دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی

پایان‌نامه دوره دکتری مهندسی برق-قدرت

تعیین استراتژی بهینه شرکت‌های خرده‌فروش برق در مبادلات دوسویه چند گزینه‌ای

علیرضا حاتمی

استاد راهنما:
دکتر حسین سیفی

استاد مشاور:
دکتر محمد کاظم شیخ الاسلامی

تابستان ۱۳۸۸

چکیده

در بازار برق، شرکت خرده‌فروش برق به‌عنوان واسطه بین شرکت‌های تولید کننده انرژی الکتریکی و مشتریان عمل می‌کند. این شرکت، انرژی الکتریکی را از بازار عمده فروشی خریداری کرده و به مشتریان می‌فروشند. بنابراین شرکت‌های خرده‌فروش باید قراردادهایی را هم با سمت عرضه و هم با سمت تقاضا تنظیم کنند.

در بازار عمده‌فروشی (بازار لحظه‌ای)، قیمت برق توسط عرضه و تقاضا تعیین می‌شود؛ در نتیجه قیمت بازار لحظه‌ای، قیمتی متغیر و دارای عدم قطعیت است. برای حداقل کردن ریسک قیمت لحظه‌ای بازار، شرکت خرده‌فروش از قراردادهای موجود در بازار آتی استفاده می‌کند. هزینه قراردادهای ذکر شده معمولاً بزرگتر از هزینه متوسط بازار لحظه‌ای است. بنابراین، لازمست مصالحه‌ای بین مقدار توان خریداری شده از بازار لحظه‌ای و توان تأمین شده از قراردادهای بازار آتی برقرار کرد. در سمت تقاضا، شرکت خرده‌فروش ملزم به تأمین تقاضای مشتریان خود است. تقاضای مشتریان دائماً در حال تغییر بوده و در نتیجه دارای عدم قطعیت است. بنابراین شرکت خرده‌فروش بایستی عدم قطعیت تقاضای مشتریانش را درنظر بگیرد. به‌علاوه شرکت خرده‌فروش باید قیمت پیشنهادی فروش انرژی الکتریکی به مشتریان را نیز تعیین کند.

در رساله حاضر، روشی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی، برای تعیین استراتژی بهینه شرکت‌های خرده‌فروش در افق زمانی میان مدت (با بازه‌ای از یک تا چند ماه) پیشنهاد می‌شود تا به‌منظور ماکزیمم کردن سود و هم‌زمان مینیمم کردن ریسک، ۱) قیمت بهینه فروش انرژی در روش‌های مختلف قیمت‌گذاری شامل قیمت‌گذاری ثابت، قیمت‌گذاری زمان–استفاده، قیمت‌گذاری پیک بحرانی، و قیمت‌گذاری زمان–واقعی تعیین شود؛ و ۲) سبد بهینه خرید شرکت خرده‌فروش برای تأمین تقاضا با حداقل هزینه و هم‌چنین پوشش ریسک مبادلات وی با استفاده از گزینه‌هایی هم‌چون بازار لحظه‌ای، قراردادهای پیش‌رو و آتی، قراردادهای اختیار خرید، نیروگاه‌های متعلق به شرکت خرده‌فروش و برنامه بارهای قطع‌پذیر تعیین شود.

در این رساله، از اندازه ریسک چند بازه‌ای برای مدل‌سازی ریسک استفاده می‌شود که در آن ریسک با روش میانگین ارزش در معرض خطر سنجیده می‌شود. هم‌چنین رقابت بین شرکت‌های خرده‌فروش به کمک تابع سهم بازار مدل‌سازی می‌شود.

مسئله بهینه‌سازی که شرکت خرده‌فروش با آن مواجه است؛ مسئله‌ای ازنوع برنامه‌ریزی تصادفی مرکب–صحیح است که به کمک تکنیک‌های تجزیه مانند انشعاب–و–حد می‌توان آن را حل کرد.

کلمات کلیدی: شرکت خرده‌فروش، بازار برق، استراتژی بهینه، برنامه‌ریزی تصادفی، تابع سهم بازار.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه	۱
فصل دوم: مروری بر خرده‌فروشی در بازار برق و تحقیقات مرتبط با آن	۵
۲-۱- مقدمه	٦
۲-۲- بازار برق	٦
۲-۲-۱- تجدید ساختار در صنعت برق	٦
۲-۲-۲- خصوصیات و ویژگی‌های بازار برق	۷
۲-۲-۳- رقابت‌پذیری	۸
۲-۲-٤- انواع تبادلات	۹
۲-۲-۵- بازه زمانی فعالیت	۱۰
۲-۲-٦- نهادهای بازار	۱۳
۲-۳- خرده‌فروشی در صنعت برق	۱٤
۲-۳-۱- تاریخچه پیدایش شرکت‌های خرده‌فروش	۱٤
۲-۳-۲- فعالیت‌های شرکت خرده‌فروش	۱۵
۲-٤- مروری بر تحقیقات مرتبط با خرده فروشی در صنعت برق	۱۸
۲-٤-۱- مراجع پایه	۱۸
۲-٤-۲- مراجع مرتبط با موضوع خرده‌فروش‌ها به‌صورت مستقیم	۱۸
۲-٤-۳- مراجع مرتبط با موضوع شرکت‌های خرده‌فروش به‌صورت غیر مستقیم	۲۰
۲-۵- نوآوری‌های رساله	۲۳
فصل سوم: تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت (برنامه‌ریزی تصادفی)	۳۲
۳-۱- مقدمه	۳۳

۳-۲- متغیرهای تصادفی ۳۳
۳-۳- برنامه‌ریزی تصادفی ۳۶
۳-۳-۱- برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای با عمل برگشتی ۳۶
۳-۳-۲- برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای ۳۸
۳-٤- روش‌های تولید سناریو ٤۰
۳-٤-۱- تولید سناریو با استفاده از سری زمانی *ARMAX* ٤۲
۳-٤-۲- سری زمانی چند متغیره *ARMAX* ٤۵
۳-٤-۳- روش‌های کاهش سناریو ٤٦
۳-۵- جمع‌بندی ٤۹
فصل چهارم :مروری بر روش‌های مدل‌سازی ریسک ۵۰
٤-۱- مقدمه ۵۱
٤-۲- ریسک و انواع آن ۵۱
٤-۳- مدیریت ریسک ۵٤
٤-۳-۱- مدل‌سازی و اندازه‌گیری ریسک ۵٤
٤-۳-۱-۱- معیار *VaR* ۵۷
٤-۳-۱-۲- معیار *CVaR* ۵۹
٤-۳-۲- مدل‌سازی ریسک در مسائل برنامه‌ریزی تصادفی ٦۰
٤-٤- جمع‌بندی ٦۲
فصل پنجم: تعیین استراتژی بهینه میان مدت شرکت‌های خرده‌فروش در بازار برق ٦۳
۵-۱- مقدمه ٦٤
۵-۲- تعریف و فرضیات مسئله ٦۵
۵-۳- مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها ٦۷
۵-۳-۱- انواع عدم قطعیت‌ها ٦۷
۵-۳-۲- مشخصات قیمت لحظه‌ای برق ٦۷
۵-۳-۳- مدل‌سازی دینامیک قیمت لحظه‌ای برق ٦۹
۵-۳-٤- تولید سناریو ۷۰

۵-٤- استراتژی شرکت‌های خرده‌فروش ۷۰
۵-٤-۱- استراتژی شرکت‌های خرده‌فروش ۷۰
۵-٤-۲- رفتار مشتریان در بازار خرده‌فروشی ۷۱
۵-٤-۳- مدل سازی رقابت شرکت‌های خرده‌فروش ۷۳
۵-۵- تعیین استراتژی بهینه میان مدت شرکت خرده‌فروش: قیمت‌گذاری ثابت ۷٤
۵-۵-۱- تابع سود ۷٤
۵-۵-۱-۱- درآمد شرکت خرده‌فروش حاصل از فروش انرژی الکتریکی ۷۵
۵-۵-۱-۲- هزینه تأمین انرژی الکتریکی شرکت خرده‌فروش ۷٦
۵-۵-۲- اندازه ریسک ۸٤
۵-۵-۳- تابع هدف ۸۵
۵-۵-٤- روش حل مسئله ۸٦
۵-۵-۵- استفاده از ابزار تصمیم گیری ۸۷
۵-٦- تعیین استراتژی بهینه میان مدت شرکت خرده‌فروش: قیمت‌گذاری زمان-استفاده ۸۷
۵-٦-۱- قیمت‌گذاری زمان-استفاده ۸۷
۵-٦-۲- تابع سود ۸۹
۵-٦-۳- تابع هدف ۹۲
۵-٦-٤- روش حل مسئله ۹۳
۵-۷- تعیین استراتژی بهینه میان مدت شرکت خرده‌فروش: قیمت‌گذاری پیک بحرانی ۹۳
۵-۷-۱- قیمت‌گذاری پیک بحرانی ۹۳
۵-۷-۲- تابع سود ۹٦
۵-۷-۳- تابع هدف ۹۹
۵-۷-٤- روش حل مسئله ۹۹
۵-۸- تعیین استراتژی بهینه میان مدت شرکت خرده‌فروش: قیمت‌گذاری زمان-واقعی ۹۹
۵-۸-۱- قیمت‌گذاری زمان-واقعی ۹۹

۵-۸-۲- تابع سود ۱۰۲
۵-۸-۳- تابع هدف ۱۰٤
۵-۸-٤- روش حل مسئله ۱۰٤
۵-۹- جمع‌بندی ۱۰٤
فصل ششم: مطالعات عددی ۱۰۵
٦-۱- مقدمه ۱۰٦
٦-۲- داده‌های مورد استفاده ۱۰٦
٦-۳- نتایج عددی روش قیمت‌گذاری ثابت ۱۰۹
٦-۳-۱- داده‌ها ۱۰۹
٦-۳-۲- تعیین تعداد سناریوهای لازم ۱۰۹
٦-۳-۳- نتایج عددی ۱۱۰
٦-٤- نتایج عددی روش قیمت‌گذاری زمان-استفاده ۱۱٤
٦-٤-۱- داده‌ها ۱۱٤
٦-٤-۲- نتایج عددی ۱۱۵
٦-۵- نتایج عددی روش قیمت‌گذاری پیک بحرانی ۱۲۰
٦-۵-۱- داده‌ها ۱۲۰
٦-۵-۲- نتایج عددی ۱۲۰
٦-٦- نتایج مطالعات عددی قیمت‌گذاری زمان-واقعی ۱۲۸
٦-٦-۱- داده‌های مورد استفاده ۱۲۸
٦-٦-۲- نتایج عددی ۱۲۹
٦-۷- نتیجه‌گیری ۱۳۱
فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۳۲
۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۳۳
۷-۲- پیشنهادات ۱۳۵
۸- مراجع ۱۳۷

ضمیمه الف ۱۵۲
ضمیمه ب ۱۵۵

علائم و نشانه‌ها

گرچه توضیحات و تعاریف علائم و نشانه‌ها پس از استفاده، در رساله بیان شده است. در این قسمت نیز، توضیحات همه علائم مورد استفاده برای سهولت دسترسی به آن‌ها ذکر می‌شود.

۱– اندیس‌ها و مجموعه‌ها

t اندیسی برای اشاره به بازه‌های زمانی کوچک در افق برنامه‌ریزی (بر حسب ساعت)؛

T افق برنامه‌ریزی (بر حسب ساعت)؛

ω اندیسی برای اشاره به یک سناریو؛

Ω مجموعه سنایوها؛

i اندیسی برای اشاره به قراردادهای پیش‌رو؛

NF تعداد قراردادهای پیش‌رو؛

j اندیسی برای اشاره به قراردادهای اختیار خرید؛

NC تعداد قراردادهای اختیار خرید؛

g اندیسی برای اشاره به نیروگاه‌های شرکت خرده‌فروش؛

NG تعداد نیروگاه‌های شرکت خرده‌فروش؛

k اندیسی برای اشاره به برنامه بارهای قطع‌پذیر (k=۱ نوع یکم و k=۲ به نوع دوم)؛

h اندیسی برای اشاره به زیر–بازه‌های افق برنامه‌ریزی در برنامه بارهای قطع‌پذیر (بر حسب ساعت)

H تعداد زیر–بازه‌های افق برنامه‌ریزی در برنامه بارهای قطع‌پذیر؛

T_h اندیسی برای اشاره به زمان زیر–بازه hام (بر حسب ساعت) $T=H\times T_h$ ؛

b اندیسی برای اشاره به بازه‌های زمانی یک روز؛

B تعداد بازه‌های زمانی یک روز؛

T'_b مدت زمان بازه زمانی bام (بر حسب ساعت)؛

n^{CPP} اندیسی برای اشاره به زیر–بازه‌ها افق برنامه‌ریزی در قیمت‌گذاری پیک بحرانی (بر حسب ساعت)

N تعداد زیر–بازه‌ها در قیمت‌گذاری پیک بحرانی (بر حسب ساعت)؛

$T_{n^{CPP}}$ مدت زمان بازه زمانی n^{CPP}ام (بر حسب ساعت)؛

۲- متغیرها

IN درآمد شرکت خرده‌فروش حاصل از فروش انرژی الکتریکی به مشتریان (بر حسب دلار)

SP^{FX} قیمت بهینه پیشنهادی فروش انرژی الکتریکی به مشتریان در روش قیمت‌گذاری ثابت (بر حسب \$/MWh)

$D^{eff}_{SP^{FX},t}(\omega)$ تقاضای مؤثر مشتریان در زمان t و سناریوی ω است هنگامی‌که شرکت خرده‌فروش انرژی الکتریکی را با قیمت SP^{FX} می‌فروشد (بر حسب MWh)

$D^{est}_t(\omega)$ تقاضای تخمین زده شده همه مشتریان موجود در بازار خرده‌فروشی، در زمان t (بر حسب MWh)؛

$COST^F$ هزینه خرید از قراردادهای پیش‌رو (آتی) (بر حسب \$)؛

P^F_i مقدار توان خریداری شده از قرارداد پیش‌رو iام (بر حسب MW)؛

$COST^C$ هزینه خرید از قراردادهای اختیار خرید (بر حسب \$)؛

P^C_j مقدار توان خریداری شده از قرارداد اختیار خرید jام (بر حسب MW)؛

$COST^G$ هزینه تولید توان نیروگاه‌های متعلق به شرکت خرده‌فروش (بر حسب \$)؛

$C(P^G_{g,t}(\omega))$ هزینه تولید نیروگاه gام در ساعت t و سناریوی ω (بر حسب \$/h)؛

$C^{su}_{g,t}(\omega)$ هزینه راه‌اندازی نیروگاه gام در ساعت t و سناریوی ω (بر حسب \$/h)؛

$P^G_{g,t}(\omega)$ توان تولید نیروگاه gام در ساعت t و سناریوی ω (بر حسب MW)؛

$P^{\text{int}}_{k,t}(\omega)$ مقدار بار قطع شده در برنامه بار قطع‌پذیر kام، در ساعت t و سناریوی ω

$PROFIT^{int}$ سود مورد انتظار قرارداد ناشی از بارهای قطع‌پذیر (بر حسب \$)؛

$profit^{\text{int}}_{k,t}(\omega)$ سود شرکت خرده‌فروش ناشی از برنامه بار قطع‌پذیر kام در ساعت t و سناریوی ω (بر حسب \$)؛

$\lambda^p_t(\omega)$ قیمت لحظه‌ای برق در ساعت t و سناریوی ω (بر حسب \$/MWh)؛

$COST^P$ متوسط هزینه/درآمد ناشی از تسویه در بازار لحظه‌ای (بر حسب \$)؛

$PROFIT_t(\omega)$ سود شرکت خرده‌فروش در ساعت t وسنایوی ω (بر حسب \$)؛

RM اندازه ریسک (بر حسب \$)؛

η_t متغیر ارزش در معرض خطر در ساعت t از افق برنامه‌ریزی (متغیر کمکی می‌باشد که در محاسبه $CVaR_\beta(\cdot)$ مورد استفاده قرار می‌گیرد)؛

$\mu_t(\omega)$ متغیر کمکی مورد استفاده در محاسبه $CVaR_\beta(\cdot)$؛

$\mathbf{SP}^{TU}$ بردار قیمت فروش (بر حسب [\$/MWh])؛

SP^{TU}_b قیمت بازه زمانی bام (بر حسب [\$/MWh])؛

$\mathbf{D}_{\mathbf{SP}^{TU}}$ بردار تقاضا بازه‌های مختلف یک روز کاری در قیمت $\mathbf{SP}^{TU}$ (بر حسب [\$/MWh])؛

$\mathbf{SP'}^{TU}$ بردار قیمت نامی فروش (بر حسب [\$/MWh])؛

$D^{eff}_{\mathbf{SP}^{TU},t}(\omega)$ تقاضای مؤثر مشترکین در ساعت t، قیمت فروش $\mathbf{SP}^{TU}$ وسناریوی ω (بر حسب [MW])؛

SP^{TU}_t قیمت فروش پیشنهادی شرکت خرده‌فروش در ساعت t ($SP^{TU}_t = SP^{TU}_b, t \in T'_b$) (بر حسب [$/MWh])؛

$D^{eff}_{\mathbf{SP}^{CPP}_t}(\omega)$ تقاضای مؤثر مشترکین در ساعت t، قیمت فروش $\mathbf{SP}^{CPP}$ وسناریوی ω (بر حسب [MWh])؛

$\mathbf{SP}^{CPP}$ بردار قیمت فروش در روش قیمت‌گذاری پیک بحرانی (بر حسب [$/MWh])؛

SP^{CPP} قیمت فروش در زمان‌های پیک بحرانی (بر حسب [$/MWh])؛

$SP^{RT}_t(\omega)$ قیمت فروش در زمان t؛ و سناریوی ω در روش قیمت‌گذاری زمان–واقعی (بر حسب [$/MWh])؛

$D^{eff}_{SP^{RT},t}(\omega)$ تقاضای مؤثر مشترکین در ساعت t، قیمت فروش SP^{RT}_t و سناریوی ω (بر حسب [MWh])؛

m درصد سودی اعمالی روی قیمت لحظه‌ای برق (بر حسب درصد)؛

n شاخصی برای سقف قیمت درنظر گرفته شده توسط شرکت خرده‌فروش (بر حسب [$/MWh])؛

۳– توابع

$\gamma(\omega)$ احتمال رخداد سناریوی ω؛

$MSF(\cdot)$ تابع سهم بازار شرکت خرده‌فروش؛

$\delta^F_{i,t}$ تابعی دو مقداری (با مقادیر صفر و یک) است که نوع قرارداد پیش‌رو (آتی) iام را مدل‌سازی می‌کند؛

$\delta^C_{j,t}$ تابعی دو مقداری (با مقادیر صفر و یک) که نوع قرارداد اختیار خرید jام را مدل‌سازی می‌کند؛

$\theta^C_{j,t}(\omega)$ تابعی دو مقداری (با مقادیر صفر ویک) که زمان اجرای قرارداد اختیار خرید jام را مدل‌سازی می‌کند.

$u^G_{g,t}(\omega)$ تابعی دو مقداری (با مقادیر صفر و یک) که برابر یک است اگر نیروگاه gام در ساعت t و سناریوی ω روشن باشد، در غیر این‌صورت برابر صفر است.

$v^G_{g,t}(\omega)$ تعداد ساعت‌هایی که نیروگاه gام در سناریوی ω و زمان ختم شده به ساعت t روشن (با علامت مثبت) یا خاموش (با علامت منفی) بوده است.

$\delta^B_{t,b}$ تابعی دو مقداری با مقادیر صفر ویک که در زمان‌های پیک بحرانی برابر یک است؛ در غیر این‌صورت برابر صفر می‌باشد.

$MSF(\mathbf{SP}^{TU})$ تابع سهم بازار شرکت خرده‌فروش، در روش قیمت‌گذاری زمان–استفاده

$MSF(\mathbf{SP}^{CPP})$ تابع سهم بازار شرکت خرده‌فروش، در روش قیمت‌گذاری پیک بحرانی

$MSF(SP^{RT})$ تابع سهم بازار شرکت خرده‌فروش، در روش قیمت‌گذاری زمان–واقعی

۴- پارامترها

α_1 درصدی از مشتریان که به شرکت خرده‌فروش وفادارند (بر حسب ٪)؛

α_2 درصدی از مشتریان که به رقبای شرکت خرده‌فروش وفادارند (بر حسب ٪)؛

μ_1 ،σ_1 پارمترهای مربوط به تابع سهم بازار در روش قیمت‌گذاری ثابت؛

λ_i^F قیمت خرید انرژی در قرارداد پیش‌رو (آتی) iام (بر حسب \$/MWh)؛

ΔP_i^F اندازه تغییرات توان در هر گام از قرارداد پیش‌رو (آتی) iام (بر حسب MW)؛

M_i^F تعداد گام‌های تغییرات توان متناظر با قرارداد پیش‌رو (آتی) iام؛

Per_j^C مبلغ اضافی (صرف) پرداختی به فروشنده در قرارداد اختیار خرید jام (بر حسب \$/MWh)؛

ΔP_j^C اندازه تغییرات توان در هر گام از قرارداد اختیار خرید jام (بر حسب MW)؛

M_j^C تعداد گام‌های تغییرات توان متناظر با قرارداد اختیار خرید jام ؛

C_g^{su} هزینه ثابت راه‌اندازی نیروگاه gام (بر حسب \$)؛

$P_g^{G,\max}$ حداکثر توان تولیدی نیروگاه gام (بر حسب MW)؛

$P_g^{G,\min}$ حداقل توان تولیدی نیروگاه gام (بر حسب MW)؛

UT_g^G حداقل زمان روشن ماندن نیروگاه gام (بر حسب ساعت)؛

DT_g^G حداقل زمان خاموش ماندن نیروگاه gام (بر حسب ساعت)؛

NP_k^{int} تعداد دفعات مجاز قطع بار برنامه قطع‌پذیر kام در بازه زمانی قرارداد؛

MD_k^{int} حداکثر مدت زمان قطعی بار برنامه قطع‌پذیر kام در هر بار قطعی (بر حسب ساعت)؛

ML_k^{int} حداکثر مقدار بار برنامه قطع‌پذیر kام در دسترس (تخمین زده شده) (بر حسب ساعت)؛

ΔP_k^{int} اندازه تغییرات توان در هر گام از برنامه قطع‌پذیر kام (بر حسب MW)؛

λ^{comp} نرخ جبران واحد بار در برنامه بار قطع‌پذیر نوع یکم (بر حسب \$/MWh)؛

DR نرخ تخفیف در برنامه بار قطع‌پذیر نوع دوم (بر حسب ٪)؛

β سطحی اطمینانی می‌باشد که در آن ریسک ارزیابی می‌شود؛

δ_t^W ضرائب وزنی انتخاب شده برای $CVaR_\beta(\cdot)$ در ساعت t؛

ρ پارامتر ریسک گریزی شرکت خرده‌فروش؛

$\mathbf{E}$ ماتریس الاستیسته (جابجایی) تقاضا نسبت به قیمت (بر حسب [\$/MWh])؛

NP^{CPP} تعداد دفعات مجاز قطع (کاهش بار) مشتری در بازه زمانی قرارداد، در قیمت‌گذاری پیک بحرانی؛

MD^{CPP} حداکثر مدت زمان قطعی (کاهش بار) مشتری در هر بار قطعی (بر حسب ساعت)؛

$A_i, B_j, i = 1,2; j = 1,2,3$ ضرائب تابع سهم بازار در روش قیمت‌گذاری زمان-واقعی؛

فصل اول

مقدمه

تجربیات خصوصی‌سازی در صنایعی مانند حمل و نقل و مخابرات، سبب مطرح شدن ایده مقررات‌زدایی در صنعت برق گردید. عواملی هم‌چون: ۱) ناکارآمدی و عدم توانایی دولت‌ها در تأمین هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری صنعت برق در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، ۲) مازاد عرضه انرژی در کشورهای پیش‌رفته در دوره‌ای خاص که به‌دنبال سرمایه‌گذاری‌های متمرکز و پرهزینه در این صنعت پدید آمده بود، و هم‌چنین ۳) بهبود فناوری به‌ویژه در بخش تولید و افزایش بازده نیروگاه‌ها همراه با کوچک‌تر شدن آن‌ها سبب سرعت یافتن مقررات زدایی در صنعت برق شد.

در نتیجه مقررات‌زدایی در صنعت برق، نهادهای مختلفی با وظایف گوناگون ایجاد شدند. یکی از این نهادها، شرکت‌های خرده‌فروش برق است. شرکت‌های خرده‌فروش برق، به‌عنوان واسطه بین شرکت‌های تولید کننده انرژی الکتریکی و مشتریان عمل می‌کنند. این شرکت‌ها انرژی الکتریکی را از بازار عمده فروشی خریداری کرده و به مشتریان می‌فروشند. در نتیجه این شرکت‌ها در بازار برق به‌عنوان نهادی واسط عمل می‌کنند که می‌باید قراردادهایی هم با سمت عرضه و هم با سمت تقاضا تنظیم کنند. با توجه به نقش واسطه این نوع نهادها، اتخاذ استراتژی مناسب حائز اهمیّت بوده و تأثیر به‌سزایی در تأمین سود یا متحمل شدن ضرر دارد.

در بازار عمده‌فروشی (بازار لحظه‌ای)، قیمت برق توسط عرضه و تقاضا تعیین می‌شود؛ در نتیجه قیمت بازار لحظه‌ای، قیمتی متغیر و دارای عدم قطعیت است. اتکای بیش از حد به بازار لحظه‌ای ممکنست سبب متضرر شدن و یا در برخی مواقع منجر به ورشکستگی شرکت خرده‌فروش شود. برای حداقل کردن ریسک قیمت لحظه‌ای بازار، شرکت خرده‌فروش از قراردادهای موجود در بازار آتی مانند قراردادهای پیش‌رو، قراردادهای اختیار خرید و ... می‌تواند استفاده کند. هزینه قراردادهای ذکر شده معمولاً بزرگتر از هزینه متوسط بازار لحظه‌ای است. بنابراین، لازمست مصالحه‌ای بین مقدار توان خریداری شده از بازار لحظه‌ای و توان تأمین شده از قراردادها برقرار کرد.

در سمت تقاضا، شرکت خرده‌فروش ملزم به تأمین تقاضای مشتریان خود است. تقاضای مشتریان دائماً در حال تغییر بوده و در نتیجه دارای عدم قطعیت است. بنابراین، شرکت خرده‌فروش بایستی عدم قطعیت تقاضای مشتریانش را درنظر بگیرد. در مبادلات صورت‌گرفته در زمان–واقعی تفاوت تقاضای تخمین زده شده و تقاضای واقعی در بازار لحظه‌ای تسویه می‌شود. به‌عبارت دیگر، شرکت خرده‌فروش کمبود (مازاد) تقاضایش را از (به) بازار لحظه‌ای خریداری می‌کند (می‌فروشد). به‌علاوه شرکت خرده‌فروش باید قیمت پیشنهادی فروش به مشتریان را نیز تعیین کند. درصورتی‌که قیمت

پیشنهادی فروش بالا باشد، مشتریان کمی با شرکت خرده‌فروش قرارداد می‌بندند. درصورتی‌که قیمت پیشنهادی فروش پایین باشد، ممکنست شرکت خرده‌فروش دچار ضرر شود. بنابراین تعیین قیمت پیشنهادی فروش، یکی از مهم‌ترین وظایف شرکت خرده‌فروش است.

بنابراین برای تعیین استراتژی میان مدت شرکت‌های خرده‌فروش برق، مسائلی هم‌چون تعیین قیمت بهینه فروش (با استفاده از روش‌های مختلف قیمت‌گذاری مانند: قیمت ثابت، قیمت زمان–استفاده، قیمت پیک بحرانی، و قیمت زمان–واقعی) و هم‌چنین تهیه سبد بهینه خرید انرژی از منابع گوناگون (هم‌چون بازار لحظه‌ای، قراردادهای پیش‌رو، قراردادهای اختیار خرید، نیروگاه‌های شرکت خرده‌فروش و قراردادهای بارهای قطع‌پذیر) با در نظر گرفتن ریسک مبادلات مطرح می‌شود. رساله حاضر بر حل چنین مسئله پیچیده‌ای می‌پردازد.

ساختار رساله به شرح زیر تدوین یافته است.

فصل دوم رساله مروری اجمالی بر بازار برق و خرده‌فروشی در آن دارد؛ در ادامه فصل مذکور، تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه خرده‌فروشی در بازار برق به‌طور مفصل مطرح و در سه قسمت شامل مراجع پایه، مراجعی که مستقیماً به موضوع خرده‌فروشی پرداخته‌اند و مراجعی که به‌صورت غیر مستقیم با مبحث خرده‌فروشی در بازار برق مرتبطند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در انتها نیز اهداف و نوآوری‌های رساله توضیح داده می‌شود.

فصل سوم رساله به بیان مفاهیم مربوط به برنامه‌ریزی تصادفی می‌پردازد تا زمینه برای فهم بهتر فصل‌های بعدی رساله فراهم شود. در این فصل در مورد مطالبی هم‌چون: متغیر تصادفی و چگونگی مدل‌سازی عدم قطعیت پارامترهای مسئله، برنامه‌ریزی تصادفی دو یا چند مرحله‌ای با برگشت و معادل قطعی آن‌ها، چگونگی تولید سناریو برای حل مسئله و بررسی روش‌های کاهش سناریوهای تولید شده توضیح داده می‌شود.

فصل چهارم به بحث در مورد ریسک و انواع آن، مدیریت ریسک و روش‌های مختلف مدل‌سازی ریسک در مسائل تصمیم‌گیری می‌پردازد. در ادامه، روش مورد استفاده در رساله برای مدل‌سازی ریسک (روش میانگین ارزش در معرض خطر) به‌طور مبسوط شرح داده می‌شود.

در فصل پنجم کارهای صورت‌گرفته در رساله تشریح می‌شود. در این فصل استراتژی بهینه شرکت خرده‌فروش در میان مدت مورد بررسی قرار می‌گیرد. استراتژی ذکر شده شامل تعیین سبد خرید بهینه از بازارها و ابزارهای گوناگون و تعیین قیمت بهینه فروش با مدنظر قراردادن ریسک

است. روابط ریاضی در چهار بخش، شامل قیمت‌گذاری ثابت، زمان–استفاده، پیک بحرانی، و زمان–واقعی بدست می‌آید.

در فصل ششم نتایج و مطالعات عددی روش‌های پیشنهادی فصل پنجم بیان می‌شود. در این فصل پس از معرفی داده‌های مورد استفاده، نتایج حاصل از مطالعات عددی روش قیمت‌گذاری ثابت، قیمت‌گذاری زمان– استفاده، قیمت‌گذاری پیک بحرانی، و در انتها قیمت‌گذاری زمان–واقعی بیان می‌شود.

فصل هفتم رساله نیز به نتیجه‌گیری و بیان پیشنهاداتی در مورد تکمیل و ادامه رساله می‌پردازد.

فصل دوم:

مروری بر خرده‌فروشی در بازار برق و تحقیقات مرتبط با آن

۲–۱– مقدمه

هدف از نگارش این فصل، آشنایی اجمالی با بازار برق و خرده‌فروشی در آن و هم‌چنین بررسی تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه خرده‌فروشی در بازار برق است.

در بخش اول، که بازار برق معرفی می‌شود، به مباحثی هم‌چون علل تجدید ساختار در صنعت برق، خصوصیات و ویژگی‌های بازار برق، انواع بازارهای برق از نظر سطح رقابت، مبادلات و بازارهای مرتبط با آن، و نهادهای فعال در بازار برق پرداخته می‌شود.

در بخش دوم، که به خرده‌فروشی در بازار برق می‌پردازد، مباحثی هم‌چون تاریخچه خرده‌فروشی در صنعت برق و فعالیت‌هایی که لازمست انجام شود تا استراتژی شرکت خرده‌فروشی تدوین گردد، تشریح می‌شود.

در بخش سوم نیز تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه خرده‌فروشی در بازار برق به‌طور مفصل مطرح می‌شود و در سه قسمت شامل مراجع پایه، مراجعی که مستقیماً به موضوع خرده‌فروشی پرداخته‌اند و مراجعی که به‌صورت غیر مستقیم با مبحث خرده‌فروشی در بازار برق مرتبطند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در بخش انتهایی نیز اهداف و نوآوری‌های رساله توضیح داده می‌شود.

۲–۲– بازار برق

۲–۲–۱– تجدید ساختار در صنعت برق

تجربه مقررات‌زدایی[1] در صنعت برق، از کشور شیلی در سال ۱۹۸۲ آغاز شد و به‌تدریج در دیگر کشورهای آمریکای جنوبی و مرکزی نیز تکرار شد. در اروپا انگلستان آغازگر این روند بود و از سال ۱۹۹٦ با تصویب پارلمان اروپا به‌تدریج در کشورهای عضو اتحادیه اروپا هم گسترش یافت. در آمریکا در سال ۱۹۹٦ با تصویب مصوبه ۸۸۸ توسط کمیته نظارت انرژی فدرال[2]، در نیوزلند در سال ۱۹۹٦، و در استرالیا در سال ۱۹۹۸ زمینه برای مقررات‌زدایی فراهم شد [۱].

تجربیات خصوصی‌سازی در صنایعی مانند حمل و نقل و مخابرات، ایده مقررات‌زدایی در صنعت برق را به‌تدریج مطرح ساخت [۱]. در بسیاری از کشورها، مسایل ناشی از ناکارآمدی و عدم توانایی دولت‌ها در تأمین هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، صنعت را به سمت خصوصی‌سازی سوق

---

[1]- Deregulation
[2]- Federal energy regulatory commission (FERC)

داد. از سوی دیگر، در کشورهای پیشرفته، روند مقررات‌زدایی به‌عنوان نتیجه طبیعی مازاد عرضه انرژی در دوره‌ای بود که به‌دنبال 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 در سرعت دادن به این روند مؤثر بوده است [۱].

در نتیجه تجدید ساختار، صنعت برق که در دوره‌ای طولانی با شرکت‌های یک‌پارچه با ساختار عمودی اداره شده بود، دچار تغییرات شگرفی شد و به صنعتی رقابتی و توزیع شده تبدیل شد. از دیگر نتایج مقررات‌زدایی، شکل‌گیری بازار آزاد و رقابتی برای کالای برق و ایجاد نهادهای مختلف با وظایف گوناگون می‌باشد [۲-۱].

۲-۲-۲- خصوصیات و ویژگی‌های بازار برق

توسعه و ایجاد بازار برق بر این فرض استوارست که انرژی الکتریکی را می‌توان به‌صورت یک کالا درنظر گرفت؛ اما بین انرژی الکتریکی و دیگر کالاها اختلاف و تفاوت اساسی وجود دارد به‌طوری‌که اثری عمیق و ژرفی در سازمان و قوانین بازار برق بر جای می‌گذارد [٤-۳].

مهمترین اختلاف انرژی الکتریکی با دیگر کالاها در اینست که با یک سیستم فیزیکی، که سریع‌تر از هر بازاری عمل می‌کند، به‌صورت جدا ناشدنی اتصال دارد. در این سیستم فیزیکی (سیستم قدرت)، بین عرضه و تقاضا باید به‌صورت لحظه‌ای تعادل برقرار باشد. در صورت عدم برقراری تعادل بین عرضه و تقاضا، سیستم قدرت با پی‌آمدهای فاجعه آمیزی از هم می‌پاشد. چنین واقعه‌ای غیر قابل تحمل است؛ زیرا نه‌تنها مبادلات تجاری بلکه کل ناحیه یا کشور برای مدت قابل ملاحظه‌ای بی‌برق می‌شود. برای بازیابی سیستم قدرت کاملاً از هم پاشیده حداقل ٢٤ ساعت زمان لازمست. بنابراین همان‌طورکه ملاحظه می‌شود پی‌آمدهای چنین حادثه‌ای بسیار گسترده است و هیچ دولتی اجازه نمی‌دهد که مکانیسم بازار سبب چنین حادثه گسترده‌ای شود.

اختلاف دیگر انرژی الکتریکی با دیگر مبادلات در اینست که قوانین کیرشهف بر آن حاکم است؛ به‌عبارت دیگر نمی‌توان توان تولیدی یک ژنراتور را به سمت بار مشخصی هدایت کرد و بالعکس. در سیستم قدرت، همه ژنراتورها در تأمین بار الکتریکی سهیم می‌باشند و به‌عبارت دیگر تشکیل یک سیستم حوضچه‌ای می‌دهند؛ بنابراین در صورت ایجاد اخلال در این سیستم، همه بازیگران بازار متأثر می‌شوند.

تقاضای انرژی الکتریکی به‌صورت روزانه و هفتگی دارای تغییرات دوره‌ای قابل پیش‌بینی است. در برخی ساعت‌ها، مقدار مصرف برق کم می‌باشد و تنها واحدهای تولیدی با بازده بالا در مدار باقی می‌مانند و در برخی ساعت‌ها مصرف زیاد و در نتیجه واحدهای با بازده کم هم به مدار وارد می‌شوند. از طرف دیگر انرژی الکتریکی بایستی در همان لحظه‌ای که مصرف می‌شود، تولید شود. با توجه به متغیر بودن هزینه حدی تولید در ساعت‌های مختلف، انتظار اینست که با تغییر بار قیمت نیز تغییر کند. چنین تغییرات سریعی در قیمت و هزینه کالاها غیر معمول است.

از دیگر ویژگی‌های منحصر به‌فرد انرژی الکتریکی وجود تلفات و نیز مسأله تراکم در شبکه انتقال است که سبب می‌شود قیمت برق در مکان‌های مختلف با یکدیگر تفاوت پیدا کند.

بازارهای برق را با توجه به سه عامل مهم رقابت، نوع تبادل و زمان می‌توان تقسیم‌بندی کرد.

۲-۲-۳- رقابت‌پذیری

بر اساس سطح رقابت‌پذیری، بازارهای برق را به چهار دسته شامل: بازارهای انحصاری، رقابت در تولید، رقابت در سطح کلان و رقابت در سطح خرد می‌توان تقسیم کرد [٤-۲]:

الف) انحصار در تمامی سطوح: بازار انحصاری برق، بازاری است که در آن تولید، انتقال و فروش انرژی در انحصار یک شرکت خصوصی، سازمان دولتی و یا نهادی وابسته به دولت است. این نوع بازار پیش از مقررات‌زدایی در همه کشورها، بر صنعت برق حاکم بوده است.

ب) رقابت در تولید: در این نوع بازار، نیروگاه‌ها و شرکت‌های تولیدی به‌صورت خصوصی در بازار فعالند و در رقابت با هم تلاش می‌کنند تا انرژی را به صورتی مطمئن و ارزان به یک نهاد کلان خریدار بفروشند. انتقال و توزیع انرژی در این نوع بازار، بر عهده نهاد خریدار است و امکان رقابت در بخش مصرف وجود ندارد.

پ) رقابت در بازار کلان: در این مدل، بازاری کلان برای انرژی شکل می‌گیرد که در آن خریداران و فروشندگان کالایی به نام برق، بر سر مقدار و بهای آن با یکدیگر رقابت می‌کنند. خریداران کلان انرژی از امکان انتخاب مستقیم فروشنده برق برخوردارند و می‌توانند از میان عرضه‌کنندگان کلان انرژی، تأمین کننده انرژی مورد نیاز خود را مستقیماً برگزینند، هر چند که این آزادی برای مصرف‌کنندگان خرد وجود ندارد.

ت) رقابت در سطح خرد: در این مدل که کامل‌ترین بازار از حیث رقابت به شمار می‌رود، تمامی مشتریان، چه خرد و چه کلان، می‌توانند مستقیماً تأمین‌کننده انرژی مورد نیاز خود را برگزینند. در این نوع بازار، شرکت‌های خرده‌فروش توان الکتریکی و دیگر خدمات لازم برای تأمین نیازهای مشتریان خود را خریداری، سپس آن‌ها را به‌صورت‌های مختلف با هم ترکیب و برای فروش به مصرف‌کنندگان بزرگ، متوسط یا کوچک عرضه می‌کنند.

۲-۲-۴- انواع تبادلات

بازارهای برق را براساس نوع تبادلات انرژی می‌توان به سه دسته تقسیم کرد که عبارتند از [۲].

الف) بازار مبتنی بر سیستم حوضچه[1] : در این بازار تنها یک خریدار حضور دارد. حوضچه در واقع یک نهاد دولتی یا نیمه‌دولتی است که با دریافت پیشنهاد قیمت از فروشندگان و با شروع از کمترین پیشنهادها، توان مورد نیاز تمامی خریداران را معمولاً با یک قیمت واحد، به آن‌ها می‌فروشد. این قیمت یکسان در واقع پیشنهاد قیمت گران‌ترین فروشنده‌ای است که توان عرضه‌شده از سوی او مورد نیاز خریداران است.

ب) بازار مبتنی بر تبادلات دوسویه توان[2]: در این بازار، خریداران و فروشندگان به‌طور منفرد با یکدیگر وارد مذاکره می‌شوند و بر سر قیمت با هم به توافق می‌رسند. در این نوع تبادل، هزینه انتقال به‌طور مجزا محاسبه و با سازوکارهای پیش‌بینی شده در قراردادهای دو یا چند جانبه از سوی تولیدکنندگان و/یا مصرف‌کنندگان تأمین می‌شود.

پ) بازار بورس تبادل توان (PX[3]): در این بازار، یک نهاد تجاری برای مدیریت بازار از سوی دولت یا شرکت‌کنندگان در بازار ایجاد می‌شود که دقیقاً مانند یک بازار سهام عمل می‌کند. خریداران نیازهای خود را به PX اعلام می‌کنند. فروشندگان نیز پیشنهادهای خود را به PX ارائه می‌دهند. فروشندگان و خریداران به هنگام تبادل تجاری با PX حقیقتاً وارد بازار شده‌اند و دیگر فروشنده یا خریدار منفرد به‌حساب نمی‌آیند. دقیقاً مانند تبادل سهام در بازار بورس، بورس تبادل توان الکتریکی به‌طور ثابت و لحظه به لحظه، بهای کالایی به نام انرژی الکتریکی را محاسبه و در اختیار تمامی شرکت‌کنندگان بازار می‌گذارد که در واقع قیمت تمامی تبادلات توانی می‌باشد که در آن لحظه انجام می‌شود.

---

[1]- Pool
[2]- Bilateral contracts
[3]- Power exchange