بکارگیری الگوریتم Bagging در شبکه‌های عصبی جهت پیش‌بینی قیمت برق در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته

زهره رمضانعلی‌زاده، محمد حسین یکتایی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آبادان، آبادان، ایران

چکیده:

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. در این مقاله، ضمن بررسی عوامل تأثیرگذار بر قیمت برق، با استفاده از داده‌کاوی و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، قیمت کوتاه مدت برق پیش‌بینی می‌گردد. بدین منظور با استفاده از شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه، دسته‌بندی داده‌ها و به‌کارگیری الگوریتم بهبود آموزش Bagging مدل‌های پیش‌بینی متوسط موزون قیمت برق ارائه شده است. ورودی مدل‌های ارائه شده، قیمت ساعات قبل، بار پیش‌بینی شده، دما، کاری و غیرکاری بودن روز است و خروجی آن قیمت پیش‌بینی شده می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از اجرای این مدل، نشان می‌دهد که دسته‌بندی مناسب داده‌ها و ایجاد مدل مناسب برای هر دسته و نیز استفاده از الگوریتم‌های بهبود آموزش، به میزان قابل‌توجهی دقت مدل را افزایش داده و موجب کاهش نرخ خطای پیش‌بینی خواهد شد.

کلمات کلیدی: بازار برق، پیش‌بینی قیمت برق، داده‌کاوی، شبکه‌عصبی و Bagging

۱.مقدمه:

قیمت برق در بازار انحصار دولتی به صورت دستوری و تابع هزینه‌های عرضه و سیاست‌های صنعتی و اجتماعی دولت‌ها تعیین می‌شود و غالباً در میان‌مدت و یا کوتاه مدت ثابت یا همراه با تغییرات بسیار کم و قابل پیش‌بینی است. در پی تجدید ساختار بازار برق در بسیاری از کشورها، قیمت در بازار رقابتی و متأثر از نیروهای بازار و از طریق اثر متقابل توابع پیچیده عرضه و تقاضای برق تعیین می‌شود. تولیدکنندگان و خریداران برای تبادل برق تولیدی و مورد نیاز خود در بازار رقابت می‌کنند و قیمت‌های پیشنهادی خود در ساعات مختلف را به بهره‌بردار بازار ارائه می‌دهند. قیمت‌های نقدی همراه با تغییرات زیاد و ریسک که در بازار رقابتی تعیین می‌شود، رفتار فعالان بازار را تغییر می‌دهد و لذا پیش‌بینی قیمت‌ها برای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان برق جهت برنامه‌ریزی آتی، سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و مدیریت ریسک ناشی از تغییرات گسترده قیمت، ضروری است (هیأت تنظیم بازار برق ایران، ۱۳۸۵). پیش‌بینی قیمت امری مهم و چالش‌برانگیز در بازارهای رقابتی انرژی است. ارزیابی قیمت بازار یکی از نگرانی‌های بسیار مهم بازیگران و تنظیم‌کنندگان بازار برق در هر کشوری است. به طور کلی، پیش‌بینی قیمت برق را می‌توان در برنامه‌ریزی افق زمانی، به سه دسته پیش‌بینی کوتاه مدت (از چند ساعت تا چند روز)، پیش‌بینی میان‌مدت (از چند روز تا چند هفته یا چند ماه) و پیش‌بینی بلندمدت (از چند ماه تا چند سال) تقسیم‌بندی کرد (کرشن و همکاران، ۱۳۸۶). مدل‌های زیادی به‌منظور پیش‌بینی قیمت برق توسعه‌یافته‌اند و افق زمانی پیش‌بینی در روش‌های مختلف از افق ساعتی تا هفتگی متغیر می‌باشد. کیم و همکاران(۲۰۰۶) پیش‌بینی را به دو گروه عمده تقسیم کرده‌اند: روش‌های پارامتری و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی. روش‌های پارامتری یک مدل ریاضی یا آماری را با بررسی روابط

کیفی بین قیمت بازار و عوامل موثر بر آن، تشکیل می‌دهند. روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی از شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان مدل بار یا قیمت استفاده می‌کنند. در این دو روش، جهت پیش‌بینی کوتاه مدت، عوامل متعددی مثل زمان، داده‌های آب و هوا و وضعیت مشتریان در نظر گرفته می‌شود. بر اساس تحقیقات انجام شده (سانجیو و همکاران، ۲۰۰۹)، مدل‌های پیش‌بینی قیمت به ۳ دسته مهم تئوری بازی‌ها، روش‌های شبیه‌سازی و روش‌های آماری تقسیم می‌شوند. روش‌های مبتنی بر نظریه بازی‌ها، راهبردهای شرکت‌کنندگان بازار را مدل‌سازی کرده و راه حل هر بازی را مشخص می‌کنند. مدل‌های شبیه‌سازی به تقلید عملیات خرد سیستم قدرت پرداخته و کلیه فرایندهای فیزیکی تحت سیستم را آزمایش می‌کند. مدل‌های آماری به مدل‌های جعبه سیاه 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 و

نوسانات قیمت به‌کار می‌روند. از جمله این روش‌ها می‌توان به تکنیک‌های داده‌کاوی برای تحلیل پیک قیمت اشاره کرد (ژو، ۲۰۰۵). در میان مدل‌های آماری مدل‌های سری زمانی از اهمیت فراوانی برخوردارند(سانجیو و همکاران، ۲۰۰۹) . 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، ARIMAX،S-ARIMA و GARCH ازجمله مدل‌های مطرح سری زمانی می‌باشند. مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی بدون در نظر گرفتن فرایندهای داخلی سیستم به نگاشت 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، مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی هستند. در تحقیق انجام شده (رائو و همکاران، ۲۰۱۳)، یک مدل جهت پیش‌بینی ساعتی قیمت در بازار برق با استفاده از تکنیک منطق فازی۱ بر پایه رویکرد روزهای مشابه۲ پیشنهاد شده است. در این مدل از روش استنتاج ممدانی۳ و از ۲۴ گام برای پیش‌بینی قیمت ۲۴ ساعت آینده استفاده‌شده است. همچنین یک مدل ترکیبی با استفاده از شبکه‌های عصبی و سیستم استنتاج فازی۴، ارائه‌شده است (گابتا، ۲۰۱۳). جهت بررسی این مدل از داده‌های بازار برق هند و با مقایسه کار آیی مدل‌های شبکه عصبی و مدل ترکیبی پیشنهادی بهره‌برداری شده است. در تحقیق دیگری (امجدی و همکاران، ۲۰۱۱)، با استفاده از روش پیشنهادی حلقه بسته۵ که شامل شبکه عصبی احتمالی PNN و سیستم ارزیابی شبکه عصبی ترکیبی HNES ۶ است، به پیش‌بینی وقوع جهش قیمت و نیز پیش‌بینی قیمت واقعی می‌پردازد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های مربوط به بار و نیز مقادیر تاریخی گذشته، با استفاده از تکنیک‌های داده کاوی به کشف ویژگی‌های بارز و مؤثر در داده‌ها پرداخته و مجموعه‌ای از داده‌ها را که شامل بیش‌ترین ویژگی‌های مؤثر می‌باشند انتخاب می‌کند. 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 Bagging، مدل پیش‌بینی قیمت برق بر اساس روش پیشنهادی برای دو حالت پیش‌بینی قیمت روز بعد۷ و پیش‌بینی لحظه‌ای قیمت۸ ارائه شده است. مجموعه داده

---

۳ Fuzzy Logic (FL)
۴ Similar Days (SD)
۵ Mamdani
۶ Fuzzy Inference System (FIS)
۹ Closed Loop
۱۰ Hybrid neuro-evolutionary system
۱۱ Day Ahead Forcasting
۱۲ Realtime Forcasting

مورد استفاده، مربوط به داده‌های ساعتی قیمت برق در بازار برق کشور و بار پیش‌بینی شده در سال ۱۳۹۲ می‌باشد(شرکت مدیریت شبکه برق ایران، ۱۳۹۳). مدل‌های پیشنهادی با استفاده از معیارهای MAPE و RMSE ارزیابی می‌گردند.

۲.بهبودآموزش شبکه عصبی با روش Bagging:

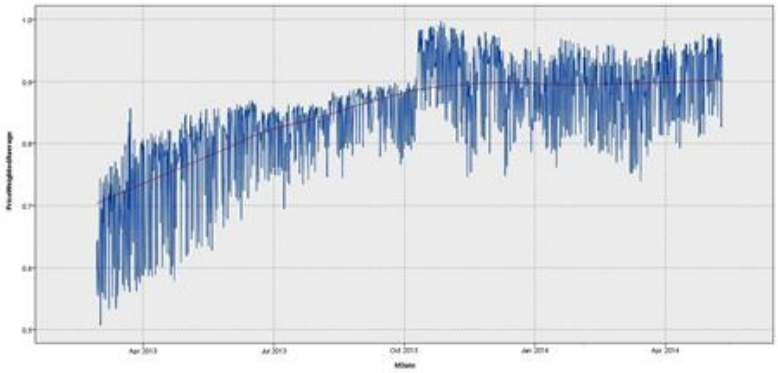
شبکه‌های عصبی دارای چندین خصوصیت متمایز و منحصربه‌فرد می‌باشند که آن‌ها را به روش‌های مناسبی جهت کار پیش‌بینی سری‌های زمانی مبدل کرده است. شبکه‌های عصبی بر خلاف روش‌های مبتنی بر مدل، روش‌هایی خود تطبیق‌ده و داده گرا می‌باشند .در این روش‌ها فرضیات خیلی کمی در مورد مدل مسئله مد نظر قرار می‌گیرد . آن‌ها از مثال‌ها یاد می‌گیرند و روابط بین داده‌ها را حتی اگر این روابط ناشناخته یا سخت برای توصیف باشند به دست می‌آورند . بنابراین برای حل مسائل دارای روابط پیچیده بین متغیرها مناسب می‌باشند به شرطی که داده‌های کافی برای آن‌ها وجود داشته باشد. شبکه‌های عصبی شامل تعدادی گره ورودی، لایه‌های مخفی، گره‌های مخفی و تعدادی گره خروجی هستند. گره‌های مخفی در لایه‌های مخفی به شبکه عصبی اجازه می‌دهند خصوصیات داده‌ها را کشف و شناسایی نماید تا به وسیله آن نگاشت‌های غیرخطی پیچیده را بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار نماید. 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 (شهرابی و ذوالقدر، ۱۳۹۳). استفاده از الگوریتم آموزش مناسب و بهبود فرایند آموزش در شبکه‌های عصبی موجب افزایش دقت پیش‌بینی و کاهش میزان خطا می-گردد. یادگیری دسته جمعی (Ensemble Learning) یک رویکرد مؤثر در یادگیری ماشینی است که از آن به منظور بهبود دقت یادگیری استفاده می شود و در واقع روشی است برای آنکه بتوان تقریب بهتری از نتایج یک شبکه عصبی فراهم کرد (ونگ و همکاران، ۲۰۱۱). یکی از مهم ترین روش‌های یادگیری دسته جمعی، روش Bagging است که می تواند برای افزایش کارائی الگوریتم های آموزشی به کار رود (کیم، ۲۰۰۹). این روش 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 روش Bagging به جای استفاده از یک شبکه عصبی از ترکیب چند شبکه عصبی استفاده می‌شود و یک سیستم مرکب شکل می‌گیرد و عملیاتی را به منظور تهیه نمونه‌های

آموزشی متفاوت انجام می‌دهد. مجموعه داده‌های آموزشی هر شبکه بطور تصادفی و با جایگزینی انتخاب می‌شود و هر شبکه بصورت مستقل آموزش می‌بینند. در نهایت نتیجه سیستم مرکب ایجاد شده با روش رأی اکثریت و یا روش میانگین انتخاب می‌گردد.

۳.بررسی حساسیت قیمت برق

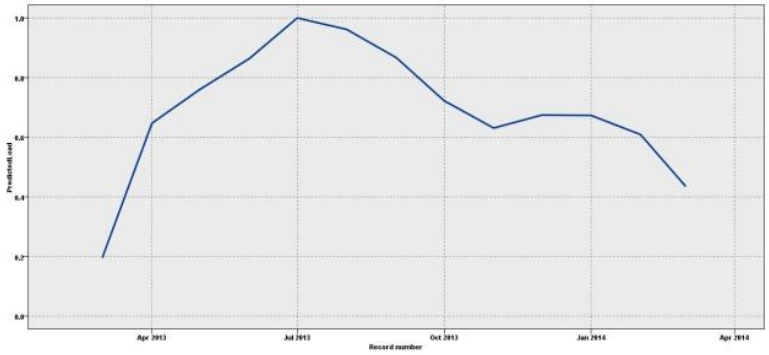
۳.۱. بررسی پارامترهای تأثیرگذار برقیمت برق

به‌منظور تحلیل تغییرات قیمت برق در طول سال، نمودار سری زمانی قیمت‌های ساعتی برق 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. سری زمانی رسم شده ، یک روند رو به رشد را برای قیمت نشان می‌دهد. در واقع مقادیر قیمت در طول زمان افزایش می‌یابد. روند رو به رشد قیمت در شش ماه اول سال ادامه دارد و در شش ماه دوم با تغییرات کمتری مواجه هستیم.



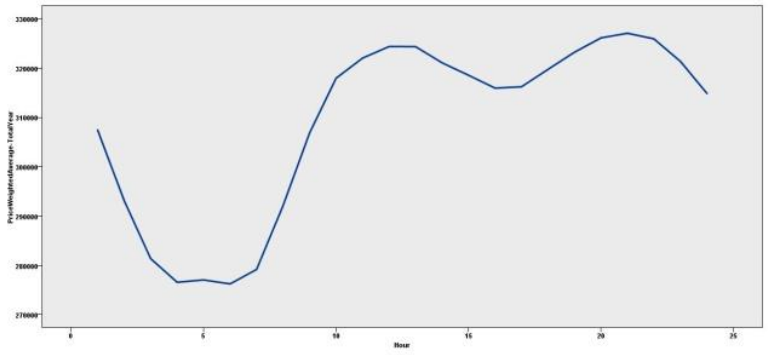
شکل ۱ - قیمت برق در سال ۱۳۹۲

همان‌طور که دیده می‌شود، 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 ۲»، تغییرات بار ساعتی در سال را نشان می دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان بار مصرفی از ابتدای سال روند افزایشی داشته است و در مردادماه به بالاترین مقدار رسیده است. از ماه پنجم به بعد تغییرات کاهشی بوده و در پایان سال روند کاهش کمتر شده است.



شکل ۲- بار پیش‌بینی‌شده در سال ۱۳۹۲

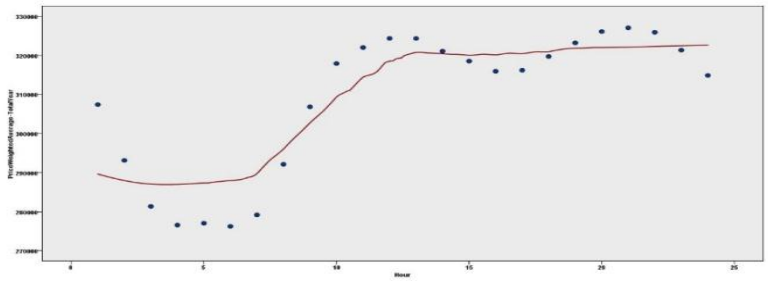
به‌منظور بررسی رابطه قیمت برق نسبت به ساعات مختلف، میانگین قیمت هر ساعت از سال ۱۳۹۲ محاسبه و روند تغییرات قیمت در طول ۲۴ ساعت در شکل «شکل ۳» ترسیم شده است. همان طور که دیده می‌شود، قیمت برق دارای تغییرات متناوب است. بدین ترتیب که در ابتدای روز تا ساعت ۶ صبح، روند کاهشی قیمت دیده می‌شود. مقدار کمینه مربوط به ساعات اولیه صبح است. از ساعت ۸ صبح، قیمت روند افزایشی دارد و در ساعت ۱۲ به اوج خود می‌رسد. روند تغییرات قیمت نشان می‌دهد که در هر روز با دو پیک قیمت مواجه هستیم که مربوط به اوج بار شبکه می‌باشد؛ یعنی با افزایش بار شبکه، قیمت برق در این ساعات افزایش می‌یابد. پیک اول مربوط به ساعات اولیه ظهر و پیک دوم مربوط به ساعات اولیه شب و اوج بار مصرفی است.



شکل ۳- میانگین ساعتی قیمت برق در سال ۱۳۹۲

۳.۲. ارتباط قیمت برق با ساعات شبانه‌روز

جهت 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 ۴»، 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 ۴- دسته‌بندی قیمت‌ها بر اساس ساعات شبانه‌روز

ساعت‌های اوج قیمت	۱۰ الی ۲٤
ساعت‌ها با قیمت‌های متوسط	۱،۲،۳،۸،۹
ساعت‌ها با قیمت‌های پایین	٤،۵،٦،۷

جدول۱- نتایج حاصل از بررسی ارتباط قیمت با ساعت‌های مختلف روز

۴.مدل‌سازی

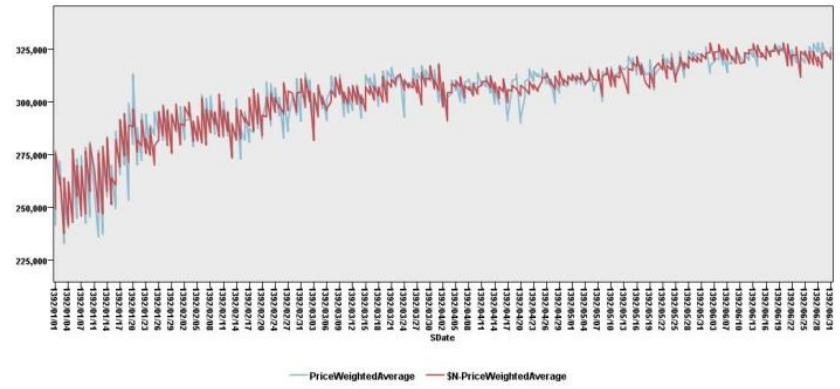
با توجه به تحقیقات انجام‌شده، داده‌های قیمت گذشته اصلی‌ترین اطلاعات برای پیش‌بینی قیمت می‌باشند. به منظور شناسایی مؤثرترین قیمت ها، به ازای هر ساعت، قیمت ۱ ساعت قبل، ۲ ساعت قبل، ۳ ساعت قبل تا قیمت ۱۷۶ ساعت قبل محاسبه و مدل پیش‌بینی قیمت بر اساس قیمت‌های

گذشته و با استفاده از شبکه‌عصبی MLP پیاده‌سازی گردید. با بررسی میزان تأثیر قیمت‌های گذشته مشخص شد که قیمت هر ساعت با مقادیر ساعات ۱۶۸،۱،۲۴،۲۸،۴۸،۵۲،۷۲،۷۶،۹۶،۱۰۰،۱۲۰،۱۲۴،۱۴۴،۱۴۸بیش‌ترین 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. پارامترهای دما، بار پیش‌بینی شده، کاری و غیرکاری بودن روز و فصل نیز سایر ورودی‌های مدل اولیه هستند. 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. ابتدا مدل پیش‌بینی قیمت با اعمال روش فوق و با استفاده از شبکه عصبی MLP ساده پیاده‌سازی می‌گردد. در مرحله بعد با استفاده از الگوریتم بهبود آموزش Bagging، مدل پیش‌بینی قیمت توسعه داده می‌شود. 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 (پیش‌بینی بار روزانه سال ۱۳۹۲. شرکت مدیریت شبکه برق ایران،۱۳۹۳). 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 (شهرابی و زارع،۱۳۹۲) و معیارهای ارزیابی MAPE و RMSE برای تمام مدل‌های پیشنهادی، محاسبه و ارائه شده است.

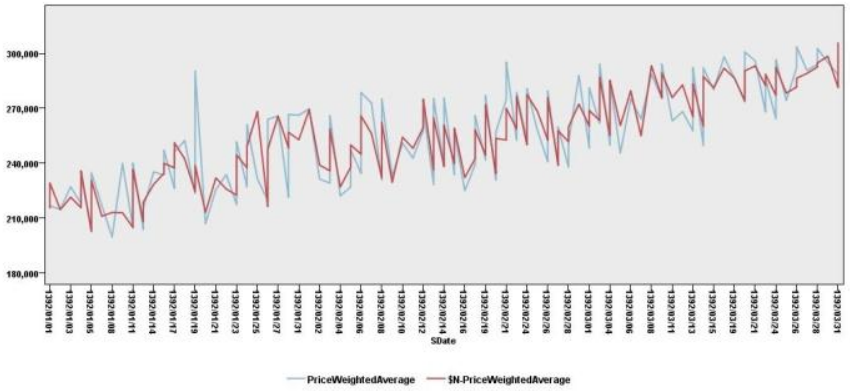
۴.۱. توسعه مدل پیش‌بینی با اعمال دسته‌بندی داده‌ها

در این مدل، داده ها به دو گروه ۶ ماه اول و ۶ ماه دوم دسته بندی شده، سپس در هر دسته سه شبکه عصبی مستقل برای ساعات اوج قیمت، ساعات قیمت متوسط و ساعات قیمت پایین در نظر گرفته شده است. تعداد کل رکوردها ۸۷۶۰ می‌باشد که تعداد ۵۱۷۸ رکورد به مجموعه آموزش و ۱۷۳۷ رکورد به مجموعه تست تعلق دارد. نتایج حاصل از پیش‌بینی در «شکل ۵» و «شکل ۶» نشان داده شده است. «شکل ۷» میزان تأثیر هر یک از ورودی های شبکه را در پیش‌بینی قیمت نشان می-

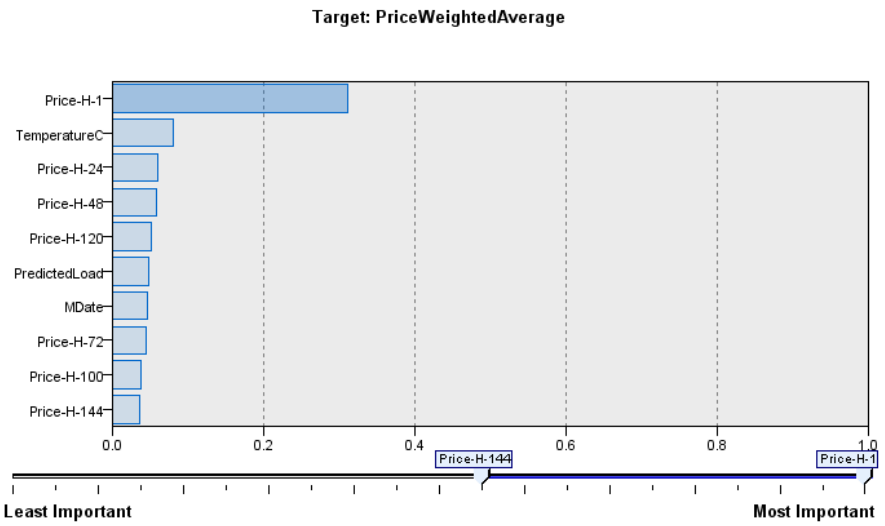
دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قیمت یک ساعت قبل بیش‌ترین تأثیر را در پیش‌بینی داشته است و به ترتیب دما، قیمت روز قبل، قیمت دو روز قبل و بار تأثیرگزار بوده‌اند.



شکل ۵- مقایسه قیمت واقعی و پیش‌بینی شده در ساعات اوج قیمت ۶ ماه اول



شکل ۶- مقایسه قیمت واقعی و پیش‌بینی شده در ساعات قیمت متوسط بهار



شکل ۷- میزان وابستگی قیمت پیش‌بینی‌شده به ورودی‌های شبکه

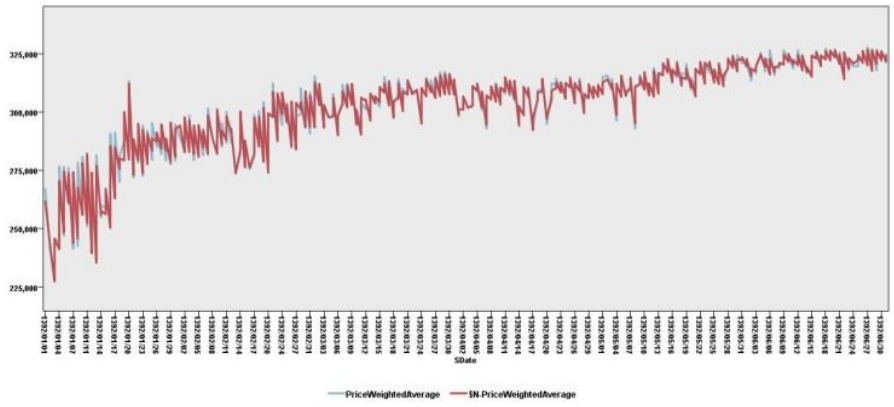
MAPEو RMSE محاسبه شده برای مدل پایه در «جدول ۲» آورده شده است. مشاهده می‌شود که دقت مدل برای ساعت-های اوج قیمت و قیمت پایین، نسبت به ساعت‌های قیمت متوسط بهتر بوده است.

جدول ۲- Mape و RMSE مدل پیش‌بینی با اعمال دسته‌بندی

	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	

۴.۲. توسعه مدل پیش‌بینی قیمت با استفاده از روش Bagging

با استفاده از شبکه عصبی با ساختار مدل پایه و با بهره‌گیری از روش بهبود آموزش Bagging به پیش‌بینی متوسط موزون قیمت برق می‌پردازیم. مجموعه داده شامل ۸۷۶۰ رکورد است که از این تعداد، ۵۵۸۰ رکورد جهت مدل‌های ساعات اوج قیمت، ۱۸۶۰رکورد جهت مدل‌های ساعات قیمت متوسط و ۱۴۸۸ رکورد جهت مدل‌های قیمت پایین در نظر گرفته شده است. نتایج پیش‌بینی این مدل در «شکل ۸» و «شکل۹» و «جدول ۶» و «جدول ۷»، نشان داده شده است همانطور که دیده می شود استفاده از این روش بهبود آموزش، به میزان قابل توجهی باعث افزایش دقت مدل شده است.در «جدول ۸»، نمونه‌ای از قیمت‌های واقعی و پیش‌بینی شده در هفته اول مهرماه آورده شده است.



شکل ۸- مقایسه قیمت واقعی و پیش‌بینی شده در ساعات اوج قیمت ۶ ماه اول با روش Bagging

جدول ۶- MAPE مدل پیش‌بینی قیمت برق با روش

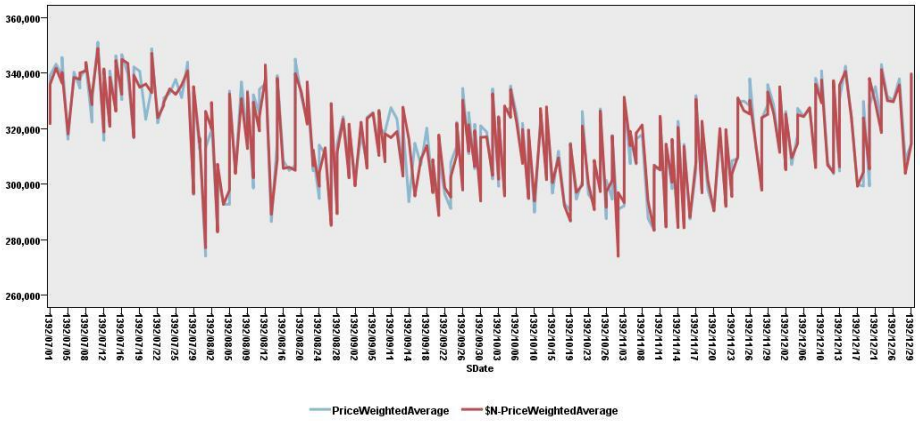
میانگین مطلق درصد خطا (MAPE)				
	قیمت اوج	قیمت متوسط	قیمت پایین	کل
٦ ماه اول	۰/٦٩٧٤	۱/۳۸۱٤	۰/۸۰۸۰	۰/۸۵۸۲
٦ ماه دوم	۰/٦۰۵۵	۰/۹۷۰٦	۰/٦۸٦۲	

Bagging

جدول ۷- RMSE مدل پیش‌بینی قیمت برق با روش

میانگین مطلق درصد خطا (RMSE)				
	قیمت اوج	قیمت متوسط	قیمت پایین	کل
٦ ماه اول	۸۵۱۳۸۷/	۷۱۷٤/	۸۱۵۹/	
	۳۳۰۳	۵۰۳۷	۲۷۰۵	٦۹۲۵/
٦ ماه دوم	۲۷۲۲/۲۲۸٦	۲۰٤۵/	۳۳۷۵/	۳٤۸۲
		٤۲۷٦	۲۸۵۰	

Bagging



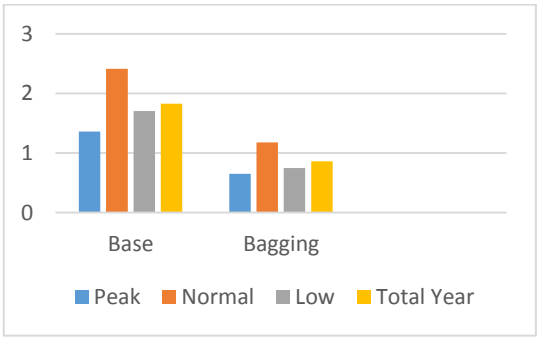
شکل ۹- مقایسه قیمت واقعی و پیش‌بینی شده در ساعات قیمت متوسط ۶ ماه دوم با روش Bagging

جدول ۸- قیمت‌های واقعی و پیش‌بینی شده در هفته اول مهرماه

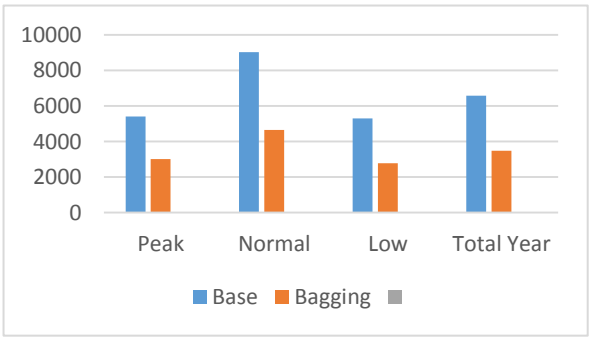
SDate	Hour	Real Price	Forcasted Price	Error percent
1392/07/01	3	323661	321873.7052	0.552211972
1392/07/01	9	339176	335949.543	0.951263354
1392/07/02	1	343242	341803.0756	0.419215726
1392/07/03	1	345653	340228.4598	1.569360087
1392/07/03	2	339124	336448.2805	0.789009184
1392/07/03	9	342297	339555.5666	0.800893206
1392/07/05	3	316245	318132.8397	0.59695481

1392/07/06	1	340348	338447.1218	0.558510184
1392/07/07	2	334658	337769.9041	0.929875917
1392/07/07	9	338320	340155.4225	0.542510777
1392/07/08	1	341632	343870.5949	0.655265
1392/07/08	9	342508	340889.9809	0.472403303

با توجه به نتایج حاصل از مقایسه قیمت‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده در مدل اولیه، دسته‌بندی مجموعه داده‌ها و ساعات روز تأثیر به سزایی در افزایش دقت مدل پیش بینی دارد. همچنین 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. مقادیر MAPE و RMSE پیش‌بینی روز بعد با روش Bagging در «جدول ۴»، نشان می‌دهد در این مدل دقت به طور محسوسی افزایش یافته است. ملاحظه می‌شود که کمترین خطای پیش‌بینی در این مدل مربوط به ساعات اوج قیمت است که مقدار آن ۰/۶۹ در ۶ ماه اول و ۰/۶۰ در ۶ ماه دوم می‌باشد.



شکل ۱۰- مقایسه MAPE مدل‌های پیشنهادی



شکل ۱۱- مقایسه RMSE مدل‌های پیشنهادی

جدول ۱۰- مقایسه MAPE و RMSE مدل‌های پیشنهادی

مدل شبکه عصبی MLP	MAPE	RMSE
مدل پیش‌بینی با اعمال دسته-بندی	۱/۸۲۵۷	٦٥٨٠/٠٥٩٧
مدل پیش‌بینی قیمت با روش **Bagging**	۰/۸۵۸۲	٣٤٨٢/٦٩٢٥

۵.نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، تکنیک‌های داده‌کاوی و روش‌های آماری به پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت برق پرداخته شد. برای نیل به این هدف ضمن بیان ضرورت پیش‌بینی قیمت برق در سیستم‌های قدرت تجدید-ساختار 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 گرفته، 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 Bagging مورد استفاده قرار گرفت و مدل پیش‌بینی متوسط موزون قیمت برق توسعه داده شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل‌های پیشنهادی، به‌کارگیری روش‌های فوق به میزان قابل‌توجهی دقت مدل را افزایش داده و موجب کاهش خطای پیش‌بینی شده‌اند. 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 پیش‌بینی قیمت با روش Bagging عملکرد بهتری دارد.

۶.قدردانی

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

۷.منابع

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]

تعطیلات رسمی کشور در سال ۱۳۹۲. مرکز تقویم موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.۱۳۹۱. [آنلاین]، <http://calendar.ut.ac.ir/Fa/Tyear/Data/holiday-1391.pdf>. دریافت شده در ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۳]

شهرابی، ج؛ ذوالقدر شجاعی، ع. ۱۳۹۰.داده کاوی پیشرفته- مفاهیم و الگوریتم‌ها، چاپ دوم . تهران: همزبانان،دبیرخانه هیات تنظیم بازار برق ایران.

شهرابی، ج؛ زارع، ا.۱۳۹۲.داده کاوی با کلمنتاین.تهران: جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر.

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

هیأت تنظیم بازار برق ایران. ۱۳۸۵. آیین نامه تعیین شرایط و روش خرید و فروش بازار برق در شبکه برق کشور، ویرایش یک. تهران: دبیرخانه هیأت تنظیم بازار برق ایران.

Kim B, Velas J, Lee J, Park J, Shin J, Lee K.2006. Short-Term System Marginal Price Forecasting Using System-Type Neural Network Architecture. 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, pp:1753–1758.

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

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

Rao N.V, Sarada K.2013.Price Eastimation for Day-Ahead Electricity Market Using Fuzzy Logic. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 5:1940–1946.

Gupta A, Chawla P, Chawla S.2013.Short Term Electricity Price Forecasting Using ANN and Fuzzy Logic under Deregulated Environment. International Journal of Advanced Research in Electrical,Electronics and Instrumentation Engineering, 8:3852–3858.

Amjady N, Keynia F. 2011.A new prediction strategy for price spike forecasting of day-ahead electricity markets. Applied Soft Computing, 6:4246–4256.

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

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