۶-۵: تغییرات سود بازیگران در بازار انرژی در مرحله اول با تسویه یکنواخت (بر حسب دلار) ۶۹
- شکل شماره ۷-۵: تغییرات انرژی برنده شده هر یک از تولیدکنندگان در مرحله اول با تسویه یکنواخت ۷۰
- شکل شماره ۸-۵: تغییرات قیمت تسویه در بازارهای انرژی و ذخیره در مرحله اول با تسویه یکنواخت ۷۳
- شکل شماره ۹-۵: تغییرات سود بازیگران در مرحله اول با تسویه یکنواخت (بر حسب دلار) ۷۳
- شکل شماره ۱۰-۵: تغییرات انرژی برنده شده هر یک از تولیدکنندگان در مرحله اول با تسویه یکنواخت ۷۵
- شکل شماره ۱۱-۵: تغییرات ذخیره برنده شده هر یک از تولیدکنندگان در مرحله اول با تسویه یکنواخت ۷۶
- شکل شماره ۱۲-۵: تغییرات قیمت آخرین بلوک پذیرفته شده انرژی و ذخیره در مرحله اول با تسویه بر مبنای پیشنهاد ۷۷
- شکل شماره ۱۳-۵: تغییرات سود بازیگران در مرحله اول با تسویه بر مبنای پیشنهاد در بازار انرژی و ذخیره (بر حسب دلار) ۷۷
- شکل شماره ۱۴-۵: تغییرات انرژی برنده شده هر یک از تولیدکنندگان در مرحله اول با تسویه پرداخت بر مبنای پیشنهاد ۷۸
- شکل شماره ۱۵-۵: تغییرات ذخیره برنده شده هر یک از تولیدکنندگان در مرحله اول با تسویه بر مبنای پیشنهاد ۷۸
- شکل (الف-۱): تغییر موقعیت هر ذره با توجه به بردارهای سرعت در الگوریتم PSO ۸۹
- شکل (الف-۲): حرکت همه ذرات به سوی نقطه بهینه در الگوریتم PSO ۹۰
- شکل (ب-۱): شمایی از روند کلی الگوریتم ژنتیک ۹۶

فهرست جداول

- جدول شماره ۵-۱- مشخصات تولیدکنندگان سیستم WSCC ۶۴
- جدول شماره ۵-۲- مشخصات شبکه انتقال سیستم WSCC ۶۴
- جدول شماره ۵-۳- مشخصات بارهای مصرفی سیستم WSCC ۶۴
- جدول شماره ۵-۴- نتایج مرحله اول وقتی تولیدکننده سوم آخرین پیشنهاد قیمت را ارائه می کند با تسویه بر مبنای پیشنهاد (بازار انرژی) ۶۸
- جدول شماره ۵-۵- نتایج نهایی مربوط به تکرارهای مرحله اول و جواب نهایی در مرحله دوم با تسویه بر مبنای پیشنهاد (بازار انرژی) ۶۸
- جدول شماره ۵-۶- نتایج مرحله اول وقتی تولیدکننده سوم آخرین پیشنهاد قیمت را ارائه میکند با تسویه بازار یکنواخت (بازار انرژی) ۷۰
- جدول شماره ۵-۷- نتایج تکرارهای مرحله اول و جواب نهایی مرحله دوم با تسویه یکنواخت در بازار انرژی ۷۱
- جدول شماره ۵-۸- نتایج مرحله اول وقتی تولیدکننده سوم آخرین پیشنهاد قیمت را ارائه می کند با تسویه بازار یکنواخت در بازار انرژی و ذخیره ۷۴
- جدول شماره ۵-۹- نتایج تکرارهای مرحله اول و جواب نهایی مرحله دوم با تسویه یکنواخت در بازار انرژی و ذخیره ۷۴
- جدول شماره ۵-۱۰- نتایج مرحله اول وقتی تولیدکننده سوم آخرین پیشنهاد قیمت را ارائه می کند با تسویه بر مبنای پیشنهاد در بازار انرژی و ذخیره ۷۹
- جدول شماره ۵-۱۱- نتایج تکرارهای مرحله اول و جواب نهایی مرحله دوم با تسویه بر مبنای پیشنهاد در بازار انرژی و ذخیره ۸۰

فصل اول

مقدمه

صنعت برق، یکی از صنایع زیربنایی در کلیه کشورها است که از تاثیرگذارترین صنایع بر رشد، شکوفایی، رفاه اجتماعی و رضایت عمومی شناخته شده است. اگرچه تولید برق تمایز زیادی با تولید دیگر کالاهای اقتصادی ندارد، اما از دیدگاه اجتماعی در طی سالیان طولانی به برق و تامین آن از دید خدمات عمومی و نه یک کالای اقتصادی، توجه شده است. وابسته بودن بخش‌های مختلف صنعت برق شامل تولید، انتقال و توزیع به یکدیگر از طرفی، نیاز به سرمایه‌گذاری سنگین بخش‌های مختلف این صنعت از سوی دیگر و در نهایت انتظار جوامع از دولت‌ها مبنی بر وظیفه تامین برق در جایگاه خدمات عمومی در سال‌های گذشته، سبب گردید که این صنعت بصورت یکپارچه و با سرمایه‌گذاری دولتی و یا با سرمایه‌گذاری خصوصی ولی با سود تضمین شده پایه‌گذاری شود.

در چنین ساختاری چنانچه سخت‌افزار این صنعت بصورت بهینه طراحی شده و از آن در شرایط بهینه بهره‌برداری گردد، به پیشینه‌شدن رفاه اجتماعی و رضایت عمومی خواهد انجامید. با این حال تجربه بیش از صد سال پایه‌گذاری این صنعت در جوامع مختلف نشان می‌دهد که حتی با وجود سیستم‌های نظارتی و تنظیم‌کننده، اهداف اقتصادی و اجتماعی بصورت بهینه و توامان حاصل نشده است. حاصل این تجربیات سبب نگرش جدید به ساختار این صنعت گردیده است بطوریکه سال‌های پایانی دهه ۹۰ میلادی به بعد را می‌توان سال‌های بازنگری جدی در ساختار این صنعت در جهان دانست. تجدیدساختار در صنعت برق در

سال‌های گذشته در دستور کار قرار داشته است و در طی سال‌های اخیر منجر به تحولات جدی گردیده است.

بر اساس نظریات اقتصادی، در یک بازار ایده‌آل در شرایط بیشینه رفاه اجتماعی و رضایت عمومی، قیمت کالای تولیدی با هزینه نهایی آن کالا برابر خواهد بود. تجربه دنیا نشان داده است که رسیدن به چنین شرایطی چندان ساده نمی‌باشد. با این حال با طراحی مناسب ساختار می‌توان به سمت چنین هدفی حرکت نمود. برای دستیابی به چنین هدفی، نگرشی جدید در طی سال‌های اخیر، برق را بعنوان کالایی که چون دیگر کالاها مبادله می‌شود در نظر گرفته است. در این راستا و به منظور رسیدن به افزایش بهره‌وری، جلوگیری از انحصار (اعم از دولتی و خصوصی) از مهمترین گام‌ها شناخته شده است. [۱].

در گذشته بهره‌برداری از نیروگاه‌ها بر اساس هزینه^۱ تولید صورت می‌گرفت، به گونه‌ای که تولیدکننده‌ای که می‌توانست برق ارزان‌تر تولید کند، سهم بیشتری از تولید کل سیستم را به خود اختصاص می‌داد. اما در ساختار جدید صنعت برق، بهره‌برداری از سیستم بر اساس قیمت^۲ صورت می‌گیرد. در چنین وضعیتی تولیدکنندگانی که برق خود را ارزان‌تر به بازار عرضه کنند، شانس بیشتری برای تصاحب سهم بازار خواهند داشت. بنابراین قیمت برق توسط مکانیزم بازار تعیین می‌گردد. چنین سازوکار بازاری که تولیدکنندگان برای تصاحب سهم بیشتری از بازار با یکدیگر رقابت می‌کنند، نهایتاً منجر به کاهش قیمت برق می‌گردد.

در ساختار جدید تولیدکنندگان که به صورت مستقل بهره‌برداری می‌شوند، می‌توانند قسمتی یا تمام ظرفیت تولید خود را به طور مستقیم به صورت قرارداد دوطرفه^۳ به مصرف‌کننده بفروشند، یا ظرفیت تولید خود را جهت فروش به بازار (حوضچه توان^۴) پیشنهاد دهند. تولیدکنندگان بایستی پیشنهاد قیمت خود را به گونه‌ای به بازار ارائه کنند تا ضمن به دست آوردن سهم مناسب از بازار، بیشترین سود را عاید خود نمایند [۱۱]. برای این منظور تولیدکنندگان علاوه بر در نظر گرفتن وضعیت واحدهای تولیدی خود، بایستی رفتار سایر بازیگران و شرایط بهره‌برداری سیستم قدرت را مد نظر قرار دهند. عموماً تولیدکنندگان دوست دارند انرژی تولیدی خود را با قیمت بالا به فروش برسانند اما ممکن است قیمت بالای پیشنهادی آنها منجر به از دست دادن سهم آنها از بازار گردد و تولیدکننده دیگر جای آنها را در بازار بگیرد.

^۱. Cost-based

^۲. Price-based

^۳. Bilateral contract

^۴. Power Pool

در یک بازار برق ایده‌آل، هر تولیدکننده توان یک قیمت گیرنده^۱ می‌باشد. در تئوری اقتصاد، استراتژی پیشنهاد قیمت بهینه برای یک تولیدکننده سبب می‌شود این تولیدکننده قیمتی مساوی هزینه حاشیه‌ای پیشنهاد دهد. وقتی یک تولیدکننده بدلیل غیر ایده‌آل بودن بازار، بمنظور افزایش سود، قیمتی بالاتر از هزینه حاشیه‌ای پیشنهاد دهد، این رفتار پیشنهاد قیمت استراتژیک نامیده می‌شود [۲].

در بازارهای برق به دلیل محدود بودن تعداد تولیدکنندگان برق، محدودیت‌های شبکه انتقال و همچنین بعضی ویژگی‌های ذاتی انرژی برق از جمله قابل ذخیره نبودن و لزوم مساوی بودن میزان تولید و مصرف در هر لحظه، رقابت کامل بین اجزای بازار امکان‌پذیر نمی‌باشد، بنابراین بعضی تولیدکنندگان می‌توانند سودشان را از طریق ارائه پیشنهاد قیمت استراتژیک و قدرت بازار افزایش دهند.

در ساختار سنتی سیستم‌های قدرت، اجزای سیستم مقید بودند که جهت تأمین امنیت و قابلیت اطمینان سیستم علاوه بر تأمین انرژی الکتریکی، خدمات دیگری نظیر توان راکتیو، ذخیره گردان، خدمات پایدارساز و ... به سیستم ارائه کنند ولی در ساختار جدید، اجزای بازار برای ارائه این خدمات به سیستم، پول دریافت می‌کنند. حتی در بازار برق بسیاری از کشورها برای هر یک از این خدمات مانند بازار انرژی، بازار جداگانه‌ای وجود دارد و ارائه‌کنندگان این خدمات، در ارائه این خدمات با یکدیگر به رقابت می‌پردازند. بنابراین تولیدکنندگان می‌توانند خدمات خود را در بازارهای خدمات جانبی به فروش برسانند. با توجه به محدودیت ظرفیت اجزای سیستم، ارائه یکی از خدمات ممکن است باعث ایجاد محدودیت برای ارائه دهنده در تأمین توان خدمات دیگر گردد. مثلاً با توجه به وجود محدودیت‌های فنی تولیدکنندگان، تولید بیشتر توان راکتیو توسط یک واحد مستلزم تولید کمتر توان اکتیو آن واحد می‌باشد یا با توجه به هم‌جنس بودن انرژی الکتریکی و توان ذخیره‌گردان، ارائه بیشتر یکی ملزم کاهش ارائه دیگری می‌باشد. با این وضعیت تولیدکنندگان بایستی ظرفیت‌های خود را به گونه‌ای در بازارها مختلف به معرض فروش بگذارند تا سرجمع سودشان در بازار بیشینه گردد.

بنابراین سوالی که برای تولیدکنندگان مطرح است این است که اولاً چه مقدار از ظرفیت خود را در هر یک از بازارهای انرژی و خدمات جانبی شرکت دهند. ثانیاً ظرفیت شرکت داده شده خود در هر یک از بازارها را به چه قیمتی به بازار پیشنهاد دهند تا ضمن رقابت با دیگر تولیدکنندگان، بیشترین سود را عاید خود نمایند.

^۱ . Price Taker

بیشتر تحقیقاتی که در زمینه تعیین استراتژی پیشنهاد قیمت در بازار برق صورت گرفته است معطوف به بازار انرژی بوده است و کمتر به مشارکت تولیدکنندگان در بازار خدمات جانبی در کنار بازار انرژی پرداخته شده است. در این پایان نامه روشی پیشنهاد می‌شود که استراتژی همزمان تولیدکنندگان را در بازار انرژی الکتریکی و ذخیره گردان را به دست می‌آورد.

برای ارائه پیشنهاد بهینه در بازار برق یکی از این دو روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های مبتنی بر بازی، و روش‌های غیربازی [۱۲]. در روش‌های مبتنی بر بازی که در این پایان نامه مورد استفاده قرار گرفته است، از تئوری بازی‌ها به منظور شبیه‌سازی رفتار تولیدکنندگان در بازار به منظور به دست آوردن نقطه تعادل نش استفاده می‌شود. در زمینه تعیین استراتژی تولیدکنندگان در بازار انرژی تحقیقات زیادی انجام شده است. [۲] روشی را ارائه می‌کند که اجازه می‌دهد شرکت‌های موجود در یک بازار نقطه‌ای غیرمشارکتی سود خود را ماکزیمم کنند. در این مرجع با ضرب کردن منحنی هزینه تولید و منحنی سمت مصرف در ضرائب غیر یک و استفاده از الگوریتم ژنتیک نقطه تعادل نش به دست می‌آید. در [۳] با استفاده از روشی موسوم به برنامه ریزی دینامیکی تودرتو و تئوری امکان، استراتژی‌های بهینه حضور واحدهای نیروگاهی در بازار برق با تأکید بر هزینه‌های ژنراتور، محدودیت‌های بهره‌برداری و قیمت بازار مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۳] منحنی هزینه حاشیه‌ای تولید در ضریبی غیر یک ضرب می‌شود. مسئله پیشنهاددهی قیمت در بازار برق به صورت یک مسئله دو سطحی با فرض در اختیار داشتن اطلاعات کامل از تولیدکنندگان رقیب، مدلسازی شده است. تسویه بازار به صورت یک مسئله پخش بار بهینه غیر خطی مدلسازی شده و از روش نیوتن-رافسون برای حل آن استفاده شده است.

در مرجع [۱۴] به مدلسازی رفتار قیمت‌دهی تولیدکنندگان بر اساس قیمت تسویه بازار می‌پردازد. در این مرجع استراتژی بهینه تولیدکنندگان با حل مجموعه‌ای معادلات دیفرانسیل به دست می‌آید. این معادلات دیفرانسیل به گونه‌ای به دست می‌آیند که شرایط لازم جهت بیشینه‌سازی سود تولیدکنندگان را برآورده می‌سازند. در [۱۵] به تعیین استراتژی تولیدکنندگان در فضای رقابتی بازار پرداخته شده است. در این مرجع مسئله به صورت مسئله بهینه‌سازی دو سطحی مدل شده و از شبیه‌سازی مونت کارلو برای محاسبه سود تولیدکنندگان و از الگوریتم ژنتیک برای یافتن استراتژی بهینه تولیدکنندگان در بازار برق استفاده شده است. در مراجع [۱۶] و [۱۷] از بازی‌های مشارکتی به منظور تحلیل امکان ایجاد ائتلاف بین تولیدکنندگان و توافق-

های احتمالی بین آنها در بازار برق استفاده شده است. در [۱۷] از بازی های غیرمشارکتی با اطلاعات ناقص به منظور انتخاب استراتژی بهینه تولیدکنندگان به صورت پیشنهاد گسسته، استفاده شده است.

تمامی مراجع فوق الذکر به مطالعه استراتژی بهینه تولیدکنندگان در بازار انرژی پرداخته‌اند. در مرجع [۱۸] به هماهنگ سازی استراتژی‌های بهینه تولیدکنندگان در بازار روز بعد^۱ انرژی و ذخیره، برای ۲۴ ساعت شبانه روز پرداخته شده است. در این مرجع از الگوریتم ژنتیک به منظور یافتن استراتژی بهینه تولیدکنندگان برای ۲۴ ساعت شبانه روز استفاده شده و از محدودیت های شبکه صرف نظر شده است. در مرجع [۱۲] استراتژی تعادلی تولیدکنندگان در بازارهای همزمان و غیرهمزمان انرژی و ذخیره گردان ۱۰ دقیقه‌ای در بازارهای با تسویه یکنواخت به دست آمده است. در این مرجع رقابت با استفاده از تابع تعادلی عرضه مدل شده است و با استفاده از روشی مبتنی بر تکرار نقطه تعادل نش به دست آمده است. در این مرجع تولیدکنندگان پیشنهادات انرژی خود را در ۳ پله با ضرب کردن هزینه حاشیه‌ای هر پله در یک ضریب بزرگتر از یک و پیشنهادات ذخیره گردان خود را در یک پله ارائه می‌کنند.

در این پایان‌نامه الگوریتمی براساس تئوری تعادل نش پیشنهاد شده است که به شبیه‌سازی رفتار متقابل تولیدکنندگان در بازار انرژی و ذخیره گردان ۱۰ دقیقه‌ای در بازارهای با تسویه یکنواخت و بازارهای با تسویه بر مبنای پیشنهاد، تا رسیدن به نقطه تعادل بازار می‌پردازد. در این الگوریتم ضرائب هزینه حاشیه‌ای تولیدکنندگان در ضرائب غیر یک ضرب می‌شود. با تعریف ضریبی به نام ضریب مشارکت در بازار انرژی، تولیدکنندگان می‌توانند بخشی از ظرفیت تولید خود را جهت شرکت در بازار ذخیره، در بازار انرژی شرکت ندهند. تولیدکنندگان قیمت پیشنهادی خود برای ذخیره را همزمان با پیشنهاد قیمت انرژی به بازار پیشنهاد می‌دهند. مسئله به صورت یک بهینه‌سازی دو سطحی مدل می‌شود که در سطح بالایی سود بازیگران را بیشینه می‌کند و در سطح پایینی بازار را تسویه می‌نماید. جهت حل این مسئله ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تجمع ذرات مورد استفاده قرار گرفته است. محدودیت‌های شبکه انتقال شامل محدودیت خطوط انتقال، با اجرای برنامه پخش بار بهینه مستقیم در الگوریتم دیده شده است.

در فصل دوم، تجدید ساختار در صنعت برق، دلایل و انگیزه‌های تجدید ساختار، مورد بررسی قرار گرفته است و اجزا و بازیگران بازار معرفی شده‌اند. تئوری بازی‌ها و انواع روش‌های بازی و رقابت در فصل سوم معرفی شده است و انواع مختلف رقابت و کاربرد آنها در بازار برق مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل

¹ .day ahead

چهارم الگوریتم پیشنهادی به منظور شبیه‌سازی رفتار قیمت‌دهی تولیدکنندگان در بازار انرژی الکتریکی و ذخیره‌گردان ۱۰ دقیقه‌ای تا رسیدن به نقطه تعادل بازار با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و الگوریتم تجمع ذرات، مدلسازی شده است. نتایج شبیه‌سازی در فصل پنجم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتیجه-گیری و پیشنهادات در فصل ششم آمده است.

فصل دوم

تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت

۱-۲ مقدمه

امروزه انرژی الکتریکی به عنوان یکی از مطلوب‌ترین صورت‌های انرژی، به عنصری حیاتی در زندگی بشر تبدیل شده و برای تأمین آن سیستم‌های قدرت بسیار بزرگ و گسترده در کشورهای مختلف جهان پدید آمده است. مدیریت و کنترل این سیستم‌ها، از آغاز برعهده دولت یا نهادهای شبه‌دولتی مانند شهرداری‌ها بوده و اگر هم به ندرت مالکیت آن‌ها در اختیار بخش خصوصی بوده است، ساختار راهبری و کنترل آن عمودی و مجتمع^۱ بوده است. در این ساختار، تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی منحصراً توسط یک نهاد انجام می‌پذیرد و اصطلاحاً ساختاری انحصاری به شمار می‌رود. بیشتر نظریاتی که در گذشته درباره سیستم قدرت ارائه شده، بر این ایده استوار است که بخش برق یک بخش خدماتی عمومی با ویژگی‌های ذاتی انحصاری است.

در بازارهای انحصاری^۲، شرکت‌های محلی برق دارای حق انحصار در نواحی جغرافیایی معین هستند. براساس این حق انحصاری، شرکت برق^۳ در قلمرو خود معمولاً انحصار فروش کلان یا حتی خرد انرژی الکتریکی را در اختیار دارد. اگر چه شکل بیرونی این انحصار از جایی به جای دیگر متفاوت است، اما بنیاد

^۱ - Vertically Integrated

^۲ - Monopoly Markets

^۳ - Electric Utilities

درونی آن اعطای تمامی امتیازات و نیز تخصیص تمامی محدودیت‌های خدمات رسانی عمومی انحصاری به شرکت‌های برق است. در این شرایط، شرکت برق معمولاً متعهد است که برای تک‌تک مصرف‌کنندگان، انرژی الکتریکی را در سطح مشخصی از قابلیت اطمینان^۱ و با بهایی کاملاً کنترل شده، فراهم آورد. [۴].

تجربیات خصوصی‌سازی^۲ در صنایعی مانند حمل و نقل و مخابرات، ایده مقررزادایی^۳ از صنعت برق را به تدریج مطرح ساخت [۵]. در بسیاری از کشورها، مسایل ناشی از ناکارآمدی و عدم توانایی دولت‌ها در تأمین هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، صنعت را به سمت خصوصی‌سازی سوق داد. از سوی دیگر، در کشورهای پیشرفته نیز روند مقررزادایی به عنوان نتیجه طبیعی مازاد عرضه انرژی در دوره‌ای بود که در پی سرمایه‌گذاری‌های متمرکز و پرهزینه در این صنعت پدید آمده بود. علاوه بر این، بهبود فناوری به‌ویژه در بخش تولید و افزایش بازده نیروگاه‌ها، همراه با کوچک‌تر شدن آن‌ها به این روند یاری رسانیده و گسترش تجارت بین‌المللی و در پی آن ضرورت بهره‌برداری بهینه از منابع اولیه نیز این روند را تقویت کرده است. [۵]

در طول سه دهه گذشته، مقررزادایی در صنعت برق، خصوصاً و در تمامی حوزه‌های بازرگانی در سطح جهان رو به افزایش بوده است، چنان که امروز می‌توان این روند را در حوزه‌های گوناگون از خرید و فروش کالاهای مختلف تا حوزه‌هایی مانند خدمات مالی و پولی شرکت‌ها ملاحظه کرد. اثر مقررزادایی خود را در تمامی بخش‌های اقتصاد نشان داده و شرایط رقابت را به صورتی قابل ملاحظه و ماندگار دگرگون ساخته است. با این وجود، شاید بتوان گفت که مهم‌ترین این دگرگونی‌ها در بخش‌هایی از خدمات رسانی رخ داده که در آن‌ها حرکت از سمت ساختار انحصاری به سوی ساختارهایی دست‌کم تا حدودی رقابتی انجام پذیرفته است. در بخش خدمات، روند مقررزادایی که از مخابرات آغاز شده بود در بازارهای برق و گاز ادامه یافت و امروزه بخش آب را نیز دربر گرفته است. در کشورهای گوناگون نیز این روند در حال حاضر در مراحل مختلف قرار دارد. در حالی که برخی از کشورها زمینه‌های حقوقی مقررزادایی را فراهم می‌کنند، در برخی از کشورها این روند به رقابتی شدن بازارهای خرد^۴ نیز انجامیده است. در سطح درون بخشی نیز روند آزادسازی تقریباً در تمامی بخش‌های شرکت‌های خدماتی از نیروی انسانی گرفته تا

^۱ - Reliability

^۲ - Privatization

^۳ - Deregulation

^۴ - Retail Markets

برنامه‌ریزی عملیاتی و حتی تا سطح تعیین راهبردها، گسترش یافته است. [۴].

۲-۲ صنعت برق سنتی

تقریباً در تمام کشورها و در صد ساله اخیر صنعت برق به صورت انحصاری بوده و تحت نظارت دولت قرار داشته است. این صنعت به صورت یک انحصار یکپارچه و با ساختار عمودی فعالیت می‌کرده که مالکیت کلی تأسیسات تولید، انتقال و توزیع را در اختیار داشته است و فقط شرکت برق ملی و یا محلی مجاز به تولید، انتقال، و توزیع و فروش برق تجاری در قلمرو خدماتی خود بود. شرکت برق مجبور بود نیاز تمام مصرف‌کنندگان منطقه خدماتی خود را تأمین نماید، نه الزاماً آن‌هایی را که سود آورند. شیوه‌های عملیاتی و کسب و کار شرکت برق می‌بایست مطابق با رهنمودها و قواعدی بود که توسط ناظرین دولتی تأمین می‌گردید.

نرخ‌های شرکت برق مطابق با رهنمودها و قواعد تنظیمی دولت بود و دولت تضمین می‌کرد که این نرخ‌های تنظیمی یک حاشیه سود عادلانه و منطقی بالاتر از هزینه‌ها را برای شرکت برق به همراه داشته باشد.

۳-۲ انگیزه‌های تجدید ساختار صنعت برق

از سال‌های ۱۹۷۰، صنعت عرضه برق در حال تغییر و تحول و حرکت به سمتی است که با اجازه رقابت بین تولیدکننده‌ها و ایجاد شرایط بازار سعی در کاهش هزینه‌های تولید و توزیع برق، حذف ناکارآمدی‌های معین، جدا شدن وظایف و افزایش انتخاب مشتری داشته است این تحول به سوی بازار رقابتی برق معمولاً مقررات زدایی یا تجدید ساختار نامیده می‌شود. و از جمله مزایای آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- فراهم آوردن حق انتخاب برای مصرف‌کنندگان

- فراهم آوردن بستری مناسب در جهت ارائه خدمات بهتر

- رقابتی نمودن عرضه کالای برق در سطوح مختلف و به تبع آن تعیین قیمت مناسب برای مصرف

کننده.

- جذب سرمایه‌های موجود در بخش خصوصی و هدایت آن در جهت انتفاع جمعی و عدم نیاز به