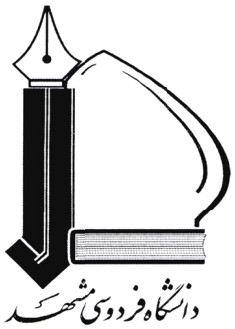


پایان نامه کارشناسی ارشد-گروه مهندسی برق -کنترل

عنوان:

شبیه سازی چند عاملی بازار برق به کمک الگوریتم یادگیری تقویتی

تهیه کننده:

بهزاد نصیری

ارائه شده جهت اخذ درجه ی کارشناسی ارشد مهندسی برق- گرایش کنترل

استاد راهنما:

دکتر محمد باقر نقیبی سیستانی

دکتر علی کریم پور

تابستان ۱۳۸۷

دانشکده مهندسی
دانشگاه فردوسی مشهد

فرم چکیده پایان‌نامه تحصیلی دوره تحصیلات تکمیلی | **دفتر مدیریت تحصیلات تکمیلی**

نام خانوادگی دانشجو: **نصیری** نام: **بهزاد**

استاد یا اساتید راهنما: **دکتر محمد باقر نقیبی سیستانی و دکتر علی کریم پور**

دانشکده: **فنی مهندسی** رشته: **برق** گرایش: **کنترل** مقطع: **کارشناسی ارشد**

تاریخ دفاع: **۸۷/۵/۱۲** تعداد صفحات: **۷۴**

عنوان پایان‌نامه: **شبیه سازی چند عاملی بازار برق به کمک الگوریتم یادگیری تقویتی**

کلید واژه‌ها: **شبیه سازی بازار برق، الگوریتم Q-Learning، الگوریتم SA-Q-Learning، بازار لحظه ای**

چکیده:

در دو دهه گذشته با معرفی تجدید ساختار و شکل گیری بازارهای رقابتی انرژی الکتریکی، این صنعت در اغلب کشورها دچار تغییر و تحولاتی شده است. تغییرات ساختاری در صنعت برق باعث بوجود آمدن مسائل نو و چالشهای جدید در سطوح مختلف این صنعت گردیده است. از دید تنظیم کننده های بازار، این صنعت نیازمند تدوین قوانین مناسب برای بهره برداری کارا و رسیدن به اهداف تجدید ساختار می باشد، همچنین بازیگران بازار نیازمند ابزاری جهت بررسی و تحلیل به مسائل گوناگون خود می باشند. در این شرایط استفاده از شبیه ساز بازار به عنوان یک ابزار مناسب می تواند مورد توجه قرار گیرد. برای شبیه سازی تاکنون روش های زیادی مورد استفاده قرار گرفته است ولی در سالهای اخیر استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی به دلیل توانایی های آن در محیط های ناشناخته مانند بازار برق با اقبال بیشتری همراه بوده است.

در این پایان نامه، با استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی سه مدل برای شبیه سازی بازار برق ارائه شده است وسپس از این مدل ها برای بررسی بعضی عوامل تاثیرگذار بر بازار برق استفاده شده است. در مدلسازی اول، عاملها با استفاده از الگوریتم Q-Learning برای قیمت دهی در بازار برق با یکدیگر به رقابت می پردازند. در این مدل مسائلی همچون تاثیر تغییرات بار، تغییرات تراکم، افزایش تعداد عاملها بر نحوه قیمت دهی عاملها مورد بررسی قرارگرفته است، در ادامه تاثیر حضور عاملی که برای قیمت دهی از استراتژی احتمالی ثابت استفاده می کند در کنار عاملهایی که از الگوریتم Q-Learning استفاده می کنند بررسی شده است، مقایسه نتایج شبیه سازی ها در شرایط مشابه نشان می دهد که عاملی که از الگوریتمی غیر از الگوریتم یادگیری تقویتی برای قیمت دهی استفاده می کند نسبت به عاملهای دیگر سود کمتری بدست خواهد آورد. سپس برای بررسی تاثیر تغییر استراتژی شرکت کنندگان از حداکثر سود به حداکثر درآمد بر قیمت تسویه بازار، یک بازاربرق بوسیله الگوریتم SA-Q-Learning مدلسازی شده و با انجام شبیه سازی ها به این مساله پرداخته شده است. در بخش سوم وانتهایی حراج های یکنواخت و تمایزی و تاثیر هر کدام از این حراج ها بر قیمت تسویه بازار مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای این منظور با استفاده از الگوریتم SA-Q-Learning یک بازار برق رقابتی که در آن شرکت کنندگان به صورت پله ای اقدام به قیمت دهی می کنند مدلسازی شده و تفاوت حراج ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی های حاکی ازبالاتر بودن قیمت تسویه بازار در حراج یکنواخت نسبت به حراج تمایزی در بارهای مختلف بود.

امضاء استاد راهنما

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: پیش گفتار

۱-۱ مقدمه ۱
۱-۲ اهداف تحقیق ۳
۱-۳ مروری بر بخش های مختلف پایان نامه ۴

فصل دوم: تجدید ساختار در صنعت برق و روشهای شبیه سازی بازار برق

۲-۱ مقدمه ۵
۲-۲ تاریخچه تجدید ساختار در صنعت برق ۶
۲-۳ بازیگران بازار ۸
۲-۴ مفاهیم اصلی تجدید ساختار ۱۰
۲-۵ روش‌های مرسوم جهت شبیه سازی بازار برق ۱۴
۲-۵-۱ روش مبتنی بر پیش‌بینی و تخمین قیمت تسویه بازار ۱۵
۲-۵-۲ روش مبتنی بر پیش‌بینی رفتار رقبا ۱۶
۲-۵-۳ روش مبتنی بر تئوری بازی ۱۸
۲-۵-۴ روش مبتنی بر الگوریتم هوشمند ۲۰

فصل سوم: الگوریتم یادگیری تقویتی و کاربرد آن در بازار برق

۳-۱ مقدمه ۲۳
۳-۲ تاریخچه الگوریتم یادگیری تقویتی ۲۴
۳-۲-۱ یادگیری بر اساس آزمون و خطا ۲۵
۳-۲-۲ یادگیری بر اساس کنترل بهینه ۲۵
۳-۲-۳ یادگیری تفاوت گذرا ۲۶
۳-۳ معرفی یادگیری تقویتی ۲۶
۳-۴ الگوریتم *Q-Learning* ۳۳
۳-۴-۱ الگوریتم *SA-Q-learning* ۳۵
۳-۵ مروری بر کاربردهای الگوریتم یادگیری تقویتی در بازار برق ۳۶

فصل چهارم: به کارگیری الگوریتم یادگیری تقویتی برای بررسی قیمت دهی عاملها در بازار برق رقابتی

۴-۱ مقدمه ۴۲
۴-۲ ساختار بازار برق و مساله قیمت دهی ۴۳
۴-۳ پیاده سازی الگوریتم *Q-Learning* برای استراتژی قیمت دهی ۴۴
۴-۳-۱ سیستم تست و شبیه سازی ۴۵
۴-۳-۲ بررسی مساله تغییر بار ۴۶
۴-۳-۳ بررسی مساله تراکم خط ۴۹
۴-۳-۴ بررسی افزایش تعداد واحده: ۵۰

۴-۳-۵ قیمت دهی بر اساس استراتژی احتمالی معین ۵۱
۴-۴ پیاده سازی الگوریتم *SA-Q-Learning* برای استراتژی قیمت دهی ۵۳
۴-۴-۱ سیستم تست و شبیه سازی ۵۵
۴-۵ مقایسه حراجهای یکنواخت و تمایزی با استفاده از الگوریتم *SA-Q-Learning* ۶۰
۴-۵-۱ سیستم تست و شبیه سازی ۶۳

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ مروری برکارهای انجام شده در پایان نامه ۶۶
۵-۲ نتیجه گیری ۶۷
۵-۳ پیشنهادات ۶۹

مراجع: ۷۱

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱) : نمونه ای از منحنی قیمت- انرژی ۱۱

شکل (۲-۲) : ساختار مناقصه در بازار برق ۱۲

شکل (۳-۱): مدل استاندارد یادگیری تقویتی ۲۷

شکل (۴-۱): سیستم تست ۵ باسه ۴۶

شکل (۴-۲): نحوه قیمت دهی واحدها با تقاضای بار ۵۰۰ مگاوات ۴۷

شکل (۴-۳): نحوه قیمت دهی واحدها با تقاضای بار ۶۰۰ مگاوات ۴۸

شکل (۴-۴): نحوه قیمت دهی واحدها با تقاضای بار ۷۰۰ مگاوات ۴۸

شکل (۴-۵): نحوه قیمت دهی واحدها با تقاضای بار ۷۵۰ مگاوات ۴۹

شکل (۴-۶): نحوه قیمت دهی واحدها با تقاضای بار ۵۰۰ مگاوات در یک شبکه متراکم ۵۰

شکل (۴-۷): نحوه قیمت دهی واحدها با تقاضای بار ۵۰۰ مگاوات در شرایط ۹ ژنراتور ۵۱

شکل (۴-۸): فضای حالت عاملها برای قیمت دهی ۵۴

شکل (۴-۹): فضای انتخاب عمل عاملها برای قیمت دهی ۵۴

شکل (۴-۱۰): قیمت دهی واحدها با فرض اینکه واحد پنجم به دنبال افزایش درآمد است ۵۶

شکل (۴-۱۱): قیمت دهی واحدها با فرض اینکه واحد پنجم به دنبال افزایش سود است ۵۷

شکل (۴-۱۲) :تمامی مراحل طی شده در قیمت دهی واحد پنجم ۵۸

شکل (۴-۱۳): قیمت دهی واحدها با فرض اینکه سه واحد تقسیم شده واحد پنجم به دنبال افزایش درآمد هستند ۵۹

شکل (۴-۱۴): قیمت دهی واحدها با فرض اینکه سه واحد تقسیم شده واحد پنجم به دنبال افزایش سود هستند ۶۰

شکل (۴-۱۵): قیمت دهی پله ای ۶۱

شکل (۴-۱۶): قیمت دهی پله ای سه ژنراتور ۶۳

شکل (۴-۱۷): قیمت تسویه بازار در حراجهای یکنواخت وتمایزی ۶۴

شکل (۴-۱۸): تمامی مراحل طی شده در قیمت دهی واحدها در حراج یکنواخت و تمایزی ۶۵

فصل اول

پیش گفتار

۱-۱ مقدمه

روند تجدید ساختار در صنایعی چون صنعت هواپیمایی، مخابرات بین الملل و گاز طبیعی و نتایج مثبت حاصل از آن تحلیلگران و سیاستگذاران عرصه صنعت برق را به اندیشه استفاده از تجارب بدست آمده ترغیب نمود. اکنون ساختار صنعت برق در بسیاری از کشورهای جهان در حال گذر از فضای انحصاری به فضای رقابتی است. در این فرایند که تحت عنوان کلی تجدید ساختار در صنعت برق پیگیری می شود، کشورهای مختلف با مدل های متفاوتی جهت خصوصی سازی و رقابتی کردن این صنعت در حال حرکتند. در ساختار رقابتی بخش‌های تولید، انتقال و توزیع از نظر اقتصادی به صورت بخش هایی مستقل و جدا از یکدیگر به فعالیت می پردازند.

در این شرایط با طراحی و راه اندازی بازارهای تجاری انرژی الکتریکی و طرح ایده دسترسی آزاد کلیه شرکت های تولیدی به شبکه انتقال، امکان ایجاد فضای رقابتی در این صنعت مهیا گردیده است. به این ترتیب الکتریسیته به عنوان یک کالا در بازارهای تجاری مختلف با توجه به قیمت پیشنهادی خریداران و فروشندگان مبادله می گردد. در

این میان بخش های انتقال و توزیع به عنوان شرکت های خدمات رسانی، وظیفه انتقال فیزیکی الکتریسیته را برعهده دارند. از طرفی اجرای طرح های توسعه در این صنعت نیازمند عبور از مالکیت دولتی و جذب سرمایه های بخش خصوصی می باشد. به این ترتیب تغییرات ساختار اقتصادی در دو بعد مقررات زدایی[1] و خصوصی سازی به عنوان دو ابزار کلیدی و با اهداف مشخص و براساس شرایط سیستم قابل پی ریزی است. البته روند تجدید ساختار در هر یک از دو بعد مقررات زدایی و خصوصی سازی بایستی مبتنی بر شرایط سیاسی، اقتصادی، فرهنگی و زیست محیطی کشور یا منطقه مورد مطالعه صورت گیرد. به همین دلیل تجدید ساختار در کشورها و مناطق مختلف دنیا به اشکال گوناگون طراحی و پیاده سازی شده است.

همان طور که اشاره گردید با شروع کار تجدید ساختار علی رغم نکات مثبتی که این فرایند به همراه آورده است، صنعت برق را در حوزه های مختلف اقتصادی، بهره برداری و کنترل دستخوش چالش ها و مسائل جدید نموده است. محیط تجدید ساختار از بازیگران مختلفی مانند فروشندگان، مصرف کنندگان، شرکت های واسطه، بهره بردار مستقل سیستم، نهادهای قیمت گذار، و ... تشکیل شده است که این شرکت کنندگان در سطوح مختلف با همدیگر در تعامل هستند و بر عملکرد و رفتار بازار برق تأثیر می گذارند.

از طرف دیگر عدم قطعیت با توجه به میزان تغییرات تقاضا، رفتار بازیگران بازار و پیشامدهای اتفاقی و ذاتی سیستم قدرت، جزء جدانشدنی بازار برق می باشد. همین طور، توانایی بازیگران در تغییر و تطبیق استراتژی ها با شرایط بازار و این مساله که در محیط تجدید ساختار برخلاف محیط انحصاری که به کلیه اطلاعات دسترسی آزاد وجود ندارد بر پیچیدگی های بازار برق افزوده است. از دیگر چالش ها محیط تجدید ساختار شده این است که خریداران و فروشندگان به طور غیر متمرکز هر یک در جهت حداکثر سازی اهداف خود تلاش می کنند و در این راه از استراتژی های مختلفی استفاده می کنند.

این چالش ها باعث شده است که علی رغم تعداد بالای سیستم هایی که در کشورهای مختلف به کار گرفته شده است هیچ کدام از این سیستم ها به اندازه کافی کارا و مطلوب نباشند. درنتیجه تنظیم کننده های بازار همواره به

[1] Deregulation

دنبال بررسی و آزمایش راهکارها و سناریوهای جدید برای افزایش کارایی بازار برق و برآورده کردن اهداف تجدید- ساختار هستند، از طرف دیگر فروشندگان و مصرف کنندگان انرژی نیز به دنبال راهی برای آزمایش استراتژی های خود و برآورده کردن خواسته های خود می باشند. اما باید درنظر داشت که آزمایش یک روش جدید برروی یک شبکه واقعی کاری مشکل، زمان بر، پرهزینه و گاهی نشدنی است، از این رو استفاده از شبیه سازی بازار به عنوان یک ابزار راهگشا مورد استفاده قرار گرفته است.

برای شبیه سازی و پیش بینی قیمت بازار تاکنون روش های زیادی مورد استفاده قرار گرفته است ولی در سالهای اخیر استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی به دلیل توانایی های آن در محیط های ناشناخته مانند بازار برق با اقبال بیشتری همراه بوده است. هدف از این تحقیق استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی جهت شبیه سازی بازار برق و بررسی و آنالیز بعضی ازعوامل تاثیرگذار بر بازار برق است.

۱-۲ اهداف تحقیق

همانطور که اشاره شده فرایند تجدید ساختار در صنعت برق موجب طرح چالشهایی در مسائل تصمیم گیری عاملهای مختلف صنعت برق در حوزه های مختلف بهره برداری گردیده است. مساله قیمت دهی استرتژیک و شبیه سازی بازار برق از منظر الگوریتم یادگیری تقویتی تاکنون در مقالات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج مفیدی نیز گرفته شده است اما هنوز زمینه هایی وجود دارد که تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است.

هدف از این تحقیق در گام اول استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی برای ارائه مدل برای شبیه سازی بازار برق است، در گام دوم نیز قصد داریم از مدلهای ارائه شده استفاده کرده و بازار برق را در شرایط زیر بررسی کنیم:

- تاثیر تغییرات بار دراستراتژی قیمت دهی واحدها
- تاثیر تراکم در خطوط انتقال دراستراتژی قیمت دهی واحدها
- تاثیرافزایش عاملها بر قیمت تسویه بازار
- تاثیر حضور عاملی که برای قیمت دهی از استراتژی احتمالی ثابت استفاده می کند در کنار عاملهایی که از الگوریتم یادگیری تقویتی استفاده می کنند.

- مقایسه حراج های یکنواخت و تمایزی و تاثیر هر کدام بر قیمت تسویه بازار
- مقایسه تاثیر استراتژی شرکت کننده های بازار بر قیمت تسویه بازار(برای مثال اگر استراتژی شرکت کنندگان بازار تنها افزایش سود باشد در مقابل استراتژی که افزایش سود و درآمد را در نظر دارد).

۱-۳ مروری بر بخش های مختلف پایان نامه

پس از مقدمه ای که در این فصل گفته شد، بخش های دیگر پایان نامه در فصل های بعد، به شرح زیر قرار گرفته اند. در فصل دوم روند شکل گیری تجدیدساختار و مفاهیم اساسی آن و اهداف تجدیدساختار مورد مطالعه قرار گرفته و روش های شبیه سازی هوشمند و کلاسیک جهت حل مسئله تصمیم گیری عامل ها و شبیه سازی بازار معرفی شده است. در فصل سوم به معرفی الگوریتم یادگیری تقویتی به عنوان ابزاری کارا جهت مدل سازی فرایند یادگیری اختصاص دارد. سپس به معرفی الگوریتم های Q-learning و SA-Q-learning که در این پایان نامه مورد استفاده قرار گرفته اند پرداخته می شود.در انتهای این فصل نیز به مروری بر کارها و تحقیقاتی که در زمینه بازار برق به کمک الگوریتم یادگیری تقویتی انجام شده است اختصاص یافته است. در فصل چهارم با استفاده از الگوریتم مدلسازی Q-learning بازار برق مدلسازی شده است و با استفاده از مدل ارائه شده به شبیه سازی و بررسی بعضی از چالشهای موجود در صنعت برق پرداخته شده است، سپس با استفاده از الگوریتم SA-Q-learning دو مدل دیگر نیز برای بازار برق ارائه شده است. فصل پنجم به جمع بندی پایان نامه و ارائه نتایج بدست آمده از آن اختصاص دارد.

فصل دوم

تجدید ساختار در صنعت برق و روشهای شبیه سازی بازار برق

۲-۱ مقدمه

صنعت برق و مسائل کنترل و بهره برداری مرتبط با آن از دیرباز مورد توجه محققان بوده است. در دو دهه گذشته با معرفی تجدید ساختار و شکل گیری بازارهای رقابتی انرژی الکتریکی، این صنعت در اغلب کشورها دچار تغییر و تحولاتی شده است. به صورت کلی، تجدید ساختار در یک صنعت به مفهوم دگرگونی و تغییر قوانین قدیمی و تجدید آن ساختار به صورت دیگر می باشد. این واژه بیانگر کلی ترین مفهوم در تغییر صنعت از حالت انحصاری به حالت غیر انحصاری و رقابتی می باشد. ایجاد محیط رقابتی، جلوگیری از انحصار، شفافیت هزینه ها، جبران کمبود منابع دولتی برای سرمایه گذاری و... از جمله مهمترین انگیزه های تجدید ساختار در صنعت برق به حساب می آیند. از طرفی تغییرات ساختاری در صنعت برق باعث بوجود آمدن مسائل نو و چالشهای جدید در سطوح مختلف این صنعت گردیده است. از دید تنظیم کننده های بازار، این

صنعت پیش از گذشته نیازمند تدوین قوانین مناسب و بهره برداری کارا برای رسیدن به اهداف تجدید ساختار می باشد. از طرف دیگر مقررات زدایی باعث طرح مسائل نو در حوزه تصمیم گیری تولیدکنندگان، مصرف کنندگان و شرکت های وابسته گردیده است. در این شرایط بازیگران بازار نیازمند ابزاری جهت بررسی و پاسخ گویی به مسائل گوناگون خود می باشند. از جمله این راهکارها می توان به شبیه سازی بازار اشاره کرد. شبیه-سازی بازار ابزاری مناسب جهت مدلسازی رفتار عاملهای مختلف و تعامل آنها با یکدیگر در محیط رقابتی بازار برق می باشد. آزمایش قوانین مختلف، بررسی استراتژی های اتخاذ شده توسط شرکت کنندگان بازار و .... از جمله مواردی است که به کمک این ابزار می توان به آن دست یافت.

۲-۲ تاریخچه تجدید ساختار در صنعت برق

در قرن بیستم مصرف کنندگان برای خرید انرژی الکتریکی، در انتخاب فروشنده اختیاری نداشتند و باید برق را از بنگاهی انحصاری که ناحیه مصرف آنها را تغذیه می کرد، می خریدند. برخی از این بنگاه ها وظیفه تولید، انتقال از محل تولید تا محل مصرف و توزیع برق به مصرف کنندگان را بر عهده داشتند و لذا به عنوان بنگاههای یکپارچه (با ساختار) عمودی شناخته می شدند. در حالتهای دیگر، مصرف کنندگان، برق را از بنگاهی می خریدند که فقط مسئول فروش و توزیع در منطقه محلی آنها بود. در عوض، این بنگاه توزیع، خود می بایست برق را از تولید کنندگان و شرکت های انتقالی می خرید که دارای انحصار در سطح منطقه جغرافیایی وسیع تری بودند. در بخش هایی از جهان، این بنگاه ها شرکت های خصوصی با مقررات تنظیم شده بودند، در حالی که در بخش هایی دیگر، شرکت های عمومی یا آژانس های دولتی بودند . صرفنظر از مالکیت و سطح یکپارچگی عمودی، انحصار جغرافیایی کماکان امری عادی بود.

بنگاه های الکتریکی که تحت این مدل عمل می کردند، سهمی بسزا در فعالیت های اقتصادی و کیفیت زندگی مردم داشتند. در جوامع صنعتی، بیشتر مردم به شبکه توزیع برق دسترسی دارند. میزان انرژی تحویل شده توسط این شبکه ها طی چندین دهه، هر هشت سال دو برابر شده است. در همین زمان، پیشرفت های مهندسی، موجب بهبود قابلیت

اطمینان تامین برق شده تا حدی که متوسط زمان قطع مصرف کنندگان در بسیاری از نقاط دنیا به کمتر از دو دقیقه در سال رسیده است. این موفقیت ها به برکت پیشرفت های مستمر در فناوری، پدید آمده اند.

در دهه ۸۰ میلادی برخی اقتصاددانان تاکید کردند که این مدل به پایان عمر خویش رسیده است. آنها انحصار را عامل بازدارنده و باعث کاهش انگیزه بهره برداری بهینه و موجب سرمایه گذاری غیر ضروری عنوان کردند و ابراز داشتند که هزینه اشتباهات نهادهای خصوصی نباید بر مصرف کنندگان تحمیل شود. از سوی دیگر، به سبب وابستگی بنگاه های عمومی به بدنه دولت، سیاست در اقتصاد تاثیرگذار بود. برای مثال، عملکرد برخی از بنگاه های عمومی بسیار سود آور بود، تعدادی دیگر، از تعیین نرخ ها در سطحی که منعکس کننده هزینه آنها بود، منع می شدند، یا از منابع لازم برای سرمایه گذاری های ضروری، محروم می گشتند.

این اقتصاددانان پیشنهاد دادند اگر تولید برق به جای اتکا بر مقررات انحصاری یا سیاست های دولتی، بر نظام بازاری مبتنی گردد، قیمت ها کاهش یافته، باعث منفعت اقتصادی همگان خواهد شد. این پیشنهاد در بستر مقررات زدایی عمومی در اقتصاد غرب، در اواخر دهه هفتاد مطرح شد. پیش از توجه به برق، این نهضت، خطوط هوایی، حمل ونقل و تامین گاز را تحت تاثیر قرار داده بود. در همه این بخش ها ، بازار تنظیم شده یا نهادهای انحصاری، به عنوان بهینه ترین روش تحویل «محصول» به مصرف کننده شناخته شده بود؛ زیرا احساس می شد این کالاها با ویژگیهای خاص خود، برای مبادله در بازارهای کاملا آزاد، مناسب نیستند. طرفداران مقررات زدایی ابراز می داشتند که مشخصات ویژه این محصولات، مانعی جدی نبوده، می توان با آنها همانند دیگر کالاها برخورد کرد. اگر شرکت ها، مجاز به رقابت آزاد برای تامین برق باشند، افزایش بهره وری نهایتا همه مصرف کنندگان را منتفع خواهد ساخت. به علاوه، شرکت های رقیب در بازار احتمالا فناوری های مختلفی بر می گزینند. لذا با احتمال کمتری، اثر سرمایه گذاری های غیر منطقی بر مصرف کنندگان تحمیل خواهد شد[1] .

به این ترتیب، تغییرات ساختاری در صنعت برق کشورهای مختلف بر اساس سه اصل ایجاد بازارهای رقابتی انرژی الکتریکی، جداسازی شرکت های خدماتی برق و انتقال و توزیع و امکان دسترسی آزاد به شبکه انتقال در جهت تجدید-

ساختار بوجود آمد. البته اجرای این ساختار در کشورهای مختلف به دلیل متفاوت بودن زیر ساخت های اقتصادی به اشکال گوناگون انجام شد[2] .

۲-۳ بازیگران بازار

به دلیل نیازهای جدیدی که با تغییرات ایجاد شده در ساختار صنعت برق بوجود آمده است، شرکت های جدیدی نیز برای برطرف کردن این نیازها شکل گرفته اند. در این بخش به معرفی عواملی می پردازیم که نقش مهمی را در این بازارها ایفا می کنند. مطالب این بخش بر مبنای مرجع [1] می باشد.

بنگاه یکپارچه (با ساختار) عمودی[1] ، علاوه بر مالکیت شبکه انتقال و توزیع، صاحب نیرو گاهها نیز می باشد. در یک محیط سنتی با مقرات تنظیم شده، چنین شرکتی از انحصار تامین برق در یک منطقه جغرافیایی برخوردار بود. در پی آزاد سازی بازار برق، فعالیتهای تولید و انتقال آن از یکدیگر جدا می شود.

شرکت تولید[2] ***(Genco)*** ، انرژی الکتریکی را تولید کرده، می فروشد. همچنین خدمات دیگری مثل تنظیم فرکانس، کنترل ولتاژ و ذخیره را که بهره بردار سیستم برای حفظ کیفیت و امنیت تامین برق به آنها نیاز دارد ارائه می کند. یک شرکت تولید می تواند مالک یک نیرو گاه یا چندین نیرو گاه با فناوری های متفاوت باشد. در یک محیطی که بنگاه های یکپارچه (با ساختار) عمودی نیز وجود دارند، شرکت های تولیدی، گاه تولید کنندگان مستقل توان[3] (IPP) نامیده می شوند.

شرکت توزیع[4] ***(Disco)***، مالک و بهره بردار شبکه توزیع بوده، در یک محیط سنتی، انحصار فروش برق به مصرف کنندگان متصل به شبکه خود را در اختیار دارد. در محیط کاملا مقررات زدایی شده، فروش انرژی به مصرف کنندگان، کاملا از بهره برداری، تعمیرات و توسعه شبکه توزیع جدا شده است و خرده فروشان در فروش انرژی با یکدیگر رقابت می کنند. ممکن است یکی از این خرده فروشان وابسته به شرکت توزیع محلی باشد.

[1] Vertically integrated utilities
[2] Generating companies
[3] Independent power producer
[4] Distribution companies

خرده فروش[۱] ،انرژی الکتریکی را بازار عمده فروشی خریده، مجددا آن را به مصرف کنندگانی که تمایل یا مجوز حضور در بازار عمده فروشی را ندارند، می فروشند. بعضی از آنها تابع شرکت های تولید یا توزیع هستند. لازم نیست همه مشتریان یک خرده فروش، به شبکه یک شرکت توزیع متصل باشند .

بهره بردار بازار[۲] ***(MO)*** ، از یک سیستم رایانه ای برای تطبیق پیشنهادهای خرید[۳] و پیشنهادهای فروش[۴] ارسال شده استفاده می کند. همچنین عهده دار تسویه پیشنهادهای پذیرفته شده می باشد. بدین معنا که در پی تحویل انرژی، وجوه پرداختی را از خریداران به فروشندگان می رساند. معمولا بهره بردار مستقل سیستم مسئول اجرای بازار نهایی[۵] است که در آن بار وتولید در زمان حقیقی به تعادل می رسند. بازارهایی که مدت زمانی قبل از زمان حقیقی بسته می شوند، نوعا بوسیله بهره بردار انتفاعی مستقل بازار[۶] اجرا می شوند.

بهره بردار مستقل سیستم[۷] ***(ISO)*** ، مسئول اصلی حفظ امنیت سیستم قدرت می باشد. بدین دلیل مستقل نامیده می شود که در محیط رقابتی، شرکت کننده ای را در تشویق یا تنبیه، نسبت به دیگری ترجیح نمی دهد. ISO معمولا فقط مالک ابزارهای محاسباتی و مخابراتی جهت نظارت و کنترل سیستم های قدرت می باشد و معمولا مسئولیت بهره برداری از سیستم ونقش بهره بردار بازار نهایی را همزمان ایفا می نماید.

شرکت انتقال[۸] ***(Transco)*** ، دارایی های انتقال نظیر خطوط هوایی، کابلها، ترانسفورماتورها و جبران سازهای توان راکتیو را در اختیار دارد. این شرکت ها تجهیزات مذکور را مطابق دستور العمل های ISO بهره برداری می نمایند. مالکان خطوط انتقال، گاه زیر مجموعه ای از شرکت های مالک نیروگاه می باشند. یک شرکت مستقل[۹] انتقال مالک شبکه انتقالی است که صاحب نیروگاه نبوده، مثل یک بهره بردار مستقل سیستم عمل می کند.

---

[1] Retailer
[2] Market Operator
[3] Bid
[4] Offer
[5] Market of last resort
[6] Independent for-profit market operator
[7] Independent system operator
[8] Transmission company
[9] Independent transmission company (ITC)

نهاد تنظیم کننده[1] بدنه حکومتی است که مسئولیت اطمینان از بهره برداری کارا و عادلانه را در بخش برق بر عهده دارد. این نهاد تصمیم گیری، قانون گذار بازار برق است و درباره موارد مشکوک به سوء استفاده از قدرت بازار[2] تحقیق می کند. این نهاد قیمت تولید برق و خدمات مختلف را در شرایط انحصاری نیز تعیین می کند.

مصرف کنندگان کوچک[3] انرژی برق را از یک خرده فروش می خرند و از شرکت های توزیع محلی خود یک اتصال به شبکه برق رسانی را اجاره می کنند. مشارت آنها در بازار برق، فراتر از انتخاب یک خرده فروش بین خرده فروشان دیگر نخواهد بود.

مصرف کنندگان بزرگ[4] در طرف مقابل، غالبا به واسطه خرید مستقیم برق از بازار، نقش فعالی در بازار برق دارند. برخی از آنها توانایی کنترل بار خود را به عنوان منبعی که ISO از آن برای کنترل سیستم استفاده می کند، به بازار پیشنهاد می دهند و حتی گاهی مستقیما به شبکه انتقال متصل می شوند.

۲-۴ مفاهیم اصلی تجدید ساختار

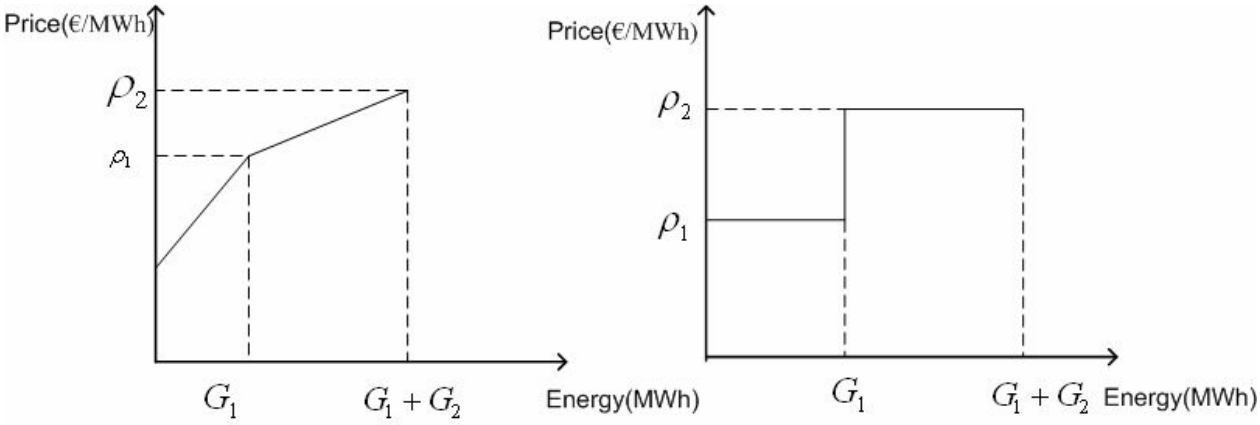
همانطور که اشاره شد بروز تجدیدساختار در صنعت برق موجب طرح مفاهیم جدیدی از جمله معرفی الکتریسیته به عنوان کالا، رقابت، خصوصی سازی و مقررات زدایی صنعت برق و معرفی برخی نهادهای جدید، بازارهای تجاری و حراج‌های مختلف در این ساختار گردیده است.

در محیط جدید بازار برق، بازارهای مختلف انرژی با مشخصات متفاوت طراحی شده اند. درحقیقت، بروز رقابت با وجود بازارها تحقق می یابد. تفاوت بازارها در قوانین حاکم برآنهاست. قوانین حاکم بر بازارها نقش اساسی را در بازدهی اقتصادی آنها بازی می کنند. انرژی الکتریکی در دو بازار قرارداد دو طرفه[5] و بازار پول[6] مبادله می گردد. در بازار قرارداد دوطرفه، خریداران و فروشندگان به صورت جدا با هم به تفاهم می رسند تا قراردادی صورت گیرد اما در بازار

[1] Regulator
[2] Market power
[3] Small consumers
[4] Large consumers
[5] Bilateral Contract
[6] Pool

پول، فروشندگان تولید خود را به یک واسطه (مثلاً یک بازار متمرکز) می فروشند و واسطه آن را به دست مصرف کنندگان می رساند. همچنین مکانیزم هایی تحت عنوان حراج در بازارها جهت تعیین قیمت برق، شرکت کنندگان برنده، میزان مبلغ دریافتی و یا پرداختی استفاده می شود و اجرای آنها معمولاً توسط بهره بردار سیستم یا نهاد بازار صورت می گیرد.

شرکت های فروشنده یا خریدار انرژی مقدار عرضه و تقاضای خود را برای دوره زمانی که حراج درنظر می گیرد به صورت منحنی هایی که پیشنهاد نامیده می شوند به نهاد بازار ارائه می دهند. این منحنی ها معمولاً به صورت منحنی-های پله ای و یا تکه ای خطی می باشند.(شکل۲-۱) با درنظر گرفتن این مطلب که تعادل تقاضا و تولید همراه باید برابر باشد، قیمت برق طبق مکانیزم تسویه بازار مشخص می گردد.



شکل۲-۱ : نمونه ای از منحنی قیمت- انرژی

حراج های انرژی ممکن است جهت تنظیم قیمت تسویه بازار[1] (MCP) به صورت یکنواخت[2] و یا تنظیم چندین قیمت برای کالا (تمایزی[3]) طراحی شود. در حراج یکنواخت، قیمت الکتریسیته همان قیمت تسویه بازار می باشند و برای کلیه

[1] Market Clearing Price
[2] Uniform Pricing
[3] Pay-as-Bid

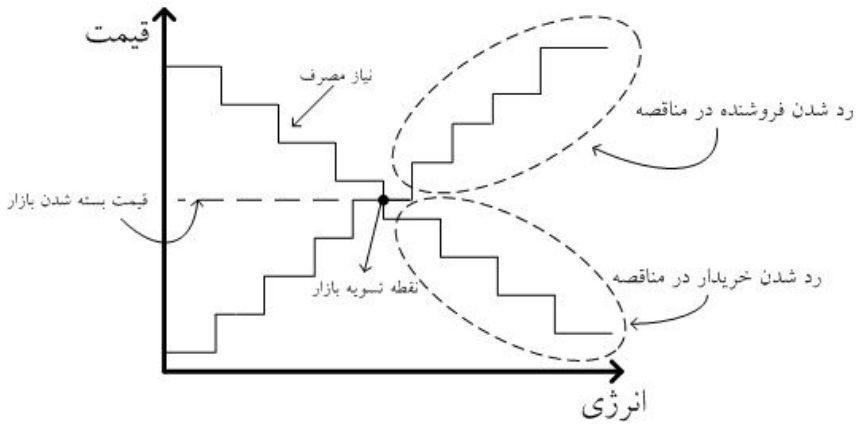
فروشندگان و خریداران یکسان نمی باشد ولی در حراج تمایزی، مبلغی که فروشندگان پرداخت و از خریداران دریافت می‌گردد مطابق قیمت پیشنهادی آنها محاسبه می گردد[3].

در ادامه به توضیح مختصر بعضی از واژه های رایج در بازار برق که در قسمت شبیه سازی ها استفاده شده است می پردازیم.

۱- قیمت تسویه بازار

اساسی ترین مفهوم قیمت گذاری در بازار قیمت تسویه بازار یا MCP می باشد. به طور کلی هنگامی که پرشدگی خط انتقال وجود ندارد، MCP تنها قیمتی است که برای کل سیستم تعریف می شود.

بعد ازاینکه بازیگران بازار قیمت های خود را پیشنهاد دادند ISO منحنی تجمعی پیشنهادی قیمت طرف تولید و منحنی تجمعی پیشنهادی قیمت طرف تقاضا را با یکدیگر برخورد می دهد و محل تقاطع این دو منحنی مطابق شکل همان قیمت MCP است.



شکل۲-۲ : ساختار مناقصه در بازار برق

۲- قیمت گرهی[1]

اگر در یک پریود زمانه خاص ISO با پر شدگی در خط انتقال مواجه شود برای رفع این مشکل تنظیمات گرهی قیمت را درنظر می گیرد. در این شرایط معمولاً سیستم به چند ناحیه تقسیم می شود و در هر ناحیه یک قیمت تسویه ای اعلام می گردد. برای نواحی در دو طرف خط فوق MCP های جداگانه در نظر می گیرد که به ZMCP معروف است.

۳- قیمت حاشیه ای محلی[2] (LMP)

LMPدر حقیقت مجموع هزینه حدی تولید، هزینه پرشدگی خط انتقال و هزینه تلفات می باشد. هنگامی که پرشدگی در انتقال وجود ندارد LMP همان MCP است. وقتی با پرشدگی روبرو هستیم پخش بار بهینه[3](OPF) تمام قیود خط انتقال را برای برقراری تعادل بین تولید و تقاضا در هر باس درنظر می گیرد. هزینه نهایی هر باس همان LMP است. در اکثر کارهای انجام شده برای مدل کردن قیمت برق از MCP استفاده شده است.

۴- قیمت هزینه حدی mc_g

هزینه تولید توان برای تولید کنندگان توان به ازای هر مگاوات می باشد. بدیهی است که تولیدکنندگان توان برای افزایش سود مقدار قیمت پیشنهادی به ISO را بالاتر از این مبلغ ارائه دهند. $(mc_g \le b_g)$ منظور از b_g قیمت پیشنهادی تولیدکنندگان انرژی می باشد.

۵- قیمت سقف بازار P_c

مقداری است که قیمت پیشنهادی تولیدکنندگان توان از آن بیشتر نباید باشد. این قیمت توسط نهاد قانون گذار بازار با توجه به هزینه قابل پرداخت مصرف کنندگان و هزینه حدی تولیدکنندگان توان تعیین می شود $(b_g \le P_c)$.

[1] Zonal MCP
[2] Location Marginal Price
[3] Optimal Power Flow

۲-۵ روش‌های مرسوم جهت شبیه سازی بازار برق

همان طور که در قسمتهای قبل گفته شد، با توجه به چالش‌ها و مسائل جدید موجود در مسائل تصمیم‌گیری عامل‌های مختلف بازار در حوزه‌های گوناگون، همواره نیاز به ابزاری جهت شبیه‌سازی بر پایه مدل‌سازی پدیده‌های مختلف موجود در آن احساس می‌گردد. به طور کلی چهار روش مرسوم جهت مدلسازی فرایند یادگیری عامل‌های بازار و تدوین استراتژی‌های پیشنهاد قیمت بهینه وجود دارد. روش اول بر مبنای پیش‌بینی و تخمین MCP در دوره بعدی مبادلات تکیه دارد. روش دوم بر تعیین استراتژی پیشنهاد قیمت مبتنی بر پیش بینی رفتار رقبا تکیه دارد. روش سوم بر پایه تئوری بازی و استفاده از نقطه تعادل نَش[1] به عنوان نقطه تعادل بازار است. روش چهارم بر مبنای استفاده از الگوریتم‌های هوشمند یادگیری و... صورت می‌گیرد. شبیه‌سازی بازار و تحلیل‌های تجربی هم برای مشخص کردن رفتار استراتژیک به کار رفته، اما روش‌های مرسومی جهت مدل‌سازی بازار و یافتن استراتژی بهینه محسوب نمی‌شود[4].

از آنجایی که در سه روش اول از چهار روش فوق‌الذکر مسائل تصمیم گیری عامل‌های بازار به کمک روش‌های مبتنی بر ریاضیات کلاسیک صورت می‌گیرد و در روش چهارم که استفاده از الگوریتم‌های هوشمند یادگیری است، رفتار عامل با روش‌های یادگیری مانند الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی، منطقی فازی، یادگیری تقویتی و... مدل‌سازی می‌شود، می‌توان این چهار روش را به دوگروه روش‌های کلاسیک و هوشمند تقسیم نمود[5] .

روش‌های کلاسیک

اتخاذ استراتژی بهینه توسط عامل‌های بازار می‌تواند به کمک روش‌های مبتنی بر ریاضیات کلاسیک صورت گیرد. در این گونه مسائل، مدل‌سازی با بهره گیری از یکسری اطلاعات اولیه و اغلب ساده سازیهایی که در مسئله انجام می‌شود صورت می‌گیرد. استفاده از سری زمانی، ریاضیات احتمالی، تئوری بازی و... به عنوان روش‌های ریاضی مطرحی هستند که در این مقالات مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه این فصل به برخی از کاربردهای این روش‌ها در حل مسائل تصمیم‌گیری و بهره‌برداری بازار برق اشاره می‌شود.

[1] Nash Equilibrium

۲-۵-۱ روش مبتنی بر پیش‌بینی و تخمین قیمت تسویه بازار

این روش بر تخمین قیمت تسویه بازار در دوره بعدی مبادلات تکیه دارد. تخمین قیمت تسویه بازار معمولاً از طریق روش‌های پیش‌بینی مانند سری زمانی، شبکه عصبی و ... صورت می‌گیرد. با تخمین MCP بدیهی است که تولیدکننده برای برنده شدن در بازار، قیمت پیش‌نهادی خود را مقداری کمتر از MCP تخمینی به بازار ارائه می‌دهد. پیش‌بینی تقاضا، دانستن رفتار رقبا، پرشدگی خطوط انتقال، قدرت بازار و... از جمله چالش‌هایی است که تخمین MCP را با مشکلاتی مواجه می‌کند.

در مرجع [6] مسئله تصمیم‌گیری برای پیشنهاد قیمت از دید تامین کننده‌های انرژی در بازار لحظه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته شده است و مسئله تصمیم‌گیری به صورت یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف فرمول‌بندی شده است. قیمت دهی از دید یک تولیدکننده انرژی بررسی شده است و از یک روش بهینه سازی استوکستیک گسسته برای مدل‌سازی رفتار رقبا استفاده شده است. تصمیم گیرنده اصلی رفتار بازار را تخمین می‌زند و پارامترهای قیمت‌دهی واحدهای دیگر را تخمین می‌زند و با اتخاذ چنین استراتژی سود خود را در افق زمانی بهینه می‌کند. در این مقاله یک الگوریتم برای محاسبه احتمال‌های گذار[1] و سود در یک مدل MDP ارائه شده است، ولی استفاده از این الگوریتم منوط به داشتن اطلاعات قیمت‌دهی احتمالی رقبا است.

در مرجع [7] با ارائه یک مدل ریاضی و استفاده ازحل یک مسئله بهینه سازی، سعی در افزایش سود واحدهای تولید کننده توان از یک روز تا یک هفته می‌کند. سپس راهی را برای حل مسئله بهینه سازی عدد صحیح مختلط[2] غیر خطی پیوسته در مقیاس بزرگ پیشنهاد می‌کند. به دلیل اینکه قیمت پیشهادی واحدها به صورت پله‌ای در نظر گرفته شده است مدل ارائه شده به صورت پله‌ای در نظر گرفته شده است و استفاده ازمدل عدد صحیح مختلط نیز به دلیل در نظر گرفتن روشن و خاموش شدن واحدهاست.

[1] Transition Probabilities
[2] Mixed Integer