

## بررسی و تحلیل پیش‌بینی پذیری قیمت برق در بازارهای رقابتی انرژی الکتریکی

جواد ساده\*

استادیار گروه برق

Sadeh@ferdowsi.um.ac.ir

حبيب رجبی مشهدی\*

استادیار گروه برق

H\_mashhadi@ferdowsi.um.ac.ir

امیر احمدی نژاد

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه برق

Am\_ah70@stu-mail.um.ac.ir

دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

\* کمیته تحقیقات - شرکت برق منطقه‌ای خراسان ایران

واژه های کلیدی: پیش‌بینی قیمت برق، شاخص‌های پیش‌بینی پذیری، سری‌های زمانی، شبکه‌های عصبی، شبیه‌سازی بازار

انجام است، مسئله پیش‌بینی پذیری و تحلیل شرایطی که بر این فرآیند تصادفی حاکم است کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله مسئله پیش‌بینی پذیری قیمت برق به عنوان یک فرآیند تصادفی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این مطالعه هدف این است که با مطالعه خواص آماری فرآیند، شناخت بیشتری از ویژگی‌ها و رفتار فرآیند حاصل شود. بدینهنج اینست شناخت بیشتر فرآیند می‌تواند در زمینه‌های مختلفی مانند انتخاب روش پیش‌بینی مناسب و برآورده از حداکثر خطا پیش‌بینی مفید واقع شود.

در این مقاله یک شاخص مفهومی، ساده و کارآمد جهت اندازه‌گیری پیش‌بینی پذیری سیگنال قیمت برق ارائه می‌گردد و سپس به تحلیل و مقایسه پیش‌بینی پذیری فرآیندهای انرژی مصرفی مورد تقاضا و قیمت برق پرداخته می‌شود. بر این اساس روش‌های مختلف مورد استفاده در پیش‌بینی مطرح شده و مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

### چکیده

ساختار صنعت برق در بسیاری از کشورهای جهان در حال گذار از فضای انحصاری به فضای رقابتی است. در این فرآیند که تحت عنوان کلی تجدید ساختار در صنعت برق پیگیری می‌شود، کشورهای مختلف با مدل‌های متفاوتی در جهت‌های خصوصی‌سازی و رقابتی کردن این صنعت در حال حرکتند. تجدیدساختار در صنعت برق مسائل مختلف بهره‌برداری و برنامه‌ریزی صنعت برق را تحت تأثیر قرارداده است و مسائل جدیدی نیز در این حوزه‌ها متولد شده‌اند. در فضای رقابتی صنعت برق و با شکل‌گیری بازارهای مختلف برای انرژی، یکی از مسائل با اهمیت که نقش کلیدی را در برنامه‌ریزی شرکت‌های تولیدی، خریداران و بهره‌بردار سیستم ایفاء می‌کند، مسئله پیش‌بینی قیمت<sup>۱</sup> برق می‌باشد. علی‌رغم تحقیقات مختلفی که در زمینه پیش‌بینی قیمت برق در حال

<sup>۱</sup>-Price Forecasting

## ۱- مقدمه

تحت این شرایط نهادی به عنوان بهره‌بردار سیستم یا بهره‌بردار مستقل سیستم (SO/ISO) مسئولیت حفظ امنیت شبکه و راهبری سیستم را به عهده دارد. این نهاد می‌تواند بصورت می‌نیمال (Min ISO) به مفهوم بدون مداخله در امور اقتصادی و یا ماکریمال (Max ISO) به مفهوم انجام تأمین امور فنی و اقتصادی طراحی شود.

تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که مدل‌های مبتنی بر سری‌های زمانی از قبیل<sup>۱</sup> ARIMA، در پیش‌بینی قیمت کالاهایی مانند گاز طبیعی به کار رفته‌اند [۲]. در سیستمهای قدرت با تکنیک‌های ARIMA برای پیش‌بینی میزان تقاضای سیستم (بار و انرژی مصرفی) نتایج بسیار خوبی حاصل شده است [۳-۴]. در حال حاضر، با فرآیند تجدیدساختاری که در کشورهای زیادی در صنعت برق اتفاق افتاده است، مدل<sup>۲</sup> AR ساده‌تر نیز برای پیش‌بینی قیمت‌های هفتگی مثل بازار نروژ مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. در ضمن جهت پیش‌بینی ARIMA قیمت روزانه Conteras و همکارانش مدل اصلاح شده‌ای جهت پیش‌بینی قیمت تمام شده بازار در ۲۴ ساعت آینده معرفی نموده‌اند [۵]. از شبکه‌های عصبی نیز در پیش‌بینی بار، به مرتب استفاده شده است [۶]. در حال حاضر نیز از این ابزار جهت پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت برق استفاده می‌شود. به عنوان مثال Ramsy و همکارانش روشی ترکیبی بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و منطق فازی با ارائه مثالی از بازار ولز و انگلستان، پیشنهاد نموده‌اند [۷]. Skzuta نیز از یک شبکه عصبی سه لایه با روش آموزش پس انتشار خطأ، جهت پیش‌بینی قیمت در بازار برق استفاده کرده‌اند [۸]. Nicolaisen و همکارانش نیز از تبدیل فوریه و تبدیل هرمیتی به عنوان فیلترهای اطلاعاتی قیمت برق در ورودی شبکه عصبی، استفاده کرده‌اند [۹].

در زمینه روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی بازار نیز تحقیقات مختلفی در سال‌های اخیر صورت گرفته است. به عنوان نمونه در مرجع [۱۰] شبیه‌ساز بازار برق بر اساس سیستمهای چندعاملی بنا شده است. در این مقاله براساس نظریه بازارها

رونده تجدیدساختار در صنایع چون صنعت هوایپیمایی، مخابرات بین‌الملل و گاز و نتایج مثبت حاصل از آن، تحلیلگران و سیاست گذاران عرصه صنعت برق را به اندیشه استفاده از تجارب بدست آمده ترغیب نمود. اکنون ساختار صنعت برق در بسیاری از کشورهای جهان در حال گذار از فضای انحصاری به فضای رقابتی است. در این فرآیند که تحت عنوان کلی تجدیدساختار در صنعت برق پیگیری می‌شود، کشورهای مختلف با مدل‌های متفاوتی در جهت‌های خصوصی‌سازی و رقابتی کردن این صنعت در حال حرکتند. عواملی مانند عدم امکان ذخیره سازی انرژی الکتریکی در مقیاس بزرگ، انتقال انرژی الکتریکی بر اساس قوانین فیزیکی حاکم بر خطوط انتقال و نه بر اساس قراردادهای اقتصادی، حساسیت کم تقاضا به تغییرات قیمت بویژه در افق زمانی کوتاه مدت و ... روند تجدیدساختار و طراحی بازارهای انرژی الکتریکی را با پیچیدگی‌های مضاعفی روپرتو نموده است. تجدیدساختار در صنعت برق مسائل مختلف بهره‌برداری و برنامه‌ریزی صنعت برق را تحت تأثیر قرارداده است و مسائل جدیدی نیز در این حوزه‌ها متولد شده‌اند.

ایده اصلی در فرآیند رقابتی کردن صنعت برق در نظر گرفتن انرژی الکتریکی به عنوان یک کالا است که توسط قراردادهای مختلف می‌تواند خریداری یا به فروش رسانده شود. با طرح این ایده، خدماتی مانند انتقال انرژی، تهیه ظرفیت رزرو، حفظ فرکانس و ولتاژ شبکه، حفظ کیفیت برق و ... به صورت خدمات جانبی این کالا مطرح می‌شوند. البته می‌توان خدمات جانبی را نیز به کمک طراحی بازارهایی در کنار بازار انرژی تأمین نمود [۱].

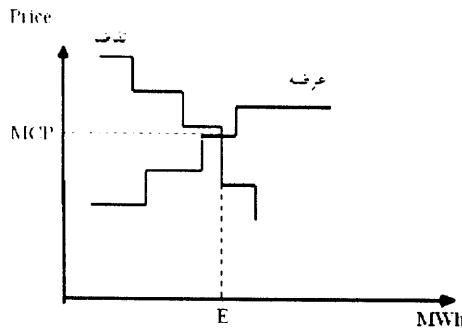
در ساختار جدید صنعت برق، انرژی الکتریکی در بازارهای مختلفی مانند بازارهای پیش‌فروش، بازارهای ساعتی و ... و در الگوهای متفاوتی بر اساس مدل‌هایی چون مدل پولکو (Pool Co) یا قراردادهای دوطرفه<sup>۳</sup> به فروش می‌رسد.

<sup>۱</sup>-Bilateral Transactions

<sup>۲</sup>-Auto Regressive Integrated Moving Average  
<sup>۳</sup>-Auto Regressive

دارند. در بازه بلند مدت معمولاً جهت کاهش ریسک در تصمیم‌گیری از قراردادهای مکمل<sup>۱</sup> در افق‌های بلند مدت استفاده می‌شود.

قیمت نهایی<sup>۲</sup> (MCP<sup>۲</sup>) به عنوان یکی از شاخص‌های مهم در بازار رقابتی برق و بر پایه اصل حداکثرسازی شاخص رفاه اجتماعی، از تلاقي منحنی‌های قیمت‌دهی تولیدکنندگان و مصرف کنندگان بدست می‌آید. به عبارتی در بک منافعه رقابتی، قیمتی که در آن منحنی تقاضای تجمعی خریداران، منحنی تجمعی تولیدکنندگان را قطع می‌کند به عنوان قیمت بسته شدن بازار (MCP) مطرح می‌شود(شکل ۱). به دلیل رفتارهای پیچیده شرکت‌کنندگان در بازار منحنی عرضه و تقاضا دارای عدم قطعیت‌های مختلف بوده و به این دلیل پیش‌بینی قیمت برق دشوار می‌باشد.



شکل ۱ : قیمت تمام شده بازار

اهمیت پیش‌بینی قیمت برق در بازارهایی که نحوه منافعه برق آنها به مانند بازار برق ایران بر اساس مناقصه<sup>۳</sup> PAB می‌باشد نسبت به مناقصه یکنواخت<sup>۴</sup> بسیار بیشتر است. دلیل این امر آن است که برخلاف مناقصه یکنواخت که قیمت تمام شده بازار بطور یکسانی بین برندهای در مناقصه توزیع می‌شود، در مناقصه نوع PAB هر شرکت‌کننده در مناقصه بازار براساس میزان قیمت پیشنهادی خود در صورت برنده شدن وجه دریافت می‌نماید. بر این اساس پیش‌بینی قیمت در این نوع مناقصه نقش تعیین کننده‌ای در استراتژی پیشنهاد قیمت خواهد داشت.

<sup>۱</sup>-Contract for Difference

<sup>۲</sup>-Marginal Clearing Price

<sup>۳</sup>-Pay-as-Bid Auction

<sup>۴</sup>-Uniform Auction

ابزاری جهت پشتیبانی تصمیم‌گیری و شبیه‌سازی بازار طراحی شده است. در مرجع [11] از محیط نرم‌افزاری MATLAB به دلیل قابلیت بالا در محاسبات ماتریسی جهت ایجاد یک محیط شبیه‌سازی بازار برق استفاده شده که در بازار برق استرالیا نیز پیاده سازی شده است.

علی‌رغم تحقیقات مختلفی که در زمینه پیش‌بینی قیمت برق در حال انجام است، مسأله پیش‌بینی پذیری و تحلیل شرایطی که بر این فرآیند تصادفی حاکم است کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله مسأله پیش‌بینی پذیری قیمت برق به عنوان یک فرآیند تصادفی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدینهی است شناخت بیشتر فرآیند می‌تواند در زمینه‌های مختلفی مانند انتخاب روش پیش‌بینی مناسب و برآوردهی از حداکثر خطای پیش‌بینی مفید واقع شود. همچنین به کار بستن تکنیکهایی جهت کاهش ریسک ناشی از پیش‌بینی‌نایپذیری در برنامه‌ریزی‌های مختلف، تنها با شناخت بیشتر فرآیند و برآورد شاخص‌های پیش‌بینی پذیری میسر است.

در این راستا بخش بعدی مقاله به تحلیل مسأله پیش‌بینی قیمت برق اختصاص یافته است. در بخش سوم یک شاخص مفهومی، ساده و کارآمد جهت اندازه‌گیری پیش‌بینی پذیری قیمت برق ارائه می‌گردد و به تحلیل پیش‌بینی پذیری فرآیندهای انرژی مصرفی و قیمت برق پرداخته می‌شود. نگاهی گذرا به روش‌های پیش‌بینی در بخش چهارم صورت می‌پذیرد. بخش انتهایی نیز به جمع‌بندی و ارائه نتایج حاصل از این تحقیق می‌پردازد.

## ۲- بررسی مسأله پیش‌بینی قیمت برق

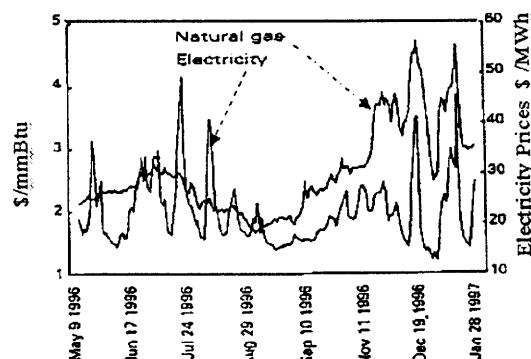
از دیدگاه شرکت کنندگان در بازار، پیش‌بینی قیمت برق از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. استراتژی پیشنهاد قیمت فروشندهای، برنامه مدیریت مصرف خریداران و برآورد بودجه شرکت‌ها از جمله مواردی است که نیاز میرم به پیش‌بینی قیمت برق را از دیدگاه‌های مختلف مورد توجه قرار می‌دهد. علاوه بر کاربرد پیش‌بینی قیمت در افق‌های زمانی کوتاه مدت در بازه بلند مدت نیز قراردادها به پیش‌بینی نیاز

عوامل تأثیرگذار در پیش‌بینی قیمت سرق را می‌توان به ذر گروه عملده تقسیم بندی نمود:

۱. عوامل عینی<sup>۱</sup> شامل: میزان تقاضا، قیمت سوخت، آب و هوا و ...
۲. عوامل ذهنی<sup>۲</sup> شامل: رفتار بازیگران در بازار و ... در تحقیقات صورت گرفته در سال‌های اخیر عمدتاً جهت پیش‌بینی عوامل عینی از روش‌های رگرسیون مانند: روش‌های مبتنی بر سری‌های زمانی و شبکه‌های عصبی استفاده شده است. پیش‌بینی عوامل ذهنی نیز به کمک روش‌های هوشمند مانند: روش‌های مبتنی بر سیستم‌های چندعاملی<sup>۳</sup>، نظریه بازی و ... صورت پذیرفته است. با توجه به طبیعت پیچیده رفتار بازیگران در بازار و نیز خطاهای موجود در پیش‌بینی تقاضا و ...، قیمت برق کمیتی با ماهیت تصادفی است و به عنوان یکی از مهمترین عوامل در تصمیمه‌گیری‌های مختلف بایستی پیش‌بینی شود.

**۳- تحلیل پیش‌بینی پذیری قیمت برق در بازار رقابتی**  
تجزیه و تحلیل پیش‌بینی پذیری یک سیگنال به معنی تعیین درجه آشفتگی آن می‌باشد. جهت بررسی این موضوع، روش‌های مختلفی در مقالات که نوعاً جهت بررسی مساله پیش‌بینی پذیری قیمت سهام استفاده شده است، مطرح شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش دیاگرام‌های فضای فازی<sup>۴</sup>، روش نمای لیاپانوف<sup>۵</sup>، بعد همبستگی<sup>۶</sup> و روش درجه فرکتالی فرآیند اشاره کرد[۱۴-۱۵]. در این مقاله یک روش مفهومی، ساده و کارآمد را جهت پیش‌بینی پذیری مطرح می‌کنیم. یکی از کمیت‌هایی که می‌تواند در شناسایی خواص یک سری زمانی مؤثر واقع شود، ضریب خود همبستگی نمونه می‌باشد. محاسبه این ضرایب می‌تواند الگوی احتمالی که فرآیند را تولید می‌کند، تا حدودی تبیین نماید. شبیه به

نگاهی به پیشینه کوتاه مدت بازارهای رقابتی برق در کشورهای مختلف جهان نشان می‌دهد که قیمت برق در بازارهای مختلف از نوسانات بسیار زیادی برخوردار می‌باشد و این امر توجه به عوامل تأثیرگذار و نیز بررسی سیگنال قیمت را بیش از پیش در درجه اهمیت قرار می‌دهد. بطوریکه نوعی بدنام شده‌اند. حتی وقتی که با قیمت‌های گاز طبیعی که ناپایدارترین سیگنال قبل از سیگنال قیمت برق بودند، مقایسه می‌شوند باز هم بی‌نظم به نظر می‌رسند. شکل ۲ قیمت نقطه‌ای روزانه برق جنوب امریکا را با قیمت نقطه‌ای گاز طبیعی مقایسه نموده و اختلافات موجود در نوسانات قیمت‌ها را نشان می‌دهد[12].



شکل ۲: قیمت نقطه‌ای روزانه برق در برابر

قیمت نقطه‌ای گاز طبیعی

مهمنترین ویژگی‌هایی که از بررسی سری‌های قیمت برق در بیشتر بازارهای رقابتی برق مشاهده گردیده است را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود[13]:

- فرکانس بالا
- میانگین و واریانس متغیر
- تغییرات فصلی چندگانه
- اثر تقویم (تعطیلات آخر هفته و رسمی)
- ناپایداری و نوسان بالا
- درصد بالای قیمت‌های غیر معمول (عمدتاً در دوره هایی که تقاضا افزایش می‌باید)

<sup>۱</sup>- Objective Factors  
<sup>۲</sup>- Subjective Factors  
<sup>۳</sup>- Multi Agent Systems  
<sup>۴</sup>- Phase Space Diagrams  
<sup>۵</sup>- Lyapunov Exponent  
<sup>۶</sup>- Correlation Dimension

با توجه به تعریف ضریب خود همبستگی تعریف شده با اساس رابطه (۴) می‌توان نتیجه گرفت که هرچه همبستگی بین سیگنال در لحظه  $t$  با گذشته آن بیشتر باشد، ضریب خود همبستگی بزرگتر است و بر عکس اکنون برای مقایسه پیش‌بینی پذیری دو فرآیند  $X_1$  و  $X_2$  با استفاده از ضریب خود همبستگی در این مقاله شاخص زیر معرفی می‌گردد. فرض بر این است که برای هر دو فرآیند  $n$  مشاهده در دسترس می‌باشد.

$$I_{X_1, X_2}(m) = \frac{\sum_{K=1}^m \rho_K^2(X_1)}{\sum_{K=1}^m \rho_K^2(X_2)} \quad (5)$$

که در این رابطه  $\rho_K(X_i)$  ضریب خود همبستگی فرآیند  $i$  ( $i = 1, 2$ ) می‌باشد که از رابطه (۴) محاسبه می‌شود و  $m$  تعداد تأخیرهایی است که در مقایسه پیش‌بینی پذیری دو فرآیند مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به رابطه (۴) مقدار  $m$  بایستی در مقایسه با  $n$  یعنی تعداد مشاهدات کوچک می‌باشد. شاخص  $I$  بطور مفهومی واپسگردی نسبی دو فرآیند به مشاهدات گذشته (تا  $m$  مشاهده قبلی) را نشان می‌دهد. بر این اساس هرچه شاخص  $I$  بزرگتر باشد، پیش‌بینی پذیری فرآیند  $X_1$  در مقایسه با فرآیند  $X_2$  آسان‌تر می‌باشد. به عبارت دیگر بزرگتر بودن شاخص  $I$  واپسگردی بیشتر فرآیند  $X_1$  نسبت به گذشته خود (در مقایسه با فرآیند  $X_2$ ) می‌باشد.

اکنون برای بررسی مسئله پیش‌بینی پذیری قیمت برق در مقایسه با پیش‌بینی پذیری تقاضای برق، از اطلاعات ساعتی واقعی قیمت برق و میزان تقاضا در ماه ژانویه سال ۲۰۰۴ میلادی بازار New England، استفاده شده است. در این خصوص ابتدا ضریب خود همبستگی برای دو فرآیند قیمت و تقاضای برق محاسبه می‌گردد. در شکل ۳ قیمت (LMP<sup>۱</sup>) و در شکل ۴ میزان تقاضا در ماه ژانویه سال ۲۰۰۴ نشان داده شده است.

ضریب همبستگی که بین دو متغیر تصادفی طبق رابطه زیر تعریف می‌شود، می‌توان در یک سری زمانی نیز ضرایب همبستگی بین مشاهدات متوالی را تعریف نمود:

$$\rho = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

بدین منظور کافی است برای  $n$  مشاهده از یک سری زمانی،  $n-1$  جفت مشاهده بصورت  $(x_1, x_2), (x_2, x_3), \dots, (x_{n-1}, x_n)$  را در نظر بگیریم. با در نظر گرفتن درایه اول هر زوج به عنوان متغیر اول و درایه دوم به عنوان متغیر دوم می‌توان ضریب همبستگی بین  $x_i$  و  $x_{i+1}$  را به شکل زیر تعریف نمود:

$$\rho_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x}(1))(x_{i+1} - \bar{x}(2))}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x}(1))^2 \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - \bar{x}(2))^2}} \quad (2)$$

که در این رابطه  $\bar{x}(2) = \frac{\sum_{i=2}^n x_i}{n-1}$  و  $\bar{x}(1) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_i}{n-1}$  ترتیب میانگین  $n-1$  مشاهده اول و میانگین  $n-1$  مشاهده آخر می‌باشند. برای مقادیر بزرگ  $n$  رابطه (2) را می‌توان بصورت زیر نوشت:

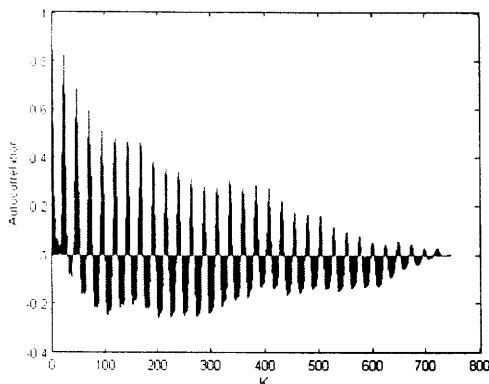
$$\rho_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+1} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{که در آن میانگین کل می‌باشد.}$$

به طریق مشابه می‌توانیم ضریب همبستگی (یا به عبارت بهتر ضریب خود همبستگی) بین مشاهداتی که با هم فاصله زمانی دارند را برای مقادیر بزرگ  $n$  تعریف کنیم  $[16] (K \leq n/4)$

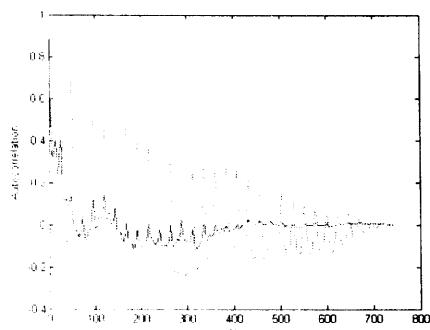
$$\rho_K = \frac{\sum_{i=1}^{n-K} (x_i - \bar{x})(x_{i+K} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

<sup>۱</sup> - Locational Marginal Price



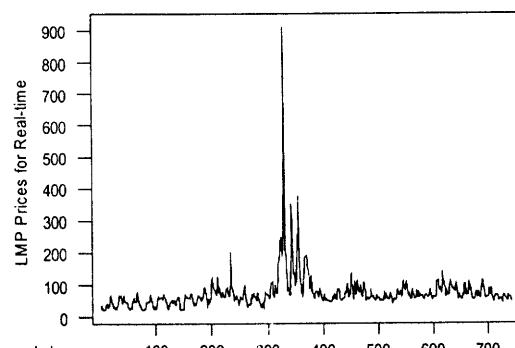
شکل ۶: ضریب خود همبستگی برای تقاضای ساعتی

از مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ ملاحظه می‌شود که مقادیر ضرایب خود همبستگی برای داده‌های فرآیند تقاضا بیشتر از مقادیر متناظر همان داده در فرآیند قیمت برق می‌باشد. جهت وضوح بیشتر شکل ۷ مقادیر ضرایب خود همبستگی برای این دو فرآیند را بطور همزمان نشان می‌دهد.

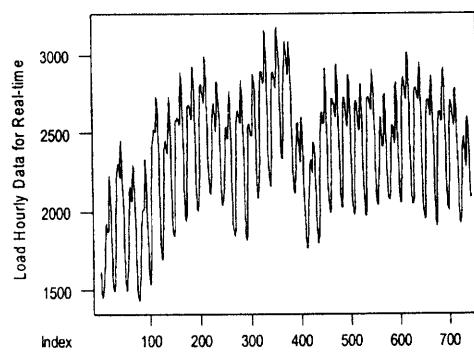


شکل ۷: مقایسه ضرایب خود همبستگی

مقایسه این دو فرآیند کاملاً منطقی است. چرا که هم تعداد داده‌ها یکسان می‌باشد و هم دامنه ضرایب خود همبستگی برای هر دو سیگنال بین ۱ و -۱ است. بر این اساس پیش‌بینی سیگنال قیمت برق با توجه به شاخص معرفی شده از پیش‌بینی سیگنال تقاضا به وضوح مشکل‌تر می‌باشد. شکل ۸ شاخص  $I$  را برای مقادیر مختلفی از پارامتر  $m$  نشان می‌دهد ( $X_1$ : قیمت برق و  $X_2$ : تقاضا).

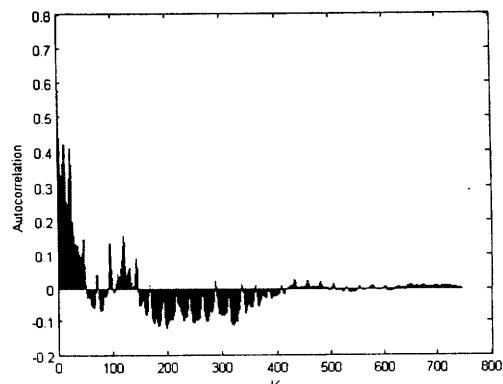


شکل ۲: قیمت برق در ماه ژانویه سال ۲۰۰۴



شکل ۴: تقاضا در ماه ژانویه سال ۲۰۰۴

در شکل‌های ۵ و ۶ نمودار مقادیر ضریب خود همبستگی به ترتیب برای فرآیندهای قیمت برق و میزان تقاضا مشاهده می‌شود.



شکل ۵: ضریب خود همبستگی برای قیمت

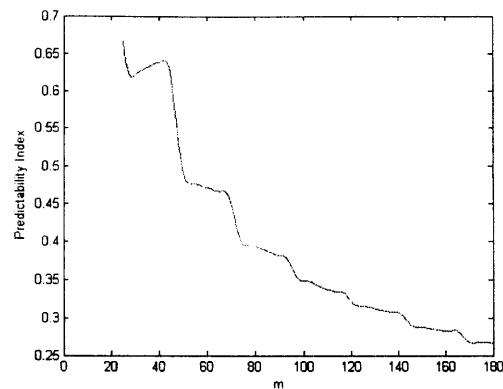
در تمامی این مدل‌ها از یک طرح بازگشته جهت پیش‌بینی استفاده شده است.

بطور کلی چون روش‌های مبتنی بر سری‌های زمانی نویعی برآش منحنی انجام می‌دهند، هر چه تعداد داده‌های قبلی کمتر باشد و در مقایل داده‌های پیش‌بینی و فاصله پیش‌بینی آنها از داده‌های اصلی بیشتر باشد دقت پیش‌بینی برای هر نوع سیگنال و سری زمانی کم و کمتر می‌شود. با توجه به شرایط فرآیند قیمت برق، بنابراین برای رسیدن به پیش‌بینی دقیق توسط روش‌های فوق داشتن اطلاعات آماری فراوان از پیشینه سیگنال ضرورت بسیاری داشته، علاوه بر آن دقت این روش برای سیگنال قیمت برق که نوعاً روند افزایشی دارد و فرآیندی غیر ایستاد (میانگین ثابتی ندارد)، جهت پیش‌بینی در بلندمدت کارساز نمی‌باشد.

از شبکه‌های عصبی مصنوعی که در واقع بر مبنای رگرسیون غیرخطی کار می‌کنند بطور وسیعی جهت پیش‌بینی بار سیستم‌های قدرت استفاده شده است. نتایج حاصل از این بررسی‌ها حکایت از دقت بالای این روش دارد. اخیراً نیز تحقیقات وسیعی با استفاده از این روش در پیش‌بینی قیمت های برق شده است. به عنوان مثال، برای بازار برق UK در مرجع [14] از این روش جهت پیش‌بینی قیمت در بازه کوتاه مدت و در مرجع [8] از عوامل عینی به عنوان ورودی جهت پیش‌بینی MCP (قیمت نهایی بازار) استفاده شده است.

استفاده از شبکه‌های عصبی با آموزش پس انتشار خطأ (BP) در پیش‌بینی قیمت برق به تابع مورد استفاده محققین قرار گرفته است. با این وجود، در طولانی مدت میزان انحراف و خطای محاسباتی بسیار بالایی جهت پیش‌بینی قیمت برق خواهد داشت. با استناد به اینکه قیمت برق از نوسانات شدیدی برخوردار است، رعایت دو نکته در بکارگیری شبکه‌های عصبی لازم و ضروری است:

1. چون شبکه‌های عصبی بر اساس داده‌ها و اطلاعات ورودی آموزش می‌بینند، تفکیک ایام هفته و روزهای خاص و حتی فصول مختلف در ایجاد مدلی جداگانه جهت آموزش شبکه و پیش‌بینی قیمت برق مهم می‌باشد.



شکل ۸: شاخص پیش‌بینی پذیری

همانطور که شکل ۸ نشان می‌دهد، شاخص مقایسه‌ای پیش‌بینی پذیری دو فرآیند همواره کوچکتر از واحد بوده و با افزایش  $m$  بطور نسبتاً سریعی کاهش می‌یابد. این امر می‌بین این نکته است که فرآیند تصادفی قیمت برق در مقایسه با تقاضا کمتر وابسته به گذشته خود می‌باشد.

#### ۴- روش‌های پیش‌بینی قیمت برق

روش‌های مختلفی که در ارتباط با پیش‌بینی قیمت برق در بازارهای رقابتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، بسته به افق زمانی مورد نظر به سه دسته تقسیم می‌شوند، که شامل: روش‌های مبتنی بر سری‌های زمانی، شبکه عصبی و شبیه‌سازی بازار می‌باشند.

بطور کلی یک سری زمانی مجموعه مشاهداتی است که بر حسب زمان مرتب شده باشند. تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی متکی به وضعیت مدل فرض شده جهت نشان دادن داده‌ها می‌باشد. که با توجه به دقت بررسی مشخصات اصلی سری‌های ساعتی قیمت، مدل در نظر گرفته شده متفاوت می‌باشد. در این خصوص در سالهای اخیر تحقیقات صورت گرفته حاکی از آن دارد که عمده‌ترین مدل‌هایی که بر اساس سری‌های زمانی جهت پیش‌بینی روزانه قیمت‌های برق مورد استفاده قرار گرفته‌اند، عبارتند از [5-13]:

۱. مدل رگرسیون دینامیکی
۲. مدل تابع انتقال ARIMA
۳. مدل

خریداران و فروشنندگان انرژی از جمله وظایف مهم و تعیین کننده نهاد تنظیم در بازار می‌باشد. به دلیل اینکه فضای رقابتی بازار برق را چندین عامل با رفتارهای متفاوت تشکیل می‌دهد یکی از روشهای مورد استفاده در شبیه‌سازی بازار برق استفاده از تئوری سیستم‌های چند‌عاملی است.

### ۵-نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله مسأله پیش‌بینی قیمت برق در بازارهای انرژی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این راستا شاخصی جهت مقایسه فرآیندها از حیث پیش‌بینی پذیری معرفی گردید. با توجه به مطالعه‌ای که در خصوص بررسی پیش‌بینی پذیری قیمت برق در ماه ژانویه سال ۲۰۰۴ میلادی بازار New England و مقایسه‌ای که در این بین با تقاضای همان ماه صورت گرفته شده است، نتیجه می‌گیریم که پیشینه قیمت برق برخلاف میزان تقاضا در پیش‌بینی قیمت برق آنچنان تأثیرگذار نخواهد بود. لذا استفاده از روشهای مبتنی بر رگرسیون از قبیل ARIMA و شبکه‌های عصبی، که بر گذشته فرآیند استوارند، از دقت خوبی برخوردار نمی‌باشد و موثرترین روشهای در این خصوص روشهای مبتنی بر شبیه‌سازی بازار برق می‌باشد.

بر این اساس با توجه به نوسانات قیمت برق و پیش‌بینی بسیار دشوار آن، بهتر است در بهینه‌سازی‌های لازم در فرآیند قیمت‌دهی، خطاهای ناشی از آن را با کنترل میزان ریسک در استراتژی قیمت‌دهی جبران نمود.

همچنین انتخاب روش مناسب جهت پیش‌بینی قیمت برق از دیدگاه‌های مختلف شرکت کنندگان در بازار بسیار حائز اهمیت است. به خصوص در کشورهایی مانند ایران که مناقصه بازار برق آن بر اساس مناقصه PAB است.

تحقيق انجام شده در ابتدای راه است و در ادامه تحقیق امیدواریم بتوانیم روشهای پیش‌بینی قیمت برق را بصور کمی و با توجه به شاخص‌های پیش‌بینی پذیری مورد نقد و بررسی قرار دهیم. همچنین بررسی اثر قوانین و نوع مناقصه (Auction) در پیش‌بینی پذیری قیمت برق می‌تواند مورد مطالعه قرار گیرد.

۲. چون ساختار شبکه‌های عصبی و آموزشی که شبکه می‌بیند بر اساس اطلاعات ورودی است، اگر از این روش برای پیش‌بینی بلند مدت و حتی میان مدت استفاده شود، با توجه به نوسانات شدید قیمت برق در بازار رقابتی، آموزش شبکه به هنگام رسیدن به اولین ضربه در سیگنال قیمت به سمت آن میل می‌کند، به این ترتیب دقت پیش‌بینی بسیار پایین می‌آید.

با توجه به اینکه روشهای رگرسیون، نمی‌توانند دقتشان را جهت پیش‌بینی قیمت برق از حدی بالاتر ببرند (چون سیگنال قیمت برق اساساً خیلی به گذشته بستگی ندارد) نیاز به یک روش پویا که جامعیتی به لحاظ دوره‌های مختلف پیش‌بینی داشته باشد در پیش‌بینی قیمت برق کاملاً احساس می‌شود. بر این اساس از مهمترین روشهای ابزارهای کارآمد در بازار برق، روشهای مبتنی بر شبیه‌سازی بازار می‌باشد، که چه از دیدگاه تصمیم گیری و چه پیش‌بینی هم در بازه کوتاه مدت و هم بلند مدت کارایی بسیار بالای دارند.

این روش قادر به گرفتن و تصحیر حرکت‌های پویای بازار شامل حرکت‌هایی که به دلیل رفتارهای استراتژیکی است، می‌باشد. به ویژه، این روش اطلاعات موقتی از رفتار بازار فراهم می‌آورد، که فهم بهتری از رفتار بازار، توانایی شرکت‌کنندگان بازار در بکارگیری تصمیمات عاقلانه در بازارهای کوتاه مدت و طولانی مدت مانند استراتژی‌های قیمت‌دهی روزانه<sup>۱</sup> را بالا می‌برد.

در بازارهای برق، شبیه‌سازی بازار برای نهادهای مرتبط با بازار بسیار حائز اهمیت است، چرا که تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به کمک این ابزار می‌توانند تصمیم گیری‌های مختلف را تجزیه و تحلیل نمایند. بطوریکه از دیدگاه فروشنندگان بررسی رفتار رقبا و از دیدگاه خریداران ارائه قیمت مناسب و بررسی سیاست‌های مدیریت مصرف‌امکان‌پذیر می‌گردد. محیط شبیه‌سازی از نقطه نظر نهاد تنظیم نیز به منظور تحلیل تأثیر تصمیمات آنها بسیار مهم است. به عنوان مثال ایجاد تعرفه‌ها یا قوانین و تعیین و تعریف روابط بین

- ۱ - Daily Bidding Strategies

- 10- Isabel Praca, Carlos Rameose and Zita A. Vale, "Competitive electricity markets simulation to improve decision making," IEEE Porto Power Tech Conf., Sept. 2001.
- 11- Widjaja, M.; Morrison, R. E.; Sugianto, I., F.; "Electricity market simulation using MATLAB," Department of Electrical & Computer Systems Engineering Monash University, Australia.
- 12- Emma Hoy, Samer Takriti and Lilian Wu, "Divide and conquer a threshold model," Energy and Power Risk Management, Vol.2, No.10, March 1998.
- 13- Nogales, F.J.; Contreras, J.; Conejo, A.J.; Espinola, R.; "Forecasting next-day electricity prices by time series models," IEEE Trans. on Power Syst. Vol. 17 , No. 2 , May 2002, pp.342 – 348.
- 14- Wang, A.; Ramsay, B.; "Prediction of system marginal price in UK power pool using neural networks," Proc. of IEEE International Conf. on Neural Networks 1997, Vol. 4, pp.2116-2120.
- 15- Hua, B.; and Lam, K.P. "Analysis and prediction for the growth enterprise market (GEM)," Proc. of ICMIT 2000, pp.36-40.
- 16- The Analysis of Time Series: An Introduction, Translated by Dr. A. Niroumand & Dr. A. Bozorgnia, Ferdowsi University of, 1372.

#### ۶- مراجع

- 1- Hrist, E.; Kirby, B.; "Creating competitive markets for ancillary services," ORNL/Con-448, Oak Ridge National Laboratory, Oka Ridge, TN, October 1997.
- 2- Conejo, A.J.; Conteras, J.; Arroyo, J.M.; de la Torre, S.; "Optimal response of an oligopolistic generating company to a competitive pool-based electric power market," IEEE Trans. Power Syst., to be published.
- 3- Gross , B. O.; Galiana, F. D.; "Short-term load forecasting," Proc. IEEE, Vol. 75, No. 12, pp. 1558-1573, Dec. 1987.
- 4- Hagan, M. T.; Behr, S. M.; "The time series approach to short term load forecasting," IEEE Trans. Power Syst, Vol.2 , pp.785-791, Aug. 1987.
- 5- Contreras, J.; Espinola, R.; Nogales, F.J.; Conejo, A.J.; "ARIMA models to predict next-day electricity prices," IEEE Trans. on Power Syst., Vol. 18 , No. 3 , Aug. 2003, pp.1014 – 1020.
- 6- Hippert, H. S.; Pedreira, C. E.; Souza, R. C.; "Neural networks for short-term load forecasting: A review and evaluation," IEEE Trans. Power Syst., Vol.16 ,pp.44-55, Feb.2001.
- 7- Ramsay, B.; Wang, A. J.; "A neural networks based estimator for electricity spot-pricing with particular reference to weekend and public holidays," Neurocomputing, Vol.23, pp.47-57, 1998.
- 8- Szkuta, B. R.; Sanabria, L. A.; Dillon, T. S.; "Electricity price short-term forecasting using artifical neural networks," IEEE Trans. on Power Syst., Vol.14, pp.851-857, Aug.1999.
- 9- Nicolaisen, J. D.; Richter Jr, C. W.; Sheble, G. B.; "Price signal analysys for competitive electric generation companies," Proc. Conf. Elect. Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, London, U.K., Apr. 4-7, 2000, pp.66-71.