١١٠٨٧٤

۸۷/۱/۰۹۹۳۲
۸۸/۱/۱۲

دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی برق

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی برق–کنترل

پیش بینی قیمت برق با استفاده از روش شبکه موجک خطی

استاد راهنما :

دکتر علی اکبر قره ویسی

مؤلف :

محمد حسن فارسی نژاد

۱۳۸۷ /۱۲/ ۲۷

شهریور ماه ۱۳۸۷

۱۱۰۸۷۳

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه مهندسی برق

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو : **محمد حسن فارسی نژاد**

استاد راهنما : **دکتر علی اکبر قره ویسی**

داور ۱ : **دکتر مسعود رشیدی نژاد**

داور ۲ : **دکتر احمد حکیمی**

داور ۳ :

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی یا نماینده دانشکده : **دکتر احمد حکیمی**

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به پدر و مادرم

تقدیم به همسر و دخترم

تقدیم به همه خوبان

تشکر و قدر دانی

خواستن چه زیباست وقتی به توانستن می انجامد، توانستن چه پر شکوه است آنگاه کـه انسـان را بـر قلـه خواستن می نشاند. آنچه که بر زیبایی و شکوه ایـن هـر دو مـی افزایـد قدرشناسـی از زحمـات بـی دریـغ راهنمایان این طریقت است که بدون ایشان البته که پیمودن این راه بسیار دشوار و غیر ممکن می نمود.

پایان نامه حاضر، مرهون راهنمایی های سخاوتمندانه جناب آقای دکتر قره ویسی اسـت. بـا کمـال افتخـار بسیار خشنودم که توانستم از محضر ایشان استفاده نموده و از زحمات بی دریغ این استاد ارجمند از ابتـدا تا اتمام این پژوهش نهایت سپاس را دارم .

از اساتید محترم جناب آقای دکتر رشیدی نژاد و جناب آقای دکتر حکیمی که قبول زحمت کرده و داوری این کار را بر عهده گرفتند تشکر می نمایم.

محمد حسن فارسی نژاد

شهریور ۱۳۸۷

چکیده

یکی از مسائل مهم در مواجهه با انواع معاملات در بازارهای برق پیش بینی دقیق قیمت آینده است. آنچه که انجام یک پیش بینی دقیق را دچار مشکل می کند خواص ویژه و غیر خطی سیگنال قیمت از جمله فرکانس بالا، عدم ثبات، آن است. لزوم استفاده از داده های تاریخی قیمت جهت پیش بینی، نیاز به روشی برای دسته بندی داده ها با توجه به همبستگی آنها را ایجاب می کند. اخیراً روشهای هوشمند بدلیل سادگی، عدم نیاز به مدل ریاضی دقیق و محاسبات کم جایگزین خوبی برای سایر روشها به شمار می آیند. از آنجا که این روشها نیاز به آموزش دارند و داده های آموزش تأثیر بسزایی بر عملکرد سیستم آموزش دارد، دسته بندی دقیق داده ها می تواند دقت پیش بینی را به شدت افزایش دهد. از سوی دیگر ارتباط بین داده های تاریخی قیمت دارای دو جمله خطی و غیر خطی است لذا بهتر است در پیش بینی هر دو جمله لحاظ شود. بدین منظور در این پایان نامه از شبکه موجک خطی استفاده شده که علاوه بر قابلیت شبیه سازی سیگنالهای غیر خطی با فرکانس بالا، ارتباط خطی بین داده های ورودی و خروجی شبکه نیز در آن لحاظ شده است. برای افزایش دقت پیش بینی و افزایش سرعت آموزش نیاز به روشی برای دسته بندی داده های آموزش وجود دارد که به این منظور از روش همبستگی پیرسون جهت انتخاب داده های آموزش استفاده شده است. یکی از مسائلی که پیش بینی سیگنال قیمت را با مشکل مواجه می کند وجود داده های پرت است. به منظور افزایش دقت پیش بینی لازم است داده های پرت در زمان آموزش و پیش بینی حذف گردند. در این پایان نامه از نرم کننده گوسی به منظور حذف داده های پرت استفاده شده است.

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه

فصل اول : مقدمه

۱-۱- نگاهی اجمالی به بازار برق تجدید ساختار یافته.....۲

۱-۲- پیش بینی قیمت.....۳

۱-۲-۱- روشهای پیش بینی و مروری بر چند مقاله.....۴

فصل دوم : مفاهیم بازار برق ، اصول پیش بینی قیمت برق و مسائل قیمت گذاری

۲-۱- ساختار و بهره برداری بازار ۱۲

۲-۱-۱- اهداف بهره برداری بازار.....۱۲

۲-۱-۲- مدلهای بازار برق.....۱۲

۲-۱-۳- عناصر کلیدی بازار ۱۴

۲-۱-۴- عناصر دیگر بازار.....۱۷

۲-۲- انواع بازار برق و اصول قیمت گذاری در آنها.....۱۹

۲-۲-۱- بازارهای انرژی، خدمات جانبی و انتقال.....۱۹

۲-۲-۲- بازارهای پیشرو و زمان حقیقی.....۲۳

۲-۳- قدرت بازار.....۲۴

۲-۴- عناصر کلیدی در بهره برداری بازار.....۲۵

۲-۵- اصول قیمت برق.....۲۶

۲-۵-۱- بی ثباتی قیمت برق.....۲۸

۲-۵-۲- دسته بندی پیش بینی قیمت.....۳۰

فصل سوم : مروری بر شبکه های موجک و عصبی

۳-۱- شبکه موجک خطی.....۳۳

۳-۱-۱- تبدیل فوریه پیوسته و تبدیل فوریه قطعه ای(زمان – کوتاه) ۳۴
۳-۱-۲- تئوری موجک..... ۳۸
۳-۱-۲-۱- تاریخچه کوتاه ۳۸
۳-۱-۲-۲- تبدیل موجک..... ۳۹
۳-۱-۲-۳- یک خانواده از موجک ها..... ۳۹
۳-۱-۲-۴- تبدیل موجک پیوسته ۴۲
۳-۱-۲-۵- تبدیل موجک گسسته ۴۳
۳-۱-۲-۶- تبدیل موجک اورتونرمال وآنالیز چند رزولوشنی..... ۴۶
۳-۱-۲-۷- خواص موجک ها ۴۷
۳-۱-۲-۸- انواع مختلف موجک ها..... ۵۰
۳-۱-۳- شبکه های موجک..... ۵۳
۳-۱-۳-۱- شبکه های موجک ضرب مستقیم..... ۵۳
۳-۱-۳-۲- تجزیه موجک و شبکه های موجک ضرب مستقیم ۵۴
۳-۱-۳-۳- شبکه های موجک رادیال ۵۸
۳-۱-۳-۴- استفاده از یک ترکیب خطی اضافی ۵۹
۳-۱-۳-۵- روشهای مقدار دهی اولیه..... ۵۹
۳-۱-۳-۶- شبکه های موجک رادیال با روش مقدار دهی اولیه انتخاب رگرسیون..... ۶۰
۳-۱-۳-۶-۱- ساختن کتابخانه موجک W..... ۶۱
۳-۱-۳-۶-۲- انتخاب بهترین رگرسورهای موجک..... ۶۳
۳-۱-۳-۶-۲-۱- الگوریتم 1 : انتخاب بر مبنای باقیمانده..... ۶۵
۳-۱-۳-۶-۲-۲- الگوریتم 2 : انتخاب به وسیله متعامد سازی..... ۶۸
۳-۱-۳-۶-۲-۳- الگوریتم 3 : حذف پس رو..... ۶۸
۳-۱-۳-۶-۳- ترکیب الگوریتم انتخاب رگرسورها و الگوریتم پس انتشار خطا..... ۷۰

۳-۱-۳-۶-۴- انتخاب تعداد موجک های لایه مخفی (ویولن ها) ۷۱

۳-۱-۴- خلاصه ۷۳

فصل ۴- پیش بینی قیمت برق توسط روش ترکیبی همبستگی پیرسون و شبکه های عصبی

۴-۱- مقدمه..... ۷۷

۴-۲- تحلیل همبستگی پیرسون ۷۷

۴-۳- شبکه های عصبی مصنوعی..... ۷۹

۴-۴- توصیف روش ۸۳

۴-۵- ارائه نتایج شبیه سازی..... ۸۴

فصل پنجم : پیش بینی قیمت برق با روش ترکیبی شبکه موجک خطی و همبستگی پیرسون

۵-۱- مقدمه..... ۸۸

۵-۲- توصیف روش..... ۸۹

۵-۳- ارائه نتایج..... ۹۰

فصل ششم : پیش بینی قیمت برق با روش شبکه موجک خطی و پسخورد خروجی

۶-۱- مقدمه..... ۹۷

۶-۲- توصیف روش..... ۹۷

۶-۳- ارائه نتایج..... ۹۹

فصل هفتم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱- مقدمه..... ۱۰۵

۷-۲- مقایسه نتایج حاصل از روشهای پیش بینی..... ۱۰۵

۷-۳- پیشنهادات..... ۱۰۹

مراجع

فصل اول

مقدمه

۱-۱- نگاهی اجمالی به بازار برق تجدید ساختار یافته

در سرتا سر جهان، صنعت برق که در دوره ای طولانی با شرکتهای یکپارچه با ساختار عمودی اداره شده است، دستخوش تغییرات شگرفی شده است. صنعت برق به صنعت رقابتی و توزیع شده ای در حال تبدیل است که در آن، قدرتهای بازار، تعیین کننده قیمت برق بوده و هزینه خالص ازطریق افزایش رقابت، کاهش می یابد.

تجدید ساختار، جداسازی سه بخش صنعت برق یعنی تولید، انتقال و توزیع را ایجاب می کند. در حقیقت جداسازی «مالکیت سیستم انتقال از کنترل انتقال»، بهترین کاربرد تعرفه «پیش فاکتوری[۱]» است. در صنعت تجدید ساختار شده، کنترل مستقل بهره برداری شبکه انتقال، بازار رقابتی را برای تولید و دسترسی مستقیم خرده فروشی، تسهیل می کند. با این وجود، استقلال در بهره برداری شبکه، بدون وجود هویت مستقلی مانند اپراتور مستقل سیستم[۲] (ISO) میسر نیست. لازم است که ISO از شرکت کنندگان منفرد بازار از جمله مالکان انتقال، تولید کنندگان، شرکتهای توزیع و مصرف کنندگان نهایی، مستقل باشد. به منظور عملکرد مطمئن سیستم قدرت، لازم است ISO، به عنوان اپراتور بازار، قواعد سالم و بی نقصی را در خصوص انرژی و بازار خدمات جانبی[۳] برقرار نموده، سیستم انتقال را به صورت منصفانه و بدون تبعیض اداره کرده، ابزار لازم را برای مقابله با مخاطرات بازار تسهیل بخشیده و به نحوی بازار را تحت نظارت قرار دهد که از استیلای قدرتها بر آن جلوگیری کند. برای نیل به مسئولیت های خود ISO باید مجهز به ابزار محاسباتی لازم برای نظارت بر بازار، طرحهای مربوط به حراج[۴] خدمات جانبی و مدیریت تراکم[۵] باشد.

با آغاز تجدید ساختار در صنعت برق، قیمت برق مورد توجه تمام فعالیت ها در بازار قرار گرفته است. بر اساس نوع خاص کاربرد ، پیش بینی قیمت به صورت کوتاه مدت ، میان مدت و بلند مدت قابل دسته بندی است. در

---

۱ - Pro forma Tariff
۲ - Independent System Operator
۳ - Ancillary Services
۴ - Auction
۵ - Congestion Management

این تحقیق توجه اصلی روی پیش بینی کوتاه مدت[۱] (STPF) در بازار برق تجدید ساختار شده می باشد.

۱-۲- پیش بینی قیمت

پیش بینی قیمت مدتهاست در دیگر بازار های کالا، همچون بازار بورس و بازار کالاهای کشاورزی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱]،[۲]،[۳]،[۴]،[۵]. در سالهای اخیر، برق مانند یک کالا مورد معامله قرار می گیرد، با این وجود برق دارای ویژگی های خاصی در مقایسه با دیگر کالاهاست. برای مثال، روشی اقتصادی برای ذخیره برق وجود ندارد و مراکز کنترل به دلیل تراکم انتقال ممکن است از مبادله آزادانه توان ممانعت به عمل آورند. بنابراین تغییرات قیمت برق می تواند بی ثباتی[۲] زیادی داشته باشد و بکارگیری روشهای رایج پیش بینی قیمت در دیگر بازارهای کالا، می تواند خطای بزرگی را در پیش بینی قیمت برق ایجاد کند[۶].

مهندسین برق، مدتهاست با پیش بینی بار آشنا هستند، با آغاز تجدید ساختار در صنعت برق مفاهیم جدیدی در پیش بینی قیمت وارد شده است [۷]،[۸]،[۹]،[۱۰]. برخی از روشهای یاد شده، یا در بکارگیری بسیار پیچیده هستند[۷] (به عنوان مثال: روش شبیه سازی) و یا بسیار ساده هستند و از صحت کافی برخوردار نیستند[۸] (به عنوان مثال: تحلیل سری های زمانی مدولار با بکار گیری منطق ابتکاری[۳]). از بین روشهای استفاده شده تا کنون روشهای هوشمند ابزاری ساده و قوی برای پیش بینی در سیستمهای عملی را مهیا می سازند. پرکاربردترین روشهای هوشمند تا کنون روش شبکه های عصبی مصنوعی[۴] ANN بوده است. با این وجود کماکان دقت پیش بینی مسئله مهمی است که انگیزه استفاده از سایر روشهای پیش بینی یا ترکیب روشهای موجود را ایجاب می کند[۶].

صحت پیش بینی یکی از مسائل مهمی است که به علت تعداد محدود عوامل فیزیکی لحاظ شده در پیش بینی قیمت بروز می کند. بدیهی است که عوامل فیزیکی می تواند در قیمت برق اثر بگذارد و این در حالی است که

---

۱ - Short-term Price Forecasting
۲ - Volatility
۳ - Heuristic logic
۴ - Artificial Neural Networks

برخی از عوامل دارای اثر بیشتری نسبت به بقیه عوامل می باشند. بنابراین باید عواملی انتخاب شوند که تأثیر قوی در پیش بینی قیمت، در کاربرد کوتاه مدت دارند. به منظور تعیین عوامل فیزیکی مؤثر در فرایند پیش بینی با استفاده از شبیه سازی مطالعات تحلیل حساسیت انجام می شود.

در خصوص ارزیابی صحت پیش بینی اندیسی که در محدوده وسیعی استفاده شده است، درصد خطای متوسط مطلق[۱] (MAPE) و جذر میانگین مجذور خطاها[۲] (RMSE) می باشد. با این وجود هم تغییر بودن داده های پیش بینی شده با مقادیر واقعی نیز از اهمیت بسزایی برخوردار است. برای تعیین نسبت تغییرات سیگنال پیش بینی شده با مقدار واقعی از اندیس دیگری بنام ضریب تعیین[۳] (R^2) استفاده شده است.

۱-۲-۱- روشهای پیش بینی و مروری بر چند مقاله

روشهایی که تا کنون برای پیش بینی قیمت برق مورد استفاده قرار گرفته است را می توان به دو دسته کلی زیر تقسیم کرد :

- روشهای کلاسیک (غیر هوشمند)
- روشهای هوشمند

روشهای کلاسیک : بدلیل اینکه داده های مرتبط با پیش بینی قیمتهای لحظه ای همچون قیمتهای گذشته و سطوح بار به شکل سری های زمانی هستند، استفاده از روشهای مبتنی بر تحلیل این سری ها مورد توجه قرار گرفته است. اگر چه در برخی موارد نتایج حاصل از آنها از اعتبار و دقت کافی برخوردار است، اما استفاده از این سری ها مستلزم ایجاد یک مدل یا تابع برای قیمت برق می باشد، که این یکی از مشکلات این روشهاست. برای تحلیل روشهای مبتنی بر سری های زمانی لازم است گامهای زیر انجام پذیرد :

---

۱ - Mean Absolute Percentage Error

۲ - Root Mean Squre Error

۳ - Determinant Coefficient

- **گام۰**- با معلوم فرض کردن برخی قضایا، فرضیه های مورد نیاز کلاسی از مدل فرمول بندی می شود.
- **گام ۱**- یک مدل برای بدست آوردن داده ها مشخص می شود.
- **گام ۲**- پارامترهای مدل تخمین زده می شوند.
- **گام ۳**- اگر فرضیه های مدل معتبر و قابل استفاده باشند، به گام ۴ برو، در غیر این صورت به گام ۱ برگرد و مدل را تصحیح کن.
- **گام ۴**- مدل برای پیش بینی آماده است.

روشهای ARIMA [۱] ، تابع انتقال و رگرسیون دینامیک، از جمله روشهای کلاسیک بکار رفته برای پیش بینی قیمت برق هستند. برای مطالعه بیشتر می توانید به مراجع [۱۱] تا [۱۸] مراجعه نمایید. در زیر به چندین مقاله که از این روشها برای پیش بینی قیمت برق استفاده کرده اند مختصر اشاره ای می گردد.

مدلهای ARIMA برای پیش بینی قیمت کالاهایی [۱۹]،[۲۰] از قبیل نفت [۲۱] یا گاز طبیعی [۲۲] مورد استفاده قرار گرفته است. در سیستمهای قدرت از تکنیکهای ARIMA برای پیش بینی بار [۲۳]،[۲۴] استفاده شده که نتایج خوبی نیز در بر داشته است. این روش برای پیش بینی قیمت برق نیز بکار رفته است [۱۱]،[۱۲]،[۱۸].

در [۱۱]، (۲۰۰۳) دو مدل ARIMA برای بازار برق اسپانیا و کالیفرنیا ارائه شده است که مدل بدست آمده برای بازار اسپانیا در رابطه ۱-۱ ارائه شده است:

$$(1-\phi_1 B^1-\phi_2 B^2-\phi_3 B^3-\phi_4 B^4-\phi_5 B^5)(1-\phi_{23} B^{23}-\phi_{24} B^{24}-\phi_{47} B^{47} -\phi_{48} B^{48}-\phi_{72} B^{72}-\phi_{96} B^{96}-\phi_{120} B^{120}-\phi_{144} B^{144})(1-\phi_{168} B^{168}-\phi_{336} B^{336} -\phi_{504} B^{504})\log p_t = c+(1-\theta_1 B^1-\theta_2 B^2)(1-\theta_{24} B^{24})(1-\theta_{168} B^{168}- \theta_{336} B^{336}-\theta_{504} B^{504})\varepsilon_t \quad (۱-۱)$$

[۱] - Auto Regressive Integrate Moving Average

در رابطه فوق $B : B^l p_t = p_{t-1}$ اپراتور شیفت به عقب ، θ_i و ϕ_i ضرایب ثابتی هستند که در گام دوم تخمین زده شده اند. مدل کالیفرنیا بر خلاف مدل اسپانیا برای پیش بینی قیمت بجای قیمتهای پنج ساعت قبل تنها به قیمتهای دو ساعت قبل نیاز دارد که شاید دلیل آن اختلاف بین ساختار بازار و مالکیت در این دو بازار است. برای مقایسه نتایج از سه معیار میانگین خطای هفتگی، انحراف استاندارد و جذر میانگین مجذور خطاها استفاده شده است. در نهایت از متغیرهای توضیحی ۱-مصرف برق و ۲-تولید واحدهای آبی در دسترس روزانه نیز برای پیش بینی استفاده شده است. میانگین خطای بدست آمده برای بازار اسپانیا با و بدون متغیرهای توضیحی ۱۰ درصد و برای بازار کالیفرنیا با متغیرهای توضیحی حدود ۵ درصد محاسبه شده است (حدود ۱۱ درصد بدون متغیرهای توضیحی).

در مقاله ای در سال ۲۰۰۵ از روش Wavelet-ARIMA برای پیش بینی بازار برق اسپانیا استفاده شد [۱۲]. یکی از مشکلات پیش بینی سری های زمانی قیمت برق ثابت نبودن واریانس و میانگین سیگنال و وجود داده های پرت در این سیگنال است. تبدیل موجک، سری قیمت را به مجموعه ای از سری های ترکیبی (نوعاً سه تا شش سری) تبدیل می کند. این سری ها رفتار بهتری (واریانس پایدارتر و بدون داده های پرت) نسبت به سری اصلی از خود نشان می دهند، بنابراین با دقت بیشتری قابل پیش بینی هستند.

مراحل پیش بینی قیمت با استفاده از این روش در سه مرحله به صورت زیر انجام می شود:

مرحله ۱- با تبدیل موجک، سری های تاریخی قیمت در دسترس (تا ساعت ۲۴ روز d-۱) به مجموعه ای از سری های ترکیبی، تجزیه می شوند.

مرحله ۲- با استفاده از مدلهای ARIMA مخصوص هر کدام از سری های ترکیبی، مقادیر ۲۴ ساعت روز d برای هر کدام از سری ها پیش بینی می شود.

مرحله ۳- با تبدیل معکوس موجک قیمت های ساعتی روز d با استفاده از مقادیر پیش بینی شده سری های ترکیبی تخمین زده شده برای این روز، پیش بینی می شوند.

این روش برای پیش بینی قیمت برق چهار هفته انتخابی سال ۲۰۰۲ استفاده و نتایج حاصل از آن در مقایسه با روشهای ARIME و Naïve از خطای کمتری برخوردار بوده است.

در مقاله ای دیگر در سال ۲۰۰۵ از روش GARCH[۱]، برای پیش بینی قیمت برق بازارهای اسپانیا و کالیفرنیا استفاده شده است. برای بررسی امکان همبستگی سری در داده های پرت، کلاسی از مدلهای ARCH[۲] توسط Engle تولید شد [۲۵]. یک مدل توسعه یافته ARCH که توسط Bollerslev پیشنهاد گردید GARCH نام دارد [۲۶]. Reinaldo و Javier نشان دادند نتایج حاصل از روش GARCH برای پیش بینی قیمت برق مطلوبتر از روش ARIMA است، به خصوص وقتی از داده های بار مصرفی نیز برای مدل GARCH استفاده شود نتایج بهبود می یابد [۱۷].

روشهای هوشمند: در این روشها بر خلاف روشهای کلاسیک نیازی به استخراج یک مدل ریاضی برای پیش بینی قیمت نیست لذا پیچیدگی های استخراج فرمولهای ریاضی برای مدل را به همراه ندارند، همچنین قابلیت بروز رسانی روشهای هوشمند نیز برتری دیگری است که این روشها را از روشهای کلاسیک متمایز می کند. از پرکاربردترین روشهای هوشمند که تا کنون برای پیش بینی در سطوح مختلف مورد استفاده قرار گرفته است روش شبکه های عصبی مصنوعی یا ترکیب این روش با سایر روشهای پردازش داده ها است. به طور کلی می توان طراحی یک سیستم هوشمند مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی برای پیش بینی را به چهار مرحله زیر تقسیم نمود:

۱. پیش پردازش داده ها
۲. طراحی شبکه
۳. پیاده سازی
۴. تأیید شبکه

---

[۱] - Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedastic

[۲] - Autoregressive Conditional Heteroscedastic

البته این دسته بندی با توجه به تداخل بین مراحل بالا نمی تواند چندان دقیق باشد. تا کنون مقالات زیادی در زمینه پیش بینی بر اساس روشهای هوشمند نوشته شده است که خواننده می تواند به مراجع [۲۷] تا [۳۵] مراجعه کند. برای نمونه در اینجا چند مقاله که در این زمینه کار شده است مرور می گردد :

در مرجع [۲۷] (۲۰۰۶)، از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی قیمت برق بازار EEX[۱] استفاده شده است. بهترین ساختاری که برای شبکه عصبی در این مقاله استفاده شده است {۵:۷:۱} است که نتایج پیش بینی بلند مدت و کوتاه مدت حاصل از شبکه عصبی ارائه شده با روش مدلهای رگرسیون اتوماتیک[۲] مقایسه گردیده است. برای ارزیابی نتایج از معیارهای RMSE، MAE، و MAPE استفاده شده است که نتایج حاصل حاکی از برتری روش شبکه های عصبی مصنوعی بر روش رگرسیون اتوماتیک است.

در مقاله ای، (۲۰۰۶) سعی شده است از ماکزیمم قابلیت های NN برای پیش بینی مقادیر آینده قیمت برق با استفاده از مقادیر گذشته و مقادیر پیش بینی شده قیمت استفاده شود [۲۸]. دو ساختار اساسی برای NN از طریق ارتباط بین ورودی ها و خروجی ها بدست می آید، یکی معماری چند ورودی چند خروجی (MIMO) و دیگری معماری چند ورودی یک خروجی (MISO) است. در این مقاله مجموعه ای متشکل از پنج شبکه عصبی مختلف برای پیش بینی قیمت برق ۲۴ ساعت آینده استفاده شده که ساختار چهار شبکه MIMO و یک شبکه دیگر MISO است. الگوی انتخاب ورودی های شبکه بر اساس تشابه رفتار سیگنال قیمت در دوره های ماهانه و هفتگی، همچنین مقادیر ماکزیمم، متوسط و مینیمم قیمت بوده است. شبکه های مورد استفاده برای پیش بینی قیمت روز بعد متشکل از ۵۰ نرون بوده اند که به صورت off line آموزش داده می شوند.

در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۴ چندین شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی MCP[۳] بازار New

---

۱ - European Energy Exchange

۲ - Autoregressive Models

۳ -Market Clearing Price

England به صورت یک ماشین کمیته[۱] مورد استفاده قرار گرفته است [۲۹]. در این روش نتایج حاصل از پیش بینی چندین NN با ضرایب وزنی که توسط یک محاسبه گر وزن بدست می آید، با هم ترکیب و خروجی نهایی محاسبه می گردد.

یکی از تکنیکهایی که برای پیش بینی قیمت برق از آن استفاده شده ترکیب منطق فازی با شبکه های عصبی مصنوعی است [۳۰]. در این روش اطلاعات زبانی مربوط به زمان رخداد، تغییرات زمان-حقیقی LMP[۲]، (ΔLMP) و بار از طریق توابع عضویت فازی به اطلاعات عددی قابل استفاده توسط شبکه های عصبی تبدیل می گردد. شبکه عصبی مورد استفاده در این تحقیق از نوع RNN[۳] بوده، چرا که قابلیت بهتری در مدلسازی سیگنالهای غیرخطی همراه با تغییرات شدید را دارا است.

در تحقیقی در سال ۲۰۰۵ تکنیکهای پیش بینی قیمت بازار برق، برای پیش بینی قیمت ۲۴ ساعت آینده با هم مقایسه شده اند [۱۸]. در این تحقیق روشهای سری های زمانی شامل ARIMA ، رگرسیون دینامیک[۴] و تابع انتقال[۵] با روش شبکه های عصبی مصنوعی و تبدیل موجک[۶] با هم مقایسه شده اند. نتیجه گیری نهایی این تحقیق حاکی از برتری روشهای سری های زمانی نسبت به دو روش تبدیل موجک و شبکه های عصبی است. در بین روشهای سری های زمانی الگوریتمهای رگرسیون دینامیک و تابع انتقال مؤثرتر از مدلهای ARIMA ظاهر شده اند. نتایج حاصل از روش تبدیل موجک بسیار نزدیک به نتایج حاصل از روش ARIMA بوده حال آنکه شبکه های عصبی نتایج قابل توجهی از خود نشان ندادند.

سایر فصلهای این پایان نامه به این شرح است: فصل دوم، مفاهیم بازار برق، اصول پیش بینی قیمت برق و مسائل قیمت گذاری است با این هدف که خواننده به صورت مجازی بازار برق را حس کرده و بیش از پیش به

---

[۱] -Committee Machine
[۲] -Locational Marginal Price
[۳] - Recurrent Neural Network
[۴] - Dynamic Regression
[۵] -Transfer Function
[۶] -Wavelet-transform

اهمیت پیش بینی قیمت برق واقف گردد. فصل سوم تبدیل موجک و شبکه موجک خطی که پایه اصلی شکل گیری پیشنهاد این پایان نامه بوده است. فصل چهارم پیش بینی قیمت برق توسط روش ترکیبی همبستگی پیرسون و شبکه های عصبی مصنوعی است که به منظور مقایسه با روش پیشهادی در این پایان نامه از این روش استفاده شده است. فصل پنجم پیش بینی قیمت برق با استفاده از روش ترکیبی شبکه موجک خطی و همبستگی پیرسون است که در انتهای فصل نتایج حاصل از این روش با روش فصل قبل مقایسه شده است. فصل ششم پیش بینی قیمت برق با استفاده از روش شبکه موجک خطی و فیدبک خروجی است که نتایج حاصل از آن بسیار بهتر از روش شبکه موجک خطی بدون فیدبک خروجی است. در آخر در فصل هفتم نتایج حاصل جمع بندی و چند پیشنهاد نیز ارائه گردیده است.

فصل دوم

مفاهیم بازار برق ، اصول پیش بینی قیمت برق و مسائل قیمت گذاری