پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت برق در سیستم‌های قدرت تجدید ساختاریافته با استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی و الگوریتم Boosting

زهره رمضانعلی‌زاده۱؛ محمد حسین یکتایی۲

چکیده

تخمین قیمت برق از جمله اطلاعات مهم و حیاتی برای تعیین استراتژی‌های مناقصه و ترتیب تولید در بازار است. تنظیم‌کنندگان بازار در تلاشند تا به تحلیل هر چه دقیق تر رفتار بازار پرداخته و سیر تکاملی بازار را مورد ارزیابی قرار دهند. بنابراین پیش‌بینی قیمت ابزار مفیدی را برای پیش‌گویی در مورد آینده بازار و محاسبه تنظیمات احتمالی فراهم می‌کند. در این مقاله، با استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی، روش‌های آماری، روش‌های مبتنی برهوش مصنوعی و نیز استفاده از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر قیمت برق، مطابق با فازهای مطرح در متدولوژی crisp، به پیش‌بینی کوتاه‌مدت قیمت برق می‌پردازیم. بدین منظور با تعیین الگوی قیمت و میزان تغییرپذیری آن و تحلیل رابطه قیمت نسبت به عوامل تأثیرگذار، تعداد بهینه و حداقلی از ورودی های مدل شناسایی شده و داده‌ها در دسته‌های مناسب طبقه‌بندی می‌شوند. سپس با استفاده از شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه و الگوریتم بهبود آموزش Boosting قیمت کوتاه‌مدت برق پیش‌بینی شده و میزان دقت مدل‌های پیشنهادی محاسبه و ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده از این مدل‌ها، نشان می‌دهد که دسته‌بندی مناسب داده‌ها و ایجاد مدل مناسب برای هر دسته و نیز استفاده از الگوریتم‌های بهبود آموزش مناسب، به میزان قابل توجهی دقت مدل را افزایش داده و موجب کاهش نرخ خطای پیش‌بینی خواهد شد.

واژگان کلیدی: داده کاوی، پیش‌بینی، بازار برق، شبکه‌های عصبی، Boosting

۱. مقدمه

صنعت برق به عنوان یک صنعت زیربنایی در دو دهه اخیر دست‌خوش تغییرات بنیادی گردیده است که از آن به عناوین مختلفی چون تجدید ساختار، مقررات زدایی و ... یاد می‌شود. در ساختار جدید بر خلاف ساختار سنتی قدیم که در آن مالک سیستم تولید، انتقال و توزیع یکی بوده و تحت مالکیت واحد بهره‌برداری می‌گردید، سیستم های تولید، انتقال و توزیع از یکدیگر مجزا می‌گردند و به صورت مستقل اداره می‌شوند. کشورهای مختلف باانگیزه‌های مختلفی وارد مرحله نوین صنعت برق گردیده‌اند.پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت برق، یکی از فعالیت‌های اساسی و حیاتی در بازارهای برق می‌باشد که پایه و اساس به حداکثر رساندن سود شرکت‌کنندگان در بازار است. با توجه به بحث خصوصی‌سازی بسیاری از شرکت‌ها در صنعت آب و برق کشور، به خصوص نیروگاه‌های برق، سودآوری یکی از اصلی‌ترین اهداف این نیروگاه‌ها است [۱]. مدل های زیادی به منظور پیش بینی قیمت برق توسعه یافته اند. بر اساس تحقیقات انجام شده در [۶] مدل‌های پیش‌بینی قیمت به ۳ دسته مهم تئوری بازی ها، روش

های شبیه سازی و روش های آماری تقسیم می شوند. اولین گروه مدل‌های پیش‌بینی، مبتنی بر نظریه بازی‌ها می‌باشند. این روش‌ها، راهبردهای (بازی‌ها) شرکت‌کنندگان بازار را مدل‌سازی کرده و راه حل هر بازی را مشخص می‌کنند. مدل های شبیه‌سازی به تقلید عملیات خرد[۲] سیستم قدرت پرداخته و کلیه فرایندهای فیزیکی تحت سیستم را آزمایش می‌کند. به این مدل‌ها، مدل‌های ساختاری[۳] یا اساسی[۴] نیز گفته می‌شود. این مدل‌ها نیاز به ورودی‌های زیاد و با جزئیات فراوان دارند و برای این منظور به یک پایگاه داده بزرگ و مناسب نیازمند می‌باشند. مدل‌های آماری به مدل‌های جعبه سیاه[۵] معروف‌اند به طوری که بدون در نظر گرفتن جزئیات فیزیکی سیستم به تحلیل مشخصات سیستم می‌پردازند. برخی از روش‌های مبتنی بر علم آمار نیز برای تحلیل مقدار پیک قیمت[۶] و نوسانات قیمت[۷] بکار می روند. از جمله این روش‌ها می‌توان به تکنیک‌های داده کاوی برای تحلیل پیک قیمت اشاره کرد [۷]. در میان مدل‌های آماری مدل‌های سری زمانی از اهمیت فراوانی برخوردارند [۶] . در مدل‌های سری زمانی تلاش می‌شود تا متغیرهای اقتصادی را صرفاً بر اساس اطلاعاتی که در مقادیر گذشته آن متغیر نهفته است مدل‌سازی و پیش‌بینی نمایند. مدل‌های ARMA، ARIMA[۸]، S-ARIMA[۹]، ARIMAX[۱۰]یا مدل های تابع انتقال، مدل GARCH[۱۱] ازجمله مدل‌های مطرح در گروه مدل های سری زمانی می‌باشند. مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی را با نام مدل‌های ناپارامتری[۱۲] نیز نام‌گذاری کرده آند چرا که این مدل‌ها بدون در نظر گرفتن فرایندهای داخلی سیستم به نگاشت[۱۳] روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی می‌پردازند. این مدل‌ها قابلیت یادگیری روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیرها را دارا می‌باشند. روابطی که توسط مدل‌های کلاسیک به سختی مدل می‌شوند. مدل‌های مبتنی بر داده کاوی و شبکه‌های عصبی مصنوعی[۱۴]، مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی هستند. طبق تعریف داده کاوی فرآیندی است که طی آن با استفاده از ابزارهای تحلیل داده به دنبال کشف الگوها و ارتباطات میان داده‌های موجود که ممکن است منجر به استخراج اطلاعات جدیدی از پایگاه داده گردند، می‌باشد [۸]. دسته بندی، تخمین و پیش بینی، از مهمترین وظایف مطرح در داده کاوی هستند که هدف آنها یافتن ارزش یک متغیر هدف خاص است [۲]. مدل‌های رگرسیون و شبکه‌های عصبی از جمله تکنیک‌های مناسب داده کاوی برای دسته بندی و پیش بینی می‌باشند. در فرایند پیش بینی از داده‌های پیشین برای تهیه یک مدل که بیانگر رفتار مشاهده‌شده کنونی است استفاده می‌شود؛ وقتی این مدل برای ورودی‌های کنونی به کار رفت، نتیجه کار، پیش‌بینی رفتار آینده خواهد بود.شبکه های عصبی دارای خصوصیات متمایز و منحصر به فردی در مدل سازی روابط غیر خطی و پیچیده هستند که آنها را به ابزار مناسبی جهت انجام فرایند پیش بینی تبدیل نموده است. برای استفاده از شبکه‌های عصبی مجموعه داده‌ها معمولاً به دو مجموعه تست و آموزش تقسیم می‌شوند .محققان در مسائل پیش‌بینی و تقریب توابع حدود ۳۰ درصد از کل داده‌ها را

به عنوان مجموعه تست در نظر می‌گیرند و بقیه را برای آموزش استفاده می‌نمایند [۳]. هدف نهایی آموزش تصحیح خطا، کم کردن تابع هزینه‌ای است که بر اساس خطای شبکه (اختلاف خروجی شبکه و مقدار t_i) تعریف می‌شود.یادگیری دسته جمعی[۱۵] یک رویکرد مؤثر در یادگیری ماشینی است که از آن به منظور بهبود دقت یادگیری استفاده می شود [۹].یکی از مهم ترین رو های

---

[۲] Detailed operation
[۳] structural
[۴] fundamental
[۵] Black-box
[۶] spike
[۷] Price volatility
[۸] Autoregressive Integrated Moving Average
[۹] Seasonal ARIMA
[۱۰] ARMA with exogenous variables
[۱۱] Generalized Auto-Regressive Conditional Heteroscedastic
[۱۲] Non-parametric models
[۱۳] map
[۱۴] ANN
[۱۵] Ensemble Learning

یادگیری دسته جمعی، روش تقویتی[۱۶] است که می تواند برای افزایش کارائی الگوریتم های آموزشی به کار رود [۱۰].روش تقویتی در گستره داده کاوی پیش گویانه مطرح می شود و جهت ایجاد مدل ها و دسته بندی های چندگانه مورد استفاده قرار می گیرد. در تحقیق انجام شده در [۱۱]، تکنیک‌ها و مدل‌های گوناگون پیش‌بینی قیمت پیشنهادشده را به طور خلاصه بیان کرده آند. در این تحقیق، مدل‌های ARIMA, LS-SVM, LLWNN, ANN, ... مقایسه شده‌اند و نقاط قوت و نقاط ضعف هر مدل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در تحقیق دیگری ، به تأثیر تکنیک‌های مختلف داده کاوی بر دسته‌بندی داده‌ها پرداخته‌اند [۱۲]. در این تحقیق یک مدل جدید به منظور دسته‌بندی قیمت برق تا ۲۴ ساعت آینده و تعیین حد آستانه با هدف برچسب‌گذاری دینامیک روی مشخصه‌های ناشناخته بازار برق ارائه‌شده است. مدل پیشنهادی امکان پیاده‌سازی یک طبقه‌بندی بازگشتی را فراهم می‌کند. در تحقیقات انجام شده در [۱۳]، روشی از شبکه‌های عصبی مصنوعی بر پایه متد روزهای مشابه برای پیش‌بینی روز بعد قیمت برق در بازار برق ارائه شده است. همچنین به بررسی عوامل موثر بر پیش‌بینی قیمت برق مثل عامل‌های زمان، عامل‌های بار و عامل‌های داده‌های تاریخی قیمت پرداخته شده است. همین نویسنده در تحقیق دیگری یک مدل شبکه‌های عصبی بر اساس روش روز مشابه ارائه کرده است [۱۴]. در مرجع [۱۵]، از الگوریتم Relief جهت پیش‌بینی قیمت استفاده شده است. Relief یک تکنیک داده کاوی قدرتمند است. با این حال از برخی نواقص جهت انتخاب ویژگی پیش‌بینی قیمت رنج می‌برد. در این مقاله دو تغییر در روش Relief جهت اصلاح مشکلات این الگوریتم در پیش‌بینی قیمت انجام‌شده است. نتیجه این مدل در یک بازار برق واقعی بررسی‌شده و با متدهای پیش‌بینی دیگر مقایسه گردیده است.در روش ارائه شده در [۱۶]، از شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت پیدا کردن قیمت بازار برای یک دوره زمانی استفاده شده است. در این تحقیق از داده‌های تاریخی برای آموزش شبکه‌های عصبی استفاده‌شده و تعداد شبکه‌های عصبی استفاده‌شده بستگی به تعداد خوشه‌های پیداشده در داده‌های تاریخی دارد. جهت پیدا کردن تعداد خوشه‌ها از متد خوشه‌بندی K-means بهره برده شده است. در تحقیق انجام‌شده در [۱۷]، یک مدل شبکه عصبی پرسپترون چهار لایه ارائه‌شده است که شامل لایه ورودی، دو لایه مخفی و لایه خروجی است همچنین به جهت افزایش سرعت همگرایی، به جای استفاده از متد پس انتشار از متد لونبرگ-مارکوارت برای آموزش شبکه عصبی استفاده‌شده است. تحقیق انجام شده در [۱۸]، از یک رویکرد مبتنی بر داده کاوی برای پیش‌بینی قابل‌اطمینان وقوع افزایش قیمت استفاده نموده‌اند. جهت پیش‌بینی وقوع افزایش، از دو الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) و طبقه بند احتمال استفاده‌شده است. همین نویسنده در تحقیق دیگری [۱۹]، از ترکیب مدل‌های SVM و مدل آماری جهت پیش‌بینی قیمت استفاده نموده است.در تحقیق انجام‌شده در [۲۰]، تحلیل حساسیت پارامترهای روزهای مشابه، جهت افزایش دقت پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی و روزهای مشابه ارائه‌شده است.

این مقاله، به ارائه مدل‌های پیش‌بینی کوتاه‌مدت قیمت برق با استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی می‌پردازد. بدین منظور با تعیین الگوی قیمت و میزان تغییرپذیری آن که عامل مهمی در انتخاب و طراحی مدل و روش حل می‌باشد و تحلیل وابستگی قیمت نسبت به عوامل تأثیرگذار، ورودی‌های سیستم شناسایی و داده‌ها را در دسته‌های مناسب طبقه‌بندی می‌شوند. سپس با استفاده از شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) و به‌کارگیری روش بهبود آموزش Boosting، قیمت کوتاه مدت برق پیش‌بینی و میزان دقت و خطای روش مورد استفاده محاسبه و ارائه می‌گردد. مجموعه داده مورد استفاده، مربوط به داده‌های ساعتی قیمت برق در بازار برق کشور در سال ۱۳۹۲ می‌باشد. مدل‌های پیشنهادی با استفاده از معیارهای MAPE و RMSE ارزیابی می‌گردند.

۲. بررسی عوامل تأثیرگذار بر قیمت برق

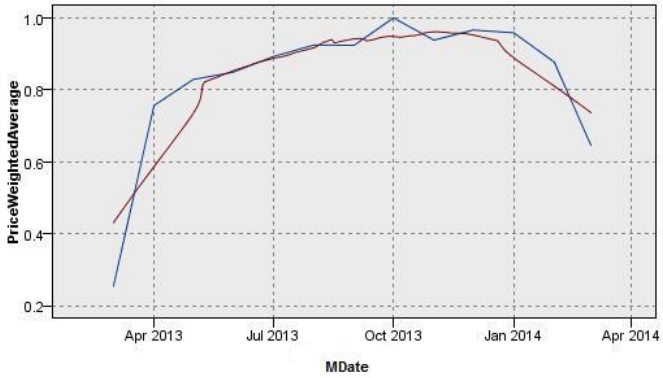
در این تحقیق به منظور پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت انرژی الکتریکی، تأثیر عواملی چون قیمت برق در ساعات گذشته، بار پیش‌بینی‌شده، دما، فصل، کاری یا غیرکاری بودن روز، در نظر گرفته شده است. در ادامه ارتباط قیمت برق با هر یک از پارامتر-های فوق بررسی و میزان تأثیر هر کدام از آنها ارائه می‌گردد.

---

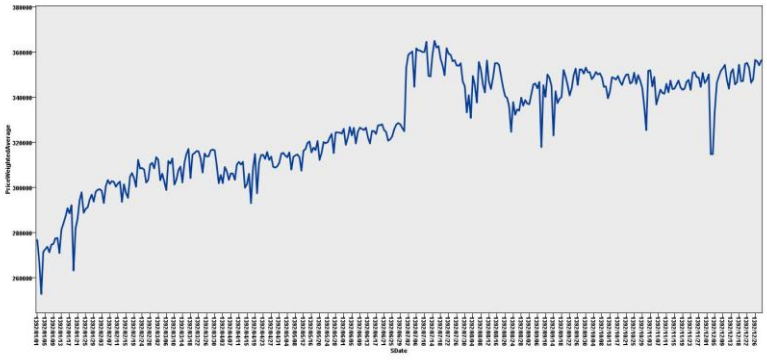
[۱۶] Boosting

۱.۲. رابطه قیمت با پارامترهای دما، بار و فصل

به‌منظور تحلیل تغییرات قیمت برق در طول سال، نمودار تغییرات قیمت در سال ۱۳۹۲ در شکل (۱) رسم شده است. در این شکل، علاوه بر نمایش تغییرات قیمت در طول زمان، روند تغییرات نیز نشان داده شده است. همچنین نمودار سری زمانی قیمت برق در یک ساعت مشخص (به‌عنوان نمونه ساعت ۲۱)، در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود ، نمودارهای فوق یک روند رو به رشد را برای قیمت نشان می‌دهند. روند رو به رشد قیمت در شش ماه اول سال ادامه دارد و در شش ماه دوم با تغییرات کمتری مواجه هستیم. کمینه قیمت مربوط به دو ماه اول سال (فروردین و اردیبهشت) بوده و با گرم شدن هوا و افزایش مصرف، قیمت نیز افزایش یافته است.

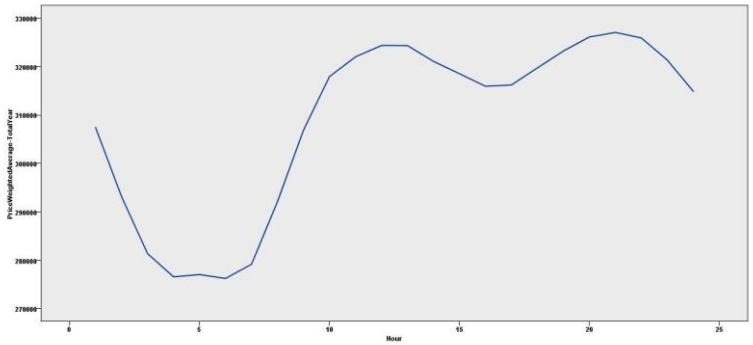


شکل ۱- روند تغییرات قیمت برق در سال ۱۳۹۲

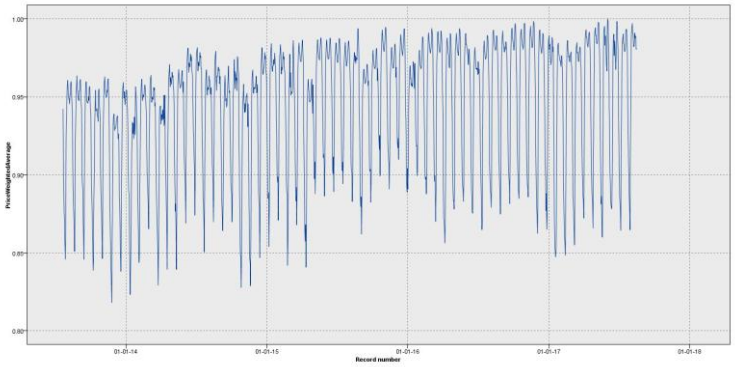


شکل ۲- قیمت برق در ساعت ۲۱

بررسی نمودار میانگین ساعتی قیمت در ۲۴ ساعت (شکل۳)، نشان می‌دهد که قیمت برق در طول شبانه روز دارای تغییرات فصلی و متناوب است و هر شبانه‌روز دارای دو اوج قیمت(پیک) است. پیک اول مربوط به ساعات اولیه ظهر و پیک دوم مربوط به ساعات اولیه شب و اوج بار مصرفی است. شکل (۴)، تغییرات قیمت برق را در مرداد شهریور نشان می‌دهد. با توجه به شکل، پدیده فصلی بودن تغییرات قیمت و نیز وجود دو پیک برای هر روز در این بازه زمانی به خوبی مشاهده می‌شود.

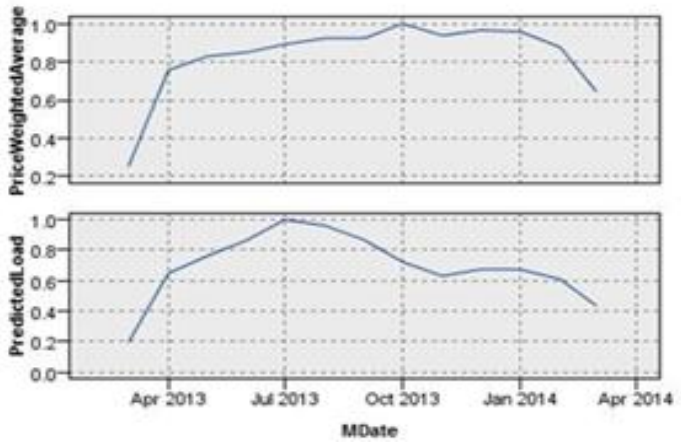


شکل۳- میانگین ساعتی قیمت در سال ۱۳۹۲



شکل ۴- قیمت برق در مرداد و شهریور

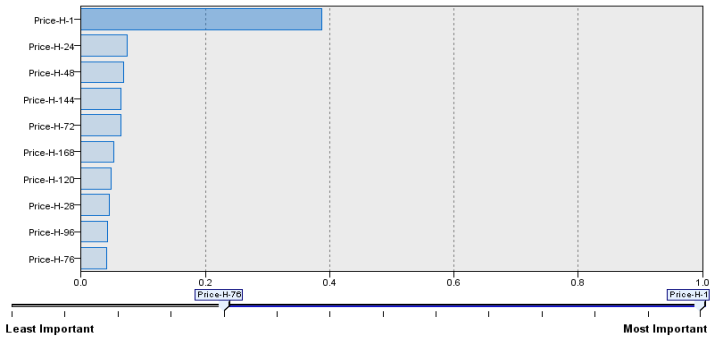
در شکل(۵)، میزان بار مصرفی و قیمت برق با هم مقایسه شده‌اند. همان طور که دیده می‌شود، روند تغییرات قیمت و بار تقریباً مشابه است و در اکثر ساعات با افزایش بار شبکه، قیمت نیز افزایش یافته است.از طرفی با افزایش دما و نزدیک شدن به تابستان، بار مصرفی و قیمت برق افزایش یافته است. بیشترین بار مصرفی و بالاترین قیمت‌ها مربوط به فصل تابستان است. در نیمه دوم سال و کاهش دما قیمت برق نسبت به بار شبکه کاهش کمتری داشته است که این مسئله نشان میدهد که علاوه بر بار، عوامل دیگری نیز بر تغییرات قیمت برق اثرگذار هستند.



شکل۵-مقایسه تغییرات قیمت برق و بار پیش‌بینی‌شده در سال ۱۳۹۲

۲.۲. ارتباط قیمت ارتباط قیمت برق با قیمت‌های گذشته

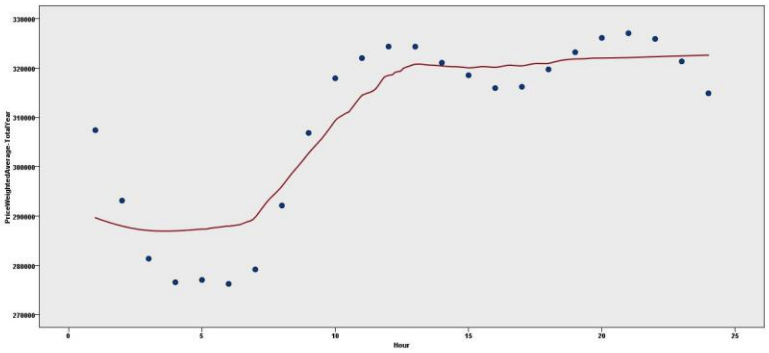
با توجه به تحقیقات انجام‌شده، داده‌های قیمت گذشته اصلی‌ترین و اساسی‌ترین اطلاعات برای پیش‌بینی قیمت می‌باشند. به منظور شناسایی مؤثرترین قیمت ها، به ازای هر ساعت، قیمت ۱ ساعت قبل، ۲ ساعت قبل، ۳ ساعت قبل تا قیمت ۱۷۶ ساعت قبل محاسبه و مدل پیش‌بینی قیمت بر اساس قیمت‌های گذشته و با استفاده از شبکه‌عصبی MLP پیاده‌سازی گردید. در شکل (۶) میزان تأثیر هر یک از ورودی‌های شبکه محاسبه و مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تعدادی از ساعات تأثیر کمی در پیش‌بینی دارند. با بررسی میزان تأثیر قیمت‌های گذشته مشخص شد که قیمت هر ساعت با مقادیر ساعات زیر وابستگی دارد. ۱،۲۴،۲۵،۹۶،۴،۱۶۸،۷۲ ۳،۵۲،۹۷،۶،۴۸،۲۳،۵۳،۷۳،۴۹،۱۴۴،۱۱۰،۴۷،۳۴،۷۶،۷۱،۱۴۸، و از بین مقادیر فوق با مقادیر ساعات ۱،۲۴،۲۸،۴۸،۵۲،۷۲،۷۶،۹۶،۱۰۰،۱۲۰،۱۲۴،۱۴۴،۱۴۸،۱۶۸ بیش‌ترین وابستگی را دارد. انتخاب ساعات فوق منطقی به نظر می‌رسد. در واقع ساعات انتخاب‌شده وابستگی قیمت را به قیمت‌های یک ساعت قبل، ساعات مشابه روز قبل، ساعات مشابه ۲ روز قبل الی ساعات مشابه ۷ روز قبل نشان می‌دهد.قیمت‌های انتخاب شده فوق، به عنوان ورودی مدل های پیشنهادی در نظر گرفته شده اند.



شکل۶- مقایسه میزان وابستگی قیمت یک ساعت به قیمت‌های ساعات قبل

۲.۳ بررسی ارتباط قیمت برق با ساعت‌های مختلف شبانه‌روز

به منظور افزایش دقت پیش‌بینی و جداسازی بیشتر و بهتر الگوهای مشابه قیمت، به تحلیل حساسیت قیمت با ساعت‌های مختلف روزانه می‌پردازیم. آنچه در ادبیات موضوع در این زمینه بیان شده است، تقسیم‌بندی روزانه داده‌های قیمت در ساعت‌های اوج مصرف، نرمال و کم باری انرژی الکتریکی می‌باشد. اما با توجه به اینکه ساعت‌های بیشینه بار و قیمت لزوماً مشابه هم نیستند، برای دستیابی به تقسیم‌بندی بهتر، در این مقاله، الگوهای مشابه قیمت را در دسته‌های ساعات اوج قیمت، قیمت متوسط و قیمت کم در نظر می‌گیریم. برای نیل به این هدف، ابتدا با به دست آوردن میانگین قیمت هر ساعت، برای تمام داده‌های سال ۱۳۹۲، میانگین قیمت برای ۲۴ ساعت محاسبه شده است. سپس با تحلیل و بررسی نمودار رسم شده در شکل(۷)، به جداسازی ساعت‌های روزانه در ۳ دسته ساعات اوج قیمت، قیمت نرمال و قیمت پایین می‌پردازیم. نتایج این تحلیل در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۷- نمودار میانگین ساعتی قیمت در سال ۱۳۹۲

جدول ۱- نتایج حاصل از بررسی ارتباط قیمت با ساعت‌های مختلف روز

ساعت‌های اوج قیمت	۱۰ الی ۲۴
ساعت‌ها با قیمت‌های متوسط	۱،۲،۳،۸،۹
ساعت‌ها با قیمت‌های پایین	۴،۵،۶،۷

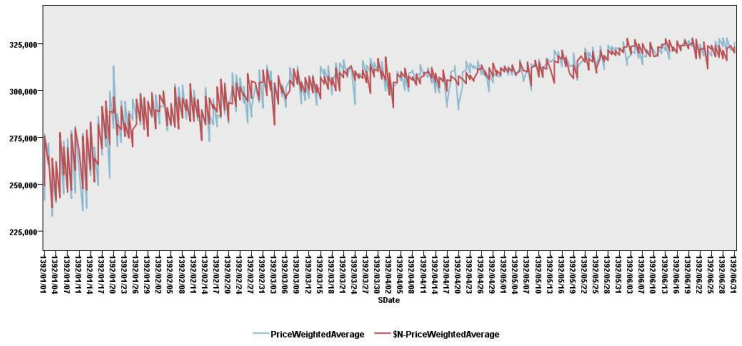
پیاده‌سازی مدل‌های پیشنهادی

به منظور کاهش خطای پیش‌بینی داده‌ها در ساعات مختلف، یکی از تکنیک‌های مؤثر، جداسازی داده‌ها با الگوی مشابه و پیش‌بینی هر کدام با شبکه‌عصبی مجزا می‌باشد. با بررسی های انجام شده در قسمت قبل، مشخص گردید که روند تغییرات قیمت در ۶ ماه اول

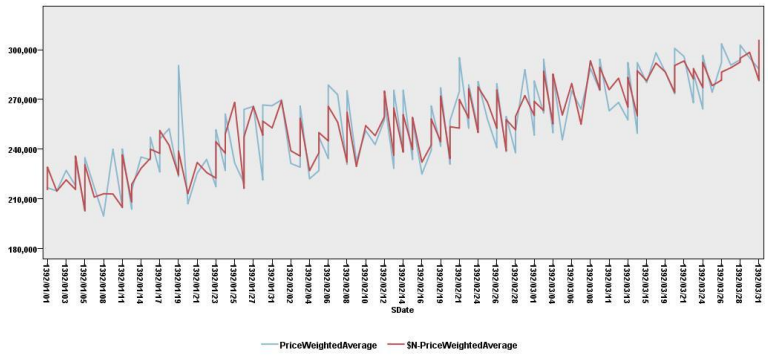
سال تقریباً مشابه است. همچنین قیمت‌ها در ۶ ماه دوم سال دارای الگوی تغییر مشابهی هستند. بنابراین داده‌های ساعتی قیمت به دو گروه ۶ ماه اول و ۶ ماه دوم دسته‌بندی شدند. همچنین مجموعه داده ها در هر گروه، به صورت ساعات اوج قیمت، ساعات قیمت متوسط و ساعات قیمت پایین دسته بندی گردید. در این مقاله ، دو مدل پیش‌بینی قیمت برق با استفاده از از شبکه‌عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) ، پیشنهاد شده است. داده‌های مورد استفاده عبارتند از داده‌های قیمت برق و بار پبش بینی شده در سال ۱۳۹۲ که از پورتال شرکت مدیریت شبکه برق کشور استخراج شده اند [۴] [۵] .شبکه عصبی اولیه دارای ۲ لایه و ۷ نرون در لایه پنهان بوده و از تابع تانژانت سیگموئید برای انتقال نرون‌های لایه پنهان استفاده می‌نماید. در مدل‌های ارائه‌شده در این مقاله، ۷۰٪ مجموعه داده‌ها به عنوان مجموعه آموزش و۳۰٪ باقیمانده به عنوان مجموعه تست در نظر گرفته شده است. جهت پیاده سازی مدل ها از نرم افزار IBM SPSS Modeler(Clementine) 14.2 استفاده شده و معیارهای ارزیابی MAPE و RMSE برای تمام مدل‌های پیشنهادی، محاسبه و ارائه شده است.

۳.۱. پیاده سازی مدل پایه با اعمال دسته‌بندی داده‌ها

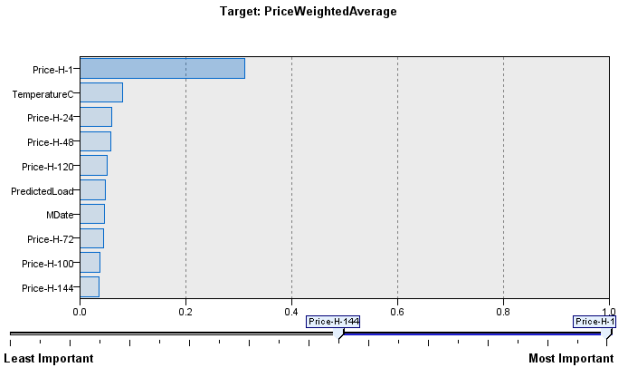
در این بخش جهت انجام پیش‌بینی متوسط موزون قیمت، داده ها به دو گروه ۶ ماه اول و ۶ ماه دوم دسته بندی شده سپس در هر دسته ۳ شبکه عصبی مستقل برای ساعات اوج قیمت، ساعات قیمت متوسط و ساعات قیمت پایین در نظر گرفته شده است. قیمت‌های گذشته با بیش‌ترین تأثیر و پارامترهای دما، بار پیش‌بینی‌شده، فصل، کاری و غیر کاری بودن روز، ورودی‌های شبکه پیشنهادی هستند. تعداد کل رکوردها در این مدل ۸۷۶۰ می‌باشد که تعداد ۵۱۷۸ رکورد مجموعه آموزش و ۱۷۳۷ رکورد به مجموعه تست تعلق دارد. نتایج حاصل از پیش‌بینی ساعات اوج قیمت، قیمت متوسط و قیمت پایین برای ۶ ماه اول و دوم سال در شکل‌های (۹)، (۱۰) نشان داده شده است. در شکل (۱۱) میزان تأثیر هر یک از ورودی های شبکه را در پیش‌بینی قیمت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قیمت یک ساعت قبل بیش‌ترین تأثیر را در پیش‌بینی داشته است و به ترتیب دما، قیمت روز قبل، قیمت دو روز قبل و بار تأثیرگزار بوده‌اند. MAPE و RMSE محاسبه شده برای مدل پایه در جدول (۲) آورده شده است. مشاهده می‌شود که دقت مدل برای ساعت‌های اوج قیمت و قیمت پایین، نسبت به ساعت‌های قیمت متوسط بهتر بوده است.



شکل ۹- نتایج پیش‌بینی مدل پایه در ساعات اوج قیمت ۶ ماه اول



شکل ۱۰- نتایج پیش‌بینی مدل پایه در ساعات قیمت متوسط در فصل بهار



شکل ۱۱- میزان وابستگی قیمت پیش‌بینی‌شده به ورودی‌های شبکه

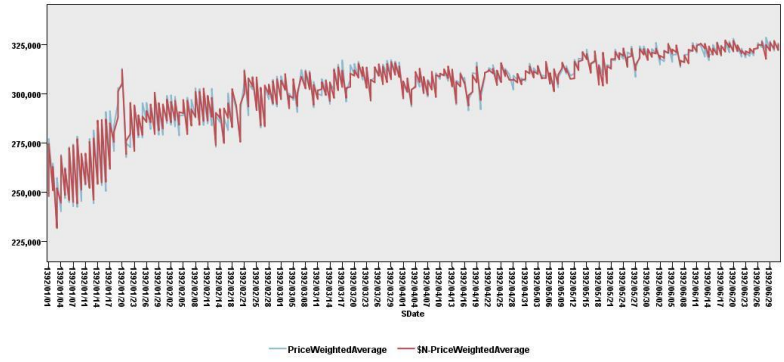
جدول ۲- MAPE و RMSE مدل پایه

	میانگین مطلق درصد خطا (MAPE)				ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)			
	قیمت اوج	قیمت متوسط	قیمت پایین	کل	قیمت اوج	قیمت متوسط	قیمت پایین	کل
۶ ماه اول	۱/۳۸۸۸	۲/۵۵۵۸	۱/۷۱۵۰	۱/۸۲۵۷	۵۶۰۵/۱۸۰۳	۸۹۰۳/۳۰۰۷	۵۷۶۰/۰۲۶۵	۶۵۸۰/۰۵۹۷
۶ ماه دوم	۱/۳۳۳۳	۲/۲۶۴۶	۱/۶۹۶۹		۵۲۱۵/۶۹۹۰	۹۱۵۶/۲۶۲۴	۴۸۳۹/۸۸۹۱	

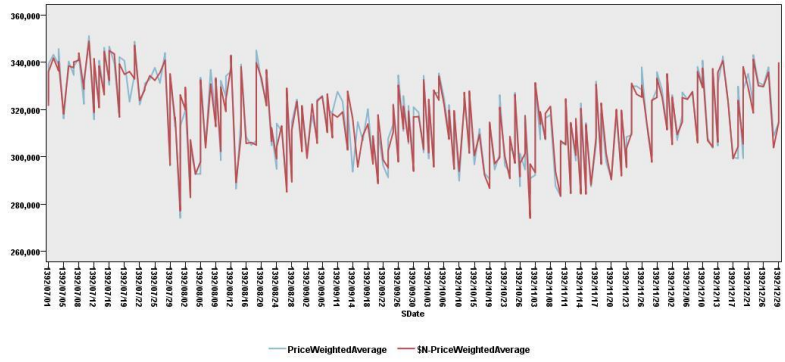
۳.۲. پیاده‌سازی مدل پایه با روش Boosting

در این بخش با استفاده از شبکه عصبی با ساختار مدل پایه، و با بهره‌گیری از روش بهبود آموزش Boosting، متوسط موزون قیمت پیش‌بینی شده است. . مجموعه داده مورد استفاده مدل پیشنهادی، دارای ۸۷۶۰ رکورد است که از این تعداد ۵۵۸۰ رکورد جهت مدل‌های ساعات اوج قیمت،۱۸۶۰ رکورد جهت مدل‌های ساعات قیمت متوسط و ۱۴۸۸ رکورد جهت مدل‌های قیمت پایین در نظر

گرفته شده است. پس از اجراهای مکرر، بهترین ساختار شبکه با دو لایه و۱۰ نرون در لایه پنهان انتخاب گردید. چند نمونه از نتایج حاصل از پیش‌بینی با مدل ارائه شده در شکل‌های (۱۲)، (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود، قیمت های پیش بینی شده تا حد زیادی به قیمت های واقعی نزدیک هستند. مقادیر محاسبه شده خطای MAPE و RMSE در جدول (۳) آورده شده است.



شکل۱۲- نتایج پیش‌بینی مدل پایه با روش Boosting ساعات اوج قیمت ۶ ماه اول



شکل۱۳-نتایج مدل پایه با روش Boosting ساعات قیمت متوسط ۶ ماه دوم

جدول ۳- MAPE و RMSE مدل پایه با روش Boosting

	میانگین مطلق درصد خطا (MAPE)				ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)			
	قیمت اوج	قیمت متوسط	قیمت پایین	کل	قیمت اوج	قیمت متوسط	قیمت پایین	کل
۶ ماه اول	۰/۶۶۳۱	۱/۱۲۵۰	۰/۷۰۶۱	۰/۷۴۱۵	۲۶۲۳/۰۶۹۹	۴۴۱۴/۰۱۶۴	۲۳۸۸/۳۰۲۵	۳۰۳۰/۴۷۲۷
۶ ماه دوم	۰/۶۰۵۲	۰/۸۲۵۶	۰/۵۲۴۲		۲۶۰۰/۳۱۹۸	۳۷۱۷/۵۰۵۳	۲۴۳۹/۶۲۲۴	

۴. ارزیابی مدل‌های پیشنهادی

با توجه به نتایج حاصل از مقایسه قیمت‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده در مدل پایه، دسته‌بندی مجموعه داده‌ها و ساعات روز تأثیر به سزایی در افزایش دقت مدل پیش بینی دارد. شکل (۱۱)، نشان می‌دهد که قیمت هر ساعت به قیمت یک ساعت قبل و دمای همان ساعت بیش‌ترین وابستگی را دارد. قیمت ساعت مشابه روز قبل، ساعت مشابه دو روز قبل و بار پیش‌بینی‌شده نیز از جمله ورودی‌های با تأثیر بالا هستند. در مدل دوم، استفاده از روش Boosting موجب بهبود فرایند یادگیری و در نتیجه افزایش دقت مدل شده است. با توجه به مقادیر MAPE و RMSE مدل پایه با روش Boosting در جدول (۳) ، این از دقت قابل قبولی برخوردار است. در این مدل، کمترین مقدار خطا مربوط به ساعات قیمت پایین در شش ماه دوم و برابر با ۰/۵۲ است. خلاصه نتایج حاصل‌شده از پیاده‌سازی این مدل در جدول(۴) ارائه شده است.

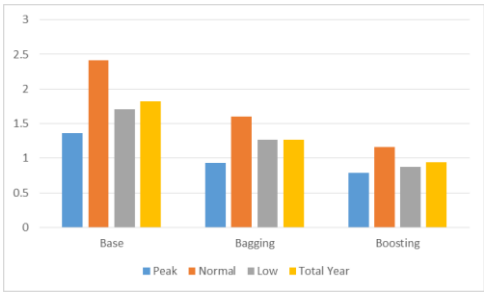
در جدول (۵)، خلاصه نتایج به دست آمده از مدل‌های ارائه‌شده نشان داده شده است. بر اساس نتایج می‌توان گفت که دسته‌بندی داده‌ها با الگوی تغییر مشابه و پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی مستقل برای هر دسته، یکی از تکنیک‌های مؤثر در افزایش دقت پیش‌بینی و کاهش میزان خطا است. به‌کارگیری روش بهبود آموزش Boosting به میزان قابل‌توجهی دقت مدل را افزایش داده است. این امر نشان‌دهنده کارایی روش فوق در فرایند پیش‌بینی قیمت است. با توجه به نتایج درج شده در جدول(۵)، مدل Boosting کمترین مقدار خطا را دارد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر این روش در مقایسه با سایر روش‌ها است.

جدول۴- MAPE و RMSE مدل پایه با فرایند Boosting

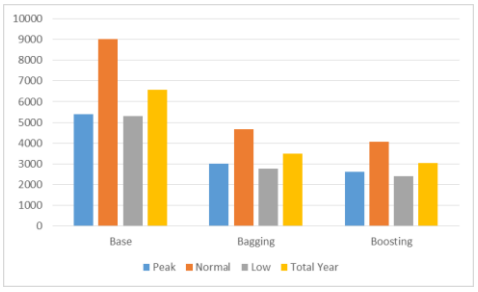
مجموعه داده	MAPE	RMSE
ساعات اوج قیمت	/۶۳۴۱۰	/۶۹۴۸۲۶۱۱
ساعات قیمت متوسط	/۹۷۵۳۰	/۷۶۰۸۴۰۶۵
ساعات قیمت پایین	/۶۱۵۲۰	/۹۶۲۵۲۴۱۳
ساعات کل سال	/۷۴۱۵۰	/۴۷۲۷۳۰۳۰

جدول۵- مقایسه MAPE و RMSE مدل‌های پیشنهادی

مدل شبکه عصبی MLP	MAPE	RMSE
مدل پایه پیشنهادی	۱/۸۲۵۷	/۰۵۹۷۶۵۸۰
مدل پایه با فرایند Boosting	**/۷۴۱۵۰**	/۴۷۲۷۳۰۳۰



شکل ۱۶- مقایسه MAPE مدل‌ها بر اساس دسته‌بندی ساعات روز



شکل ۱۷- مقایسه RMSE مدل‌ها بر اساس دسته‌بندی ساعات روز

۵. نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و روش‌های آماری و با پیروی از مراحل انجام یک پروژه داده کاوی در فرایند Crisp-DM به پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت برق پرداخته شد. برای نیل به این هدف ضمن بیان ضرورت پیش‌بینی قیمت برق در سیستم‌های قدرت تجدیدساختار یافته، مهمترین روش‌های پیش‌بینی قیمت و تحقیقات انجام شده در این زمینه بیان گردید. همچنین ارتباط قیمت برق با عوامل تأثیرگذاری مانند دما، بار، فصل و ساعات شبانه‌روز مورد تحلیل و بررسی قرار کرفته، مؤثرترین پارامترها و میزان تأثیر آنها ارائه شد. در ادامه با انجام دسته‌بندی‌های مناسب بر اساس شش ماه اول و شش دوم سال و نیز ساعات اوج قیمت، ساعات قیمت متوسط و ساعات قیمت پایین، با استفاده از شبکه‌های عصبی MLP، قیمت ساعتی برق پیش‌بینی گردید. جهت افزایش دقت مدل ارائه شده، روش بهبود آموزش Boosting مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل‌های پیشنهادی، بکارگیری روش فوق به میزان قابل‌توجهی دقت مدل را افزایش داده و موجب کاهش خطای پیش‌بینی شده است. مدل‌های پیشنهادی با استفاده از معیارهای MAPE و RMSE مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی فوق نشان می‌دهد که مدل‌های پیشنهادی از دقت بالایی برخوردار هستند و مدل شبکه عصبی با روش Boosting بهتری دارد.

۶. تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از همکاری و حمایت دفتر بازار برق و دفتر تحقیقات و استانداردهای سازمان آب و برق خوزستان تشکر و قدردانی می‌گردد.

۷. فهرست منابع

[۱] کرشن، دانیل؛ استرابک، م؛ براتی، م؛ جهان بین، ا؛ رحمتی، ا؛ کاشانی زاده، ب؛ محمدنژاد، ح؛ قاضی، ج؛ مبانی اقتصاد سیستم قدرت، دبیرخانه هیأت تنظیم بازار برق ایران، تهران، ۱۳۸۶.

[۲] شهرابی، جمال؛ داده کاوی ۲، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۰

[۳] شهرابی، جمال؛ ذوالقدر شجاعی، علیرضا؛ *داده کاوی پیشرفته- مفاهیم و الگوریتم‌ها*، همزبانان،دبیرخانه هیات تنظیم بازار برق ایران، تهران ، *چاپ دوم، ۱۳۹۰.*

[۴]پیش‌بینی بار روزانه سال ۱۳۹۲. شرکت مدیریت شبکه برق ایران، [آنلاین]، <http://www.igmc.ir/Default.aspx?tabid=477&EntryId=275905> دریافت شده در ۲۲ اردیبهشت ۱۳۹۳]

[۵]قیمت روز بازار سال ۱۳۹۱.شرکت مدیریت شبکه برق ایران.۱۳۹۱. [آنلاین]، <http://www.igmc.ir/Default.aspx?tabid=477&EntryId=275901> دریافت شده در ۲۲ اردیبهشت ۱۳۹۳]

[٦] Sanjeev K; Aggarwal L. M; "Ashwani K;.Electricity price forecasting in deregulated markets:A review and evaluation.Electrical Power and Energy Systems"; 31:13-22, 2009

[٧] Zhao J.H; Dong Z.Y; Li X; Wong K.P; "A general method for electricity market price spike analysis"; IEEE power engineering society general meeting, 1: 1286–93, 2005.

[٨] Hun J; Kamber M; DataMining Concepts and Techniques, 2006.

[٩]Wang G; Hao J, Ma J; Jiang H; "A comparative assessment of ensemble learning for credit scoring", Expert Systems with Applications, 38: 223–230, 2011.

[١٠]Kim Y; "Boosting and measuring the performance of ensembles for a successful database marketing", Expert Systems with Applications, 36: 2161–21, 2009.

[١١]Jain A; Tuli A; Kakkar M; "A Review For Electricity Price Forecasting Techniques In Electricity Markets" Int. J. Eng, 4:1714–1718, 2013.

[١٢] Huang D; Zareipour H; Member S; Rosehart W.D; "Data Mining for Electricity Price Classification and the Application to Demand-side Management", pp: 1–11, 2012.

[١٣] Mandal P; Senjyu T; Yona A; Park J.W; Srivastava A.K; "Sensitivity Analysis of Similar Days Parameters for Predicting Short-Term Electricity Price", 2007 39th North American Power Symposium, pp:568–574, 2007.

[١٤]Mandal P; Senjyu T,Uezato K; Funabashi T; "Several-hours-ahead electricity price and load forecasting using neural networks", IEEE Power Engineering Society General Meeting,pp:2205–2212, 2005.

[١٥]Amjady n; Daraeepour A; "Day-ahead electricity price forecasting using the relief algorithm and neural networks", 2008 5th International Conference on the European Electricity Market, pp:1–7, 2008.

[١٦]Azevedo F; Vale Z; "Forecasting Electricity Prices with Historical Statistical Information using Neural Networks and Clustering Techniques", 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition,pp:44–50, 2006.

[١٧]Ranjbar M; Soleymani S; Sadati N; Ranjbar A; "Electricity Price Forecasting Using Artificial Neural Network", International Conference on Power Electronic,Drives and Energy Systems. PP: 1–5, 2006.

[١٨]Zhao J.H; Dong Z; Li X; Wong K.P; "A Framework for Electricity Price Spike Analysis With Advanced Data Mining Methods", IEEE Transaction Power Systems, 1:376–385, 2007.

[١٩]Zhao J; Dong Z; "A Statistical Approach for Interval Forecasting of the Electricity Price", IEEE Transaction Power Systems, 2:267–276, 2008.

[٢٠]Mandal P; Srivastava A.K; Park J.W; "An Effort to Optimize Similar Days Parameters for ANN-Based Electricity Price Forecasting", IEEE Transaction on Industry Applications, 5:1888–1896, 2009.