بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه بیرجند

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت در بازار برق در محیط حساس به قیمت شبکه‌های هوشمند

استادان راهنما:

دکتر محسن فرشاد

دکتر سعید رضا گلدانی

حسین طاهریان

تابستان ۱۳۹۲

چکیده

در محیط تجدید ساختار یافته، برق به عنوان یک کالا در محیطی رقابتی بر پایه قراردادهای مختلف در بازارهای متفاوت مبادله می‌گردد. محیط رقابتی صنعت برق، به همراه خود مسایل جدیدی را در بهره‌برداری و برنامه‌ریزی صنعت برق مطرح نموده است. آنچه حائز اهمیت است، این است که با معرفی تجدید ساختار در صنعت برق، قیمت الکتریسیته تمام فعالیت‌های بازار را تحت‌الشعاع خود قرار داده است. با توجه به طبیعت نامطمئن قیمت آتی برق در بازار رقابتی و احتساب آن به عنوان مهم‌ترین فاکتور عدم قطعیت در این محیط، شرکت‌کنندگان در بازار، جهت فعالیت‌های بهره‌برداری و برنامه‌ریزی خود، به پیش‌بینی قیمت می‌پردازند. در این تحقیق پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت در بازارهای مختلف برق، با ارائه دو مدل پیشنهادی که شامل شبکه‌ی عصبی بهبودیافته و شبکه‌ی SVR بهبودیافته با ایده خوشه‌بندی FCM می‌باشد، صورت گرفته است. نتایج بدست آمده دقت بالای مدل‌های پیشنهادی را در مقایسه با مدل‌های پیشین نشان می‌دهد.

از طرف دیگر، با ظهور شبکه‌های هوشمند و استفاده از ابزارهای پیشرفته اندازه‌گیری، مشترکان به صورت لحظه‌ای از قیمت‌ها باخبر هستند؛ از این‌رو انتظار می‌رود در شبکه‌های هوشمند آینده، مشترکان سمت تقاضا، الگوی مصرف خود را بر اساس قیمت‌های پیش‌بینی شده با قطع بار، انتقال بار و یا حتی تولید بار به صورت محلی تغییر دهند. مجموع واکنش مشترکان می‌تواند منحنی تقاضا را در بازار برق انتقال دهد. بنابراین ممکن است قیمت‌ها با قیمت پیش‌بینی شده‌ی اولیه متفاوت باشد. لذا، هدف در این پایان‌نامه، پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت در محیط حساس به قیمت شبکه‌های هوشمند می‌باشد که با ارائه دو مدل پیشنهادی شامل مدل ترکیبی عصبی MIMO و شبکه ANFIS همچنین مدل ترکیبی شبکه SVR و شبکه ANFIS با ایده خوشه‌بندی مبتنی بر الگوریتم ICA، نتایج قابل قبولی حاصل گشته است.

کلید واژه‌ها: الگوریتم‌های هوشمند، بازار برق، پیش‌بینی کوتاه‌مدت قیمت، شبکه‌های هوشمند، محیط حساس به قیمت.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها..... ه

فهرست جدول‌ها..... و

فهرست شکل‌ها..... ز

فصل ۱- مقدمه..... ۱۰

۱-۱- پیشگفتار..... ۱۰

۱-۲- تاریخچه..... ۱۱

۱-۳- هدف از تدوین پایان‌نامه..... ۱۱

۱-۴- نوآوری تحقیق..... ۱۲

۱-۵- ساختار تحقیق..... ۱۲

فصل ۲- کلیات و مفاهیم..... ۱۳

۲-۱- مقدمه..... ۱۳

۲-۲- قیمت گذاری در بازار برق..... ۱۳

۲-۲-۱- MCP..... ۱۳

۲-۲-۲- ZMCP..... ۱۴

۲-۲-۳- LMP..... ۱۴

۲-۳- روش‌های پرداخت در بازار برق..... ۱۴

۲-۴- رفتار و خواص سیگنال قیمت برق..... ۱۶

۲-۵- لزوم پیش‌بینی قیمت در کوتاه مدت..... ۱۷

۲-۶- عوامل اثرگذار بر سیگنال قیمت در کوتاه مدت جهت پیش‌بینی قیمت برق..... ۱۸

۲-۷- نتیجه‌گیری..... ۱۹

فصل ۳- مفاهیم و روش‌های پیش‌بینی..... ۲۰

۳-۱- مقدمه..... ۲۰

۳-۲- پیش‌بینی و دسته بندی کلی آن..... ۲۰

۳-۳- روش‌های پیش‌بینی..... ۲۱

۳-۳-۱- روش‌های مبتنی بر قضاوت ۲۲
۳-۳-۲- روش‌های مبتنی بر داده‌های آماری ۲۳
۳-۴- انتخاب یک روش جهت پیش‌بینی ۲۴
۳-۵- مدل‌های سری‌های زمانی ۲۴
۳-۵-۱- ساختن مدل ۲۳
۳-۵-۲- معیارهای خطا ۲۷
۳-۶- مدل‌های رگرسیون ۲۷
۳-۷- شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) ۲۸
۳-۷-۱- شبکه عصبی خود مختار کوهونن ۳۰
۳-۷-۲- شبکه هاپفیلد ۳۰
۳-۷-۳- شبکه عصبی چند لایه‌ای با روش یادگیری پس انتشار ۳۰
۳-۸- سیستم‌های استنتاج فازی (FIS) ۳۱
۳-۹- سیستم‌های فازی- عصبی (ANFIS) ۳۱
۳-۱۰- ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) ۳۲
۳-۱۱- ترکیب روش‌ها ۳۴
۳-۱۲- پیش‌بینی بازه‌ای ۳۴
۳-۱۳- نتیجه‌گیری ۳۴

فصل ۴- پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت در بازار برق ۳۵

۴-۱- مقدمه ۳۵
۴-۲- مروری بر فعالیت‌های انجام شده در حوزه پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت ۳۶
۴-۲-۱- سری‌های زمانی ۳۶
۴-۲-۲- مدل‌های ماشین یادگیری ۳۶
۴-۲-۳- مدل‌های ترکیبی ۳۷
۴-۳- ارائه مدلی جهت پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت در بازار برق ۳۸
۴-۳-۱- انتخاب داده های ورودی ۳۸
۴-۳-۲- فضای کاری پیشنهادی ۳۹
۴-۳-۲-۱- بهینه سازی ساختار شبکه عصبی ۳۹
۴-۳-۲-۲- بهینه‌سازی وزن‌های شبکه عصبی ۴۰
۴-۳-۲-۳- معرفی الگوریتم فاخته ۴۰

۴-۳-۳- اعمال مدل پیشنهادی بر روی داده‌های بازار برق ایران ۴۷
۴-۳-۴- اعمال مدل پیشنهادی بر روی داده‌های بازار برق کالیفرنیا ۵۰
۴-۳-۵- اعمال مدل پیشنهادی بر روی داده‌های بازار برق PJM ۵۲
۴-۴- ارائه مدلی جهت پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت در بازار برق با در نظر گرفتن تأثیر تولید واحدهای بادی ۵۳
۴-۴-۱- اثر تولید بادی بر قیمت در بازار برق ۵۴
۴-۴-۲- فضای کاری پیشنهادی ۵۷
۴-۴-۲-۱- خوشه بندی داده های ورودی ۵۹
۴-۴-۲-۲- شبکه SVR ۵۹
۴-۴-۲-۳- شبکه SVR بهبودیافته بر پایه الگوریتم فاخته ۶۰
۴-۴-۳- اعمال مدل پیشنهادی بر داده‌های بازار برق Nord Pool ۶۰
۴-۵- نتیجه‌گیری ۶۳
فصل ۵- پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت در محیط شبکه‌های هوشمند ۶۴
۵-۱- مقدمه ۶۴
۵-۱-۱- چالش‌های شبکه های الکتریکی سنتی ۶۴
۵-۱-۲- شبکه‌های الکتریکی هوشمند ۶۵
۵-۱-۳- ویژگی‌های شبکه الکتریکی هوشمند ۶۷
۵-۱-۴- روند هوشمندسازی شبکه‌های الکتریکی ۶۹
۵-۱-۵- زیرساختارهای مورد نیاز شبکه هوشمند ۷۰
۵-۲- ارائه مدلی جهت پیش‌بینی کوتاه مدت بار و قیمت در شبکه‌های هوشمند ۷۲
۵-۲-۱- کشش بار و قیمت الکتریکی در شبکه‌های هوشمند ۷۳
۵-۲-۲- فضای کاری پیشنهادی ۷۴
۵-۲-۲-۱- استخراج روزهای مشابه ۷۴
۵-۲-۲-۲- مدل MIMO پیش‌بینی بار و قیمت الکتریکی ۷۴
۵-۲-۲-۳- شبکه فازی-عصبی ۷۵
۵-۲-۳- مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی ۷۶
۵-۲-۳-۱- اعمال مدل پیشنهادی بر روی داده‌های بازار برق کانادا – استان Ontario ۷۷
۵-۲-۳-۲- اعمال مدل پیشنهادی برروی داده‌های بازار برق استرالیا – منطقه NSW ۷۸
۵-۳- ارائه مدلی جهت پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت با درنظر گرفتن نفوذ بالای تولید بادی در محیط شبکه‌های هوشمند ۸۲

۵-۳-۱- مقدمه ۸۲
۵-۳-۲- شرح مسئله ۸۴
۵-۳-۳- مدل پیشنهادی ۸۵
۵-۳-۳-۱- ICA-Clustering Block ۸۶
۵-۳-۳-۲- شبکه عصبی پرسپترون چندلایه ۸۷
۵-۳-۳-۳- شبکه ANFIS ۸۷
۵-۳-۴- مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی ۸۷
۵-۴- نتیجه‌گیری ۹۰
فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۹۲
۶-۱- نتیجه‌گیری ۹۲
۶-۲- پیشنهادها ۹۳
فهرست مراجع ۹۴
واژه نامه فارسی به انگلیسی ۹۹
واژه نامه انگلیسی به فارسی ۱۰۲

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
مقدار واقعی نقطه تسویه بازار	Act.-MCP
ابزار اندازه‌گیری پیشرفته	AMI
میانگین نقطه تسویه بازار	Ave.-MCP
شبکه عصبی مصنوعی	ANN
جستجوی فاخته	CS
نقطه تسویه پیش‌بینی شده	For.-MCP
میانگین قدر مطلق خطا	MAE
میانگین قدر مطلق درصد خطا	MAPE
نقطه تسویه بازار	MCP
میانگین مجذور خطا	MSE

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱: معیارهای تعیین خطا ۲۷

جدول ۴-۱: نتایج شبیه‌سازی برای ۵۰ اجرای مجزا برای هر تکرار ۴۹

جدول ۴-۲: مقایسه نتایج معیار خطای MAPE برای بازار برق ایران ۵۱

جدول ۴-۳: مقایسه نتایج MAPE شبکه عصبی مرجع [۴۲] و شبکه عصبی پیشنهادی ۵۲

جدول ۴-۴: اطلاعات ساعتی LMP جهت ساختن و تست مدل پیش‌بینی ۵۲

جدول ۴-۵: مقایسه نتایج معیارهای مختلف اشاره شده در مرجع [۴۴] با مدل پیشنهادی ۵۳

جدول ۴-۶: مقایسه عددی نتایج مدل پیشنهادی با شبکه SVR مرسوم با و بدون در نظر گرفتن تولید بادی ۶۱

جدول ۵-۱: مقایسه معیارهای مختلف خطا در پیش‌بینی بار و قیمت اولیه و نهایی ۶ ماهه اول سال ۲۰۱۲ بازار برق انتاریو ۷۹

جدول ۵-۲: مقایسه معیارهای مختلف خطا در پیش‌بینی بار و قیمت اولیه و نهایی ۶ ماهه دوم سال ۲۰۱۲ بازار برق استرالیا ۸۰

جدول ۵-۳: میانگین روزانه v_d برای دو بازار برق کانادا استان انتاریو و استرالیا منطقه NSW ۸۱

جدول ۵-۴: نتایج معیارهای مختلف خطا جهت پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت بازار برق Nord Pool سال ۲۰۱۳ ..... ۸۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: بازار برق ۱۳
شکل ۲-۲: تعیین MCP ۱۴
شکل ۲-۳: نمودارهای متوسط روزانه دو سیگنال قیمت برق و گاز در بازار انگلستان ۱۶
شکل ۲-۴: عوامل اثرگذار بر پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت ۱۸
شکل ۳-۱: مدل ایستا ۲۰
شکل ۳-۲: مدل سری‌های زمانی ۲۱
شکل ۳-۳: فلوچارت کلی روش‌های پیش‌بینی ۲۲
شکل ۳-۴: انتخاب روش پیش‌بینی ۲۵
شکل ۳-۵: مراحل ساختن مدل ۲۵
شکل ۳-۶: رگرسیون: (a) رگرسیون مرتبه اول و (b) رگرسیون چندگانه ۲۸
شکل ۳-۷: مدل اقتصادسنجی ۲۸
شکل ۴-۱: روش‌های پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت ۳۵
شکل ۴-۲: نحوه آموزش و تست شبکه عصبی جهت پیش بینی کوتاه مدت قیمت در [۲۵] ۳۷
شکل ۴-۳: فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی فاخته ۴۳
شکل ۴-۴: روش فاخته‌ها جهت تخم‌گذاری ۴۴
شکل ۴-۵: حرکت فاخته‌ها به سمت نقطه هدف ۴۵
شکل ۴-۷: تابع برازندگی بهینه‌سازی ساختار شبکه عصبی ۴۹
شکل ۴-۸: همگرایی بهترین جواب برای الگوریتم‌های GA،PSO ، ICA و CS ۴۹
شکل ۴-۹: پیش‌بینی قیمت برای روز ۲۳ آوریل سال ۲۰۱۲ بازار برق ایران ۵۰
شکل ۴-۱۰: پیش‌بینی قیمت برای روز ۲۳ جولای سال ۲۰۱۲ بازار برق ایران ۵۰
شکل ۴-۱۱: پیش‌بینی قیمت برای روز ۵ نوامبر سال ۲۰۱۲ بازار برق ایران ۵۰
شکل ۴-۱۲: پیش‌بینی قیمت برای روز ۱۴ ژانویه سال ۲۰۱۳ بازار برق ایران ۵۰
شکل ۴-۱۳: پیش‌بینی قیمت برای ۳ تا ۹ آوریل سال ۲۰۰۰ بازار برق کالیفرنیا ۵۱
شکل ۴-۱۴: هفته هدف زمستان از ۱۸ الی ۲۴ فوریه سال ۲۰۰۲ بازار برق PJM ۵۲
شکل ۴-۱۵: هفته هدف زمستان از ۲۰ الی ۲۶ می سال ۲۰۰۲ بازار برق PJM ۵۳

شکل ۴-۱۶: تغییرات قیمت و تولید بادی منطقه DK-1 ۵۵
شکل ۴-۱۷: همبستگی تولید بادی و قیمت بازار Nord Pool منطقه DK-1 ۵۵
شکل ۴-۱۸: تغییرات قیمت و تولید بادی منطقه Bruce ۵۶
شکل ۴-۱۹: همبستگی تولید بادی و قیمت منطقه Bruce ۵۶
شکل ۴-۲۰: نمودار کاهش در متوسط قیمت لحظه‌ای در سطوح مختلف نفوذ بادی در منطقه DK-1 در سال ۲۰۱۰ ۵۷
شکل ۴-۲۱: مدل پیشنهادی جهت پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت با درنظر گرفتن تولید بادی ۵۸
شکل ۴-۲۲: پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت روز ۱۳ فوریه ۶۱
شکل ۴-۲۳: پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت روز ۱۵ می ۶۱
شکل ۴-۲۴: پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت روز ۱۴ آگوست ۶۱
شکل ۴-۲۵: پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت روز ۱۳ نوامبر ۶۱
شکل ۴-۲۶: مقایسه معیار خطای MAPE برای هدف زمستان ۶۲
شکل ۵-۱: همبستگی داده‌های بار و قیمت ماه فوریه سال ۲۰۱۲ بازار برق استرالیا (منطقه NSW) ۷۳
شکل ۵-۲: منحنی داده‌های بار و قیمت ۱۳ ماه دسامبر سال ۲۰۱۲ بازار برق استرالیا (منطقه VIC) ۷۴
شکل ۵-۳: مدل پیشنهادی جهت پیش‌بینی همزمان بار و قیمت در محیط شبکه‌های هوشمند ۷۵
شکل ۵-۴: پیش‌بینی ساعتی قیمت ۱۵ ژانویه سال ۲۰۱۲ بازار انتاریو ۷۸
شکل ۵-۵: پیش‌بینی ساعتی بار ۱۵ ژانویه سال ۲۰۱۲ بازار انتاریو ۷۸
شکل ۵-۶:پیش‌بینی ساعتی قیمت ۱۴ آوریل سال ۲۰۱۲ بازار انتاریو ۷۸
شکل ۵-۷: پیش‌بینی ساعتی بار ۱۴ آوریل سال ۲۰۱۲ بازار انتاریو ۷۸
شکل ۵-۸: پیش‌بینی ساعتی قیمت ۱۵ آگوست سال ۲۰۱۲ بازار استرالیا ۷۹
شکل ۵-۹: پیش‌بینی ساعتی بار ۱۵ آگوست سال ۲۰۱۲ بازار استرالیا ۷۹
شکل ۵-۱۰: پیش‌بینی ساعتی قیمت ۱۴ اکتبر سال ۲۰۱۲ بازار استرالیا ۸۰
شکل ۵-۱۱: پیش‌بینی ساعتی بار ۱۴ اکتبر سال ۲۰۱۲ بازار استرالیا ۸۰
شکل ۵-۱۲: اثر تولید بادی بر حساسیت قیمت ۸۴
شکل ۵-۱۳: مدل پیشنهادی جهت پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت با درنظر گرفتن نفوذ بالای تولید بادی در محیط حساس به قیمت شبکه‌های هوشمند ۸۵
شکل ۵-۱۴: فلوچارت خوشه‌بندی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری ۸۹
شکل ۵-۱۵: پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت برای ۱۱ ژانویه سال ۲۰۱۳ ۹۰

شکل ۵-۱۶: پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت برای ۹ فوریه سال ۲۰۱۳..... ۹۰
شکل ۵-۱۷: پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت برای ۷ مارس سال ۲۰۱۳..... ۹۰
شکل ۵-۱۸: پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت برای ۷ آوریل سال ۲۰۱۳..... ۹۰

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

در ساختار سنتی صنعت برق وظیفه تولید، انتقال و توزیع برق به عهده یک شرکت است و به نوعی برق در فضای انحصاری در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرد. در محیط تجدید ساختار یافته[۱]، برق به عنوان یک کالا در محیطی رقابتی بر پایه قراردادهای مختلف در بازارهای متفاوت مبادله می‌گردد. محیط رقابتی صنعت برق به همراه خود مسایل جدیدی را در بهره‌برداری و برنامه‌ریزی صنعت برق مطرح نموده است. آنچه حائز اهمیت است، این است که با معرفی تجدید ساختار در صنعت برق، قیمت الکتریسیته تمام فعالیت‌های بازار را تحت‌الشعاع خود قرار داده است. یکی از مسایلی که در هر دو ساختار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، پیش‌بینی بار[۲] سیستم در افق‌های مختلف زمانی می‌باشد، اما مسئله جدیدی که در محیط تجدید ساختار یافته مورد توجه قرار گرفته است و نقشی حیاتی برای تولیدکننده، مصرف‌کننده و بهره‌بردار مستقل سیستم (ISO)[۳] ایفا می‌کند، مسئله پیش‌بینی قیمت برق[۴] در افق‌های کوتاه مدت[۵] (چند روز)، میان مدت[۶] (چند ماه) و بلند مدت[۷] (چند سال) است. در سال‌های اخیر موضوع پیش‌بینی قیمت برق مورد توجه محققان بسیاری بوده است و تلاش‌های زیادی در این زمینه صورت گرفته است. با توجه به اینکه قیمت الکتریسیته دارای مشخصه متمایزی از سایر کالاهای تجاری است، پیش‌بینی آن دارای پیچیدگی زیادی است.

در بازار لحظه‌ای[۸] و در قراردادهای طولانی مدت، پیش‌بینی قیمت جهت تعیین استراتژی پیشنهاد قیمت[۹] موثر می‌باشد که منجر به بدست آوردن بالاترین سود ممکن و کم کردن ریسک ناشی از خیزش ناگهانی قیمت[۱۰] در کوتاه مدت و برنامه ریزی مناسب‌تر در طولانی مدت می‌گردد.

رفتار پیچیده سیگنال برق موجب شده است، در بازار برق، قیمت به عنوان مهم‌ترین عدم قطعیت محسوب شود و کلیه مسایل برنامه‌ریزی انرژی الکتریکی را تحت تأثیر خود قرار دهد. یکی از شروط اصلی برنامه‌ریزی مناسب در صنعت برق، داشتن الگویی مناسب جهت مدل کردن قیمت در بازه زمانی کوتاه مدت می‌باشد. بنابراین پیش‌بینی قیمت در این بازه زمانی دارای اهمیت ویژه در بازار برق محسوب می‌شود و به عنوان یکی از ورودی‌های مهم جهت فعالیت‌هایی مانند: تنظیم استراتژی‌های کوتاه مدت،

---

[1] Restructuring
[2] Load Forecasting
[3] Independent System Operator
[4] Electricity Price Forecasting
[5] Short Term
[6] Mid - Term
[7] Long Term
[8] Spot Market
[9] Bidding
[10] Spike

برنامه‌ریزی‌های کوتاه مدت و تعمیرات زمان‌بندی شده و... می‌باشد و بازیگرانی در بازار برق موفق می‌باشند که ابزاری مناسب‌تر جهت حل این مسئله در اختیار داشته باشند.

از طرف دیگر، با ظهور شبکه‌های هوشمند، تمامی شرکت‌کنندگان، با سطوح مختلف بار، قادر به بهره‌برداری از شبکه می‌باشند. با پیشرفت ابزارهای اندازه‌گیری در این شبکه‌ها، حرکت به سوی قیمت‌گذاری پویا و تعرفه‌های غیر ثابت الکتریسیته آسان می‌گردد. در این محیط پیش‌بینی ساعتی قیمت و بار الکتریکی از طریق دستگاه‌های اندازه‌گیری به سمت مصرف‌کنندگان بازار عمده و خرده فروشی ابلاغ می‌گردد. بنابراین مشترکان به دلیل بهینه کردن مسائل اقتصادی، زیست محیطی و افزایش قابلیت اطمینان، می‌توانند مصرف خود را مدیریت کنند و قادرند، الگوی مصرف خود را براساس قیمت‌ها تغییر دهند. بنابراین ممکن است قیمت‌ها با قیمت پیش بینی شده‌ی اولیه متفاوت باشد.

۱-۲- تاریخچه

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه‌ی مدل‌ها و نیز استفاده از اطلاعات تأثیرگذار بر مدل‌های پیش‌بینی قیمت انجام شده است. برخی از مدل‌های پیش‌بینی توسط سری‌های زمانی ارائه شده است. این سری‌های زمانی شامل مدل‌های دینامیکی رگرسیونی هستند [۱]؛ مانند: مدل‌های تابع انتقال[1] [۲]، ARIMA[2] و GARCH[3] [۳]. مدل‌های ذکرشده پارامتری هستند که قیمت آینده را به عنوان یک تابع از قیمت‌های گذشته بیان می‌کنند. برخی از مدل‌های پیش‌بینی ماشین یادگیری، مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی [۴] و سیستم‌های استنتاج فازی [۵] نیز در پیش‌بینی استفاده می‌گردند. این مدل‌ها از الگوریتم‌های محاسباتی برای پیش‌بینی قیمت آینده استفاده می‌کنند. اما مدل‌های تک مرحله‌ای ممکن است قادر به نمایش صورت‌های مختلف یک سری زمانی نباشند. از این‌رو ایده‌ی به‌کارگیری مدل‌های هایبردی چند مرحله‌ای در کاربردهای متنوع شامل پیش‌بینی قیمت و بار مطرح شده است [۶]. هدف پیش‌بینی هایبردی چند مرحله‌ای ترکیب مدل‌های مختلف جهت بهبود دقت نهایی پیش‌بینی است.

۱-۳- هدف از تدوین پایان‌نامه

پیش‌بینی دقیق سیگنال پیچیده قیمت الکتریسیته، تنها با درک صحیح از عوامل موثر بر قیمت و به‌کارگیری مدل کامل و کارآمد، حاصل می‌گردد. اما به هر حال، باید در نظر داشت، به خاطر عدم‌قطعیت‌های متنوع موجود (مانند تغییرات آب و هوا، تغییرات قیمت سوخت، شاخص‌های اقتصادی و حتی سیاست‌های کلی) پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت برق کاری دشوار است. ظهور شبکه‌های هوشمند الکتریکی و استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری و ارسال اطلاعات و قیمت شبکه، باعث گشته ارتباطی دوسویه بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان ایجاد گردد. بنابراین مشترکان بسته به سلیقه خود قادر به واکنش

[1] Transfer Function Models
[2] Auto Regressive Integrated Moving Average
[3] Generalized Auto Regressive Conditional Heteroskedastic

نسبت به قیمت‌های اعلام شده، می‌باشند. استفاده از ابزارهای ذخیره‌ساز و تولیدات پراکنده، می‌تواند نقش مصرف‌کنندگان شبکه را به تولیدکننده تبدیل کند.

در این تحقیق، پیش‌بینی کوتاه مدت سیگنال پیچیده قیمت در محیط تجدید ساختار یافته و همچنین در محیط حساس به قیمت شبکه‌های هوشمند مد نظر بوده است.

۱-۴- نوآوری تحقیق

در مقالات پیشین در ادبیات پیش‌بینی قیمت الکتریسیته، فرض بر آن بود که الگوهای مصرف سمت مشترکان، براساس قیمت پیش‌بینی شده، تغییرات اساسی ندارند و بنابراین قیمت‌های پیش‌بینی شده در برابر واکنش‌های مشترکان مصون می‌ماند. انتظار می‌رود، در فضای حساس به قیمت شبکه‌های هوشمند، مشترکان سمت تقاضا، الگوی مصرف خود را براساس پیش‌بینی قیمت‌ها تغییر دهند. بنابراین در این پایان‌نامه، با درنظر گرفتن واکنش متفاوت مشترکان شبکه به قیمت‌ها و ارائه چندین مدل کارآمد، پیش‌بینی کوتاه‌مدت قیمت در بازارهای مختلف برق، انجام گرفته است. همچنین در این تحقیق، نتایج حاصل از پیش‌بینی قیمت با استفاده از مدل‌های هایبردی و الگوریتم‌های بهینه‌ساز، بهبودیافته است.

۱-۵- ساختار تحقیق

به دلیل آنکه شرط اول پیش‌بینی، شناسایی کامل عامل مورد نظر می‌باشد، در فصل دوم این پایان‌نامه در ابتدا به بررسی کامل رفتار سیگنال قیمت برق در کوتاه مدت پرداخته شده است. سپس عوامل اثرگذار بر قیمت در این بازه زمانی شرح داده شده است. انواع روش‌های پیش‌بینی قیمت، در فصل سوم مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم، دو مدل پیشنهادی جهت پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت در بازارهای برق مختلف ارائه شده است. ظهور شبکه‌های هوشمند و تفاوت‌های روش‌های پیش‌بینی قیمت در این محیط، باعث گشته است، فصل پنجم به پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت در محیط حساس به قیمت شبکه‌های هوشمند اختصاص یابد؛ در این فصل همچنین به ارائه دو مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود و نهایتاً پایان‌نامه با نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها در فصل ششم خاتمه می‌یابد.

فصل ۲– کلیات و مفاهیم

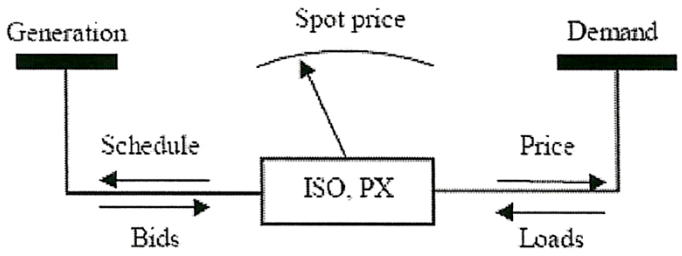
۲–۱– مقدمه

هنگامی که تجدید ساختار در صنعت برق رخ داد، سیگنال قیمت به یک سیگنال حیاتی برای کلیه بازیگران بازار بدل شد و بررسی رفتار آن مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفت. به دلیل مشکلات خاصی که در نحوه انتقال انرژی الکتریکی وجود دارد، انواع مفاهیم قیمت‌گذاری در بازار برق به وجود آمد که هر کدام کاربرد ویژه خود را دارد.

در این فصل پس از اشاره مختصری به نحوه قیمت‌گذاری الکتریسیته در بازار برق، تفاوت سیگنال قیمت با سایر کالاها، بررسی نحوه رفتار سری زمانی قیمت در کوتاه مدت و عوامل اثر گذار بر آن، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲–۲– قیمت گذاری در بازار برق

برای آشنایی با ساختار بازار برق، شکل ۲-۱ بررسی می‌گردد. ژنراتورها و بارها، قیمت‌های مد نظر خود را پیشنهاد می‌دهند و ISO یا بورس برق (PX)[1]، قیمت لحظه‌ای بازار را براساس آخرین واحد تولیدی که وارد مدار می‌شود، تنظیم می‌کند تا تعادل بین تولید و تقاضا برقرار گردد. اگر تقاضا بیش از توان تولیدی باشد، قیمت لحظه‌ای افزایش می‌یابد و برعکس اگر توان پیشنهادی بیشتر از تقاضا باشد، قیمت لحظه‌ای کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۱: تعیین قیمت لحظه‌ای در بازار برق

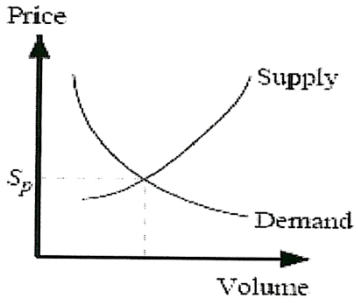
در بازار برق، آنچه حائز اهمیت است، قیمت الکتریسیته به مهم‌ترین سیگنال برای تمام بازیگران بازار مبدل شده است. اساسی‌ترین مفهوم قیمت‌گذاری در بازار قیمت تسویه حساب (MCP)[2] می‌باشد. به طور کلی هنگامی که پر شدگی[3] خط انتقال وجود ندارد، MCP تنها قیمتی است که برای کل سیستم تعریف

[1] Power Exchange
[2] Market Clearing Price
[3] Congestion

می‌گردد. هنگامی که پر شدگی وجود دارد، قیمت تسویه حساب گره‌ای (ZMCP)[1] یا قیمت حدی محلی (LMP)[2]، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۲-۱- MCP

پس بعد از این که بازیگران بازار قیمت‌های خود را پیشنهاد دادند، ISO منحنی تجمعی پیشنهادهای قیمت طرف تولید و منحنی تجمعی پیشنهادی قیمت طرف تقاضا را با یکدیگر برخورد می‌دهد و محل تقاطع این دو منحنی مطابق شکل ۲-۲ همان MCP است.



شکل ۲-۲: تعیین MCP

۲-۲-۲- ZMCP

اگر در یک دوره زمانی خاص، ISO با پرشدگی در یک خط انتقال مواجه شود، جهت رفع این مشکل تنظیمات گره‌ای قیمت را در نظر می‌گیرد و برای نواحی دو طرف خط MCP های جداگانه در نظر می‌گیرد که به ZMCP معروف است.

۲-۲-۳- LMP

به هزینه تولید یک مگاوات انرژی الکتریکی دیگر در یک باس، LMP گویند. LMP در حقیقت مجموع هزینه حدی تولید، هزینه پرشدگی خط انتقال و هزینه تلفات می‌باشد. هنگامی که پرشدگی در انتقال وجود ندارد، همانند MCP است. وقتی پرشدگی خط مطرح می‌گردد، پخش بار بهینه (OPF)[3] تمام قیود خطوط انتقال را جهت برقراری تعادل بین تولید و تقاضا در هر باس در نظر می‌گیرد. هزینه نهایی هر باس همان LMP است.

در اکثر کارهای انجام شده جهت مدل کردن قیمت برق از MCP یا LMP استفاده شده است. در این پایان‌نامه نیز به این دو مدل قیمت، خصوصاً MCP بها داده شده است.

۲-۳- روش‌های پرداخت در بازار برق

با توجه به خواص ذاتی برق امکان ایجاد یک بازار رقابت کامل برای این کالا وجود ندارد. دو رویکرد متفاوت در بازار برق وجود دارد که در یکی تبادل برق از طریق بورس برق اختیاری (مانند بازار نیوزیلند) و

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

در دیگری بورس برق اجباری (انگلستان و استرالیا) صورت می‌گیرد. مزیت رویکرد بازار اجباری ایجاد شفافیت در بازار است که جهت محدود کردن قدرت بازار تولیدکنندگان بزرگ صورت می‌گیرد.

روش‌های خرید و فروش در بازار برق عبارتند از: بورس برق، معاملات دو جانبه و معاملات چند جانبه. در روش بورس برق تمام فروشندگان و خریداران موظفند در بازار که به شکل یک نهاد غیر انتفاعی اداره می‌شود، حضور پیدا کنند و پیشنهادات خرید و فروش خود را به آن ارائه دهند. این نهاد، منحنی‌های عرضه و تقاضای تجمعی را با یکدیگر تلاقی می‌دهد و نقطه تسویه بازار را معین می‌نماید. همانند بورس‌های دیگر، حراج ممکن است یک‌طرفه و یا دوطرفه باشد. در حراج یک‌طرفه فروشندگان میزان تولید و قیمت (منحنی‌های عرضه) خود را ارائه می‌دهند ولی مصرف‌کنندگان تنها مقدار مورد نیاز خود را اعلام می‌کنند. در حراج دوطرفه، هم خریداران و هم فروشندگان به قیمت حساس هستند و میزان تولید و یا مصرف و قیمت مورد نظر خود را ارائه می‌نمایند. پرداخت‌ها در این مدل به دو صورت می‌تواند انجام گردد.

در روش اول که "پرداخت بر مبنای پیشنهاد[1] " نامیده می‌شود، پرداخت به برنده بر مبنای پیشنهادی که ارائه کرده است و برنده شده است، صورت می‌گیرد. در این حالت بی‌ثباتی و متغیر بودن قیمت که ناشی از خطا در پیش‌بینی مصرف است، کمتر از روش قیمت ثابت است.

روش دوم که " پرداخت بر مبنای قیمت تسویه بازار" خوانده می‌شود، تنها یک قیمت در بازار تعیین می‌شود و تمام برندگان همان قیمت را دریافت می‌کنند. این پیشنهادها از کمترین قیمت به بیشترین قیمت مرتب می‌شود و برق از واحدهایی که دارای کمترین قیمت‌ها هستند، خریداری می‌گردد. این عمل تا جایی که عرضه و تقاضا برابر شوند، ادامه می‌یابد. قیمت یکسانی که بابت هر کیلو وات ساعت به فروشندگان پرداخت می‌شود، قیمت آخرین پیشنهاد پذیرفته شده یا اولین پیشنهاد رد شده می‌باشد. در حالتی که فقط تولیدکنندگان یا فروشندگان قیمت را پیشنهاد می‌کنند، تلاقی نیاز مصرف با منحنی فروشنده، نقطه تسویه بازار را تعیین می‌کند و فروشندگانی که قیمت پیشنهادی آن‌ها بالاتر از این میزان باشد، رد می‌گردد. در صورتی که اگر پیشنهاد خریدار را نیز داشته باشیم، نقطه تلاقی منحنی فروشنده و خریدار، نقطه تسویه بازار را تعیین می‌کند. فروشندگانی که قیمت بالاتر و خریدارانی که قیمت پایین‌تری پیشنهاد داده‌اند، در این رقابت انتخاب نخواهند شد.

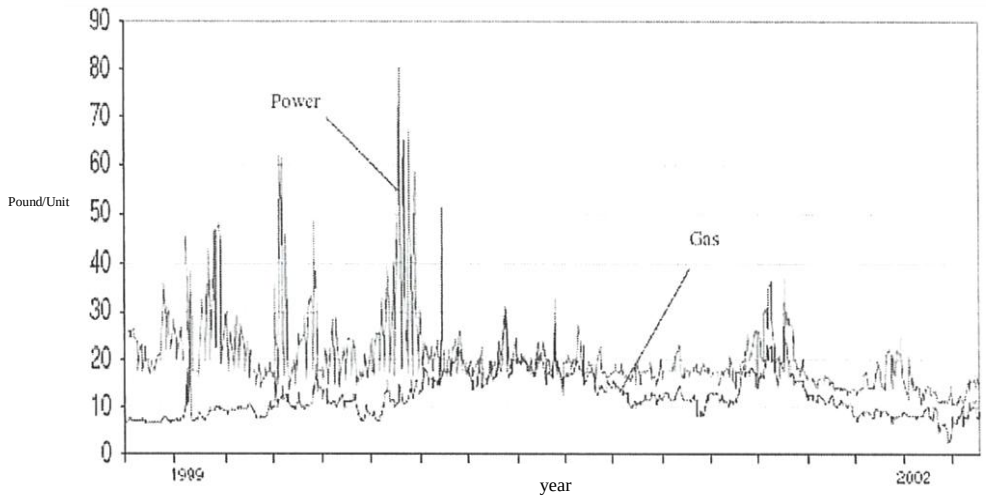
در روش معامله دو جانبه، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به صورت مستقل و تحت ضوابط بهره بردار مستقل سیستم عمل می‌کنند. در این حالت میزان انرژی مبادله شده به منظور رعایت محدودیت‌های سیستم انتقال باید با هماهنگی بهره‌بردار مستقل سیستم صورت گیرد. در این روش چون مصرف‌کنندگان ارزان‌ترین تولیدکنندگان را انتخاب می‌کنند، کارایی بازار بهبود می‌یابد؛ اما محدودیت‌های شبکه‌ی انتقال ممکن است استفاده از این روش را دشوار سازد. روش معاملات چند جانبه، تعمیم مبادلات دو جانبه است. در این دو روش، در صورت نقض محدودیت‌های شبکه انتقال، جریمه‌هایی به تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان تعلق می‌گیرد.

[1] Pay As Bid

۲-۴- رفتار و خواص سیگنال قیمت برق

بازار برق بر مبنای مفهوم انرژی الکتریکی به عنوان یک کالا و جداسازی آن از سیستم انتقال و توزیع به عنوان خدمات ارتباطی طراحی شده است. در ابتدا لازم است به اختصار به این موضوع پرداخته شود که چرا رفتار و خواص سیگنال برق کاملاً متفاوت از قیمت سایر کالاهای تجاری است. از دید بازار کالا، قیمت عمده‌فروشی برق نتیجه فعالیت سرمایه‌گذارانی است که تحت قراردادهای مختلف از یک سوخت اولیه مانند گاز، نفت و یا زغال‌سنگ انرژی الکتریسیته تولید می‌کنند. اگرچه بخشی از انرژی الکتریکی توسط نیروگاه‌های آبی تولید می‌شود، اما قسمت اعظم تولید الکتریسیته در اثر یک تبدیل گرمایشی از سوخت‌های فسیلی مثل گاز و نفت تولید می‌شود. بنابراین قیمت سوخت‌های فسیلی معمولاً بیشترین اثر را روی قیمت برق دارند. بسته به نوع و دوره تکنولوژی استفاده شده در نیروگاه، به طور متوسط در حدود نیمی از انرژی سوخت اولیه به الکتریسیته تبدیل می‌شود. بنابراین با توجه به قیمت سوخت و راندمان کاری نیروگاه، می‌توان تخمینی از هزینه نهایی نیروگاه در کوتاه مدت بدست آورد. برای مثال سوخت گاز در نظر گرفته شده است که شناخته‌شده‌ترین و ارزان‌ترین انتخاب برای تولید الکتریسیته است.

شکل ۲-۳ نمودارهای متوسط روزانه دو سیگنال قیمت برق و گاز را برای بازار انگلستان نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: نمودارهای متوسط روزانه دو سیگنال قیمت برق و گاز در بازار انگلستان

طبیعی است که باید همگرایی بین این دو سیگنال وجود داشته باشد که در شکل مشاهده می‌گردد. اما همان‌طور که دیده می‌شود، این رابطه نسبتاً نامنظم می‌باشد. اولین دلیلی که به ذهن می‌رسد، این است که تا آنجایی که به بازار انگلستان مربوط می‌شود، گاز تنها یکی از سوخت‌های مورد استفاده جهت تولید الکتریسیته است. از اواسط دهه ۹۰ دولت شروع به جانشین کردن گاز به عنوان سوخت اولیه و غالب جهت تولید الکتریسیته به جای زغال‌سنگ کرد که این مسئله کاملاً در شکل قابل مشاهده است [۷]. اما این تنها قسمت کوچکی از داستان است. خواص پایه سیگنال برق به کلی متفاوت از خصوصیات گاز و یا سایر کالاها می‌باشد. به عنوان یک سری زمانی، قیمت برق شدیداً جهشی، دارای نوسانات سریع

زیاد[1] و الگوی میانگین بازگشتی[2] قوی می‌باشد. این خواص در تمام بازارهای برق دنیا مشاهده می‌گردد. این موضوع در بازار لحظه‌ای برق، به دلیل طبیعت آنی تولید است.

قوانین فیزیکی که برای انتقال توان در شبکه انتقال حکم‌فرماست ایجاب می‌کند، بین توزیع توان و مصرف آن تعادل برقرار باشد و تولید و مصرف بدون هیچ‌گونه قابلیت ذخیره شدن برای تولید، باید همزمان باشند. اگر حتی برای مدت زمانی کوتاهی این تعادل بهم بخورد، نوسانات فرکانس و ولتاژ به‌وجود می‌آید. علاوه بر آن مصرف‌کنندگان انتهایی به عنوان یک سرویس از برق استفاده می‌کنند، یعنی هنگامی که یک مصرف‌کننده خانگی لامپی را روشن می‌کند، وی قراردادی مجدد با تولیدکننده جهت این مصرف اضافی نمی‌بندد. بنابراین الکتریسیته به عنوان یک کالا تولید می‌شود، ولی به عنوان یک سرویس مصرف می‌شود. با توجه به موارد ذکر شده در هر زمان برای جبران نوسانات بار، انواع نیروگاه‌های مختلف با پیشنهادهای قیمت متفاوت وارد مدار می‌شوند. این تنوع نیروگاه‌ها دارای دو منشأ متفاوت است.

نخست آنکه نیروگاه‌ها با تکنولوژی‌های متفاوت و با راندمان‌های متفاوت وارد مدار می‌شوند. بنابراین نوسان قیمت ایجاد می‌گردد. آنی بودن تولید و تعادل لحظه‌ای تولید و مصرف، سبب ورود نیروگاه‌هایی با نرخ بارگیری سریع به مدار می‌شود. به سخن دیگر، در پیک بار، نیروگاه‌هایی که کمتر در مدار هستند وارد مدار می‌شوند و برای جبران هزینه نهائی‌شان با توجه به این که زمان کمی از سال در مدار هستند، قیمت بالایی پیشنهاد می‌دهند. بنابراین در پیک بار، ممکن است قیمت رفتاری جهشی نشان دهد.

علت اثرگذار دیگر روی قیمت برق، خرابی نیروگاه‌ها است که می‌تواند باعث شود، نیروگاه‌های گران‌تر وارد مدار شوند و قیمت بالایی پیشنهاد دهند.

عامل دیگر، قدرت بازار برخی از تولیدکنندگان است؛ چون در اکثر بازارها قیمت توسط چند قطب بزرگ تولیدی دیکته می‌شود. لذا این تولیدکنندگان در زمان‌های خاص می‌توانند بر روی قیمت برق اثر مستقیمی گذارند. بنابراین با توجه به عوامل ذکر شده سیگنال قیمت برق دارای نوسانات زیاد، میانگین و واریانس متغیر و رفتار آشوبگرانه و تصادفی می‌باشد.

۲-۵- لزوم پیش‌بینی قیمت در کوتاه مدت

رفتار پیچیده سیگنال قیمت برق موجب گشته است، در بازار برق، قیمت برق به عنوان مهم‌ترین عدم قطعیت محسوب شود و کلیه مسایل برنامه‌ریزی انرژی الکتریکی را تحت تأثیر خود قرار دهد. یکی از شروط اصلی برنامه‌ریزی مناسب در صنعت برق داشتن الگویی مناسب جهت مدل کردن قیمت برق در بازه زمانی کوتاه‌مدت می‌باشد. بنابراین پیش‌بینی قیمت برق در این بازه زمانی دارای اهمیت ویژه در بازار برق و به عنوان یکی از ورودی‌های مهم جهت فعالیت‌هایی مانند تنظیم استراتژی‌های کوتاه‌مدت، برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و تعمیرات زمان‌بندی شده و... می‌باشد و بازیگرانی در بازار برق موفق می‌باشند که ابزاری مناسب‌تر جهت این مسئله در اختیار داشته باشند.

[1] Volatility
[2] Mean Reversion