بررسی اهمیت پیش‌بینی میزان تقاضا در پیش‌بینی قیمت برق با تفکیک قیمت برق به مولفه‌های مختلف در فضای رقابتی انرژی الکتریکی

امیر احمری‌نژاد
دانشجوی کارشناسی ارشد گروه برق
a_ahmarinejad@yahoo.com

حبیب رجبی مشهدی
استادیار گروه برق
H_mashhadi@ferdowsi.um.ac.ir

جواد ساده
استادیار گروه برق
Sadeh@ferdowsi.um.ac.ir

دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد
دفتر تحقیقات و استانداردها- برق منطقه‌ای خراسان

واژه‌های کلیدی: بازار برق، قیمت برق، پیش‌بینی، پیش‌بینی‌پذیری، شبکه‌های عصبی، نمای هرست

چکیده

در محیط تجدیدساختار یکی از مسائل مهم در برنامه‌ریزی شرکت‌های تولیدی، خریداران و بهره‌بردار سیستم، مسأله پیش‌بینی قیمت برق[1] می‌باشد. در این فضا، به دلیل عدم قطعیت‌هایی که در فرآیند قیمت برق وجود دارد، نوسانات زیادی در فرآیند قیمت برق ایجاد شده است که پیش‌بینی این کمیت مهم را به نسبت پیش‌بینی بار که مدت زیادی در حال انجام است با مشکل مواجه نموده است.

در این مقاله با تفکیک قیمت برق به دو بخش عمده (یک بخش مرتبط با میزان تقاضا و بخش دیگر مرتبط با هر چیزی غیر از میزان تقاضا مثلاً رفتار شرکت‌کنندگان در بازار) به بررسی پیش‌بینی‌پذیری قیمت برق در مقابل مولفه‌های تفکیک شده می‌پردازیم. با استناد به نتایج بدست آمده از این بررسی، مدل پیشنهادی جهت پیش‌بینی قیمت برق معرفی می‌شود. همچنین اهمیت پیش‌بینی میزان تقاضا نیز به عنوان یکی از ورودی‌های تأثیرگذار در پیش‌بینی قیمت برق مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

1. Electricity Price Forecasting

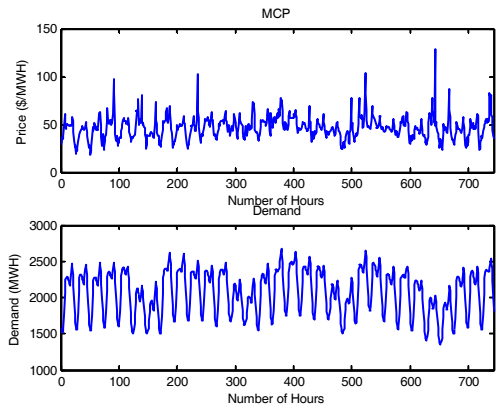
۱- مقدمه

از دیدگاه شرکت‌کنندگان در بازار، پیش‌بینی قیمت برق از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. استراتژی پیشنهاد قیمت[2] فروشندگان، برنامه مدیریت مصرف خریداران و برآورد بودجه شرکت‌ها از جمله مواردی است که نیاز مبرم به پیش‌بینی قیمت برق را از دیدگاه‌های مختلف مورد توجه قرار می‌دهد. در بازه بلندمدت نیز انعقاد قراردادها به پیش‌بینی قیمت برق نیاز دارند. در بازه بلندمدت معمولاً جهت کاهش ریسک در تصمیم‌گیری از قراردادهای مکمل[3] در افق‌های بلندمدت استفاده می‌شود.

پیش‌بینی این کمیت مهم در بازار برق در مقایسه با پیش‌بینی میزان تقاضا[4] که مدت زیادی در صنعت برق در حال انجام است، با پیچیدگی‌های مضاعفی همراه است. تاکنون روش‌های متعددی جهت پیش‌بینی میزان تقاضا (بار سیستم) مطرح شده است که در افق‌های زمانی مختلف اعم از

2. Bidding Strategy
3. Contract for Difference
4. Load Forecasting

کوتاه‌مدت و بلندمدت از کارایی لازم برخوردار می‌باشند. جهت شفاف شدن این موضوع، در شکل(۱) منحنی‌های ساعتی قیمت برق و میزان تقاضا در ماه آوریل سال ۲۰۰۴ میلادی بازار New England آورده شده است. از بررسی و مقایسه این دو منحنی این‌طور به نظر می‌رسد که برخلاف منحنی مربوط به میزان تقاضا که از الگوهای یکسانی برخوردار هستند، منحنی مربوط به قیمت برق با نوسانات و بی‌نظمی زیادی همراه می‌باشد. در ضمن مشاهده می‌شود که قیمت برق برخلاف میزان تقاضا با تغییرات ناگهانی نیز همراه است. به این ترتیب پیش‌بینی قیمت و انتخاب بهترین روش برای پیش‌بینی ضمن اینکه از درجه اهمیت بالایی برخوردار است با پیچیدگی خاصی نیز همراه می‌باشد.



شکل(۱): منحنی‌های ساعتی قیمت برق و میزان تقاضا در ماه آوریل سال ۲۰۰۴ میلادی بازار New England

در جدول (۱) خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده از تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر در خصوص پیش‌بینی قیمت برق آورده شده است. از اولین تحقیقات صورت گرفته می‌توان به مدل پیشنهاد شده توسط Szkuta و همکارانش اشاره نمود. که با شبکه عصبی سه لایه با آموزش BP به پیش‌بینی قیمت برق در ۲۴ ساعت بعد در بازار Victorian پرداختند. خطای پیش‌بینی در این روش ۱۵٪ است که نسبتاً خطای بالایی می‌باشد[۱]. در ادامه در سال ۲۰۰۱ میلادی، Hong و همکارانش با استفاده از شبکه عصبی Elman پیش‌بینی قیمت برق در بازار PJM را با تفکیک روزهای مختلف هفته اعم از روزهای تعطیل و غیر تعطیل برای ۲۴ ساعت بعد انجام دادند که خطای پیش‌بینی حدود ۱۱/۱٪ بدست آمد[۲]. در سال ۲۰۰۲ میلادی Caihua Li و همکارانش نیز با مطالعه بر روی بازار PJM به پیش‌بینی ۲۴ ساعت بعد قیمت برق با ترکیب خوشه‌بندی دینامیکی[1] و شبکه عصبی با آموزش BP پرداختند[۳]. با معیار حداقل فاصله بین داده نمونه و مرکز خوشه‌بندی، داده مذکور به چندین کلاس از طریق خوشه‌بندی دینامیکی تقسیم می‌شوند. در این روش خطای پیش‌بینی ۵/۰۱٪ می‌باشد که به نسبت کارهای قبلی دقت پیش‌بینی بالاتر رفته است.

جدول (۱): خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر

نام محقق و سال تحقیق	بازار برق مورد مطالعه	روش مورد استفاده برای پیش‌بینی	محدوده پیش‌بینی	درصد خطا
Szkuta [99]	Victorian	شبکه عصبی سه لایه با آموزش BP	۲۴ ساعت بعد	۱۵
Hong [01]	PJM	Elman	۲۴ ساعت بعد	۱۱/۱
Caihua Li [02]	PJM	BP+خوشه بندی دینامیکی	۲۴ ساعت بعد	۵/۰۱
Yuan [03]	New York ISO	شبکه عصبی با آموزش BP	۲۴ ساعت بعد	۱۰
Vanaja Lyer [03]	Australia	فازی-عصبی	۲۴ ساعت بعد	۷/۰۷
Jau.Jia Guo [04]	New England	RBF MLP Committee Machine	یک ماه بعد	۱۲/۵۳ ۱۳/۴۰ ۱۰/۸۷
Z. Hu [04]	Zhejiang	BP + Linear Regression	۵ هفته بعد	۱۴/۴۷
Gonzalez [05]	Spanish	IOHMM	۲۴ ساعت بعد	۱۵/۸۳

Yuan و همکارانش نیز در سال۲۰۰۳ میلادی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل مورد نظر برای پیش‌بینی قیمت برق در ۲۴ ساعت آینده را با مطالعه بر روی داده‌های

1. Dynamic Clustering

بازار New York معرفی نمودند که خطای پیش‌بینی در این حالت ۱۰٪ است که نسبت به کار انجام شده در همین سال مدل مذکور با دقت کمتری همراه است[۴]. در سال ۲۰۰۳ میلادی Vanaja Lyer و همکارانش با استفاده از منطق فازی و با روش فازی-عصبی با مطالعه بر روی داده‌های بازار استرالیا مدلی را برای پیش‌بینی ۲۴ ساعت بعد معرفی نمودند که خطای آن حدود ۷/۰۷٪ می‌باشد. البته شایان ذکر است که مقایسه دقیق نتایج تحقیقاتی کارهای مختلف از نظر درصد خطا به دلیل متفاوت بودن بازارها، داده‌ها و بزرگی سیستم منطقی نمی‌باشد.

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد عمده تحقیقات انجام شده تا قبل از سال ۲۰۰۴ میلادی برای پیش‌بینی قیمت برق در ۲۴ ساعت آینده استوار بوده‌اند. در ادامه در سال ۲۰۰۴ میلادی Jau.Jia Guo و همکارانش با مطالعه بر روی بازار New England به پیش‌بینی قیمت برق در یک ماه پرداختند[۵]. مدل معرفی شده توسط این تحقیق از جمله مدل‌های ترکیبی شبکه‌های عصبی هستند که به Committee Machine معروف می‌باشند. در این خصوص ضمن مقایسه این مدل با شبکه‌های عصبی دیگر از قبیل MLP و RBF در نهایت خطای پیش‌بینی قیمت برق در یک ماه ۱۰/۸۷٪ بدست آمده است که به نسبت دو شبکه دیگر دقت بالاتری دارد. در همین سال تحقیق دیگری توسط Z. Hu و همکارانش بر روی بازار Zhejiang انجام گرفت که هدف محققین پیش‌بینی میان مدت (۵ هفته) با استفاده از ترکیب شبکه عصبی با آموزش BP و روش رگرسیون خطی می‌باشد. خطای پیش‌بینی برای این مدت ۱۴/۴۷٪ بوده است[۶].

از آنجا که در فضای رقابتی بازار برق، شرکت‌کنندگان در بازار با عدم قطعیت‌های فراوانی همراه هستند یکی از روش‌های مفید برای بررسی مسأله مدلسازی و پیش‌بینی قیمت برق استفاده از روش‌های دینامیکی مرتبط با هم از قبیل زنجیره‌های مارکوف[1] می‌باشد. در مرجع [۷]، Gonzalez و همکارانش در سال ۲۰۰۵ میلادی مدل IOHMM[2] برای تحلیل و پیش‌بینی قیمت لحظه‌ای برق برای ۲۴ ساعت بعد معرفی نموده‌اند. در این مدل حالت‌های مختلف بازار برق اسپانیا از طریق متغیرهای توضیحی مربوطه تعیین و مشخص می‌گردند. خطای پیش‌بینی قیمت برق در این روش ۱۵/۸۳٪ است و هر چند که پیچیدگی این مدل بالاست اما خطا نسبتاً زیاد می‌باشد.

با توجه به نوسانات و بی‌نظمی در سری زمانی قیمت برق، شناخت عوامل تأثیرگذار بر فرآیند از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از مسائل مهمی که در خصوص پیش‌بینی هر سری زمانی کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد مسأله پیش‌بینی‌پذیری فرآیند مورد مطالعه است. استفاده از آزمون‌های پیش‌بینی‌پذیری سری‌های زمانی در خصوص فرآیند قیمت برق، جهت انتخاب روش پیش‌بینی و تعیین افقی که در آن پیش‌بینی با دقت مناسبی قابل انجام است می‌تواند بسیار راه‌گشا باشد.

تحقیقات صورت گرفته در خصوص پیش‌بینی‌پذیری یک سری زمانی، تاکنون در بررسی فرآیندهایی مانند قیمت سهام در بازار بورس به‌کار رفته‌اند. ولی تاکنون این تحلیل‌ها روی فرآیند قیمت برق به‌کار نرفته‌اند از جمله مهمترین این روش‌ها، می‌توان به روش‌های دیاگرام فضای فاز[3]، نمای لیاپانوف[4] و بعد همبستگی[5] اشاره کرد[۸-۹]. در زمینه فرآیند قیمت برق نیز اخیراً در مرجع [۱۰] یک شاخص کارآمد و مفهومی‌جهت پیش‌بینی‌پذیری فرآیند قیمت برق و مقایسه آن با فرآیند تقاضا مطرح شده است. با معرفی شاخصی مفهومی در این مرجع پیش‌بینی‌پذیری قیمت برق در مقایسه با میزان تقاضا با استناد به ضرایب خودهمبستگی این دو فرآیند انجام شده است.

در این مقاله با استناد به مدل معرفی شده در مرجع [۱۱]، روند محاسباتی آن مدل در ابتدا با تفکیک قیمت برق با

1. Markov Models

2. Input/Output Hidden Markov Models
3. Phase Space Diagram
4. Lyapunov Exponent
5. Correlation dimension

استفاده از مدل مورد نظر به دو بخش عمده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از یک روش آماری مقاوم[1] که عمدتاً جهت سنجش میزان نویز در یک الگو به کار می‌رود مقایسه پیش‌بینی‌پذیری مولفه‌های بدست آمده از فرآیند قیمت برق و خود فرآیند قیمت برق انجام می‌گیرد. در نهایت مدل مورد نظر جهت پیش‌بینی را با این نگرش معرفی می‌نماییم.

در این مقاله هدف اصلی مقایسه پیش‌بینی قیمت برق به طور مستقیم و بدون در نظر گرفتن اثر میزان تقاضای سیستم، در مقابل تفکیک آن به مولفه‌های مختلف می‌باشد. در این راستا شرایط مدل مورد استفاده، نوع شبکه عصبی، تعداد نرون‌های شبکه موردنظر و نیز نسبت داده‌های آموزش به تست برای پیش‌بینی قیمت برق به طور مستقیم و مولفه‌های تفکیک شده آن، همگی یکسان در نظر گرفته شده است. بعبارت دیگر هدف مقایسه نسبی مدل پیشنهادی جهت پیش‌بینی قیمت برق با تفکیک آن به دو مولفه در برابر پیش‌بینی مستقیم قیمت برق می‌باشد. بنابراین تلاشی جهت بهینه‌سازی ساختار شبکه عصبی صورت نگرفته است.

بدیهی است که با تغییر شاختار شبکه عصبی استفاده شده و ... می‌توان دقت پیش‌بینی را بالا برد. هر چند میزان خطای مدل مورد نظر در مقایسه با تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر قابل مقایسه است.

کارهای تکمیلی در این زمینه بر پایه تئوری آشوب و قضیه Takens توسط نویسندگان مقاله انجام شده است که در آن با اصلاح ساختار شبکه عصبی و با استفاده بهینه از اطلاعات خطای پیش‌بینی به شدت کاهش یافته است[۱۲].

سری زمانی مورد مطالعه در این مقاله قیمت برق و میزان تقاضا در ماه فوریه و بخشی از ماه مارچ سال ۲۰۰۴ میلادی از بازار برق New England می‌باشد[۱۳].

در بخش دوم نخست ویژگی‌های روش نمای هرست به عنوان یکی از آزمون‌های پیش‌بینی‌پذیری سری‌های زمانی معرفی می‌گردد. در ادامه و با استناد به همبستگی بالای قیمت برق و میزان تقاضا مدل تفکیک قیمت برق به دو مولفه عمده انجام می‌پذیرد. سپس مسأله پیش‌بینی‌پذیری مولفه‌های قیمت برق و خود فرآیند قیمت برق نسبت به هم با استناد به نمای هرست مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در بخش سوم با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه به مقایسه پیش‌بینی قیمت برق از دیدگاه مستقیم و تفکیک آن به دو مولفه می‌پردازیم. یکی از اهداف این بخش بررسی صحت نتایج بدست آمده در بخش دوم است. از دیگر اهداف مهم این مقاله اهمیت استفاده از پیش‌بینی میزان تقاضا و پیشینه آن در پیش‌بینی قیمت برق جهت افزایش دقت پیش‌بینی می‌باشد.

۲- پیش‌بینی‌پذیری قیمت برق در بازار رقابتی با تفکیک به دو مولفه مختلف

در این بخش بررسی مسأله پیش‌بینی‌پذیری قیمت برق را توأماً با تفکیک آن به دو بخش عمده و با استفاده از تحلیل R/S مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. بر پایه تحلیل R/S یا مقیاس‌بندی مجدد[2] حوزه تغییرات سری زمانی قیمت‌ها، تشخیص یک سری زمانی تصادفی از یک سری زمانی غیر تصادفی، بدون در نظر گرفتن توزیع آن (اعم از گوسی یا غیرگوسی) امکان پذیر می‌شود. تحلیل R/S که به نمای هرست نیز معروف است، یک روش آماری مقاوم[3] است که برای سنجش میزان نویز در یک الگو به کار می‌رود(روند محاسبات در پیوست آورده شده است).

نمای هرست همانندی دو پیشامد متوالی را نشان می‌دهد. برآورد H به کمک محاسبه شیب منحنی $Log(R/S)_n/Log(n)$ و با استفاده از روش رگرسیون در حوزه تغییرات n به دست می‌آید[۱۴]. به طور کلی ۳ حالت مختلف برای H وجود دارد که عبارتند از[۱۵]:

۱. H = ۰/۵: بیانگر این مطلب است که سری زمانی مورد مطالعه توسط یک فرآیند تصادفی مستقل[4] تولید شده است. به عبارتی نمای هرست برای یک سری زمانی تصادفی برابر ۰/۵ است.

1. Robust Statistic Method

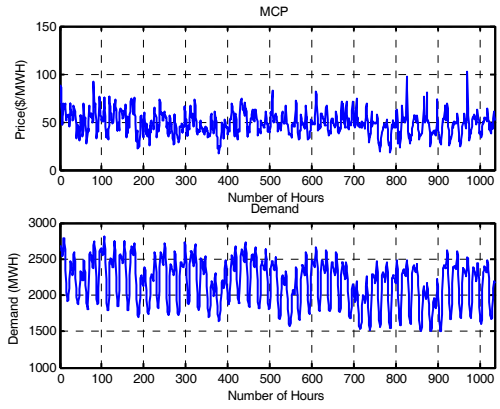
2. Rescaled Range Analysis
3. Robust Statistical Method
4. Independent Random Process

۲. ۰/۵≤H≤۱: نمایانگر رفتار پایای[1] سری زمانی می‌باشد. به این معنی که اگر سیستم در یک دوره دارای روند افزایشی باشد، این احتمال وجود دارد که این روند افزایشی را در آینده نیز حفظ کند.

۳. ۰≤H≤۰/۵: بر خلاف حالت قبل سیستم دارای رفتار غیرپایا[2] می‌باشد. این فرآیند اغلب تمایل به عملکرد معکوس خودش دارد. در این حالت اگر سیستم یک روند کاهشی را در گذشته دارا باشد، بیانگر احتمال روند افزایشی در آینده را می‌رساند.

بیشترین مقدار به دست آمده از نمای هرست نمایانگر میانگین دوره گردش متناوب[3] الگوست. بدین معنی که می‌توان بررسی کرد که اثر داده‌های قبلی در سری زمانی مذبور تا چه مدتی باقی می‌ماند. میانگین حافظه بلندمدت را می‌توان با بدست آوردن نمای هرست(H) و جایگذاری در رابطه $(n)^H$ بدست آورد. در این خصوص برای مقایسه قابلیت پیش‌بینی (پیش‌بینی‌پذیری) سری‌های زمانی با استفاده از نمای هرست، کمتر بودن H نمایانگر پایین بودن اثر حافظه بلندمدت در سری زمانی می‌باشد.

در شکل (۲) فرآیند قیمت برق و میزان تقاضا در بازه مورد نظر ملاحظه می‌شود.



شکل(۲): (a) قیمت برق و (b) تقاضا در ماه فوریه و بخشی از ماه مارچ سال ۲۰۰۴ بازار New England

در ادامه این قسمت مسأله پیش‌بینی‌پذیری قیمت برق با نگرشی جدید و بر مبنای آزمون نمای هرست مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین بررسی مسأله پیش‌بینی‌پذیری قیمت برق را هنگامی که به دو مولفه تفکیک می‌شود نیز بر پایه تحلیل R/S مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور سری زمانی قیمت برق در فضای رقابتی انرژی الکتریکی به دو مولفه مختلف تجزیه می‌شود. مولفه نخست بیانگر قسمتی که به میزان تقاضا در همان دوره بستگی دارد می‌باشد و مولفه دیگری بخشی که مربوط به سایر عوامل بجز تقاضا (مثلاً با عنوان رفتار شرکت‌کنندگان در بازار) می‌باشد.

فرض کنیم که قیمت برق ($\boldsymbol{\rho}_t$) به دو عامل تقاضا ($\mathbf{D}_t$) و سایر عوامل بجز تقاضا ($\overline{\mathbf{D}}_t$) وابسته است. و این دو مولفه مستقل از هم هستند. به منظور سهولت، مقدار میانگین قیمت $\boldsymbol{\rho}_t$ را از آن کم نموده و تعریف می‌کنیم:

$$\boldsymbol{\rho}_t - \mu_{\mathbf{p}_t} = f\left(\mathbf{D}_t, \overline{\mathbf{D}}_t\right) = \boldsymbol{\rho}_{\mathbf{D}_t} + \boldsymbol{\rho}_{\overline{\mathbf{D}}_t} \qquad (۱)$$

هدف آن است که با معلوم بودن میزان تقاضا ($\mathbf{D}_t$) مولفه متناسب با میزان تقاضا را در قیمت برق تخمین بزنیم. بنابراین فرض می‌کنیم که مولفه $\boldsymbol{\rho}_{D_t}$ بصورت خطی به شکل زیر تابع تقاضا می‌باشد:

$$\boldsymbol{\rho}_{D_t} = \alpha\left(\mathbf{D}_t - \mu_{\mathbf{D}_t}\right) \qquad (۲)$$

بر این اساس، تخمین‌گر خطی مورد استفاده عبارتست از:

$$\boldsymbol{\rho}_t - \mu_{\mathbf{p}_t} = \alpha\left(\mathbf{D}_t - \mu_{\mathbf{D}_t}\right) + \boldsymbol{\rho}_{\overline{\mathbf{D}}_t} \qquad (۳)$$

$\left(\mathbf{D}_t - \mu_{\mathbf{D}_t}\right)$ به منظور تعیین پارامتر α طرفین را در ضرب کرده و امیدریاضی می‌گیریم:

$$E\left(\left(\boldsymbol{\rho}_t - \mu_{p_t}\right).\left(\mathbf{D}_t - \mu_{\mathbf{D}_t}\right)\right) = \alpha E\left(\left(\mathbf{D}_t - \mu_{\mathbf{D}_t}\right)^2\right) + E\left(\boldsymbol{\rho}_{\overline{\mathbf{D}}_t}.\left(\mathbf{D}_t - \mu_{\mathbf{D}_t}\right)\right) \qquad (۴)$$

سمت چپ رابطه (۴) طبق تعریف کوواریانس بین $\boldsymbol{\rho}_t$ و $\mathbf{D}_t$ بوده و داریم:

$$\operatorname{cov}\left(\boldsymbol{\rho}_t, \mathbf{D}_t\right) = \alpha.\delta_{D_t}^2 + E\left(\boldsymbol{\rho}_{\overline{\mathbf{D}}_t}\right)E\left(\mathbf{D}_t - \mu_{\mathbf{D}_t}\right) \qquad (۵)$$

بدیهی است که جمله دوم در سمت راست معادله (۵) بر اساس فرض مستقل بودن مولفه‌های $\boldsymbol{\rho}_{\overline{\mathbf{D}}_t}$ و $\boldsymbol{\rho}_{\mathbf{D}_t}$ نوشته شد و برابر صفر می‌باشد. در نتیجه داریم:

1. Persistent Behavior
2. Anti- Persistent Behavior
3. Mean Orbital Period

$$\alpha = \frac{\mathrm{cov}(\boldsymbol{\rho}_t, \mathbf{D}_t)}{\delta_{D_t}^2} \qquad (۶)$$

به طریق دیگر نیز می‌توان مقدار α را بدست آورد. برای سادگی فرض کنید معادله (۲) را به صورت $Y = \alpha.X + b$ در نظر بگیریم. در این بین جهت بدست آوردن α و b داریم:

$$\underset{a,b}{Min} \quad E\left(Y - (\alpha X + b)\right)^2 \qquad (۷)$$

نهایتاً با مشتق گیری نسبت به a و b خواهیم داشت:

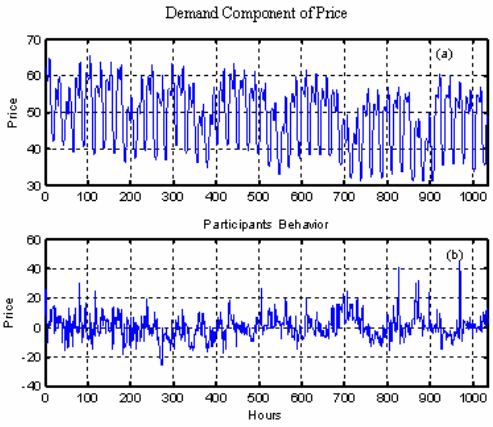
$$\alpha = \frac{E(XY)}{E(X^2)} = \frac{\mathrm{cov}(\boldsymbol{\rho}_t, \mathbf{D}_t)}{\delta_{D_t}^2} \qquad (۸)$$

بر این اساس با استفاده از رابطه (۹)، بخشی از قیمت برق که مربوط به میزان تقاضا می‌باشد مدل گردیده که نهایت آنچه که باقی می‌ماند معرف سایر عوامل بجز تقاضا (رفتار شرکت‌کنندگان در بازار) است.

$$\boldsymbol{\rho}_{D_t} = \mu_{\rho_t} + \frac{\mathrm{cov}(\boldsymbol{\rho}_t, \mathbf{D}_t)}{\delta_{D_t}^2}.(\mathbf{D}_t - \mu_{D_t}) \qquad (۹)$$

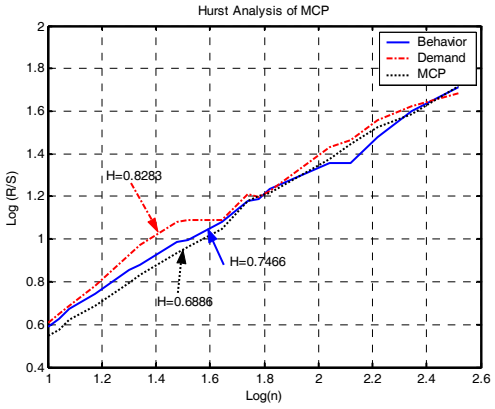
در رابطه فوق ، μ_{ρ_t} ، μ_{D_t} ، $\mathrm{cov}(\boldsymbol{\rho}_t, \mathbf{D}_t)$ و δ_{D_t} به ترتیب میانگین قیمت برق، تقاضا، کوواریانس بین قیمت برق و تقاضا و انحراف معیار میزان تقاضا می‌باشند.

در شکل (۳) مولفه‌هایی از قیمت برق (شکل(۲)) که با استفاده از رابطه (۹) به دو بخش عمده یکی مولفه‌ای از قیمت که مربوط به رفتار شرکت‌کنندگان و مولفه‌ای که مربوط به میزان تقاضا در همان دوره می‌باشد ملاحظه می‌شود.



شکل(۳)- مولفه‌های قیمت: (a) مولفه مربوط به میزان تقاضا و (b) مولفه مربوط به رفتار شرکت‌کنندگان

در شکل(۴) مقادیر $\mathrm{Log(R/S)_n}$ به ازای تغییرات $\mathrm{Log(n)}$ بر پایه تحلیل R/S برای هر سه فرآیند قیمت واقعی برق و دو مولفه آن نشان داده شده است. از مقایسه مقادیر متناظر با نمای هرست فرآیند قیمت برق (H=۰/۶۸۸۶) و نمای هرست مربوط به مولفه‌ای از قیمت برق که معرف میزان تقاضا (H=۰/۸۲۸۳) و مولفه‌ای از قیمت برق که معرف رفتار شرکت‌کنندگان در بازار(H=۰/۷۴۶۶) است می‌توان به اثر حافظه بلندمدت در مولفه‌های قیمت به نسبت خود قیمت برق پی برد. به این معنی که پیشامدهایی که پی‌درپی و مانند یکدیگر در مولفه‌های قیمت رخ داده‌اند به نسبت خود قیمت برق بیشتر بوده است. به عبارت دیگر میانگین حافظه بلندمدت به ترتیب در سری زمانی قیمت برق حدود ۱۱۹ ($^{۰/۶۸۸۶}$۱۰۳۶) و برای مولفه‌ای از قیمت برق که معرف میزان تقاضا است برابر ۳۱۴ ($^{۰/۸۲۸۳}$۱۰۳۶) و مولفه دیگر حدود ۱۷۸ ($^{۰/۷۴۶۶}$۱۰۳۶) ساعت بدست آمد.



شکل(۴)- مقادیر Log(R/S) به ازای تغییرات Log(n) برای فرآیند قیمت برق و دو مولفه آن

اهمیت این مطلب در بررسی و ایجاد مدل دقیق پیش‌بینی قیمت برق نمایان می‌شود. در واقع انتظار می‌رود که پیش‌بینی دو مولفه ایجاد شده قیمت برق با خطای کمتری به نسبت پیش‌بینی فرآیند اصلی قیمت برق همراه باشد. این مسأله در بخش بعد مورد ارزیابی دقیق‌تری قرار می‌گیرد.

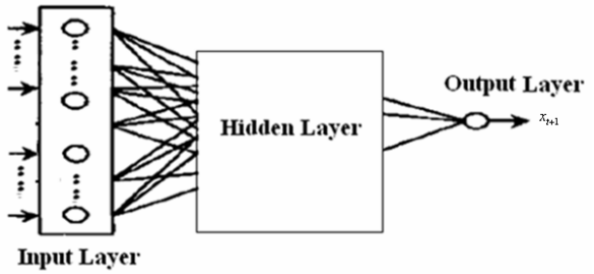
۳- پیش‌بینی قیمت برق با استفاده از شبکه عصبی MLP تک خروجی

شبکه عصبی مصنوعی(ANN) در واقع یک سیستم پردازش اطلاعات است و دارای خصوصیات عملکردی شبیه به شبکهٔ عصبی موجودات زنده می‌باشد. خصوصیات زیر مشخص کننده یک شبکه عصبی:

- ساختار شبکه : تعداد عصب‌های هر لایه و طریقه ارتباط بین عصب‌ها
- روش آموزش شبکه: تعیین مقادیر وزن های رابط عصب‌ها
- تابع تحریک هر عصب

ساختار متداول شبکه‌های عصبی جهت کاربرد پیش‌بینی معمولاً ساختار پرسپترون چند لایه (MLP) می‌باشد. شبکه‌های پرستپرون چند لایه (MLP)[1] دارای ساختار ساده‌ای هستند و توانایی ارائه مدل سیستم‌های غیرخطی را با دقت مطلوب دارند. شکل (۵) ساختار کلی شبکه عصبی مورد استفاده در این مقاله را نشان می‌دهد.

جهت آموزش شبکه داده‌های مربوط به ماه فوریه و بخشی از ماه مارس، ۱۰۳۶ داده، از بازار مورد مطالعه انتخاب شده که در این تعداد ۸۳۶ داده جهت آموزش و ۲۰۰ داده بعدی به عنوان داده‌های تست شبکه به کار می‌روند. در این بخش به نتایج بدست آمده از پیش‌بینی قیمت برق با استفاده از شبکه عصبی MLP تک خروجی و با ۲۵ نرون در لایه پنهان پرداخته می‌شود. در این راستا از مجموع ۲۰۰ داده تست ۱۰۰ داده برای بررسی دقت پیش‌بینی قیمت برق بکار رفته است.



شکل(۵)- ساختار شبکه عصبی

به منظور بهبود عملکرد شبکه عصبی پردازش روی داده‌های استاندارد شده مطابق با معادله زیر انجام می‌شود:

$$Z_t = \frac{x_t - \mu_x}{\delta_x} \qquad (۱۰)$$

که در این رابطه، μ_x میانگین و δ_x انحراف معیار داده‌ها می‌باشد. پیش‌پردازش فوق موجب می‌شود که آموزش شبکه به صورت مؤثرتری انجام شود.

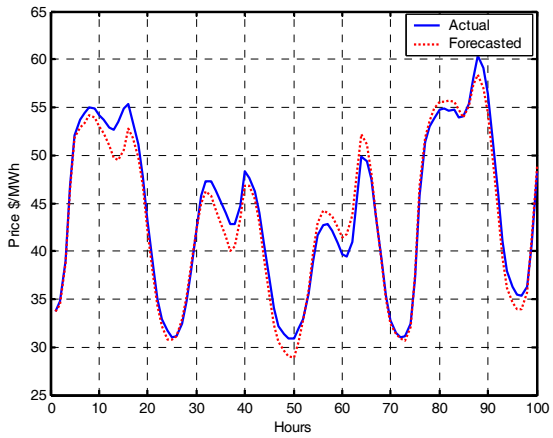
تابع معیاری که برای بررسی عملکرد پیش‌بینی و در واقع آموزش شبکه مورد استفاده قرار گرفته، تابع جذر میانگین مربعات خطا است که بصورت زیر تعریف شده است:

$$Rms = \sqrt{\delta^2 + \bar{e}^{\,2}} \qquad (۱۱)$$

که در این رابطه δ و $\bar{e}$ از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[e_i - \bar{e}\right]^2}$$
$$\bar{e} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_i \qquad (۱۲)$$

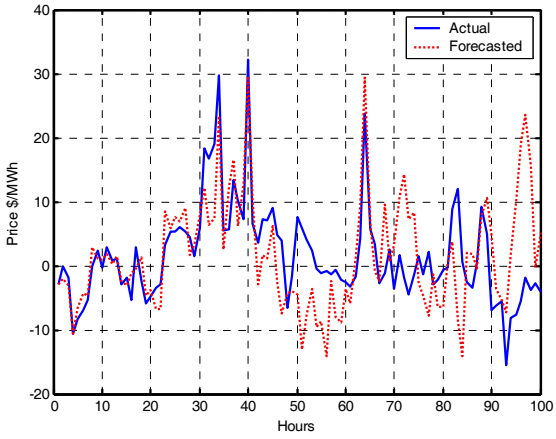
در شکل‌های (۶) و (۷) منحنی واقعی و پیش‌بینی شده مولفه‌های قیمت برای ۱۰۰ داده تست آورده شده است.



شکل(۶)- مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده قیمت برق با شبکه MLP برای ۱۰۰ داده آزمون مولفه قیمت مربوط به میزان تقاضا

همانطور که دیده می‌شود نسبتاً پیش‌بینی این مولفه به خوبی انجام شده است که مورد انتظار بود.

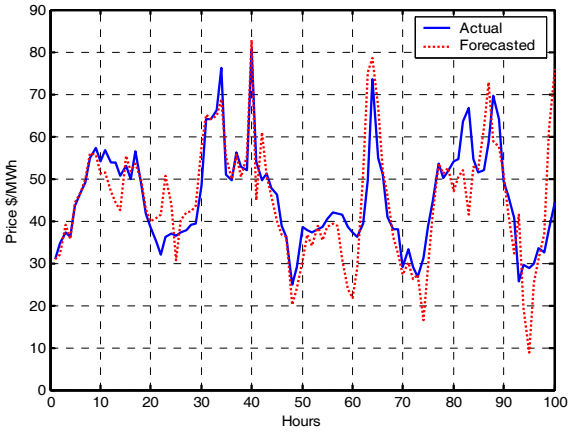
1. Multi-Layer Perceptron



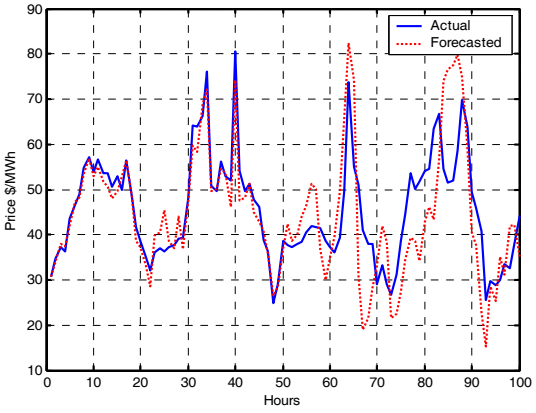
شکل (۷)- مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده قیمت برق با شبکه MLP برای ۱۰۰ داده آزمون مولفه قیمت مربوط به رفتار شرکت‌کنندگان

بر خلاف شکل(۶) در شکل(۷) خطای پیش‌بینی بیشتر است. در این خصوص منطقی به نظر می‌رسد که رفتار بازیگران غیر قابل پیش‌بینی است. در واقع عمده خطای ایجاد شده در پیش‌بینی قیمت برق ناشی از رفتار شرکت‌کنندگان می‌باشد.

در شکل‌های (۸) و (۹) نیز به ترتیب منحنی واقعی و پیش‌بینی شده مجموع مولفه های قیمت برق و خود قیمت برق آورده شده است.



شکل(۸)- مقادیر واقعی مجموع مولفه‌های قیمت برق و پیش‌بینی قیمت برق با شبکه عصبی MLP برای ۱۰۰ داده آزمون



شکل (۹)- مقادیر واقعی قیمت برق و پیش‌بینی قیمت برق با شبکه عصبی MLP برای ۱۰۰ داده آزمون

در جدول (۲) نتایج پیش‌بینی‌های صورت گرفته با این روش آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تفکیک قیمت برق به مولفه‌های مختلف در ایجاد مدلی با خطای کمتر کارساز خواهد بود .این مسأله هم با آزمون نمای هرست مورد ارزیابی قرار گرفت و هم با بررسی ساده‌ای با شبکه MLP به اثبات رسید.

جدول(۲)- مقایسه نتایج مربوط به پیش‌بینی قیمت برق به طور مستقیم و تفکیک آن به دو بخش عمده

مجموع مولفه‌های قیمت برق		قیمت برق	
Rms(%)	Std(%)	Rms(%)	Std(%)
۱۲/۰۳	۱۱/۸۲۰	۱۶/۲	۱۴/۵

به کمک بررسی صورت گرفته با استناد به مدلسازی انجام شده با شبکه عصبی MLP تک خروجی و با توجه به معیار هرست، جهت افزایش قابلیت مدل مورد نظر در پیش‌بینی قیمت برق یک راهکار مفید این است که به جای پیش‌بینی قیمت برق صرفاً از روی فرآیند آن، آنرا به دو قسمت عمده تفکیک کرده و برای هر قسمت مدلی مجزا و در عین حال با دقت بالا طراحی کرد. همانطور که در مقدمه مطرح شد در اینجا تلاشی برای بهینه‌سازی ساختار شبکه عصبی صورت نگرفته است. و به منظور کاهش خطا ضمن پیش‌بینی تقاضا بر روی افق موردنظر با استفاده از تئوری آشوب به طراحی ساختار جدید شبکه عصبی در ادامه تحقیق پرداخته شده است[۱۲].

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله مسأله پیش‌بینی قیمت برق در بازارهای انرژی مورد تجزیه وتحلیل قرار گرفت. در این راستا به بررسی شاخص تحلیلی R/S جهت مقاسیه فرآیندها از حیث پیش‌بینی‌پذیری در بازار رقابتی برق پرداخته شده است. با توجه به مطالعه‌ای که در خصوص بررسی پیش‌بینی پذیری قیمت برق در سال ۲۰۰۴ میلادی بازار New England و بررسی رفتار شرکت کنندگان در بازار بر مبنای تحلیل R/S و با استناد به مدل تقاضا، صورت گرفته شده است ملاحظه می‌شود که به دلیل عدم قطعیتی که در رفتار شرکت‌کنندگان ملاحظه می‌شود دقت پیش‌بینی قیمت برق بطور مستقیم پایین می‌آید. یک روش که در تحقیقات گذشته مورد توجه نبوده این است که می‌توان از ترکیب مدل‌ها جهت رسیدن به مدل پیش‌بینی دقیق قیمت سود برد.

در این مقاله ایده تفکیک قیمت برق به دو بخش عمده که یکی وابسته به میزان تقاضای انرژی بوده و دیگری وابسته به رفتار شرکت‌کنندگان در بازار می‌باشد مطرح گردیده و به کمک تحلیل R/S پیش‌بینی پذیری هر یک از این بخشها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. همچنین مقایسه‌ای با پیش‌بینی پذیری فرآیند قیمت نیز انجام شده است. بر این اساس با توجه به رفتارهای متفاوت این دو بخش می‌توان برای بالا بردن دقت پیش‌بینی، مدلهای متفاوتی را برای پیش‌بینی هر بخش استفاده نمود. این مسأله با استفاده از یک شبکه MLP تک خروجی با ۲۵ نرون در لایه پنهان انجام گرفت که نتایج حاصل از این بررسی با نتایج حاصل از بررسی صورت گرفته با نمای هرست همخوانی داشته است.

از آنجا که انتخاب استراتژی بهینه پیشنهاد قیمت به خصوص در کشورهایی مانند ایران که مناقصه بازار برق آنها بر اساس مناقصه PAB انجام می‌شود، وابسته به پیش‌بینی دقیق قیمت برق است لذا بکارگیری روشهای دقیق جهت پیش‌بینی قیمت از دیدگاه‌های مختلف شرکت‌کنندگان در بازار بسیار حائز اهمیت است. بررسی فوق کمک شایانی در جهت کاهش خطا در مدل پیش‌بینی خواهد داشت. بدیهی است در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار در پیش‌بینی قیمت برق اعم از میزان تقاضا، وضعیت آب و هوا و ... در کاهش خطای پیش‌بینی بسیار موثر است.

۵ مراجع

[1] B. R. Szkuta, L. A. Sanabria, T. S. Dillon, "*Electricity Price Short-Term Forecasting using Artificial Neural Networks*", **IEEE** Trans. Power Syst., pp. 851-857, Vol. 14, Aug. 1999.

[2] Y. Y. Hong, C. Y. Hsia, "*Locational Marginal Price Forecasting in Deregulated Electricity Markets using Artificial Intelligence*",Generation, Transmission and Distribution,**IEE** Proceedings-Vol. 149, Issue 5, Sept. 2002.

[3] C. Li, Z. Guo, "*Short-term System Marginal Price Forecasting with Hybrid Module*", **IEEE** Power System Technology, International Conference on Vol. 4, 13-17 Oct. 2002**.**

[4] Y. S. C. Yuen,"*Experience in Day-ahead Market Price Forecasting*"**, IEE** Conf**.** Advances in Power System Control, Operation and Management, 2003. ASDCOM 2003. Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 497) Vol. 1, 11-14 Nov. 2003**.**

[5] V. Lyer, C. C. Fung, T. Gedeon,"*A Fuzzy-Neura Approach to Electricity Load and Spot-price Forecasting in a Deregulated Electricity Market",* **IEEE** CNF, TENCON 2003. Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region, Vol.4, 15-17 Oct. 2003.

[6] Z. Hu, Y. Yu,"*Price Forecasting Using an Integrated Approach"***, IEEE** CNF. Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004. (DRPT 2004). Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Vol. 1, 5-8 April 2004.

[7] Jau-Jia Guo, P.B. Luh,"*Improving Market Clearing Price Prediction by Using a Committee Machine of Neural Networks*", **IEEE** JNL, Power Systems, IEEE Transactions on Vol. 19, Issue 4, Nov. 2004.

[8] E. W. Saad, D. V. Prokhorov and D. C. Wunsch, "*Comparative Study of Stock Trend Prediction Using Time Delay,*

Recurrent and Probabilistic Neural Networks", **IEEE** Transactions on Neural Networks, Vol. 9, No. 6, November 1998.

[9] Hua, B.; and Lam, K.P. ***"Analysis and prediction for the growth enterprise market (GEM),"*** Proc. Of ICMIT 2000, pp.36-40.

[۱۰] امیر احمری‌نژاد، حبیب رجبی مشهدی و جواد ساده؛ " *بررسی و تحلیل پیش‌بینی پذیری قیمت برق دربازارهای رقابتی انرژی الکتریکی"*، نوزدهمین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC2004)، تهران ،آذر ۱۳۸۳.

[۱۱] امیر احمری‌نژاد، جواد ساده و حبیب رجبی مشهدی؛ " *رویکردی جدید در پیش‌بینی‌پذیری قیمت در بازارهای رقابتی انرژی الکتریکی*"، سیزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، زنجان، بهار ۱۳۸۴.

[۱۲] امیر احمری نژاد؛" ***پیش‌بینی‌پذیری و پیش‌بینی قیمت برق در فضای رقابتی انرژی الکتریکی***"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، تیر ۱۳۸۴.

[13] http://www.iso-ne.com/smd/operations_reports/.

[14] Rafal Weron, Beata Przyby lowicz," *Hurst* Analysis *of electricity prices dynamics"*, Physics A 462-468, 2000.

[15] I. E. Kanounikov, E. V. Antonova, B. V. Kiselev, D. R. Belov, " *Dependence of one of the Fractal Characteristics (Hurst exponent) of the Human Electroencephalogram on the Cortical Area and Type of Activity*", International Joint Conference on Neural Networks ,Vol. 1, 10-16 July 1999.

۶- پیوست

الف) سری X_t به طول N به d بردار n تایی تقسیم می‌گردد(لازم به ذکر است که n مقسوم علیه‌های N را شامل می‌شود).

ب) برای هر بردارZ، $n\times 1$ حاصل از این تقسیم‌بندی ، از $m=1,...,d$ داریم:

۱. میانگین (μ_m) و انحراف معیار (S_m) را برای هر m محاسبه نموده

۲. برای $i=1,...,n$ ، از $X_{i,m}=Z_{i,m}-\mu_m$ ، سری زمانی انباشته[1] $Y_{i,m}=\sum_{j=1}^{i}X_{j,m}$ را بدست آورده

۳. $R_m=Max\{Y_{1,m},...,Y_{n,m}\}-Min\{Y_{1,m},...,Y_{n,m}\}$ را محاسبه کرده و

۴. با به دست آوردن مقیاس بندی مجدد R_m/S_m ، مقدار متوسط مقیاس‌بندی مجدد بردارهای n بعدی عبارت است از:

$$(R/S)_n=\frac{1}{d}\sum_{m=1}^{d}\frac{R_m}{S_m}$$

چنانچه پیداست، در تحلیلR/S، R نمایانگر تفاوت بین بیشترین و کمترین انحراف انباشته از میانگین سری زمانی مفروض، و تابعی از تعداد مشاهدات (n) است.

هرست دریافت که برای بسیاری از سری‌های زمانی رابطه تجربی زیر بدست می آید:

$$(R/S)_n=(n)^H$$

که در آن $H\in[0,1]$ نمای هرست نامیده می‌شود.

نمای هرست همانندی دو پیشامد متوالی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، H معرف پیشامدهایی است که پی‌درپی و مانند یکدیگر رخ داده‌اند. و به ازای مقادیر مختلف n بصورت زیر بدست می‌آید:

$$H=\frac{Log\,(R/S)_n}{Log\ (n)}$$

تخمین H به کمک محاسبه شیب منحنی $Log\,(R/S)_n$ بر حسب $Log\ (n)$ و با استفاده از روش رگرسیون در حوزه تغییرات n بدست می‌آید.

1. Cumulative