

بررسی مقایسه‌ای مدل‌های پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت در بازار برق ایران

^۱ داود منظور^{*}، ^۲ مهدی قائمی اصل، ^۳ احمد نوروزی

چکیده

در دهه‌های اخیر رقابتی شدن بازار برق، مقوله قیمت را به یک عنصر اساسی در تصمیم‌گیری‌های بازیگران در چهارچوب صنعت برق تبدیل نموده است و به تبع آن بخش خصوصی به عنوان سرمایه‌گذار اصلی در این حوزه نیازمند پیش‌بینی قیمت‌های آینده به منظور اتخاذ استراتژی مناسب و سازگار با روند کلی نظام بازار در راستای حفظ سهم خود از بازار و حفظ حاشیه سود می‌باشد. در چهارچوب تحلیل‌های اقتصادی، این هدف با ابزار مدل‌های اقتصاد سنجی محقق خواهد شد که اعتبار مدل یاد شده ناظر به کمینه‌سازی خطای پیش‌بینی در تطابق الگوی پیش‌بینی شده با واقعیت جاری است. پژوهش حاضر به بررسی مقایسه‌ای قدرت پیش‌بینی مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک و مدل آریما در افق کوتاه‌مدت با استفاده از داده‌های ساعتی قیمت برق در سالهای ۱۳۹۴-۹۵ پرداخته است. نتایج پژوهش، حاکی از آن است که در افق کوتاه‌مدت، شبکه‌های عصبی مصنوعی، خطای کمتری نسبت به دو الگوی دیگر در پیش‌بینی داشته و الگوریتم ژنتیک در جایگاه دوم قرار دارد. همچنین، الگوهای سری زمانی دارای بیشترین خطای در پیش‌بینی قیمت برق، با توجه به پیش‌بینی‌های درون نمونه‌ای را دارا می‌باشد. مجموع مربعات خطای در الگوی شبکه عصبی مصنوعی در داده‌های آموزش، اعتبار سنجی و آزمون، به ترتیب برابر $1473/443$ ، $1498/32$ و $1722/53$ و $11318/20$ و $7085/98$ و در الگوی سری زمانی برابر $34644/37$ می‌باشد.

تاریخ دریافت:
۱۳۹۷/۱/۳۰

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۷/۵/۲

کلمات کلیدی:
بازار برق،
پیش‌بینی قیمت،
سری‌های زمانی،
شبکه‌های عصبی،
الگوریتم ژنتیک.

۱. دانشیار، دانشکده اقتصاد، دانشگاه امام صادق(ع) (نویسنده مسئول)

۲. استادیار، دانشکده اقتصاد، دانشگاه خوارزمی

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد، دانشگاه امام صادق(ع)

۱. مقدمه

عدم قابلیت ذخیره‌سازی برق در شرایط فعلی که ناظر به بالا بودن هزینه‌های آن بوده و هنوز استفاده از چنین فناوری‌هایی در کشور توجیه اقتصادی پیدا نکرده است، برقراری توازن و تعادل میان عرضه و تقاضای این محصول را با جالش‌های مواجه ساخته است.

تعییر ساختار بازار برق از انحصار دولتی به بازار رقابتی و تأثیرپذیری قیمت از مکانیزم‌های عرضه تقاضا در این بازار، تصمیم‌گیری برای فعالان بازار در جهت افزایش سودآوری را با دشواری‌هایی مواجه ساخته است. یکی از مؤلفه‌های اساسی در فرآیند تصمیم‌گیری که نقش بسیار مهمی در نحوه

جهت‌گیری بازیگران بازار برق دارد، چشم‌انداز قیمتی این محصول در سطح بازار می‌باشد.

با توجه به این نکته که تعییر استراتژی بنگاه‌های تولیدی در افق بلند مدت، مستلزم تعییر ساختار فنی و تکنولوژیک دخیل در فرآیند تولید محصول می‌باشد، پیش‌بینی قیمت برق در افق بلند مدت در کنار مؤلفه‌های جانبی چون تحلیل‌های هزینه – فایده تعییر ساختار فنی فرآیند تولید، احتمال ظهور فناوری‌های نوین که استفاده از ساختار تولیدی فعلی را فاقد توجیه اقتصادی می‌نماید و...، به تولید کنندگان و فعالان بازار، جهت دھی می‌کند و با این نوع نگاه، صرفاً پیش‌بینی قیمت در افق بلند مدت، راهگشا نخواهد بود. اما در خصوص سودآوری بنگاه‌های تولیدی که در عرصه‌ی تولید برق یا تولید قطعات جانبی مرتبط با این فرآیند، مشغول به فعالیت هستند؛ پیش‌بینی قیمت برق در آینده و در افق کوتاه مدت، دید روشنی را برای تولید کنندگان در خصوص الگوی بهینه مواجهه با شرایط بازار به ارمغان خواهد آورد.

بدیهی است، روش‌هایی که بهترین و دقیق‌ترین پیش‌بینی‌های ممکن را در اختیار واحدهای تولیدی قرار دهد و ایشان را با سطح اطمینان بالاتری از آنچه که قرار است در آینده اتفاق بیفتند مطلع سازد، از اهمیت و محبوبیت بالاتری برخوردار خواهد بود. بنابراین، می‌بایست مدل‌سازی‌های لازم صورت پذیرد تا در گام‌های بعدی، کارا ترین مصدق این روش‌ها را جهت بهره‌برداری، به فعالان حوزه‌ی صنعت معرفی نمود.

تا کنون در مقام نظر و تئوری بدون درنظر گیری امکان عملیاتی‌سازی آن، دو الگوی متفاوت برای پیش‌بینی قیمت‌های برق ارائه شده است. الگوی اول، ناظر به روش‌های آماری از قبیل سری‌های زمانی بوده و الگوی دوم، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی مثل شبکه‌های عصبی

مصنوعی و الگوریتم ژنتیک می‌باشد. در نهایت، روش‌هایی بهینه خواهند بود که در واقعیت، بیشترین تطبیق را با شرایط موجود داشته باشد. پژوهشگران به این منظور، تاکنون معیارهای متفاوت و متنوعی را پیشنهاد کرده‌اند که در این میان می‌توان به میانگین مربعات خطأ، میانگین مربعات خطای نرمالیزه شده و ریشه میانگین مربعات خطأ، میانگین قدر مطلق خطأ و میانگین قدر مطلق درصد خطأ اشاره کرد. پژوهش پیش رو، در صدد است تا به مقایسه پیش‌بینی قیمت در بازار برق ایران با استفاده از مدل‌های مبتنی بر روش‌های آماری (مدل ARIMA^۱) و روش‌های هوش مصنوعی (مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی^۲ و الگوریتم ژنتیک^۳) پردازد. بر این اساس، بهمنظور جمع آوری اطلاعات از داده‌های سری زمانی شرکت مدیریت شبکه استفاده شده است (داده‌ها بر حسب ريال بر کیلووات ساعت می‌باشند). با توجه به ساختار بازار برق ایران که از نوع بازار روز قبل است، قیمت‌دهی ساعتی انجام می‌شود. بر این اساس، داده‌های تحقیق به صورت ساعتی، یک بازه دو ساله از ۱۳۹۴/۰۱/۰۱ تا ۱۳۹۵/۱۲/۲۹ را شامل می‌شود. برای پردازش اطلاعات نیز از نرم افزارهای EVIEWS نسخه ۱۰ و MATLAB نسخه 2010 استفاده شده است.

در الگوهای سری زمانی، محور تصمیم‌گیری، داده‌ها و معیارهای اطلاعاتی داده محور می‌باشد. همچنین لازم به توضیح است که تنظیم و طراحی یک مدل الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی، ماهیتی عامل‌بنیان داشته و بسته به نوع رویکرد محقق می‌تواند شکل‌های گوناگونی به خود بگیرد. در این مقاله، در مدل‌سازی شبکه عصبی از نگرش همت اصفهانی و همکاران (۲۰۱۵)^۴ و در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک از الگوریتم عامل‌بنیان چن و همکاران (۲۰۱۴)^۵ استفاده شده و در نهایت نیز قدرت پیش‌بینی این سه مدل، با معیار میانگین مربعات خطأ^۶ در یک پیش‌بینی درون نمونه‌ای مقایسه شده است.

در این تحقیق، پس از بررسی پیشینه پژوهش به بیان روش‌شناسی تحقیق و مبانی نظری سه روش مورد مطالعه در جریان تحقیق پرداخته شده است و پس از آن اجراء مدل و نتایج تحقیق مورد

-
1. ARIMA
 2. Artificial Neural Networks (ANN)
 3. Genetic Algorithm (GA)
 4. Mean Squared Error (MSE)

بحث و بررسی قرار گرفته است. بخش نهایی نیز به جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و همچنین مقایسه نتایج این مطالعه با مطالعات مشابه پرداخته است.

۲. پیشنهاد تحقیق

درودی و همکاران (۱۳۹۶) در مقاله "ارائه یک موتور پیش‌بینی مبتنی بر ترکیب اطلاعات جهت پیش‌بینی قیمت در بازارهای برق" یک روش ترکیبی ارائه می‌دهند تا روش یاد شده قادر باشد به صورت همزمان از مزیت‌های چند موتور پیش‌بین استفاده نماید. در روش پیشنهادی ایشان سه موتور پیش‌بین مقدماتی شبکه‌های عصبی مصنوعی چند لایه، سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی (ANFIS) و روش میانگین متحرک خودگردان (ARMA) پیش‌بینی‌هایی مستقل از قیمت بازار برق ارائه کرده‌اند. سپس یک الگوریتم ترکیب اطلاعات جدید ارائه شده است که این سه پیش‌بینی مستقل را با یکدیگر ترکیب نموده تا یک پیش‌بینی واحد از قیمت برق ارائه نماید. روش پیشنهادی از میزان خطای گذشته موتورهای پیش‌بین مقدماتی بازخورد گرفته تا میزان تاثیر آن‌ها را در پیش‌بینی نهایی تنظیم نماید. روش پیشنهادی در این تحقیق، بر روی داده‌های قیمت بازار اسپانیا اعمال شده‌اند تا کارایی آن ارزیابی شود. نتایج حاکی از آن است که روش پیشنهادی می‌تواند پیش‌بینی‌هایی ارائه دهد که از هرکدام از پیش‌بینی‌های موتورهای مقدماتی بهتر است.

رحیمی و ناظمی (۱۳۹۶) در مقاله‌ای تحت عنوان "پیش‌بینی قیمت برق در بازار ایران با استفاده از شبکه عصبی" با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون به پیش‌بینی قیمت برق پرداخته است. در این تحقیق از متوسط قیمت موزون، بار و تمیز فضول برای طراحی مدل استفاده شده است و نتایج حاکی از دقت و قدرت مدل دارد.

منظور و یادی پور (۱۳۹۵) در مقاله‌ای تحت عنوان "ارزیابی و پیش‌بینی نوسانات قیمت در بازار برق ایران به کمک مدل ARMAX-GARCH" با اجرای مدل خودگرسیون میانگین متحرک با مدل خودگرسیون میانگین شرطی تعیین یافته، برترین مدل برای برازش بازده و نوسانات قیمت‌های روزانه بازار برق در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۳۹۱ را معرفی نموده است. بر اساس این تحقیق، با شرایط فعلی بازار برق ایران مدل‌های استاندارد گارچ، بهترین شبیه سازی را در حوزه نوسانات قیمت برق ارائه می‌دهد. شایقی و قاسمی (۱۳۹۴)، در مطالعه خود تحت عنوان "پیش‌بینی قیمت روزانه برق با شبکه عصبی بهبود یافته مبتنی بر تبدیل موجک و روش آشوبناک جستجوی گرانشی" به طراحی مدلی مناسب با ساختار جدید

بازار برق نمودند. در مطالعه مذکور با طراحی و اجرای یک مدل از الگوریتم جستجوی گرانشی آشوبناک و شبکه عصبی بهبود یافته با تابع تبدیل موجک به تبیین و پیش‌بینی رفخار کوتاه مدت قیمت‌های متوسط روزانه نقدی در بازار برق ایران و بازارهای جهانی پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان از موفقیت الگوریتم انتخاباتی در مرتب سازی داده‌های تقسیم شده از تبدیل موجک است.

rstمنیا (۱۳۹۲) در پایان‌نامه‌ای تحت عنوان "پیش‌بینی قیمت متوسط موزون بازار برق ایران با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و شبکه‌های عصبی- فازی" به پیش‌بینی قیمت متوسط موزون بازار برق ایران در دو بازه اوج مصرف و کم باری و ارزیابی تأثیر درجه رقابت بر آن پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که درجه رقابت در بازار و استفاده از الگوهای مصرف متفاوت، بر قیمت‌ها اثرگذار بوده و مد نظر قرار دادن آن‌ها به افزایش قدرت مدل می‌انجامد. همچنین با توجه به ماهیت قیمت برق نتیجه شده است که شبکه‌های هوشمند قادرند قیمت برق را ردیابی کرده و آن را با یک دقت خوب پیش‌بینی نمایند.

منظور و صفاکیش (۱۳۸۸) در پژوهش خود تحت عنوان "پیش‌بینی قیمت برق در بازار رقابتی ایران با رویکرد مدل‌های سری زمانی" به پیش‌بینی قیمت برق در بازار ایران با استفاده از داده‌های سری زمانی قیمت‌های روزانه برق پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که با استفاده از مدل ARMA، متغیرهای تأخیری اول و هفت‌م به عنوان متغیرهای توضیحی مدل انتخاب شده‌اند. سپس با مشاهده‌ی نتایج آزمون LM GARCH برای ورود ناپایداری مشاهده شده از قیمت‌ها از مدل GARCH(1,1) استفاده و مشاهده می‌شود پسمندی مدل دارای الگوی خطای سفید و توزیع نرمال می‌باشد. همچنین بر اساس آماره‌های تعیین کننده قدرت پیش‌بینی مدل، مدل ارائه شده توانسته است مقادیر مشاهده شده قیمت برق را بهخوبی پیش‌بینی نماید.

کی‌نیا و بهرام‌پور (۲۰۱۷) در مقاله "یک الگوی پیش‌بینی جدید از قیمت و ناظمینانی مبتنی بر شبکه‌های عصبی بهینه برای بازارهای برق مقررات‌گذاری نشده" یک روش هوشمند ترکیبی جدید برای پیش‌بینی قیمت پیشنهاد داده‌اند. الگوی یاد شده را می‌توان نسخه‌ی پیشرفته الگوریتم اصلاح پارامترهای اصلی سیستم پیش‌بینی کننده قیمت دانست که این سیستم، مبتنی بر شبکه‌های عصبی چند لایه، به پیش‌بینی قیمت برق می‌پردازد. همچنین این روش با استفاده‌های از داده‌های مربوط به بازارهای شناخته شده برق، مورد آزمون قرار گرفته و اعتبار آن به واسطه این آزمون‌ها تأیید شده است.

قلی پور و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله‌ای تحت عنوان "پیش‌بینی قیمت برق با استفاده از شبکه‌های عصبی با الگوریتم تکرار آموزش بهبود یافته" دو نوآوری عمدۀ را تحت عنوان انتخاب جدید دو مرحله‌ای و یک الگوریتم جدید تکرار آموزش ارائه کردند. الگوریتم انتخاب، به حذف ورودی‌های نامعلوم و بی ارتباط بر مبنای تجزیه و تحلیل‌های مبتنی بر همبستگی پرداخته و همچنین الگوریتم تکرار آموزش، متشکل از دو شبکه‌ی عصبی است که در آن، خروجی اولین شبکه به عنوان ورودی شبکه دوم، ایفا ن نقش می‌کند.

گائو و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله " مقایسه مدل‌های آریما و شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی قیمت در بازار برق" مدلی را ارائه می‌کنند که قیمت‌ها را تا دو ماه آینده در بازار برق انگلستان، پیش‌بینی می‌کنند. نتایج تحقیق، حاکی از آن است که با معیار RMSE، مدل ARIMA(4,1,2)، دقیق‌تری در پیش‌بینی نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی با ۲۰ نورون و ۴ وقفه دارا می‌باشد.

عرب اسدی و همکاران (۲۰۱۳) در مقاله " پیش‌بینی قیمت کوتاه‌مدت برق" یک طرح پیش‌بینی قیمت کوتاه مدت برق را بر اساس یک مدل فضای وضعیت بازار برق مطرح می‌نمایند. فرآیند گاوس - مارکوف برای نشان دادن پویایی تصادفی بازار برق مورد استفاده قرار گرفته است. فیلترهای کالمن، دو روش مبتنی بر مدل فضای وضعیت به شمار می‌روند که به منظور برآوردن قیمت برق و مقایسه کیفیت برآوردهای وضعیت آنان به کار گرفته می‌شوند. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که معیارهای عملکرد برای فیلتر کالمن به صورت کلی برتر از معیارهای عملکرد برای فیلتر کالمن استاندارد هستند.

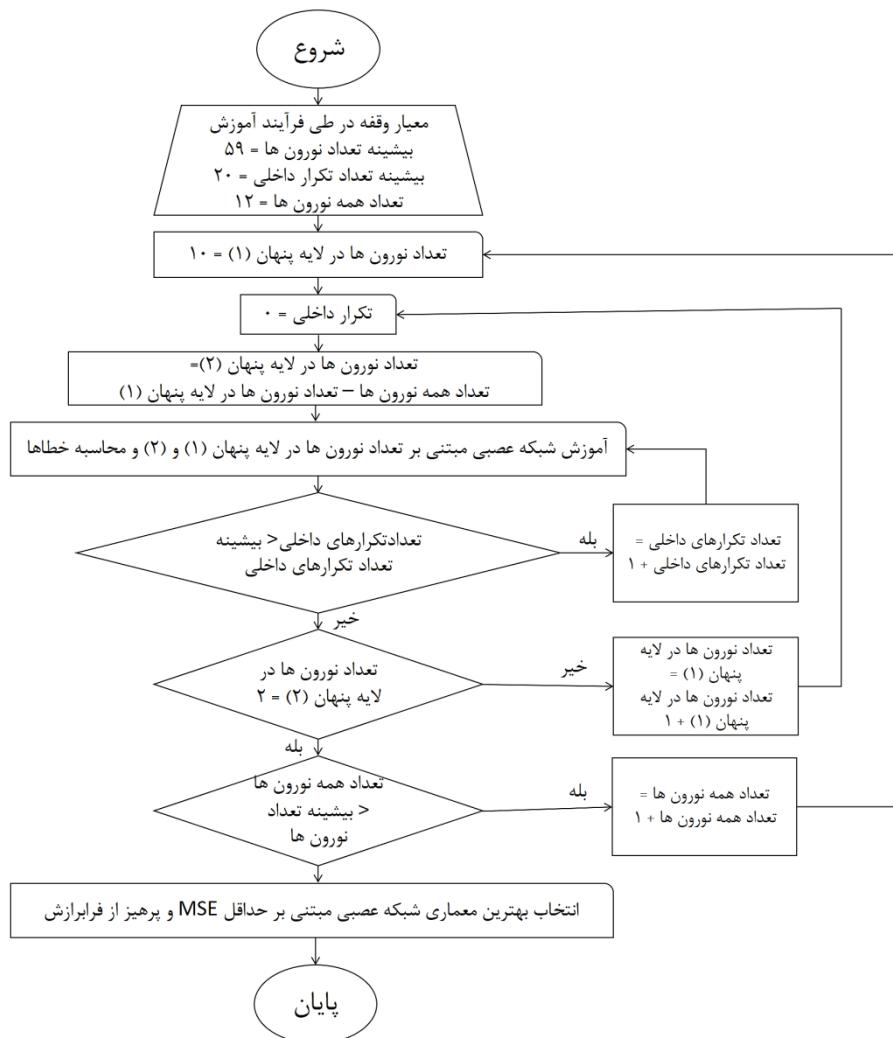
انصاری و جاویدی (۲۰۱۳) در مقاله‌ای تحت عنوان " مقایسه مدل‌های آریما و شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد استفاده در بازار برق ایران" یک مدل ترکیبی برای پیش‌بینی قیمت برق در روز آینده معرفی نموده است. نویسنده‌گان این مقاله، مدل معرفی شده را سابقاً نیز برای پیش‌بینی بار الکتریکی در شبکه برق خراسان، مورد استفاده قرار داده‌اند.

۳. روش‌شناسی تحقیق

۳-۱. شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی الگویی است که تحلیل داده‌ها و اطلاعات خود را از مغز انسان الهام گرفته است. این الگو از واحدهای یکپارچه‌ای تشکیل شده که آن را نورون می‌نامند و وظیفه‌ی تحلیل اطلاعات و داده‌های ورودی را عهده دار است. شبکه‌های عصبی چند لایه پرسپترون شامل لایه‌ی ورودی، لایه‌ی پنهان و لایه‌ی خروجی می‌باشد. نورون‌ها مهمترین جزء شبکه‌های عصبی می‌باشند. در هر نورون مقادیر ورودی، وزن‌دهی شده و با پارامتری تحت عنوان تورش^۱ جمع می‌شوند و مقدار به دست آمده، از یک عملگر میانی به نام تابع انتقال عبور می‌کند. تابع انتقال، وظیفه‌ی محاسبات و در اختیار نهادن خروجی بر اساس داده‌های دریافتی را عهده دار است (Hemmat Esfahani et al., 2015). شبکه‌های عصبی، ناظر به موقعیت به کارگیری می‌تواند در بردارنده‌ی تعداد لایه‌های متفاوتی باشد که هر لایه نیز متشکل از نورون‌های متعدد باشد که مجموعاً یک هدف واحد تحت عنوان پردازش داده‌ها و اطلاعات ورودی را دنبال می‌کند. مسیر کلی الگوریتم تعیین انتخاب بهترین معماری شبکه‌ی عصبی میتنی بر حافظ مقدار میانگین مجدد خطأ و پرهیز از فراپرازش^۲، در شکل ۱ ترسیم شده است.

1. bias
2. over fitting



شكل ۱. الگوریتم یافتن شبکه عصبی بهینه

۲-۳. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک که بر پایه انتخاب طبیعی و تئوری ژنتیک ساخته شده است، الگوریتم مناسبی در جهت حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی می‌باشد. اخیراً الگوریتم ژنتیک کاربرد گسترده‌ای در شاخه‌های مختلف علوم طبیعی و شاخه‌های مهندسی پیدا کرده است. الگوریتم ژنتیک به دنبال حل مسائل از

طریق پردازش مجموعه‌ای از رشته‌های متغیر کد گذاری شده به نام کروموزوم می‌باشد. هر کروموزوم نمایندگی یک کنثگر در فرآیند پردازش مدل را عهده دار بوده که مجموعه این کروموزوم‌ها ساختار کلی الگوریتم ژنتیک را شکل می‌دهند.

این الگو از سه بخش اصلی تشکیل شده است. بخش اول تحت عنوان مرحله انتخاب شناخته می‌شود. این مرحله که به انتخاب کروموزوم والد از میان کل جامعه می‌پردازد، کلیدی‌ترین نقش را در مدل ایفا می‌نماید. کروموزوم‌هایی که بیشترین مقادیر برآراش را داشته باشند، بالاترین احتمال انتخاب را دارا می‌باشند(Guangying chen et al., 2014). در پژوهش حاضر، برآراش جامعه داده‌ها مبتنی بر خطاهای پیش‌بینی الگوریتم ژنتیک به وسیله کروموزوم‌های کد گذاری شده صورت می‌پذید. مقادیر برآراش هر کروموزوم f_i طبق الگوی زیر محاسبه می‌گردد:

$$f_j = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n e_{i,j}^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

و همچنین عملگر انتخاب p_j برای هر عضو برابر مقدار زیر خواهد بود:

$$p_j = \frac{f_j}{\sum_{j=1}^m f_j}$$

که f_j مقدار مقادیر برآراش کروموزوم j ام، n تعداد داده‌های ورودی‌های شبکه عصبی مصنوعی و m بیانگر اندازه جامعه الگوریتم ژنتیک می‌باشد. $e_{i,j}$ نیز خطای شبکه عصبی مصنوعی i ام متناسب با کروموزوم j ام می‌باشد.

گام دوم تحت عنوان آمیزش^۱ شناخته می‌شود. در این مرحله دو کروموزوم‌های والد با یکدیگر ترکیب شده و با توجه به اطلاعات ژنتیکی موجود، کروموزوم‌های نوزاد را شکل می‌دهند.

1. crossover

در مرحله آمیزش، همه‌ی کروموزوم‌ها از مجرای عملگر آمیزش گذر می‌کند و این در حالی است که نقطه‌ی آمیزش به طور کاملاً تصادفی در دامنه‌ی کروموزوم‌ها تعیین می‌شود. بعد از مرحله‌ی شکل‌گیری، تناسب مقدار هر یک از کروموزوم‌های نوزاد محاسبه می‌گردد.

جهش در کروموزوم‌ها توسط تغییر در ژن‌های هر کروموزوم مناسب با عملگر جهش اجرایی می‌شود. در خلال این فرآیند، الگوریتم ژنتیک قادر خواهد بود که تمامی فضای در اختیار پارامترها را پوشش داده و از بهینه نشان دادن نقاطی که بهینه نسبی در یک همسایگی خاص هستند، جلوگیری می‌کند.

به طور کلی، فرآیند انتخاب ارزیابی گروهی را به سمت جمعیتی که بالاترین برازش را داشته باشد رهنمون می‌شود. آمیزش فرآیند الگوریتم ژنتیک با شتاب بیشتری به یک پاسخ بهینه می‌رساند و این در حالیست که جهش^۱ برای ایجاد تنوع جمعیتی به کار می‌رود. این سه مرحله اجزای اصلی الگوریتم در رسیدن به نتیجه مطلوب می‌باشند.

این مدل در حقیقت الگویی است که مبتنی بر یک شبکه عصبی پیش خور چند لایه عمل نموده و دارای فرآیند یادگیری مبتنی بر الگوریتم پس انتشار^۲ می‌باشد. فرآیند آن شامل سه مرحله‌ی جمع آوری داده، تشکیل و بهینه‌یابی در مدل شبکه و آزمون شبکه‌های بهینه شده می‌باشد. در بخش جمع آوری داده در شبکه‌های عصبی مصنوعی، داده‌های ورودی به دو بخش تقسیم می‌شوند: داده‌های آموزش و داده‌های آزمون. در این الگو، جمعیت پیشین برای آموزش مدل الگوریتم ژنتیک به منظور دستیابی به ساختار شبکه‌ای بهینه و حصول اطمینان از اعتبار پیش‌بینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در تشکیل و بهینه‌یابی مدل الگوریتم ژنتیک، پس از پشت سر گذاشتن مرحله اول، مدل وارد فرآیند پردازش داده‌های موجود خواهد شد. سازوکار تحلیلی مدل، شامل مراحل ذیل خواهد بود که در شکل ۲ نیز نشان داده شده است.

-
1. mutation
 2. back propagation



شکل ۲. الگوریتم ژنتیک به کار برده شده برای شبیه سازی قیمت برق

تمام داده ها در این فرآیند به مقادیری بین ۱-۰ و ۱ نرمال خواهند شد تا مقدار خروجی را بتوان به عنوان یک پیش‌بینی قابل اتقاء به شمار آورد. تعداد داده‌های ورودی طبق الگوی تعریف شده برای داده‌های آزمون و آموزش و همچنین انتخاب پارامترهای پایه‌ی مدل، با توجه به هدف الگو، معرف نورون‌ها در لایه‌های ورودی و خروجی و همچنین تعداد لایه‌های پنهان می‌باشد. پارامترهای ساختاری شبکه از قبیل: تعداد لایه‌های پنهان، نورون‌ها در هر لایه، الگوریتم یادگیری، نرخ یادگیری و تابع انتقال؛ مبتنی بر روش آزمون و خطای اصلاح می‌شود. پارامترهای متفاوت مورد آزمون قرار گرفته و بهترین گزینه از میان موارد بررسی شده انتخاب می‌گردد. ایجاد جمعیت اولیه و سایر پارامترهای

عملکرد از قبیل اندازه‌ی جمعیت و حجم عملگرهای انتخاب، آمیزش و جهش به منظور ایجاد الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی میزان وزن تورش‌های های متغیر صورت می‌گیرد که نهایتاً منجر به یافتن کروموزوم‌هایی با بیشترین مقدار برازش خواهد شد. اطلاعات از لایه ورودی به لایه پنهان و سپس به لایه خروجی با وزن‌های مشخص، تورش وتابع انتقال شبکه، منتقل می‌شود تا پس از طی این سه مرحله، نتیجه پیش‌بینی را به مشاهده بگذارد.

آموزش شبکه نیز شامل محاسبه میزان خطای بین خروجی مدل و میزان مورد انتظار می‌باشد. در صورتی که خطاهای مورد قبول باشند، الگوی نهایی شبکه شکل گرفته است و اگر این میزان غیر قابل قبول باشد، به قبل از مرحله تکثیر رفته و وزن‌ها و تورش‌ها را از طریق طی الگو در مسیر عکس اصلاح می‌کنیم. طبیعی است که این فرآیند تا زمانی که شبکه قادر به پیش‌بینی خروجی معین داشته باشد، ادامه خواهد داشت.

بعد از کمینه سازی میزان خطای مدل می‌بایست از حیث دقت و پایداری در شرایط مختلف مورد سنجش قرار گیرد که این سنجش با استفاده از قیمت برق که روی ۲۵٪ باقی داده‌ها که در فرآیند آموزش بلا استفاده بوده اند، صورت می‌گیرد.

۳-۳. مدل آریما

در مدل‌های سری زمانی از نوع $BJ_{t-\gamma}$ با استفاده از مقادیر گذشته از متغیر Y و جملات خطای استوکاستیک توضیح داده می‌شود. این الگو شامل دو فرآیند خودرگرسیون (AR) و میانگین متحرک (MA) می‌باشد.

فرآیند خودرگرسیون مرتبه اول AR(1) عبارتست از:

$$(Y_t - \delta) = \alpha_1(Y_{t-1} - \delta) + U_t$$

که در حالت کلی، فرآیند خودرگرسیون مرتبه p AR(p) را می‌توان به شکل ذیل نوشت:

$$(Y_t - \delta) = \alpha_1(Y_{t-1} - \delta) + \alpha_2(Y_{t-2} - \delta) + \dots + \alpha_p(Y_{t-p} - \delta) + U_t$$

که δ میانگین Y و U_t جمله اخلال خالص می‌باشد.

همچنین فرآیند MA(1) به فرم زیر می‌باشد:

$$Y_t = \mu + \beta_0 u_t + \beta_1 u_{t-1}$$

حالت کلی $MA(q)$ نیز به این شکل می‌باشد:

$$Y_t = \mu + \beta_0 u_t + \beta_1 u_{t-1} + \beta_2 u_{t-2} + \cdots + \beta_q u_{t-q}$$
 که μ یک مقدار ثابت و u جمله اخلاق می‌باشد.

نهایتاً الگوی کلی ARIMA را که ویژگی‌های هر دو فرآیند AR و MA را داشته باشد، می‌توان

به فرم زیر نوشت:

$$Y_t = \varphi + \alpha_1 Y_{t-1} + \beta_0 u_t + \beta_1 u_{t-1}$$
 که در آن φ یک عبارت ثابت می‌باشد.

برای پیش‌بینی قیمت برق با استفاده از روش باکس جکینز مدل ویژه‌ای را از میان مدل‌های اتورگرسیو (AR)، مدل‌های میانگین متحرک (MA) و در نهایت مدل‌های تلفیق شده اتورگرسیو-میانگین متحرک (ARIMA) انتخاب نمود. روش باکس - جنکینز عبارتست از برآوردن یک الگوی میانگین متحرک تلفیق شده با خودگرسیو به مجموعه داده‌ها و به دست آوردن الگوی ریاضی شرطی است. این روش توسط باکس و جنکینز معرفی شده است (Box, Jenkins; 1994).

اجرای الگوریتم باکس جکینز شامل ۵ مرحله می‌باشد که عبارتند از:

۱. مشخص نمودن مانایی سری زمانی مورد مطالعه.
۲. تعیین مقادیر واقعی p و q در $ARIMA(p, d, q)$
۳. برآورد مدل
۴. کنترل تشخیص
۵. پیش‌بینی

۴. اجراء مدل و نتایج تحقیق

۴-۱. شبکه‌های عصبی مصنوعی

در شبکه عصبی پرسپترون چند لایه پیشخور که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است، داده‌ها به طور تصادفی در سه گروه دسته بندی شده‌اند. ۸۰٪ داده‌ها در قالب داده‌های آموزش^۱، ۱۵٪ داده‌ها در قالب داده‌های اعتبارسنجی^۲ و ۵٪ داده‌ها در قالب داده‌های آزمون^۳ گروه بندی شده‌اند. در این شبکه، اولین لایه در بر دارنده ۷ نورون می‌باشد که از الگوی انتقال سیگموید^۴ تعیین می‌کند. لایه دوم نیز دارای ۵ نورون بوده که از الگوی انتقالی مشابه تعیین می‌کند. الگوی انتقال یاد شده را می‌توان به فرم زیر نمایش داد:

$$n_j = \frac{2}{1 + e^{2z}} - 1$$

که در آن n_j خروجی نورون j ام بوده و z نیز در این رابطه بصورت زیر تعیین می‌شود:

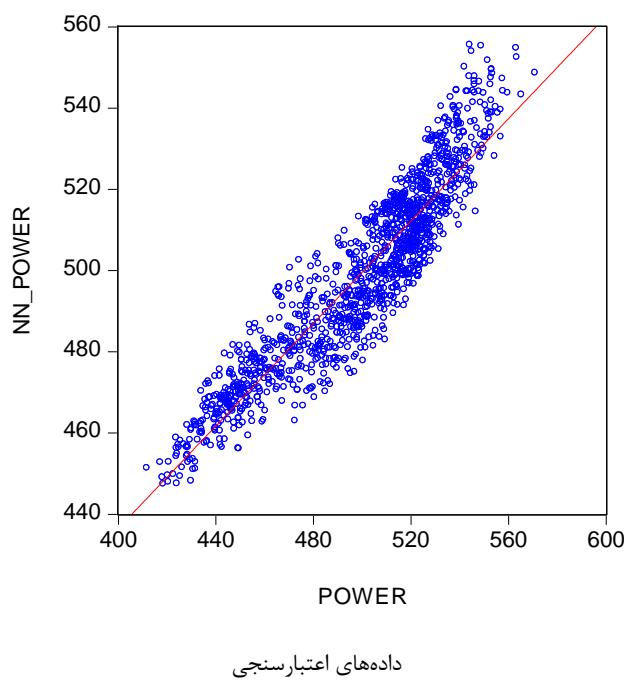
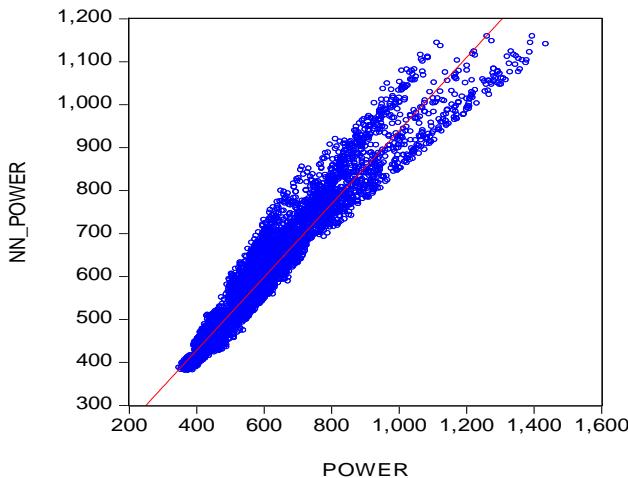
$$z = \sum_{i=1}^r w_{ij} p_i + b_j$$

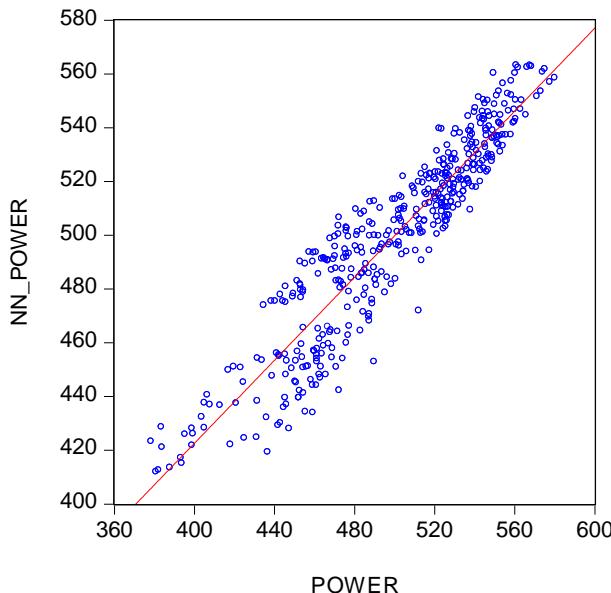
در این رابطه w_{ij} نشان دهنده وزنی ارتباط نورون‌های i ام با نورون‌های قبلی خود که در حقیقت نورون‌های J ام هستند، می‌باشد. p_i نیز بیانگر خروجی نورون I ام، b پارامتر تورش و r تعداد نورون‌ها در لایه قبلی می‌باشد.تابع انتقال خطی و تعداد داده‌های ورودی مدل نیز برابر ۸۷۸۳ است. در این شبکه در طی فرآیند یادگیری، بیشینه مقدار تکرار برابر ۲۰۰۰، بیشینه تعداد شکست در فرآیند ارزیابی اعتبار برابر ۲۰ بوده و میزان بازدهی شبکه نیز بصورت میانگین محدود خطای، بیان می‌شود. مقدار میانگین محدود خطای، طبق الگوی زیر محاسبه می‌شود.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - a_i)^2}{n}$$

-
1. train data
 2. validation data
 3. test data
 4. Tan-Sigmoid

که در آن n تعداد داده‌ها، t_i نشان دهنده مقادیر هدف i ام و a_i نیز بیانگر مقدار پیش‌بینی شده می‌باشد. همبستگی میان داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده قیمت برق در نمودار ۱ نشان داده شده‌اند.





نمودار ۱. همبستگی میان داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده قیمت برق

همانگونه که در نمودارهای فوق نیز قابل مشاهده است ارتباط نزدیکی میان داده‌های مشاهده شده و مقدار پیش‌بینی شده توسط فرآیند شبکه عصبی مصنوعی وجود دارد. در این فرآیند حداکثر میزان میانگین مربعات خطأ، برابر با $1762/63$ است که مربوط به داده‌های اعتبار سنجی است و این شاخص در خصوص داده‌های آموزش و داده‌های آزمون برابر با $1373/43$ و $1498/32$ است.

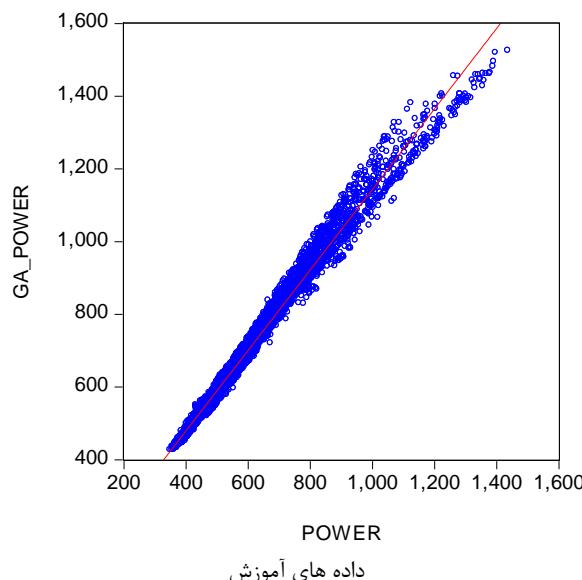
۴-۲. الگوریتم ژنتیک

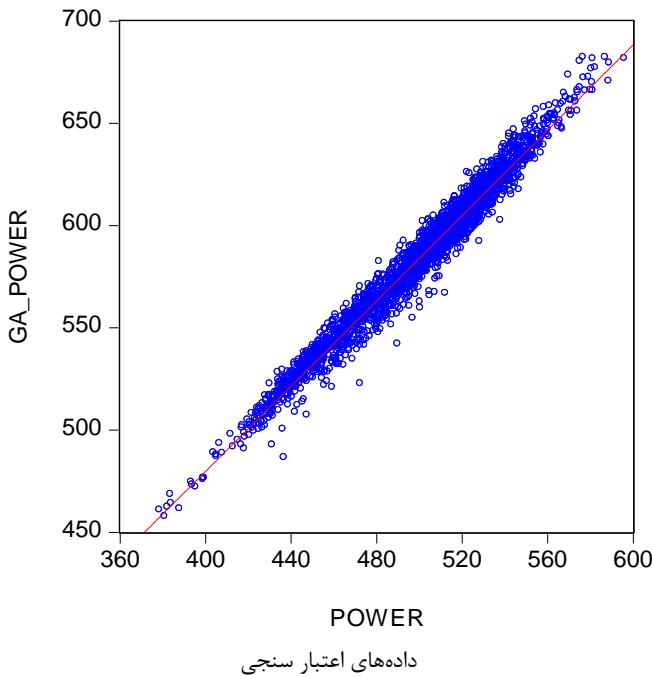
در پژوهش حاضر، مقادیر بهینه پارامترها از روش آزمون و خطأ به دست آمده که در جدول ۱ بهترین ترکیب از مقادیر بهینه پارامترها برای پیش‌بینی قیمت برق از طریق الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.

جدول ۱. بهترین ترکیب از مقادیر بھینه پارامترها برای پیش‌بینی قیمت برق از طریق الگوریتم ژنتیک

مقادیر	پارامترها
۲	تعداد لایه‌های پنهان
۵	تعداد نورون‌ها در لایه ۱
۵	تعداد نورون‌ها در لایه ۲
Logsig	تابع انتقال داده‌های لایه پنهان
Logsig	تابع انتقال داده‌های لایه پنهان ۲
Linear	تابع انتقال داده‌های لایه خروجی
0.0015	نرخ آموزش
MSE	خطای هدف
LM	الگوریتم آموزش
معیار سنجش در مقادیر آزمون R, MSE, AARE, E _{min} , E _{max} , APRE _{10%}	

نتایج فرآیند آموزش روی ۶۱۴۹ داده مدل نیز صورت پذیرفت و میانگین مربعات خطأ در خصوص داده‌های آموزش برابر با ۱۱۳۱۸/۲۰ است.





نمودار ۲. همبستگی میان داده های تجربی و مقادیر پیش بینی شده قیمت برق

همبستگی دادهها میان داده های مشاهده شده و مقادیر پیش بینی شده در وضعیت مناسبی قرار دارد. پس از آموزش مدل می بایست اعتبارسنجی را به منظور سنجش دقیق داده های آموزش شده انجام دهیم. فرآیند اعتبارسنجی نیز با استفاده از ۲۶۳۴ داده انجام شد که میانگین مربعات خطأ در خصوص داده های اعتبارسنجی برابر با $70.85/98$ است.

۴-۳. مدل آریما

به منظور مشخص نمودن مانایی سری مورد مطالعه از آزمون دیکی - فولر استفاده نموده که نتایج به دست آمده از آزمون یاد شده در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. نتایج آزمون دیکی-فولر

احتمال	T آماره	آماره آزمون مکمل دیکی-فولر
۰.۰۰۳۰	-۳.۷۹۶۷۵۵	آزمون مقادیر بحرانی
	-۳.۴۳۰۵۵۴	سطح٪ ۱
	-۲.۸۶۱۵۱۴	سطح٪ ۵
	-۲.۵۶۶۷۹۷	سطح٪ ۱۰

* فرض صفر: p دارای ریشه واحد است.

* متغیرهای برون زا: ثابت * طول وقفه ها: ۴۳ وقفه

همانطور که از جدول اخیر آزمون دیکی-فولر نیز مشخص است، این داده‌ها در سطوح ۱٪ و ۵٪ و ۱۰٪ مانا هستند. پس از مانا شدن داده‌ها، نوبت به تعیین تعداد وقفه بهینه برای AR و MA می‌رسد. تعداد وقفه‌ای را که برای هر کدام از مدل‌های اتورگرسیو و میانگین متحرک در نظر گرفته‌ایم دوازده وقفه است. اکنون می‌خواهیم بینیم که چه ترکیبی از این وقفه‌ها برای پیش‌بینی قیمت ساعتی برق بهینه است. روش کار نیز به این صورت است که از میان ترکیبات متفاوتی که بر حسب ترکیبات مختلف وقفه‌های AR و MA ساخته می‌شود؛ ترکیبی که کمترین اکاییک را نسبت به ترکیبات وقفه‌های دیگر دارد انتخاب شود.

از میان ترکیبات مختلف AR و MA در سری زمانی مورد مطالعه، ترکیب ARMA(12, 10) بهینه‌ای می‌باشد که در میان ترکیبات موجود، کمترین اکاییک را به خود اختصاص داده است. از طرفی با توجه به آزمون دیکی-فولر که حاکی از مانایی متغیرها در سطح بوده و بهمنظور مانایی داده‌ها نیازی به تفاضل‌گیری از داده‌ها نمی‌باشد؛ مدل بهینه را می‌توان به صورت ARIMA(12, 0, 10) نوشت. نتایج به دست آمده از اجرای این مدل در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. نتایج بهدست آمده از اجرای مدل ARIMA(12, 0 10)

متغیر	ضرائب	خطای استاندارد	آماره T	احتمال
ثابت	۶۱۰.۱۴۱۴	۲۹.۲۹۲۳۴	۲۰.۸۲۹۳۸	.....
AR(1)	۱.۷۱۳۵۸۳	۰.۰۰۳۷۸۵	۴۵۲.۷۷۳۰	.....
AR(2)	-۰.۷۲۹۲۹۷	۰.۰۰۵۱۵۶	-۱۴۱.۴۳۶۸	.....
AR(3)	۰.۰۷۴۷۱۰	۰.۰۰۲۳۱۴	۳۲.۲۹۰۵۳	.....
AR(4)	۰..۵۷۷۰۶	۰.۰۰۲۲۲۹	۲۵.۸۸۶۲۹	.....
AR(5)	-۰.۷۵۷۵۰۸	۰.۰۰۲۳۴۲	-۳۲۳.۴۳۸۳	.....
AR(6)	۰.۹۹۵۲۸۶	۰.۰۰۳۵۴۸	۲۸۰.۴۹۳۶	.....
AR(7)	-۰.۲۹۱۵۷۸	۰.۰۰۲۷۴۲	-۷۷.۹۲۰۷۶	.....
AR(8)	۰..۵۵۷۶۸	۰.۰۰۲۳۰۴	۲۴.۲۰۷۶۹	.....
AR(9)	۰.۲۶۰۶۵۳	۰.۰۰۲۰۰۵۴	۱۲۶.۸۹۸۳	.....
AR(10)	-۱.۴۶۸۲۲۰	۰.۰۰۲۲۴۹	-۶۵۲.۸۰۸۵	.....
AR(11)	۱.۴۱۸۶۳۳	۰.۰۰۵۱۰۲	۲۷۸.۰۵۸۶	.....
AR(12)	-۰.۳۳۴۳۵۹	۰.۰۰۳۴۲۲	-۹۷.۷۰۲۲۳	.....
MA(1)	۰.۳۵۶۵۶۲	۰.۰۰۳۳۵۴	-۱۰۶.۳۲۰۳	.....
MA(2)	-۰.۱۸۲۴۸۵	۰.۰۰۲۳۱۶	-۷۸.۸۰۹۰۴	.....
MA(3)	-۰.۱۷۷۸۹۵	۰.۰۰۲۲۰۷	-۸۰.۶۲۱۲۷	.....
MA(4)	-۰.۲۲۰۶۷۴	۰.۰۰۲۱۹۴	-۱۰۰.۰۶۷۱	.....
MA(5)	۰.۴۸۷۵۲۳	۰.۰۰۲۲۳۵	۲۱۸.۱۳۵۲	.....
MA(6)	-۰.۲۰۴۲۰۹	۰.۰۰۲۴۲۱	-۸۴.۳۵۳۵۶	.....
MA(7)	-۰.۱۹۶۹۴۹	۰.۰۰۲۰۸۷	-۹۴.۳۵۵۰۸	.....
MA(8)	-۰.۲۲۸۲۷۳	۰.۰۰۱۹۷۳	-۱۱۵.۶۸۸۵	.....
MA(9)	-۰.۴۵۶۵۶۹	۰.۰۰۲۳۱۳	-۱۹۷.۳۵۵۹	.....

متغیر	ضرائب	خطای استاندارد	آماره T	احتمال
MA(10)	۰.۸۵۲۱۳۸	۰.۰۰۲۹۵۳	۲۸۸.۶۱۳۲	۰.۰۰۰۰
مجموع مربعات	۱۲۲۵.۲۰۷	۳.۴۶۴۱۲۷	۳۵۳.۶۸۴۳	۰.۰۰۰۰
R^2	۰.۹۶۴۶۹۹	۰.۹۱۱.۷۰۹۳	میانگین واریانس وابسته	
R^2 تعدیل شده	۰.۹۶۴۶۵۳	۱۸۶.۳۰۵۹	انحراف معیار واریانس وابسته	۰.۹۶۴۶۵۳
خطای استاندارد رگرسیون	۳۵.۰۲۷۰۳	۹.۹۵۲۲۷۴	معیار آکایک	
مجموع مربع پسماند	۲۱۴۰۶۸۲۵	۹.۹۶۲۹۹۴	معیار شوارتز	
لگاریتم احتمال	-۸۶۹۱۹.۰۶	۹.۹۵۵۷۸۸	معیار هنان-کوئین	
F آماره	۲۰۷۳.۴۰	۱.۹۵۵۶۰۹	آماره دوربین-واتسون	
احتمال (آماره F)	۰.۰۰۰۰			

همانطور که در جدول ۳ مشخص است، شاخص دوربین - واتسون نیز در وضعیت مناسبی قرار دارد. نتایج آزمون‌های انجام شده حاکی از آن است که مدل اجرا شده، به خوبی توانسته است که قیمت برق را مدلسازی نماید. اما در نهایت امر آنچه باید توجه داشت این است که میزان میانگین مربعات خطأ در این فرآیند برابر $۳۴۶۴۴/۳۷$ می باشد.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

فرآیند مقررات زدایی و شیوه‌های نوین انجام مبادلات در بازار برق موجب بروز ناظمینانی قیمت برای تولیدکنندگان و مصرف کنندگان این کالا شده است؛ بنابراین یافتن مدل‌هایی که قابلیت ارزیابی، تخمین و پیش‌بینی صحیح قیمت جهت تصمیم‌گیری و مدیریت ریسک را داشته باشد، از ضروریات این بازار به شمار می‌آید.

مطالعات انجام شده در این زمینه تا کنون را می‌توان در سه گروه دسته‌بندی کرد: گروه نخست، به سنجش قدرت پیش‌بینی و پیش‌بینی قیمت برق با استفاده از یکی از مدل‌های پیش‌بینی قیمت برق در بازار ایران پرداخته‌اند که این الگوی ترکیب، خارج از چهارچوب تحلیلی این پژوهش می‌باشد. گروه دوم، با رویکرد مقایسه‌ای میان الگوهای سری زمانی از قبیل مدل‌های خود توضیح جمعی میانگین

متحرک و الگوی شبکه‌های عصبی مصنوعی به مطالعه‌ی قدرت پیش‌بینی قیمت در بازار برق ایران پرداخته و گروه سوم با یک رویکرد ترکیبی از چند موتور پیش‌بینی به ارائه یک قیمت پیش‌بینی شده‌ی واحد از قیمت در بازار برق ایران پرداخته‌اند.

نتایج این پژوهش، حاکی از تأیید نتایج مطالعاتی است که به‌طور مجزا الگوهای سری زمانی چون مدل‌های خود توضیح جمعی میانگین متحرک و شبکه‌های عصبی مصنوعی را مورد بررسی قرار داده و آن‌ها را به عنوان الگوهای مناسبی در جهت پیش‌بینی قیمت در بازار برق ایران معرفی کرده‌اند. با توجه به این که در مطالعات انجام شده، بازار برق ایران با داده‌های قیمت به صورت روزانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، پژوهش حاضر نتایج این مطالعات را با داده‌هایی که به صورت ساعتی می‌باشند نیز تأیید می‌نماید. این پژوهش، همچنین علاوه بر دو مدل یاد شده، الگوریتم ژنتیک را نیز به عنوان یک الگوی مناسب و قابل قبول معرفی می‌نماید.

همچنین در خصوص مطالعاتی که به بررسی مقایسه‌ای الگوهای سری زمانی و شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداخته‌اند، در این مقاله، عملکرد مدل‌های خود توضیح جمعی میانگین متحرک، شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک به دلیل ویژگی‌های آماری و قابلیت آن‌ها برای ارزیابی و تخمين سری زمانی قیمت‌های بازار برق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطابق بررسی‌های صورت گرفته در جریان این تحقیق، میانگین مربعات خطأ برای قیمت پیش‌بینی شده برق در روش خود توضیح جمعی میانگین متحرک از دو روش دیگر بیشتر است. همچنین شبکه‌های عصبی مصنوعی نسبت به سایر روش‌ها دارای کمترین میزان خطأ می‌باشد. بر این اساس، مشخص است که شبکه‌های عصبی مصنوعی عملکرد به مراتب بهتری نسبت به مدل‌های خود توضیح جمعی میانگین متحرک و الگوریتم ژنتیک در خصوص پیش‌بینی قیمت‌های برق دارند. در نتیجه، انتخاب یک شبکه عصبی با ساختار مناسب می‌تواند ابزار بسیار توانمندی برای پیش‌بینی سری‌های زمانی باشد. بر این اساس، نتایج این پژوهش، مؤید نتایج مطالعاتی است که قدرت پیش‌بینی شبکه‌های عصبی مصنوعی را به مراتب بیشتر از مدل‌های خود توضیح جمعی میانگین متحرک می‌دانند با این تفاوت که با اضافه کردن الگوریتم ژنتیک که تا کنون مورد توجه این قبیل مطالعات قرار نگرفته است، مدل‌های خود توضیح جمعی میانگین متحرک در رتبه‌ی سوم قدرت پیش‌بینی در بازار برق ایران قرار دارد.

منابع

- [۱] امیدی، محمدرضا؛ امیدی، نبی؛ عسگری، حشمت‌الله؛ جعفری اسکندری، میثم (۱۳۹۵)، مدل سازی و پیش‌بینی تولید و مصرف برق در ایران؛ فصلنامه آینده پژوهی مدیریت؛ شماره ۱۰۶.
- [۲] درودی، علی؛ بشری، مسعود؛ جاویدی دشت بیاض، محمد حسین (۱۳۹۶)، ارائه یک موتور پیش‌بینی مبتنی بر ترکیب اطلاعات جهت پیش‌بینی قیمت در بازارهای برق؛ کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران.
- [۳] رحیمی، سلمان؛ ناظمی، علی (۱۳۹۶)، پیش‌بینی قیمت برق در بازار ایران با استفاده از شبکه عصبی. دومین کنفرانس ملی مهندسی برق و کامپیوتر.
- [۴] رمضانی، رضا؛ رمضانی، مریم (۱۳۸۴)، پیش‌بینی تقاضای ماهیانه برق با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و اریما در ایران؛ بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران.
- [۵] شایقی، حسین؛ قاسمی، علی (۱۳۹۴)، پیش‌قیمت روزانه برق با شبکه عصبی بهبود یافته مبتنی بر تبدیل موجک و روش آشوبناک جستجوی گرانشی؛ مجله مهندسی برق؛ دانشگاه تبریز.
- [۶] منظور، داود؛ صفاکیش، امیر‌کاظم (۱۳۸۸)، پیش‌بینی قیمت برق در بازار رقابتی ایران با رویکرد مدل‌های سری زمانی؛ هفتمین همایش ملی انرژی.
- [۷] منظور، داود؛ یادی پور، مهدی (۱۳۹۵)، ارزیابی و پیش‌بینی نوسانات قیمت در بازار برق ایران به کمک مدل ARMAX-GARCH؛ فصلنامه اقتصاد مقداری، دوره ۱۳، شماره ۱.

- [8] Amjadi, N., Daraeepour, A. and F. Keynia (2010), Day-ahead electricity price forecasting by modified relief algorithm and hybrid neural network. IET Generation, Transmission & Distribution. 4(3): 432-444.
- [9] Azadeh, A., Asadzadeh, S.M. and A. Ghanbari (2010). An adaptive network-based fuzzy inference system for short-term natural gas demand estimation: Uncertain and complex environments," Energy Policy, Elsevier, 38(3): 1529-1536.
- [10] Benaouda, D., et al. (1996). Wavelet-based nonlinear multi-scale decomposition model for electricity load forecasting. International Journal of NeuArabali, A., Chalko, E., Etezadi-Amoli, M. and M.S. Fadali (2013), Short-term electricity price forecasting. IEEE Power and Energy Society General Meeting. Vancouver, BC, Canada.
- [11] Box, Jenkins (1994). Time Series Analysis: Forecasting and Control; Prentice Hall; 3rd edition.
- [12] Desai, V. S. and Rakesh Bharati (1998), A comparison of linear regression and neural network methods for prediction excess returns on large stocks; Annals of Operation Research 78(0): 127-163.
- [13] Yu, F., and X. Xu (2014). A short term load forecasting model of natural gas based on optimized genetic algorithm and improved BP neural network. Applied Energy. 134 (C):102-113.

- [14] Gao, G.; Lo, K. and Fulin Fan (2017). Comparison of ARIMA and ANN Models Used in Electricity Price Forecasting for Power Market. *Energy and Power Engineering*. 9(4B): 120-126.
- [15] Gholipour, Morteza, et al. (2017). Electricity price forecasting using neural networks with an improved iterative training algorithm. *International Journal of Ambient Energy*, 147-158
- [16] Chen, G. et al. (2014), The genetic algorithm based back propagation neural network for MMP prediction in CO₂-EOR process. *Fuel*. 126: 202–212.
- [17] Hemmat-Esfehani, M. et al. (2015), Designing an artificial neural network to predict thermal conductivity and dynamic viscosity of ferromagnetic nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 68: 50–57.
- [18] Hippert, H.S., Pedra, C.E. and R.C. Souza (2000), Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation. *IEEE Transactions on Power Systems* 16(1): 44 - 55.
- [19] Javidi, M.H. and Alireza Asrari (2012). Application of a New Hybrid Method for Day-Ahead Energy Price Forecasting in Iranian Electricity Market. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*. 8(4): 322-328.
- [20] Keynia, F. and M. Bahrampour (2017). A New Electricity Price and Load Uncertainty Prediction Method based on Optimal Neural Networks for Deregulated Electricity Power Markets. *Journal of Energy Management and Technology*. 1(3): 1-12.
- [21] Siekmann, S. et al. (2001). Information fusion in the context of stock index prediction. *International Journal of Intelligent System*. 16(11): 1285-1298.
- [22] Zhang, G. Peter (2003). Time series forecasting using a hybrid ARMA and neural network model. *Neurocomputing* 50: 159 – 175