پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق-گرایش کنترل

عنوان:

قیمت‌دهی در بازار برق به‌کمک الگوریتم Q-Learning تطبیقی و قدرت بازار

نگارنده: رضا کاکو لاریمی

استاد راهنما: دکتر محمد باقر نقیبی سیستانی

تابستان ۹۱

به نام آفریدگار سبز . . .

ای صبا نَکهَتی از خاک ره یار بیار

ببر اندوه دل و مژده‌ی دل‌دار بیار

نکته‌ای روح‌فزا از دهن یار بگو

نامه‌ای خوش خبر از عالم اسرار بیار

با سپاس از پدرم، مادرم، مادرم، برادران و خواهرانم.

و با سپاس از استادم.

تقدیم به ن.ج.آ.

بسمه تعالی .

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی دانشجویان .

دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان رساله/پایان نامه: قیمت‌دهی در بازار برق به کمک الگوریتم Q-Learning تطبیقی و قدرت بازار

نام نویسنده: رضا کاکولاریمی

نام استاد راهنما: دکتر محمد باقر نقیبی سیستانی

دانشکده : مهندسی	**گروه: برق**	**رشته تحصیلی: کنترل**
تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۷/۱		**تاریخ دفاع: ۱۳۹۱/۷/۱۵**
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ● دکتری ○		**تعداد صفحات: ۹۵**

چکیده رساله/پایان نامه :

در طی دو- سه دهه‌ی اخیر صنعت برق در سرتاسر جهان، گذار از ساختارهای یک‌پارچه‌ی عمودی را به سمت بازارهای آزاد رقابتی آغاز کرده است. با وجود حرکت به سمت فضای رقابتی، متأسفانه این گذار به‌صورت کامل صورت نگرفته است، و بازارهایی با رقابت ناکامل ایجاد شده‌اند. در بازاری با رقابت ناکامل، تولیدکننده‌گان درمی‌یابند که اگر قیمتی بالاتر از هزینه‌ی حدی‌شان پیشنهاد دهند ممکن است سود بیشتری به‌دست آورند. بنابراین نیاز به ابزارهای مناسب برای قیمت‌دهی بیش از پیش احساس می‌شود. ویژگی‌هایی نظیر اطلاعات نامتقارن، رقابت ناکامل، تعامل استراتژیک، یادگیری تجمعی، و امکان تعادل چندگانه سبب پیچیده شدن بازار برق شده و استفاده از روش‌های سنتی را برای مدل‌سازی بازار برق با مشکل مواجه کرده است. اقتصاد محاسباتی مبتنی بر عامل یکی از روش‌های قدرتمند و جذابی است که به خوبی می‌تواند با این پیچیده‌گی‌ها مواجه شود. در میان روش‌های مدل‌سازی مبتنی بر عامل، یادگیری تقویتی به‌دلیل ذات عامل محور بودن خود برای مدل‌سازی مبتنی بر عامل سیستم‌های پیچیده از جمله بازار برق بسیار توانمند می‌باشد؛ و در بین الگوریتم‌های یادگیری تقویتی، الگوریتم یادگیری-Q از آن‌جا که برای تصمیم‌گیری به مدل سیستم نیاز ندارد، برای مدل‌سازی رفتار بازیگران بازار بسیار مناسب است. اما این الگوریتم همواره خود را در برابر چالشی بزرگ می‌بیند، و آن چالش دوراهی بین کاوش و بهره‌برداری می‌باشد. بازار برق به دلیل ذات چندعامله بودن خود از دید عامل یادگیری تقویتی محیطی ناایستا می‌باشد. در یک محیط ناایستا نیاز به کاوش همواره وجود دارد. اما گاهی اتفاقاتی در بازار رخ می‌دهد که بر روی میزان ناایستایی بازار از دید برخی از عامل‌ها و درنتیجه بر میزان کاوش‌اشان تأثیر می‌گذارد و آن اتفاقی است که منجر می‌شود عاملی از قدرت بازار قابل توجهی برخوردار شود. در این پایان‌نامه رویکردی پیشنهاد می‌دهیم که نرخ کاوش الگوریتم یادگیری-Q را هم‌زمان با تغییرات میزان ناایستا بودن محیط به‌علت تغییرات قدرت بازار تنظیم می‌کند. روش پیشنهادی در یک بازار برق حوضچه‌ی توان شبیه‌سازی شده است و عملکرد آن را با روش‌های یادگیری-Q با نرخ کاوش ثابت، یادگیری-Q با نرخ کاوش کاهشی، و با یادگیری-Q فازی مقایسه کرده‌ایم. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی نسبت به دیگر روش‌های نامبرده، به سودآوری بیشتری منجر می‌شود.

کلید واژه:

۱- بازار برق

۲- قدرت بازار

۳- الگوریتم Q-Learning تطبیقی

۴- دوراهی کاوش – بهره‌برداری

۵- محیط ناایستا - ایستا

امضای استاد راهنما:

تاریخ:

فهرست مطالب

عنوان صفحه

۱ پیش‌گفتار ۱
۱-۱ مقدمه و انگیزه ۱
۱-۲ هدف‌های پژوهش ۳
۱-۳ مروری بر فصل‌های مختلف این پایان‌نامه ۴
۲ مدل‌سازی بازار برق ۶
۲-۱ انواع روش‌های مدل‌سازی بازار برق ۶
۲-۱-۱ مقایسه‌ی سه روش مدل‌سازی از سه جنبه‌ی مختلف ۸
۲-۲ نظریه‌ی پیچیده‌گی ۹
۲-۳ مدل‌سازی مبتنی بر عامل ۱۱
۲-۳-۱ مروری بر شبیه‌سازی مبتنی بر عامل. ۱۲
۲-۴ اقتصاد محاسباتی مبتنی بر عامل ۱۶
۲-۴-۱ پیچیده‌گی در اقتصاد ۱۷
۲-۴-۲ مزیت‌های هوش مصنوعی ۱۸
۲-۴-۳ برخی از مفاهیم کلیدی ۱۸
۲-۵ روش اقتصاد محاسباتی مبتنی بر عامل ۱۹
۲-۵-۱ رابطه‌ی ACE با دیگر روش‌های اقتصادی ۱۹
۲-۵-۲ مزیت مدل‌سازی مبتنی بر عامل بازار برق ۲۰
۲-۶ یادگیری تقویتی ۲۱
۲-۶-۱ تقسیم‌بندی رویکردهای یادگیری از لحاظ میزان فیدبک ۲۱
۲-۶-۲ معرفی یادگیری تقویتی و الگوریتم Q-Learning ۲۳
۳ قدرت بازار ۳۳

۳-۱ شرایط تحقق بازار با رقابت کامل ۳۳
۳-۲ قدرت بازار در بازار برق ۳۴
۳-۳ استراتژی‌های به‌کارگیری قدرت بازار ۳۵
۳-۴ تحلیل قدرت بازار ۳۶
۳-۵ پیشینه‌ی پژوهشی ۳۸
۴ شبیه‌سازی مبتنی بر عامل یک بازار برق نوعی ۴۱
۴-۱ مقدمه ۴۱
۴-۲ فلسفه‌ی و فرمولاسیون ایده‌ی اصلی این پژوهش ۴۲
۴-۳ سنجش قدرت بازار ۴۵
۴-۴ شبیه‌سازی ۴۹
۴-۵ نتایج شبیه‌سازی ۵۵
۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۸۹
۵-۱ مروری بر کارهای انجام شده در این پایان‌نامه به‌همراه نتیجه‌گیری ۸۹
۵-۲ پیشنهادها ۹۳
۶ بن‌مایه‌ها ۹۴

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل ۲-۱: شماتیک انواع روش‌های مدل‌سازی بازار برق ۶
شکل ۲-۲: ساختار ریاضی مدل بهینه‌سازی تک-بنگاه و مدل مبتنی بر تعادل ۸
شکل ۲-۳ : دیاگرام یک سیستم شبیه‌سازی مبتنی بر عامل ۱۲
شکل ۲-۴: رگرسیون روی یک مجموعه‌ی آموزشی نوعی ۲۲
شکل ۲-۵: دیاگرام تعامل عامل-محیط در یادگیری تقویتی ۲۳
شکل ۲-۶: شبه کد الگوریتم Q-Learning ۲۹
شکل ۴-۱: دیاگرام تنظیم اپسیلون و قیمت‌دهی ۴۳
شکل ۴-۲: هزینه‌ی حدی واقعی (MC) و تابع عرضه‌ی (SF) یک تولیدکننده ۴۶
شکل ۴-۳: تخمین‌گر فازی قدرت بازار ۴۷
شکل ۴-۴: دیاگرام تک‌خطی سیستم تست ۱۱ باسه ۴۹
شکل ۴-۵: مکانیزم قیمت‌دهی و تسویه‌ی بازار ۵۱
شکل ۴-۶: مکانیزم قیمت‌دهی ژنراتور ۱۲ در شبیه‌سازی دوم ۵۳
شکل ۴-۷: چگونگی تعیین حالت ۵۳
شکل ۴-۸: توان عبوری از خط انتقال ۱۶ در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۱ ..... ۵۵
شکل ۴-۹: قیمت پیشنهادی ژنراتور ۱۲ به ازای توان تولیدی‌اش در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۱ ..... ۵۶
شکل ۴-۱۰: قیمت محلی باس ۱۰ در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۱ ..... ۵۶
شکل ۴-۱۱: قیمت پیشنهادی ژنراتور ۱۱ به ازای توان تولیدی‌اش در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۱ ..... ۵۶
شکل ۴-۱۲: قیمت‌های پیشنهادی ژنراتورهای ۱ إلی ۱۱ به‌ازای توان تولیدی‌اشان در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۱ ..... ۵۷
شکل ۴-۱۳: توان عبوری از خط انتقال ۱۷ در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۱ ..... ۵۷
شکل ۴-۱۴: توان تولیدی ژنراتور ۱۱ در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۱ ..... ۵۸
شکل ۴-۱۵: توان تولیدی ژنراتور ۱۲ در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۱ ..... ۵۸
شکل ۴-۱۶: قیمت محلی باس ۱۱ در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۱ ..... ۵۸
شکل ۴-۱۷: منحنی تغییرات پارامترهای قدرت بازار ژنراتور ۱۲ در سناریوی ۱ ..... ۵۹
شکل ۴-۱۸: منحنی تغییرات اپسیلون سیاست یادگیری ژنراتور ۱۲ در شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۱ ..... ۶۰
شکل ۴-۱۹: قیمت پیشنهادی ژنرانور ۱۲ به ازای توان تولیدی‌اش در شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۱ ..... ۶۰
شکل ۴-۲۰: توان تولیدی ژنراتور ۱۲ در شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۱ ..... ۶۱
شکل ۴-۲۱: مقایسه‌ی متوسط سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در دو شبیه‌سازی از سناریوی ۱ ..... ۶۱

شکل ۴-۲۲: میانگین قیمت محلی باس ۱۱ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی ۱ ..... ۶۲
شکل ۴-۲۳: میانگین توان تولیدی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی ۱ ..... ۶۲
شکل ۴-۲۴: میانگین قیمت محلی باس ۱۱ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۱ ..... ۶۲
شکل ۴-۲۵: میانگین توان تولیدی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۱ ..... ۶۲
شکل ۴-۲۶: مقایسه‌ی میانگین متوسط سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای مختلف دو شبیه‌سازی از سناریوی ۱ ..... ۶۳
شکل ۴-۲۷: توان عبوری از خط انتقال ۱۶ در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۲ ..... ۶۳
شکل ۴-۲۸: توان تولیدی ژنراتور ۱۱ در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۲ ..... ۶۴
شکل ۴-۲۹: توان تولیدی ژنراتور ۱۲ در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۲ ..... ۶۴
شکل ۴-۳۰: قیمت پیشنهادی ژنراتور ۱۲ به ازای توان تولیدی‌اش در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۲ ..... ۶۴
شکل ۴-۳۱: قیمت محلی باس ۱۱ در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۲ ..... ۶۵
شکل ۴-۳۲: قیمت‌های پیشنهادی ژنراتورهای ۱ إلی ۱۱ به‌ازای توان تولیدی‌اشان در شبیه‌سازی اول از سناریوی ۲ ..... ۶۵
شکل ۴-۳۳: تغییرات پارامترهای قدرت بازار ژنراتور ۱۲ در سناریوی ۲ ..... ۶۶
شکل ۴-۳۴: منحنی تغییرات اپسیلون سیاست یادگیری ژنراتور ۱۲ در شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۲ ..... ۶۷
شکل ۴-۳۵: قیمت پیشنهادی ژنراتور ۱۲ به ازای توان تولیدی‌اش در شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۲ ..... ۶۷
شکل ۴-۳۶: توان تولیدی ژنراتور ۱۲ در شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۲ ..... ۶۷
شکل ۴-۳۷: مقایسه‌ی متوسط سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در دو شبیه‌سازی از سناریوی ۲ ..... ۶۸
شکل ۴-۳۸: میانگین قیمت محلی باس ۱۱ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی ۲ ..... ۶۸
شکل ۴-۳۹: میانگین توان تولیدی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی ۲ ..... ۶۹
شکل ۴-۴۰: میانگین قیمت محلی باس ۱۱ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۲ ..... ۶۹
شکل ۴-۴۱: میانگین توان تولیدی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۲ ..... ۶۹
شکل ۴-۴۲: مقایسه‌ی میانگین متوسط سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای مختلف دو شبیه‌سازی از سناریوی ۲ ..... ۷۰
شکل ۴-۴۳: میانگین توان عبوری از خط انتقال ۱۶ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی ۳ ..... ۷۰
شکل ۴-۴۴: میانگین قیمت پیشنهادی ژنراتورهای ۱۲ و ۱۳ به ازای توان تولیدی‌اشان در ۵۰ بار اجرای شبیه سازی اول از سناریوی ۳ ..... ۷۱
شکل ۴-۴۵: میانگین توان تولیدی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی ۳ ..... ۷۱
شکل ۴-۴۶: میانگین توان تولیدی ژنراتور ۱۳ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی ۳ ..... ۷۲
شکل ۴-۴۷: میانگین قیمت محلی باس ۱۱ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی ۳ ..... ۷۲
شکل ۴-۴۸: میانگین قیمت پیشنهادی ژنراتورهای ۱ إلی ۱۱ به ازای توان تولیدی‌اشان در ۵۰ بار اجرای شبیه سازی اول از سناریوی ۳ ..... ۷۲
شکل ۴-۴۹: میانگین پارامترهای قدرت بازار ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای سناریوی ۳ ..... ۷۳
شکل ۴-۵۰: منحنی میانگین اپسیلون سیاست یادگیری ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۳ ..... ۷۴
شکل ۴-۵۱: میانگین قیمت پیشنهادی ژنراتورهای ۱۲ و ۱۳ به ازای توان تولیدی‌اشان در ۵۰ بار اجرای شبیه سازی دوم از

سناریوی ۳ ..... ۷۴
شکل ۴-۵۲: میانگین قیمت محلی باس ۱۱ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی دوم از سناروی ۳..... ۷۴
شکل ۴-۵۳: میانگین توان تولیدی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۳ ..... ۷۵
شکل ۴-۵۴: مقایسه‌ی میانگین متوسط سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای مختلف دو شبیه‌سازی از سناریوی ۳ ..... ۷۵
شکل ۴-۵۵: میانگین توان تولیدی ژنراتور ۱۱ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی ۴..... ۷۶
شکل ۴-۵۶: میانگین توان عبوری از خط انتقال ۱۶ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی ۴ ..... ۷۷
شکل ۴-۵۷: میانگین قیمت محلی باس ۱۰ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی ۴..... ۷۷
شکل ۴-۵۸: میانگین قیمت پیشنهادی ژنراتورهای ۱۲ و ۱۳ به ازای توان تولیدی‌اشان در ۵۰ بار اجرای شبیه سازی اول از سناریوی ۴ ..... ۷۷
شکل ۴-۵۹: میانگین توان تولیدی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی ۴..... ۷۸
شکل ۴-۶۰: میانگین توان تولیدی ژنراتور ۱۳ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی۴..... ۷۸
شکل ۴-۶۱: میانگین قیمت محلی باس ۱۱ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی اول از سناریوی ۴..... ۷۸
شکل ۴-۶۲: میانگین قیمت پیشنهادی ژنراتورهای ۱ إلی ۱۱ به ازای توان تولیدی‌اشان در ۵۰ بار اجرای شبیه سازی اول از سناریوی ۴ ..... ۷۹
شکل ۴-۶۳: میانگین پارامترهای قدرت بازار ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای سناریوی ۴ ..... ۷۹
شکل ۴-۶۴: منحنی میانگین اپسیلون سیاست یادگیری ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۴ ..... ۸۰
شکل ۴-۶۵: میانگین قیمت محلی باس ۱۱ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۴..... ۸۰
شکل ۴-۶۶ : میانگین توان تولیدی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی دوم از سناریوی ۴ ..... ۸۱
شکل ۴-۶۷: مقایسه‌ی میانگین متوسط سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای مختلف دو شبیه‌سازی از سناریوی ۴ ..... ۸۱
شکل ۴-۶۸: مقایسه‌ی میانگین متوسط سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای سه شبیه سازی QL، FQL و AQL از سناریوی ۱ ..... ۸۲
شکل ۴-۶۹: مقایسه‌ی میانگین متوسط سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای سه شبیه سازی QL، FQL و AQL از سناریوی ۲ ..... ۸۳
شکل ۴-۷۰: مقایسه‌ی میانگین متوسط سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای سه شبیه سازی QL، FQL و AQL از سناریوی ۳ ..... ۸۳
شکل ۴-۷۱: مقایسه‌ی میانگین متوسط سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای سه شبیه سازی QL، FQL و AQL از سناریوی ۴ ..... ۸۴
شکل ۴-۷۲: مقایسه‌ی میانگین متوسط سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای دو شبیه سازی چهارم و پنجم از سناریوی ۱ ..... ۸۵
شکل ۴-۷۳: میانگین اپسیلون سیاست یادگیری ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی چهارم و پنجم از سناریوی ۱ ..... ۸۵
شکل ۴-۷۴: میانگین قیمت پیشنهادی ژنراتور ۱۲ به ازای توان تولیدی‌اش در ۵۰ بار اجرای شبیه سازی چهارم از سناریوی ۱ ..... ۸۶

شکل ۴-۷۵: میانگین قیمت پیشنهادی ژنراتور ۱۲ به ازای توان تولیدی‌اش در ۵۰ بار اجرای شبیه‌سازی پنجم از سناریوی ۱ ۸۶
شکل ۴-۷۶: مقایسه‌ی میانگین متوسط سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای دو شبیه سازی ششم و هفتم از سناریوی ۱ ۸۷
شکل ۴-۷۷: مقایسه‌ی میانگین متوسط سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در ۵۰ بار اجرای دو شبیه‌سازی هشتم و نهم از سناریوی ۱ ۸۷

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

جدول ۳-۱: طبقه‌بندی روش‌های تحلیل قدرت بازار ۳۷
جدول ۴-۱: پایگاه قواعد فازی برای محاسبه‌ی قدرت بازار تخمینی ۴۸
جدول ۴-۲: اطلاعات مربوط به ژنراتورها و بار هر باس سیستم تست ۱۱ باسه ۵۰
جدول ۴-۳: اطلاعات مربوط به راکتانس و ظرفیت خطوط انتقال ۵۰
جدول ۴-۴: مقایسه‌ی کل سود دریافتی ژنراتور ۱۲ در چهار سناریو و به ازای دو شبیه‌سازی QL و AQL ۸۱
جدول ۵-۱: الگوریتم مورد استفاده‌ی ژنراتورها در نه شبیه‌سازی مختلف ۹۲

فهرست نمادهای اختصاری

ABS	Agent-Based Simulation	شبیه‌سازی مبتنی بر عامل
ACE	Agent Computation Economics	اقتصاد محاسباتی مبتنی بر عامل
AQL	Adaptive Q-Learning	**Q-Learning** تطبیقی
CMDP	Competitive Markov Decision Process	فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف رقابتی
DAI	Distributed Artificial Intelligence	هوش مصنوعی توزیع شده
DES	Discrete Event Simulation	شبیه‌سازی پیشامد گسسته
DMP	Duration of Market Power	دوره‌ی قدرت بازار
EM ABS	Electricity Market Agent-Based Simulation	شبیه‌سازی مبتنی بر عامل بازار برق
EMP	Estimated Market Power	قدرت بازار تخمینی
FQL	Fuzzy Q-Learning	–
HHI	Herfindahl-Hirschman Index	شاخص هرفیندال–هیرشمن
ISO	Independent System Operator	بهره‌بردار مستقل سیستم
LI	Lerner Index	شاخص لرنر
LMP	Local Marginal Price	قیمت حدی محلی
MC	Marginal Cost	هزینه‌ی حدی
MIS	Market Information System	سیستم اطلاعاتی بازار
MMP	Magnitude of Market Power	دامنه‌ی قدرت بازار
MPEI	Market Power Existence Index	شاخص وجود قدرت بازار
QL	Q-Learning	–
QMPI	Quantity Modulated Price Index	–
RL	Reinforcement Learning	یادگیری تقویتی
R-Value	Reinforcement Value	ارزش تقویتی
SA	Simulated-Annealing	تبرید تدریجی شبیه‌سازی شده
SA-QL	Simulated-Annealing Q-Learning	–
SF	Supply Function	تابع عرضه

فصل اول

پیش‌گفتار

۱-۱ مقدمه و انگیزه:

صنعت برق در سرتاسر جهان تکامل از ساختارهای انحصاری یک‌پارچه‌ی عمودی[1] را به سمت بازارهای آزاد دنبال می‌کند که این امر رقابت میان تولیدکننده‌گان را سبب شده و به مشتریان امکان انتخاب خدمات مورد نیازشان را می‌دهد. عدم تمرکز سیستم‌های تولید، انتقال و توزیع، فرصت‌هایی را برای بازیگران یا عامل‌های جدید ایجاد می‌کند که وارد بازار شوند. در نتیجه بازارهای کاملاً دایر به‌وسیله‌ی حضور تعداد زیادی از شرکت‌ها و بازیگران که در رقابت و هم‌آهنگی سیستم قرار دارند، شکل گرفتند. از این تغییرات که از اوایل ۱۹۸۰ میلادی آغاز شد تحت عنوان تجدید ساختار صنعت برق یاد می‌شود. انگیزه‌ی اصلی تجدید ساختار[2] این است که رقابت بیشتر و بازارهای آزاد می‌توانند منجر به افزایش بهره‌وری اقتصادی از طریق ارائه‌ی خدمات با کیفیت بالاتر و قیمت‌های خرده‌فروشی کمتر شوند. به خاطر نقش اقتصاد ملی، سیستم‌های سنتی و مشخصه‌های تکنولوژیکی صنعت برق، گذار به بازارهای آزاد به‌عنوان پدیده‌ای پیچیده برشمرده می‌شود. به همین دلیل پیشرفت‌های اصلاحاتی مبتنی بر بازار در سرتاسر جهان به کندی پیش می‌رود [1]. در این قالب جدید، عملکرد واقعی واحدهای تولیدی به رویکرد متمرکز مبتنی بر بنگاه[3]، خیلی وابسته نیست بلکه به تصمیمات غیرمتمرکز شرکت‌های تولیدی که هدف‌اشان بیشینه‌کردن سودشان می‌باشد وابسته است. همه‌ی شرکت‌ها برای فراهم کردن خدمات تولیدی در قیمتی که به‌وسیله‌ی بازار تعیین می‌شود با هم رقابت می‌کنند. لازم به ذکر است که این قیمت در اثر تعامل همه‌ی شرکت‌های تولیدی و بار تعیین می‌شود [2].

[1] Vertically Integrated Monopoly
[2] Restructuring
[3] Single-Firm

نظریه‌ی اقتصاد خُرد[1] بیان می‌کند که در یک بازار با رقابت کامل، هر تولیدکننده‌ی توان پذیرنده‌ی قیمت[2] است و بهترین قیمت پیشنهادی برای چنین تولیدکننده‌ای این است که هزینه‌ی حدی[3] خود را پیشنهاد دهد. وقتی‌که ژنراتوری قیمتی بالاتر از هزینه‌ی حدی‌اش پیشنهاد می‌دهد تا از نقص بازار برای افزایش سودش استفاده کند، گفته می‌شود که قیمت‌دهی ژنراتور استراتژیک است. اگر ژنراتوری بتواند به‌طور موفقیت‌آمیزی سود خود را با قیمت‌دهی استراتژیک یا هر راه دیگر به جز کاهش هزینه‌هایش افزایش دهد، گفته می‌شود که این ژنراتور دارای قدرت بازار[4] است. بازارهای برق جدید معمولاً بازارهایی با رقابت ناکامل[5] هستند، بنابراین یک ژنراتور می‌تواند سودش را از طریق قیمت‌دهی استراتژیک[6]، یا به عبارت دیگر از طریق اعمال قدرت بازار افزایش دهد [3]. بنابراین شرکت‌های تولیدی در معرض ریسک بالایی قرار دارند و نیازشان به مدل‌های تصمیم‌گیری مناسب به‌شدت افزایش یافته است. از طرف دیگر سازمان‌های تنظیم‌کننده به مدل‌های آنالیزکننده‌ی مناسبی به‌منظور نظارت بر رفتار بازار احتیاج دارند. مدل‌های سنتی برای شرایط جدید مناسب نیستند چرا که رفتارهای استراتژیک بازیگران بازار در آن‌ها لحاظ نشده است [2].

ذات فنی الکتریسیته، بازارهای برق[7] را در رسته‌ی پیچیده‌ترین بازارهایی که در حال حاضر وجود دارند قرار می‌دهد. عرضه و تقاضا باید به‌صورت لحظه‌ای و با در نظر گرفتن قیود مربوط به انتقال و قیود در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها[8] موازنه شوند. انتقال برق به خطوط انتقال فیزیکی احتیاج دارد و این انتقال براساس قوانین فیزیکی انجام می‌گیرد و نه براساس قراردادهای اقتصادی. برق تولید شده نمی‌تواند به میزان زیادی ذخیره شود. همچنین صنعت برق به وسیله‌ی بازارهای به هم مرتبط چندگانه‌ای از قبیل بازارهای سوخت، بازارهایی برای زمان‌بندی روز بعد[9]، بازارهایی برای پخش بار[10] یا توازن انرژی به‌صورت لحظه‌ای، قراردادهای دو جانبه، بازارهای خدمات جانبی و بازار سهمیه‌ی انتشار گازهای غیر مجاز، تحت الشعاع قرار گرفته است [4,5]. این ویژگی‌های فنی و اقتصادی از یک طرف و وجود بازیگران استراتژیک مختلف نظیر ژنراتورها، مشتریان و دیگر شرکت‌کننده‌گان از طرف دیگر که هر کدام استراتژی تجارت، اولویت ریسک و مدل تصمیم‌گیری خاص خود را دارند و به صورت خودمختار عمل می‌کنند، کار آنالیز بازار را به شدت پیچیده می‌کنند. بنابراین نیاز به ابزارهای مدل‌سازی بیش از پیش احساس می‌شود.

[1] Microeconomic
[2] Price Taker
[3] Marginal Cost
[4] Market Power
[5] Imperfect Competition
[6] Strategic Bidding
[7] Power Market
[8] Unit Commitment
[9] Day-Ahead
[10] Dispatching

۱-۲ هدف‌های پژوهش:

همان‌طور که در زیربخش قبل گفته شد با وجود حرکت صنعت برق به‌سوی بازارهای آزاد رقابتی، هنوز در بسیاری از کشورهای جهان این گذار به‌صورت کامل انجام نگرفته و هنوز شرایط بازاری با رقابت کامل فراهم نشده است. در بازارهای با رقابت ناکامل تولیدکننده‌گان درمی‌یابند که اگر در قیمتی بالاتر از هزینه‌ی حدی‌اشان پیشنهاد دهند امکان این که به سود بیشتری دست‌یابند وجود دارد. بنابراین نیاز به مدل‌های قیمت‌دهی مناسب بیش از پیش احساس می‌شود. از طرفی رقابت ناکامل، اطلاعات نامتقارن، و ویژگی‌های فنی و اقتصادی صنعت برق، بازار برق را در زمره‌ی بازارهای بسیار پیچیده قرار می‌دهد. این پیچیده‌گی‌ها اکثر روش‌های مدل‌سازی سنتی را با محدودیت‌هایی مواجه می‌کنند. مدل‌های سنتی تعادلی یا رفتار استراتژیک را در نظر نمی‌گیرند یا فرض می‌کنند که بازیگران همه‌ی اطلاعات مربوط به دیگر بازیگران را در اختیار دارند. اقتصاد محاسباتی مبتنی بر عامل یکی از روش‌های جدید و جذابی‌ست که پتانسیل زیادی برای غلبه بر کمبودهای روش‌های سنتی دارد. در یک محیط اقتصادی محاسباتی، بازیگران بازار به‌صورت عامل‌هایی که می‌توانند رفتار استراتژیک‌اشان را از طریق تجربیات‌اشان بهبود دهند، مدل‌سازی می‌شوند. و تکامل بازار نتیجه‌ی برآیند تعاملات این بازیگران استراتژیک است. از جمله بازیگران استراتژیک بازار برق تولیدکننده‌گان می‌باشند. چون آن‌ها به‌دلیل ناقص بودن فضای رقابتی بازار برق از قدرت بازار برخوردار بوده و سعی می‌کنند با رفتاری استراتژیک در قالب تعامل با فضای بازار برق، یادبگیرند که بهترین قیمت برای پیشنهاد به بازار چیست؟ از طرفی تولیدکننده‌گان بازار فقط به اطلاعات محلی دسترسی دارند و در مورد میزان بار مصرفی و ویژگی‌های رفتاری رقبایشان چیزی نمی‌دانند. به اصطلاح آن‌ها مدل را در اختیار ندارند. از جمله الگوریتم‌های مبتنی بر عامل که این قابلیت را دارد که بدون داشتن مدل به بهترین سیاست برای تصمیم‌گیری منجر شود، الگوریتم QL می‌باشد. اما این الگوریتم همواره با چالشی بزرگ مواجه است، و آن چالش، دوراهی کاوش [۱] – بهره‌برداری[۲] می‌باشد. از طرفی بازار برق یک محیط دینامیکی متشکل از بازیگران استراتژیک با سیاست‌ها و ویژگی‌های مختلفی می‌باشد، که آن را به یک محیط چندعامله‌ی ناایستای تصادفی تبدیل می‌کند. فرآیند تصمیم‌گیری در چنین محیطی بسیار بغرنج‌تر خواهد بود. به بیانی دیگر انتخاب سیاست مناسب برای یادگیری و تنظیم نرخ کاوش این سیاست دوراهی فوق را بحرانی‌تر می‌کند. بنابراین درک تولیدکننده از وضعیت خود در بازار می‌تواند گامی بسیار مؤثر در بهبود رفتار قیمت‌دهی‌اش باشد. از جمله ویژگی‌هایی که یک تولیدکننده در بازار به‌صورت بالقوه از آن برخوردار است، قدرت بازار می‌باشد. بنابراین یافتن راهی برای تنظیم نرخ کاوش سیاست یادگیری الگوریتم QL به‌عنوان رویکرد تصمیم‌گیری تولیدکننده در محیط چندعامله‌ی ناایستای تصادفی بازار برق به کمک میزان قدرت بازارش می‌تواند مفید واقع شود. بنابراین پرسشی که این پژوهش به‌دنبال پاسخ‌گویی آن است را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

[1] Exploration
[2] Exploitation

آیا می‌توان به کمک قدرت بازار تولیدکننده راهی برای تنظیم میزان کاوش سیاست یادگیری‌اش یافت؟

۱-۳ مروری بر فصل‌های مختلف این پایان‌نامه:

بازار برق به دلیل ویژگی‌های فنی و اقتصادی منحصر به فردش به‌عنوان یک سیستم پیچیده شناخته می‌شود. بنابراین چگونگی مدل‌سازی آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در فصل دوم انواع روش‌های مدل‌سازی بازار برق به همراه کاستی‌ها و مزایایشان مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آن‌جا که بازار برق در رسته‌ی سیستم‌های پیچیده قرار می‌گیرد، بنابراین نظریه‌ی پیچیده‌گی و گونه‌های مختلف آن مختصراً بیان می‌شود تا نوع پیچیده‌گی بازار برق به‌منظور درک دقیق‌تر آن مشخص گردد. سپس با توجه به پیچیده‌گی‌های بازار برق لزوم مدل‌سازی آن به کمک روش‌های مدل‌سازی مبتنی بر عامل برشمرده می‌شود. در ادامه‌ی این فصل ابتدا مدل‌سازی مبتنی بر عامل معرفی شده و سپس ویژگی‌های عامل به‌عنوان جز لاینفک مدل‌سازی مبتنی بر عامل واشکافی خواهد شد تا گامی در جهت چرایی مدل‌سازی مبتنی بر عامل بازار برق به‌عنوان محیطی متشکل از عامل‌های استراتژیک، برداشته شود. سپس از دید مدل‌سازی مبتنی بر عامل به بازار برق نگاه کرده و به توصیف عامل‌های بازار برق، بیان ویژگی‌ها و اهداف‌اشان می‌پردازیم تا پیش‌نیازهای لازم برای این مدل‌سازی را فراهم کرده باشیم. سپس اقتصاد محاسباتی مبتنی بر عامل و دلایل وجوب آن برای توصیف سیستم‌های اقتصادی از جمله بازار برق معرفی شده و به دنبال آن رویکرد یادگیری تقویتی به‌عنوان رویکردی بسیار کارا در زمینه‌ی اقتصاد محاسباتی مبتنی بر عامل مختصراً توضیح داده شده و در امتداد آن الگوریتم QL جهت مدل‌سازی رفتار بازیگران بازار توصیف می‌شود. و در پایان این فصل مدل‌سازی مبتنی بر عامل یک بازار برق نوعی انجام شده است تا بینشی عمیق‌تر نسبت به چگونگی مدل‌سازی بازار برق به کمک رویکرد اقتصاد محاسباتی مبتنی بر عامل فراهم آید.

چند انحصاری بودن بازار برق امکان اعمال قدرت بازار به برخی از بازیگران خود می‌دهد. برخورداری بازیگران بازار از قدرت بازار از جمله نشانه‌های یک بازار با بهره‌وری اقتصادی نامطلوب می‌باشد. بنابراین شناسایی و تحلیل قدرت بازار به‌منظور رفع آن برای بهره‌بردار بازار از اهمیت زیادی برخوردار است. از جهت دیگر برخورداری بازیگران بازار از قدرت بازار این امکان را به این بازیگران می‌دهد تا بتوانند توان تولیدی خود را با قیمتی بالاتر از هزینه‌ی حدی‌اشان بفروشند. در واقع با انجام رفتار استراتژیک در بازار، سود بیشتری عاید خود کنند. بنابراین شناسایی قدرت بازار برای تولیدکننده‌گان نیز ضرورتی اساسی به شمار می‌آید. به همین دلیل در فصل سوم مفهوم قدرت بازار بیان شده و رویکردهای تحلیلی قدرت بازار مختصراً معرفی خواهند شد. در انتهای این فصل بازبینی مختصری بر روی مقالاتی خواهیم داشت که از الگوریتم QL برای مدل‌سازی رفتار استراتژیک تولیدکننده‌گان در بازار برق استفاده کرده‌اند. به‌خصوص بر روی سیاست‌های یادگیری انتخابی هر یک و نحوه‌ی تنظیم میزان کاوش‌اشان دقت نظر خواهیم داشت تا از این منظر کاستی‌های هر یک را موشکافانه‌تر بررسی کرده تا گامی در جهت رفع آن برداریم.

بازار برق به دلیل ذات دینامیک و چند عامله بودن، یک محیط ناایستای تصادفی از منظر الگوریتم یادگیری تقویتی که به‌عنوان تصمیم‌گیرنده‌ی اصلی عامل‌های استراتژیک در این پایان‌نامه مطرح است، می‌باشد. در چنین محیط ناایستایی نیاز به تطبیق‌پذیری با تغییرات شرایط، به‌عنوان یکی از دغدغه‌های بنیادی عامل‌ها مطرح است. از طرفی به خاطر بهره‌مندی برخی از عامل‌ها از قدرت بازار، منطقی به نظر می‌رسد که بازیگران به نوعی قدرت بازار خود را در تصمیم‌گیری‌اشان یعنی در سیاست رفتاری‌اشان لحاظ کنند. در فصل چهارم با نگاه جدید به بازار برق به‌عنوان یک محیط ناایستا، به کمک قدرت بازار سعی می‌کنیم که نرخ کاوش سیاست رفتاری را به‌صورت تطبیقی تغییر دهیم. ابتدا ایده‌ی اصلی این پایان‌نامه در این فصل بیان و فرموله شده که منجر به تعریف یک الگوریتم QL تطبیقی جدید می‌شود. سپس یک سیستم تست ۱۱ باسه با ۱۳ ژنراتور استراتژیک در نظر گرفته و عملکرد الگوریتم QL تطبیقی پیشنهادی را با روش‌های QL با نرخ کاوش ثابت، QL با نرخ کاوش کاهشی، و با QL فازی را بسته به تغییرات بازار مقایسه می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی سودآوری بیشتر الگوریتم QL تطبیقی پیشنهادی را نسبت به همه‌ی روش‌های دیگر تأیید می‌کند.

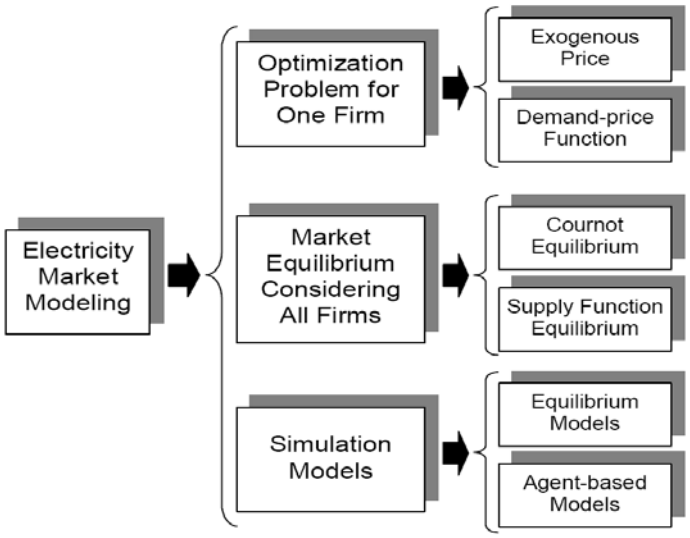
در نهایت در فصل پنجم خلاصه‌ای از نتایج مهم به همراه پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی در این زمینه آورده شده است.

فصل دوم

مدل‌سازی بازار برق

۲-۱ انواع روش‌های مدل‌سازی بازار برق:

به‌طور کلی رویکردهای مدل‌سازی بازار برق را از نقطه‌نظر ساختاری می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد: مدل‌های بهینه‌سازی[1]، مدل‌های تعادلی[2]، و مدل‌های شبیه‌سازی[3]. این تقسیم‌بندی در شکل (۲-۱) نمایش داده شده است:[2]



شکل ۲-۱: شماتیک انواع روش‌های مدل‌سازی بازار برق [2]

مدل‌های بهینه‌سازی روی مسأله‌ی بیشینه‌کردن سود یکی از شرکت‌های رقابت‌کننده در بازار تمرکز دارد در حالی‌که

[1] Optimization Models
[2] Equilibrium Models
[3] Simulation Models

مدل‌های تعادلی رفتار بازار را با در نظر گرفتن رقابت میان همه‌ی شرکت‌کننده‌گان در نظر می‌گیرد و مدل‌های شبیه‌سازی جایگزینی برای مدل‌های تعادلی هستند زمانی که مسأله بسیار پیچیده‌تر از آنی باشد که در قالب مدل‌های تعادلی در نظر گرفته شود.

① **مدل‌های بهینه‌سازی تک-بنگاه:**

رویکردهایی که بر اساس بیشینه‌کردن سود یک شرکت‌کننده بنا شده‌اند، در کلاس " مدل‌های بهینه‌سازی تک-بنگاه" طبقه‌بندی می‌شوند. این مدل‌ها قیود مربوط به سیستم تولید متعلق به بنگاه ذینفع، و همچنین پروسه‌ی تسویه‌ی قیمت را در نظر می‌گیرند. مطابق با روشی که پروسه در آن تعریف می‌شود، این مدل‌ها را می‌توان به دو دسته طبقه‌بندی کرد: ۱- قیمت به عنوان یک متغیر خروجی مدل شود. ۲- قیمت به‌وسیله‌ی تابعی از تقاضای شرکت تحت مطالعه مدل شود.

② **مدل‌های تعادلی:**

رویکردهایی که به‌وضوح تعادل بازار را در قالب برنامه‌ریزی ریاضی سنتی در نظر می‌گیرند، در کلاس مدل‌های تعادلی قرار می‌گیرند. معمول‌ترین آن‌ها، مدل رقابت کورنات[1] است. که در آن شرکت‌ها در میزان کمیت با هم رقابت می‌کنند. در حالی که اکثر مدل‌های پیچیده بر اساس "تعادل تابع عرضه[2]" هستند. جایی‌که بنگاه‌ها در منحنی پیشنهادی با هم رقابت می‌کنند. گرچه هر دو رویکرد از نقطه‌نظر متغیرهای استراتژیک (کمیت در مقابل تابع عرضه) متفاوت هستند اما هر دو وابسته به مفهوم تعادل نش می‌باشند. منظور از تعادل نش این است که بازار زمانی به تعادل می‌رسد که استراتژی هر شرکت بهترین پاسخ به استراتژی‌های انتخاب شده به وسیله‌ی رقبایش باشد.

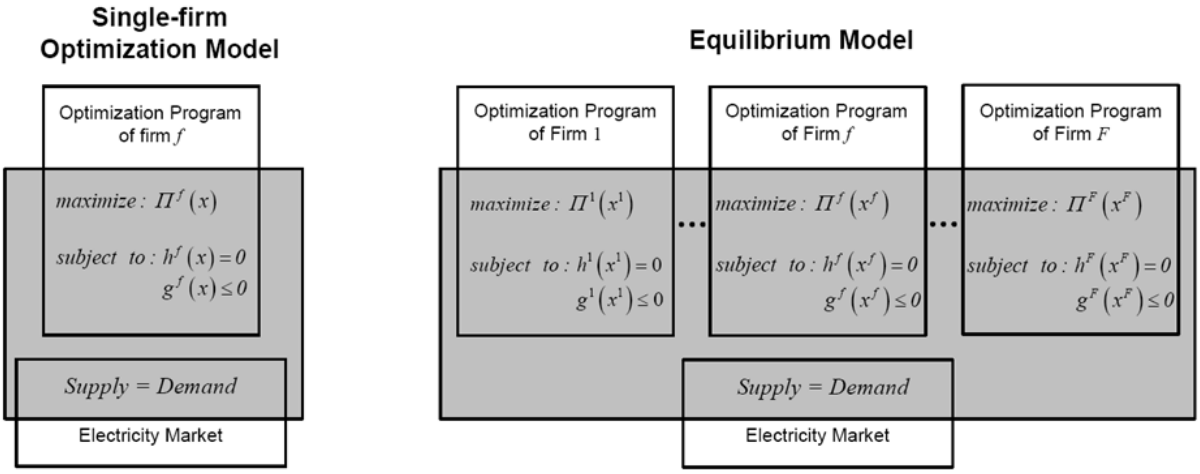
③ **مدل‌های شبیه‌سازی:**

مدل‌های تعادلی بر اساس تعریف رسمی تعادل هستند که در قالب مجموعه‌ای از معادلات جبری-دیفرانسیلی بیان می‌شوند. این امر محدودیت‌هایی را در رقابت بین شرکت‌کننده‌گان ایجاد می‌کند. به علاوه محاسبه‌ی پاسخ (البته در صورت وجود) بسیار سخت می‌باشد. مدل‌های شبیه‌سازی جایگزینی برای مدل‌های تعادلی هستند هنگامی که مسأله‌ی مورد نظر بسیار پیچیده‌تر از آنی‌ست که در قالب یک مدل تعادلی مرسوم حل شود. مدل‌های شبیه‌سازی اساساً دینامیک‌های تصمیم‌گیری استراتژیک هر عامل را به‌وسیله‌ی مجموعه‌ای از قوانین ترتیبی از برنامه‌ریزی واحدهای تولیدی گرفته تا ساختن منحنی‌های عرضه، معرفی می‌کنند. مزیت بزرگ رویکرد شبیه‌سازی، انعطاف‌پذیری آن است که برای اجرای انواع مختلفی از رفتارهای استراتژیک مناسب می‌باشد. با این حال این آزادی عمل نیازمند در نظر گرفتن فرض‌هایی برای شبیه‌سازی می‌باشد.

[1] Cournot
[2] Supply Function Equilibrium

۲-۱-۱ مقایسه‌ی سه روش مدل‌سازی از سه جنبه‌ی مختلف:[2]

ساختار ریاضی[1]: مدل‌های مبتنی بر بهینه‌سازی، به‌صورت یک برنامه‌ی بهینه‌سازی واحد در نظر گرفته می‌شوند که در آن یک شرکت بیشینه‌کردن سود خود را دنبال می‌کند. یک تابع هدف وجود دارد که با توجه به مجموعه‌ای از قیود اقتصادی و فنی بهینه‌سازی می‌شود. برخلاف آن، هر دو مدل تعادلی و شبیه‌سازی، برنامه‌ی بیشینه‌کردن سود همه‌ی شرکت‌کننده‌گان رقابت‌کننده در بازار را در نظر می‌گیرند. هر دو مدل در شکل (۲-۲) معرفی شده‌اند.



شکل ۲-۲: ساختار ریاضی مدل بهینه‌سازی تک-بنگاه و مدل مبتنی بر تعادل [2]

مدل‌سازی بازار[2]: مدل‌های مبتنی بر تعادل و شبیه‌سازی، بازار را با رفتار رقابتی میان همه‌ی شرکت‌کننده‌گان در نظر می‌گیرند. در عوض مدل‌های بهینه‌سازی فقط یک شرکت را در نظر می‌گیرند. در نتیجه در مدل‌های تعادلی و شبیه‌سازی، بازار در ارائه‌ی قیمت تسویه بازار سنتز می‌شود که این قیمت می‌تواند به‌عنوان خروجی برنامه‌ی بهینه‌سازی یا وابسته به کمیت (توان) تولید شده به‌وسیله‌ی شرکت ذینفع مدل‌سازی شود.

ساده‌گی محاسباتی[3]: در حالی‌که روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی پیچیده در مواجه با مدل‌های تعادلی لازم هستند، الگوریتم‌های بهینه‌سازی معروف و قدرتمند با قابلیت مدل‌سازی بالا می‌توانند برای حل مدل‌های مبتنی بر بهینه‌سازی به‌کار گرفته شوند. مدل‌های شبیه‌سازی نسبت به مدل‌های تعادلی انعطاف‌پذیرتر هستند هر چند که آن‌ها معمولاً با فرض‌هایی همراه هستند.

تفاوت‌های گفته شده در قسمت قبل یعنی ساختار ریاضی، مدل‌سازی بازاری، و ساده‌گی محاسبات، ما را به‌منظور

[1] Mathematical Structure
[2] Market Modeling
[3] Computational Tractability

انتخاب یک روش مناسب برای مدل‌سازی یاری می‌کنند. برای مثال، ساده‌گی محاسباتی مدل‌های بهینه‌سازی، آن‌ها را قادر می‌سازد که با مسائل مفصل و پیچیده‌ای نظیر منحنی قیمت‌دهی روزانه در کوتاه‌مدت، به‌خوبی برخورد کنند. در عوض مدل‌های تعادلی بیشتر برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و آنالیز قدرت بازار مناسب هستند، چون مدل‌های تعادلی همه‌ی شرکت‌کننده‌گان را با هم در نظر می‌گیرند. و انعطاف‌پذیری بالای مدل‌های شبیه‌سازی رنج وسیعی از کاربردها را برای آن‌ها فراهم می‌کند [2].

در بازار برق تجدید ساختار یافته هم‌چنان بسیاری از شرکت‌ها یک‌پارچه‌ی عمودی هستند، و در چندین بازار به‌صورت هم‌زمان فعالیت می‌کنند در نتیجه به استراتژی‌های بازاری پیچیده‌ای احتیاج دارند. علاوه‌بر این با توجه به ساختار چند انحصاری اکثر بازارهای برق، شرکت‌کننده‌گان توانایی اعمال قدرت بازار را در بسیاری از این بازارها دارند. این پیچیده‌گی‌ها اکثر روش‌های مدل‌سازی کلاسیک را با محدویت‌هایی مواجه می‌کنند. مدل‌های تعادلی یا رفتار قیمت‌دهی استراتژیک را در نظر نمی‌گیرند یا فرض می‌کنند که بازیگران همه‌ی اطلاعات مربوط به مشخصات فنی و رفتاری دیگر بازیگران را در اختیار دارند. همچنین مدل‌های تعادلی تأثیرات یادگیری ناشی از تعاملات تکرار شونده‌ی روزانه را نادیده می‌گیرند. آنالیز نظریه‌ی بازی معمولاً به شرایط تجاری تلطیف شده میان بازیگران کم محدود می‌شود و فرض‌های محدودکننده و اجتناب‌ناپذیر[1] و اغلب غیر واقعی برای رفتار بازیگران لحاظ می‌کند [6].

تجربیات انسان–محور[2] برای پژوهش در زمینه‌ی بازار برق با مشکلات زیادی همراه هستند، چون مقداری تخصص لازم است تا از رفتار قیمت‌دهی ژنراتورها تقلید کنیم. بنابراین برای پاسخ‌گویی به بسیاری از پرسش‌های مربوط به بازار برق، تجربیات انسان–محور روش مناسبی نیستند [6].

برای به‌دست آوردن بینشی مناسب‌تر به‌منظور انتخاب روشی مناسب برای مدل‌سازی بازار برق، از آن‌جا که بازار برق یک سیستم تطبیقی پیچیده می‌باشد، بنابراین در ادامه ابتدا نظریه‌ی پیچیده‌گی را تعریف کرده و سپس به معرفی گونه‌های مختلف پیچیده‌گی خواهیم پرداخت. و در انتهای زیربخش زیر توضیح خواهیم داد که بازار برق با توجه به‌ویژگی‌های منحصر به فرد خود به کدام یک از گونه‌های پیچیده‌گی متعلق خواهد بود.

۲-۲ نظریه‌ی پیچیده‌گی: [7]

یکی از وجوه افتراق علم از هنر، امکان کمی کردن علم و بیان آن در قالب روابط ریاضی می‌باشد. این ویژگی آن‌چنان برجسته شده که گاهی ارزش کار علمی بر اساس کیفت ریاضیات آن سنجیده می‌شود و نه محتوای تجربی‌اش.

[1] Strong and Constrained
[2] Human-Subject