

بررسی مقایسه‌ای مدل‌های پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت در بازار برق ایران

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

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 به‌عنوان سرمایه‌گذار اصلی در این حوزه نیازمند پیش‌بینی قیمت‌های آینده به‌منظور 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 اقتصادسنجی 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 آریمای در افق کوتاه‌مدت با استفاده از داده‌های ساعتی قیمت برق در سالهای ۹۵-۱۳۹۴ 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 خطا در پیش‌بینی قیمت برق، با توجه به پیش‌بینی‌های درون نمونه‌ای را دارا می‌باشند. مجموع مربعات خطا در الگوی شبکه عصبی مصنوعی در داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون، به‌ترتیب برابر ۱۴۷۳/۴۳، ۱۷۶۲/۶۳ و ۱۴۹۸/۳۲، در الگوریتم ژنتیک در داده‌های آموزش و اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر ۱۱۳۱۸/۲۰ و ۷۰۸۵/۹۸ و در الگوی سری زمانی برابر ۳۴۶۴۴/۳۷ می‌باشد.

تاریخ دریافت:

۱۳۹۷/۱/۳۰

تاریخ پذیرش:

۱۳۹۷/۵/۲

کلمات کلیدی:

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

manzoor@isu.ac.ir

m.ghaemi84@yahoo.com

norouzi.ahm@gmail.com

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 چالش‌هایی مواجه ساخته است.

تغییر 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 تغییر استراتژی بنگاه‌های تولیدی در افق بلند مدت، مستلزم تغییر ساختار فنی و تکنولوژیک دخیل در فرآیند تولید محصول می‌باشند، پیش‌بینی قیمت برق در افق بلند مدت در کنار مؤلفه‌های جانبی چون تحلیل‌های هزینه - فایده تغییر 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 دهی 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 برخوردار خواهد بود. بنابراین، می‌بایست مدل‌سازی‌های لازم صورت پذیرد تا در گام‌های بعدی، کارا ترین مصداق این روش‌ها را جهت بهره‌برداری، به فعالان حوزه‌ی صنعت معرفی نمود.

تا کنون در مقام نظر و تئوری بدون در نظر 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 خطا، میانگین مربعات خطای نرمالیزه شده و ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدر مطلق خطا و میانگین قدر مطلق درصد خطا 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 آریمای^۱) و روش‌های هوش مصنوعی (مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی^۲ و الگوریتم ژنتیک^۳) بپردازد. بر این اساس، به منظور جمع‌آوری اطلاعات از داده‌های سری زمانی شرکت مدیریت شبکه استفاده شده است (داده‌ها بر حسب ریال 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) و در مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک از الگوریتم عامل‌بنیان چن و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شده و در نهایت نیز قدرت پیش‌بینی این سه مدل، با معیار میانگین مربعات خطا^۴ 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. پیشینه تحقیق

درودی و همکاران (۱۳۹۶) در مقاله "ارائه یک موتور پیش بینی مبتنی بر ترکیب اطلاعات جهت پیش بینی 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 هر کدام 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 تمییز فصول 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 خودرگرسیون میانگین متحرک با مدل خودرگرسیون میانگین شرطی تعمیم یافته، برترین مدل برای برازش بازده و نوسانات قیمت‌های روزانه بازار برق در بازه زمانی ۱۳۹۱-۱۳۹۳ را معرفی نموده است. بر اساس این تحقیق، با شرایط فعلی بازار برق ایران مدل‌های استاندارد گارچ، بهترین شبیه‌سازی 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 رفتار 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 مرتب‌سازی داده‌های تقسیم شده از تبدیل موجک است.

رستم‌نیا (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 کم‌باری و ارزیابی تاثیر 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 به‌عنوان متغیرهای توضیحی مدل انتخاب شده‌اند. سپس با مشاهده نتایج آزمون LM GARCH برای ورود ناپایداری مشاهده شده از قیمت‌ها از مدل GARCH(1,1) استفاده و مشاهده می‌شود پسماندهای مدل دارای الگوی خطای سفید و توزیع نرمال می‌باشد. همچنین بر اساس آماره‌های تعیین‌کننده‌ی قدرت پیش‌بینی مدل، مدل ارائه شده توانسته است مقادیر مشاهده شده‌ی قیمت برق را به‌خوبی پیش‌بینی نماید.

کی‌نیا و بهرام‌پور (۲۰۱۷) در مقاله "یک الگوی پیش‌بینی جدید از قیمت و ناطمینانی 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 پیش‌بینی‌کننده 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 به‌واسطه این آزمون‌ها تأیید شده است.

قلی‌پور و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله‌ای تحت عنوان "پیش‌بینی قیمت برق با استفاده از شبکه‌های عصبی با الگوریتم تکرار آموزش بهبود یافته" دو نوآوری عمده را تحت عنوان انتخاب جدید دو مرحله‌ای و یک الگوریتم جدید تکرار آموزش ارائه کرده‌اند. الگوریتم انتخاب، به حذف ورودی‌های نامعلوم و بی‌ارتباط 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 به‌عنوان ورودی شبکه دوم، ایفای نقش می‌کند.

گائو و همکاران (۲۰۱۷) در مقاله "مقایسه مدل‌های آریمای 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 $ARIMA(4,1,2)$ ، دقت بهتری 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 به‌شمار می‌روند که به‌منظور برآورد 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.

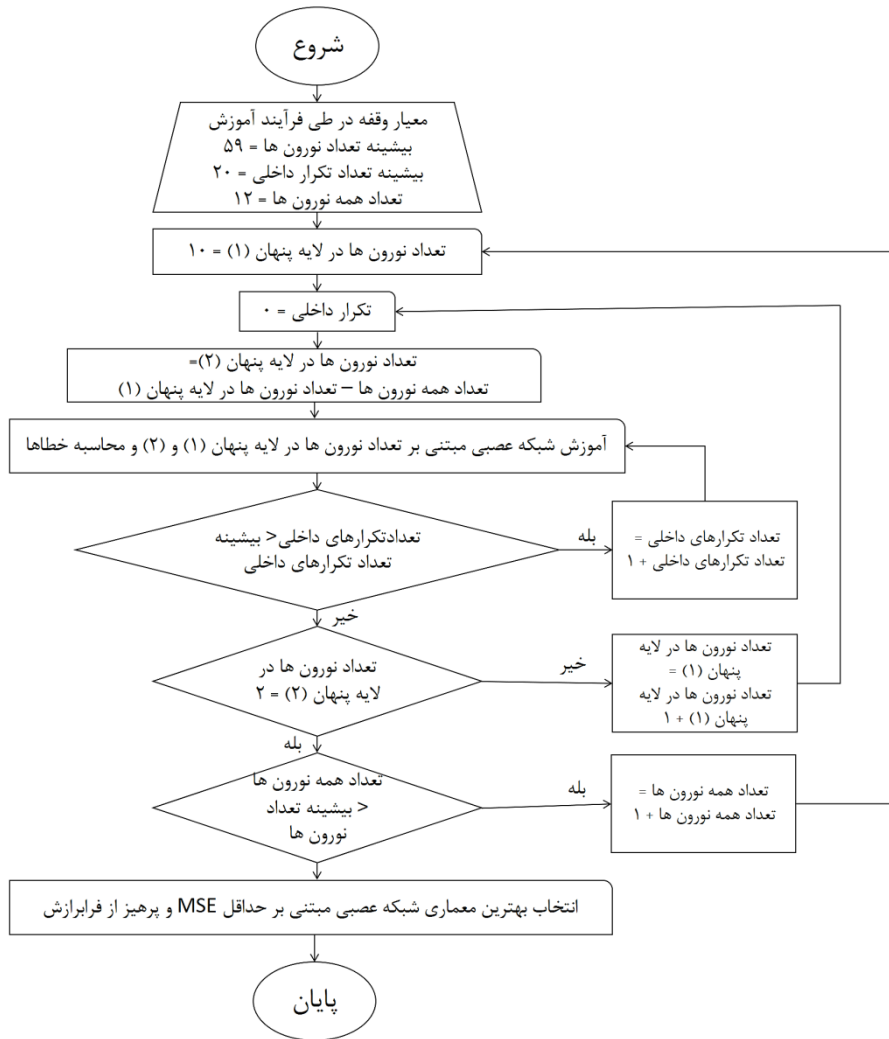
انصاری و جاویدی (۲۰۱۳) در مقاله‌ای تحت عنوان "مقایسه مدل‌های آریمای و شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد استفاده در بازار برق ایران" یک مدل ترکیبی برای پیش‌بینی قیمت برق در روز آینده معرفی نموده است. نویسندگان این مقاله، مدل معرفی شده را سابقاً نیز برای پیش‌بینی بار الکتریکی در شبکه برق خراسان، مورد استفاده قرار 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 آن‌را 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 به‌دست 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 به‌کارگیری می‌تواند دربردارنده‌ی 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 مبتنی بر حداقل مقدار میانگین مجذور خطا و پرهیز از فرابرازش^۲، در شکل ۱ ترسیم شده است.

1. bias
2. over fitting



شکل 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 کنشگر 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 برازش را داشته باشند، بالاترین احتمال انتخاب را دارا می‌باشند (Guangying chen et al., 2014). در پژوهش حاضر، برازش جامعه داده‌ها مبتنی بر خطاهای پیش‌بینی الگوریتم ژنتیک به وسیله کروموزوم‌های کدگذاری شده صورت می‌پذیرد. مقادیر برازش هر کروموزوم f_j طبق الگوی زیر محاسبه می‌گردد:

$$f_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n e_{ij}^2$$

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 برازش کروموزوم j ام، n تعداد داده‌های ورودی‌های شبکه عصبی مصنوعی و m بیانگر اندازه جامعه الگوریتم ژنتیک می‌باشد. e_{ij} 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 به‌طور 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 متناسب 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 بهینه‌نشان دادن نقاطی که بهینه‌نسی در یک همسایگی خاص هستند، جلوگیری می‌کند.

به‌طور کلی، **فرآیند انتخاب** ارزیابی گروهی را به سمت جمعیتی که بالاترین برآزش 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 پیش‌خور چند لایه عمل نموده و دارای فرآیند یادگیری مبتنی بر الگوریتم پس‌انتشار^۲ می‌باشد. فرآیند آن شامل سه مرحله‌ی جمع‌آوری داده، تشکیل و بهینه‌یابی در مدل شبکه و آزمون شبکه‌های بهینه شده می‌باشد. در بخش جمع‌آوری 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- و ۱ نرمال خواهند شد تا مقدار خروجی را بتوان به عنوان یک پیش بینی قابل اتکاء 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 خطا 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 بهینه‌سازی میزان وزن تورش‌های 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 و تابع انتقال شبکه، منتقل می‌شود تا پس از طی این سه مرحله، نتیجه پیش‌بینی را به مشاهده بگذارد.

آموزش شبکه نیز شامل محاسبه میزان خطا بین خروجی مدل و میزان مورد انتظار می‌باشد. در صورتی که خطاها 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 کمینه‌سازی میزان خطا 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٪ باقی‌داده‌ها که در فرآیند آموزش بلا استفاده بوده‌اند، صورت می‌گیرد.

۳-۳. مدل آریمای

در مدل‌های سری زمانی از نوع BJ متغیر Y_t 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 ام 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 اخلاص 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:

$$Y_t = \mu + \beta_0 u_t + \beta_1 u_{t-1} + \beta_2 u_{t-2} + \dots + \beta_q u_{t-q}$$

که μ یک مقدار ثابت و u جمله اخلاص 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 خودرگرسیو 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 ، d 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 سیگموئید^۴ تبعیت می‌کند. لایه دوم نیز دارای ۵ نورون بوده که از الگوی انتقالی مشابه تبعیت 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:

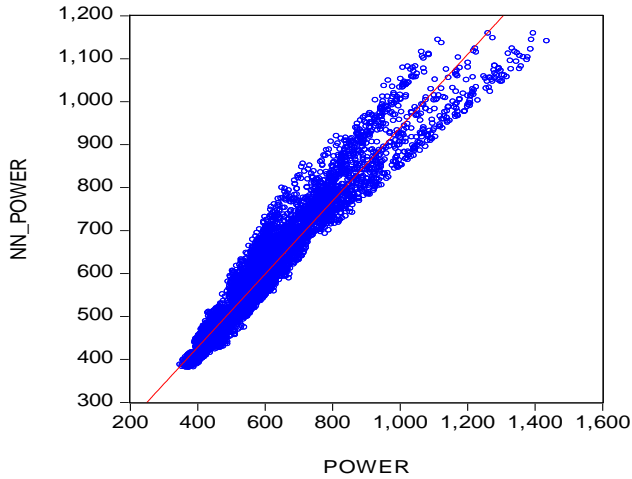
$$z = \sum_{i=1}^r w_{ij} p_i + b_j$$

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 مجذور خطا، بیان می‌شود. مقدار میانگین مجذور خطا، طبق الگوی زیر محاسبه می‌شود.

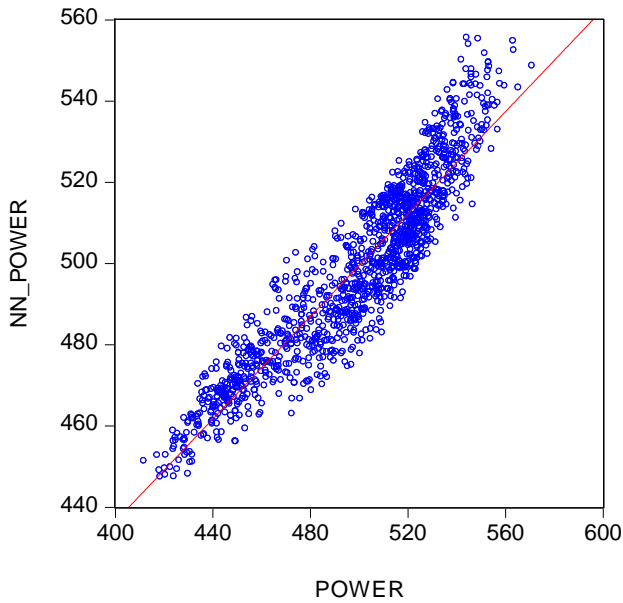
$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - a_i)^2}{n}$$

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

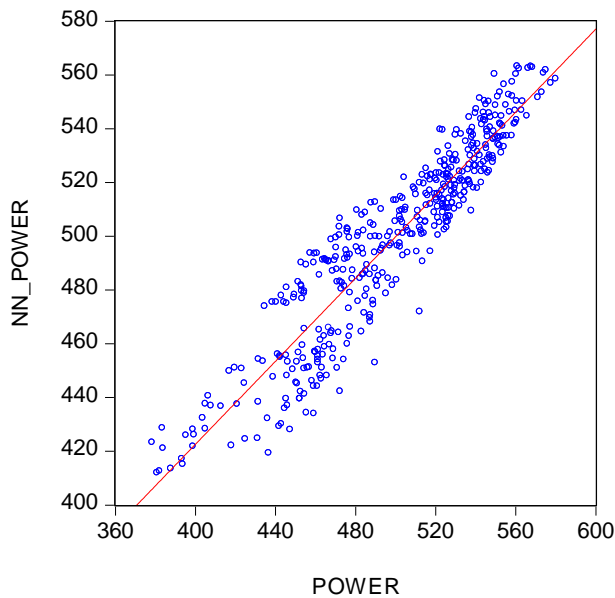
که در آن n تعداد داده‌ها، t_i نشان دهنده مقادیر هدف i ام و a_i نیز بیانگر مقدار پیش‌بینی شده می‌باشد. همبستگی میان داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده قیمت برق در نمودار ۱ نشان داده شده‌اند.



داده‌های آموزش



داده‌های اعتبارسنجی



داده‌های آزمون

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 خطا، برابر با $1762/63$ است که مربوط به داده‌های اعتبار سنجی است و این شاخص در خصوص داده‌های آموزش و داده‌های آزمون برابر با $1473/43$ و $1498/32$ است.

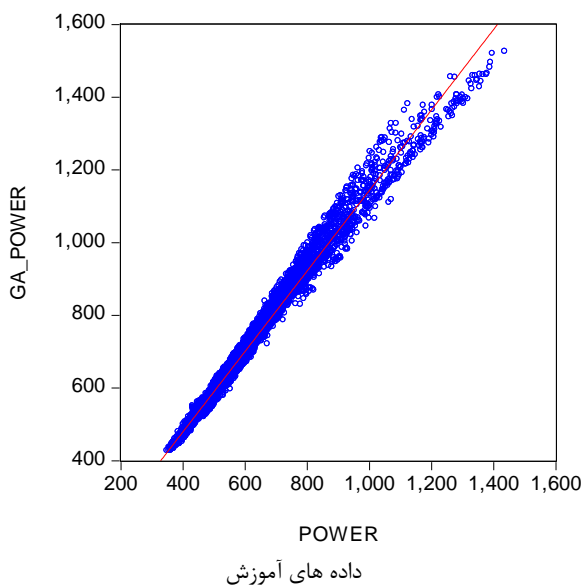
۴-۲. الگوریتم ژنتیک

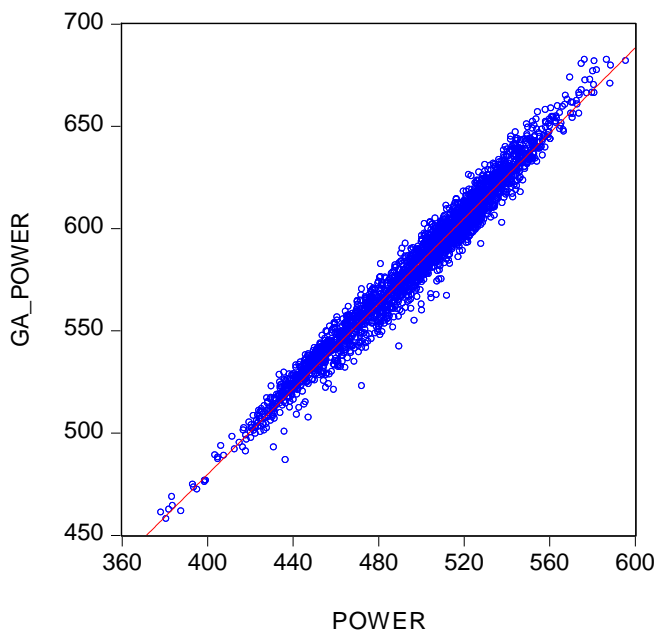
در پژوهش حاضر، مقادیر بهینه پارامترها از روش آزمون و خطا به دست آمده که در جدول ۱ بهترین ترکیب از مقادیر بهینه پارامترها برای پیش‌بینی قیمت برق از طریق الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.

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

مقادیر	پارامترها
۲	تعداد لایه های پنهان
۵	تعداد نورون ها در لایه ۱
۵	تعداد نورون ها در لایه ۲
Logsig	تابع انتقال داده های لایه پنهان ۱
Logsig	تابع انتقال داده های لایه پنهان ۲
Linear	تابع انتقال داده های 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 خطا در خصوص داده‌های آموزش برابر با ۱۱۳۱۸/۲۰ است.





داده‌های اعتبارسنجی

نمودار ۲. همبستگی میان داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده قیمت برق

همبستگی داده‌ها میان داده‌های مشاهده شده و مقادیر پیش‌بینی شده در وضعیت مناسبی قرار دارد. پس از آموزش مدل می‌بایست اعتبارسنجی را به منظور سنجش دقت داده‌های آموزش شده انجام دهیم. فرآیند اعتبارسنجی نیز با استفاده از ۲۶۳۴ داده انجام شد که میانگین مربعات خطا در خصوص داده‌های اعتبارسنجی برابر با $7085/98$ است.

۴-۳. مدل آریمای

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	آماره T	
۰.۰۰۳۰	-۳.۷۹۶۷۵۵	آماره آزمون مکمل دیکی-فولر
	-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٪، 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 ببینیم 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 وقفه-های 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 به‌صورت ARIMA(12, 0, 10) نوشت. نتایج به‌دست آمده از اجرای این مدل در جدول ۳ نشان داده شده است.

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

متغیر	ضرائب	خطای استاندارد	آماره T	احتمال
ثابت	۶۱۰.۱۴۱۴	۲۹.۲۹۲۳۴	۲۰.۸۲۹۳۸	۰.۰۰۰۰۰
AR(1)	۱.۷۱۳۵۸۳	۰.۰۰۳۷۸۵	۴۵۲.۷۷۳۰	۰.۰۰۰۰۰
AR(2)	-۰.۷۲۹۲۹۷	۰.۰۰۵۱۵۶	-۱۴۱.۴۳۶۸	۰.۰۰۰۰۰
AR(3)	۰.۰۷۴۷۱۰	۰.۰۰۲۳۱۴	۳۲.۲۹۰۵۳	۰.۰۰۰۰۰
AR(4)	۰.۰۵۷۷۰۶	۰.۰۰۲۲۲۹	۲۵.۸۸۶۲۹	۰.۰۰۰۰۰
AR(5)	-۰.۷۵۷۵۰۸	۰.۰۰۲۳۴۲	-۳۲۳.۴۳۸۳	۰.۰۰۰۰۰
AR(6)	۰.۹۹۵۲۸۶	۰.۰۰۳۵۴۸	۲۸.۰۴۹۳۶	۰.۰۰۰۰۰
AR(7)	-۰.۲۹۱۵۷۸	۰.۰۰۲۷۴۲	-۷۷.۹۲۰۷۶	۰.۰۰۰۰۰
AR(8)	۰.۰۵۵۷۶۸	۰.۰۰۲۳۰۴	۲۴.۲۰۷۶۹	۰.۰۰۰۰۰
AR(9)	۰.۲۶۰۶۵۳	۰.۰۰۲۰۵۴	۱۲۶.۸۹۸۳	۰.۰۰۰۰۰
AR(10)	-۱.۴۶۸۲۲۰	۰.۰۰۲۲۴۹	-۶۵۲.۸۰۸۵	۰.۰۰۰۰۰
AR(11)	۱.۴۱۸۶۳۳	۰.۰۰۵۱۰۲	۲۷۸.۰۵۸۶	۰.۰۰۰۰۰
AR(12)	-۰.۳۳۴۳۵۹	۰.۰۰۳۴۲۲	-۹۷.۷۰۲۲۳	۰.۰۰۰۰۰
MA(1)	۰.۳۵۶۵۶۲	۰.۰۰۳۳۵۴	-۱۰۶.۳۲۰۳	۰.۰۰۰۰۰
MA(2)	-۰.۱۸۲۴۸۵	۰.۰۰۲۳۱۶	-۷۸.۸۰۹۰۴	۰.۰۰۰۰۰
MA(3)	-۰.۱۷۷۸۹۵	۰.۰۰۲۲۰۷	-۸۰.۶۲۱۲۷	۰.۰۰۰۰۰
MA(4)	-۰.۲۲۰۶۷۴	۰.۰۰۲۱۹۴	-۱۰۰.۵۶۷۱	۰.۰۰۰۰۰
MA(5)	۰.۴۸۷۵۳۳	۰.۰۰۲۲۳۵	۲۱۸.۱۳۵۲	۰.۰۰۰۰۰
MA(6)	-۰.۲۰۴۲۰۹	۰.۰۰۲۴۲۱	-۸۴.۳۵۳۵۶	۰.۰۰۰۰۰
MA(7)	-۰.۱۹۶۹۴۹	۰.۰۰۲۰۸۷	-۹۴.۳۵۵۰۸	۰.۰۰۰۰۰
MA(8)	-۰.۲۲۸۲۷۳	۰.۰۰۱۹۷۳	-۱۱۵.۶۸۸۵	۰.۰۰۰۰۰
MA(9)	-۰.۴۵۶۵۶۹	۰.۰۰۲۳۱۳	-۱۹۷.۳۵۵۹	۰.۰۰۰۰۰

متغیر	ضرائب	خطای استاندارد	آماره T	احتمال
MA(10)	۰.۸۵۲۱۳۸	۰.۰۰۲۹۵۳	۲۸۸.۶۱۳۲	۰.۰۰۰۰۰
مجموع مربعات	۱۲۲۵.۲۰۷	۳.۴۶۴۱۲۷	۳۵۳.۶۸۴۳	۰.۰۰۰۰۰
R^2	۰.۹۶۴۶۹۹	میانگین واریانس وابسته	۶۱۱.۷۰۹۳	
R^2 تعدیل شده	۰.۹۶۴۶۵۳	انحراف معیار واریانس وابسته	۱۸۶.۳۰۵۹	
خطای استاندارد رگرسیون	۳۵.۰۲۷۰۳	معیار آکایک	۹.۹۵۲۲۷۴	
مجموع مربع پسماند	۲۱۴۰۶۸۲۵	معیار شوارتز	۹.۹۶۲۹۴۴	
لگاریتم احتمال	-۸۶۹۱۹.۰۶	معیار هنان-کوئین	۹.۹۵۵۷۸۸	
آماره F	۲۰۷۳.۴۰	آماره دوربین-واتسون	۱.۹۵۵۶۰۹	
احتمال (آماره F)	۰.۰۰۰۰۰			

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 خطا در این فرآیند برابر $34644/37$ می باشد.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

فرآیند مقررات زدایی و شیوه‌های نوین انجام مبادلات در بازار برق موجب بروز نااطمینانی قیمت برای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان 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 به‌عنوان 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 به‌صورت روزانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، پژوهش حاضر نتایج این مطالعات را با داده‌هایی که به‌صورت ساعتی می‌باشند نیز تأیید می‌نماید. این پژوهش، همچنین علاوه بر دو مدل یاد شده، الگوریتم ژنتیک را نیز به‌عنوان 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 تخمین سری زمانی قیمت‌های بازار برق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطابق بررسی‌های صورت گرفته در جریان این تحقیق، میانگین مربعات خطا 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 خطا 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 خودتوضیح 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 خودتوضیح جمعی میانگین متحرک در رتبه‌ی سوم قدرت پیش‌بینی در بازار برق ایران قرار دارد.

منابع

- [۱] امید، محمدرضا؛ امید، نبی؛ عسگری، حشمت‌اله؛ 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] رضایی، رضا؛ رضایی، 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)، پیش‌بینی قیمت 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] Amjady, 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