بررسی روش‌های پیش‌بینی قیمت برق در سیستم قدرت تجدید ساختار یافته

زهره رمضانعلی‌زاده، محمد حسین یکتایی

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

چکیده

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. در این ساختار جدید، پیش‌بینی مقدار تقاضا و قیمت برق به یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مهم برای مهندسان برق تبدیل شده است و محققان در این راستا به توسعه ابزارها و الگوریتم‌های آموزش می‌پردازند. در این مقاله ضمن معرفی ساختار بازار برق، فرایند فروش انرژی و روش‌های قیمت گذاری و پرداخت در بازار رقابتی برق، روش‌های پیش‌بینی قیمت برق مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌است. با توجه به ساختار بازار برق، شرایط جغرافیایی و سایر پارامترهای اثرگذار بر قیمت، روش‌های متعددی به منظور پیش‌بینی قیمت برق در کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت و نیز پیش‌بینی وقوع جهش قیمت ارائه شده است. روش‌های آماری، شبیه سازی و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی از جمله روش‌های مطرح در این زمینه می‌باشند. همچنین مدل‌های ترکیبی و مدل‌های مبتنی بر داده‌کاوی که اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند، پیشرفت‌های قابل توجهی را در بهبود فرایند پیش‌بینی قیمت در بر داشته‌اند.

کلمات کلیدی: بازار برق، پیش‌بینی قیمت برق، هوش مصنوعی، سری‌های زمانی، شبکه‌های عصبی، داده‌کاوی

۱.مقدمه

صنعت برق، از شاخص‌های اثرگذار بر وضعیت اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، فرهنگی و رفاهی جامعه به شمار می‌رود. صنعت برق، سال‌ها به عنوان یک خدمت عمومی تلقی می‌شد و به همین دلیل، انحصاری و غیررقابتی بود؛ امّا امروزه دیگر چنین نیست. صنایع برق جهان در دو دهه گذشته با تغییر ساختار بنیادینی همراه شده‌اند که از این تغییرات با عنوان تجدید ساختار یاد می‌شود. تجدید ساختار در صنعت برق با اهداف و انگیزه‌هایی چون ایجاد محیط رقابتی و جلوگیری از انحصار، ایجاد محیط رقابتی و جلوگیری از انحصار، ایجاد حق انتخاب برای مشتریان، شفافیت هزینه‌ها، تبعیت از قوانین بین‌المللی، شرایط و پروتکل‌های منطقه‌ای و ... همرا بوده است (کرشن و همکاران، ۱۳۸۶). در بسیاری از کشورها از جمله ایران، رقابت تنها در سطح عمده‌فروشی می‌باشد و مصرف‌کنندگان نهایی برق، همچنان با قیمت‌های ثابت که توسط دولت‌ها تعیین می‌شود، مواجه هستند. برق کالایی غیرقابل ذخیره‌سازی است و نوسانات تقاضا موجب نوسانات قیمت شدید برای این کالا می‌شود. تقاضای برق نیز به عوامل غیرقابل‌پیش‌بینی نظیر شرایط آب و هوایی وابسته است. همین امر اثر شوک‌های عرضه و تقاضا را بر قیمت بازار برق تشدید می‌نماید. کالای برق در پاسخ به نوسانات دوره‌ای تقاضا دارای الگوی فصلی است. تقاضای برق به میزان فعالیت‌های اقتصادی و شرایط آب و هوایی بستگی دارد و همین امر سطوح مختلفی از فصلی بودن را برای این کالا ایجاد می‌نماید. برای پیش‌بینی صحیح قیمت‌های ارائه‌شده در بازار برق باید این ویژگی‌ها را در نظر داشت و از ابزارهای

مدل‌سازی لازم برای ورود این خصوصیات در مدل استفاده نمود (هیأت تنظیم بازار برق ایران، ۱۳۸۵). به طور کلی می‌توان عوامل موثر بر رفتار قیمت انرژی را به عامل‌های ساختاری، رفتاری، عملیاتی، تاریخی و همچنین عوامل خارجی تقسیم‌بندی کرد. هر چند باید متذکر شد که این دسته‌ها کاملاً تفکیک‌شده از هم نبوده و دارای همپوشانی می‌باشند. از جمله عوامل ساختاری می‌توان به طراحی‌های بازار[۱] اشاره کرد که شامل انواع قیمت‌گذاری‌های یکپارچه، قیمت‌گذاری منطقه‌ای و حضور بازارهای پیشرو موازی[۲] می‌باشند. این عوامل بر روی رفتار کلی شرکت‌کنندگان در بازار برای تعیین راهبردهای قیمت‌گذاری و یا راهبری‌های ایجاد مناقصه تأثیر می‌گذارند. ساختار فیزیکی مثل ظرفیت‌های انتقال و یا ذخیره می‌باشند که می‌توانند الگوی قیمت را مخصوصاً در ساعات پیک مصرف تغییر دهند. چرا که در این ساعات عملکرد سیستم به ظرفیت‌های حدی خود نزدیک می‌شود. عامل‌های عملیاتی همان سیاست‌های عملیاتی کنترل‌کنندگان و متصدیان سیستم های مستقل بازار است که بر روی رفتار شرکت‌کنندگان در بازار نقش مؤثری دارد. عوامل تاریخی نیز شامل مقادیر گذشته بار و قیمت انرژی است و در نهایت منظور از عوامل خارجی هم مواردی از قبیل وضعیت آب و هوایی و قیمت‌های سوخت هستند که خارج از کنترل متصدیان برق می‌باشند (مهدوی، ۱۳۸۵).

۲.تفاوت انرژی الکتریکی با سایر کالاها

پیش‌فرض توسعه بازار برق این است که با انرژی الکتریکی نیز می‌توان مثل یک کالا رفتار کرد؛ اما تفاوت‌هایی مهم میان انرژی الکتریکی و دیگر کالاها وجود دارد. این تفاوت‌ها اثری اساسی بر سازمان‌دهی و قوانین بازار برق دارند (کرشن و همکاران، ۱۳۸۶). اساسی‌ترین تفاوت انرژی الکتریکی با دیگر کالاها در این است که انرژی الکتریکی وابستگی زیادی به سیستمی فیزیکی دارد که بسیار سریع‌تر از هر بازار دیگری عمل می‌کند. در سیستم فیزیکی قدرت، توازن بین عرضه و تقاضا (تولید و بار) باید ثانیه به ثانیه برقرار شود و اگر چنین نشود، سیستم قدرت با عواقبی فاجعه انگیز، دچار فروپاشی خواهد شد. چنین اتفاقی قابل‌تحمل نیست؛ زیرا نه تنها نظام تجاری را متوقف می‌کند، بلکه موجب قطع برق کامل یک منطقه یا کشور برای چند ساعت خواهد شد. بازیابی سیستم قدرت به شرایط عادی بهره‌برداری، در پی یک فروپاشی کامل، فرایندی پیچیده است که ممکن است در کشورهای صنعتی بزرگ، ۲۴ ساعت و یا حتی بیشتر به طول انجامد. عواقب اقتصادی و اجتماعی خاموشی سراسری، به قدری ناگوار است که هیچ دولتی با به‌کارگیری بازار برقی که موجب افزایش احتمال چنین حوادثی گردد، موافق نیست؛ بنابراین توازن بین عرضه و تقاضای انرژی الکتریکی در کوتاه مدت، فرایندی است که نمی‌توان آن را به سادگی به نهادی نسبتاً کند و غیرمسئول مثل بازار، سپرد. در کوتاه مدت، عملاً باید این توازن را با هر هزینه‌ای حفظ کرد. این کار باید از طریق سازوکاری که در انتخاب و توزیع منابع، مبتنی بر بازار نیست، انجام شود.

تفاوت اساسی دیگر انرژی الکتریکی با سایر کالاها در این است که انرژی تولیدی توسط یک مولد، نمی‌تواند به طور مستقیم به یک مصرف‌کننده خاص هدایت شود. بالعکس، یک مصرف‌کننده نیز نمی‌تواند انرژی را فقط از یک مولد مشخص دریافت نماید. در عوض، توان تولیدی همه مولدها به سیستم قدرت می‌ریزد و سپس به مصرف‌کننده‌ها تحویل می‌گردد. این تجمیع[۳] توان، به دلیل عدم تفاوت در انرژی تولیدی واحدهای مختلف، میسر است. همچنین این تجمیع، مطلوب است؛ زیرا به صرفه مقیاس باارزشی می‌انجامد: حداکثر ظرفیت تولید باید با حداکثر بار کل مصارف متناسب باشد؛ درحالی‌که در صورت عدم تجمیع توان، می‌بایست کل ظرفیت تولید با مجموع حداکثر مصرف تک‌تک مصرف‌کنندگان برابری می‌نمود. از طرف دیگر، یک خرابی[۴] در سیستمی که کالا در آن تجمیع می‌شود، همگان را متأثّر می‌سازد.

---

[۱] market design
[۲] parallel forward market
[۳] Pooling
[۴] Breakdown

و بالأخره، تقاضای انرژی الکتریکی دارای تغییرات قابل پیش‌بینی متناوب در طی یک روز یا هفته می‌باشد و از دیگر سو، انرژی الکتریکی باید همزمان با مصرف، تولید شود. چون کشش قیمتی تقاضای برق، در کوتاه مدت بسیار پایین است، برای تطبیق تولید با مصرف، باید تجهیزات تولید، قابلیت ردگیری تغییرات سریع و بزرگ مصرف را که در طی روز رخ می‌دهد، داشته باشند. همه مولدها در تمام طول یک روز، تولید نمی‌کنند. هنگامی که تقاضا کم باشد، احتمالاً فقط واحدهای با بهره‌وری بیشتر در رقابت شرکت می‌کنند و سایر واحدها موقتاً خاموش خواهند ماند. این واحدهای با بهره‌وری کمتر، فقط در زمان اوج تقاضا مورد نیاز خواهند بود. از آنجا که با افزایش و کاهش بار، تولیدکننده حدی[۵] نیز تغییر می‌کند، باید انتظار داشت که هزینه حدی[۶] تولید انرژی الکتریکی و به همین دلیل قیمت لحظه‌ای[۷] هم طی یک روز تغییر کند. چنین تغییرات سریع و متناوب در هزینه و قیمت یک کالا بسیار غیرعادی است.

۳. روش‌های قیمت‌گذاری و پرداخت در بازار رقابتی برق

روش‌های خرید و فروش در بازار برق عبارت‌اند از: بورس برق، معاملات دو جانبه و معاملات چندجانبه. در روش بورس برق تمام فروشندگان و خریداران موظف‌اند در بازار که به شکل یک نهاد غیرانتفاعی اداره می‌شود، حضور پیدا کنند و پیشنهادهای خرید و فروش خود را به آن ارائه دهند. این نهاد، منحنی‌های عرضه و تقاضای تجمعی را با یکدیگر تلاقی داده و نقطه تسویه بازار را معین می‌نمایند. حراج ممکن است یک طرفه یا دو طرفه باشد.

در حراج یک طرفه فروشندگان میزان تولید و قیمت خود را ارائه ولی مصرف‌کنندگان فقط نیاز خود را اعلام می‌کنند. در حراج دو طرفه هم خریداران و هم فروشندگان به قیمت حساس بوده و میزان تولید و یا مصرف و یا قیمت مورد نظر خود را ارائه می‌نمایند. پرداخت‌ها در این مدل به دو صورت می‌تواند انجام شود در روش اول که «پرداخت بر مبنای پیشنهاد»[۸] نامیده می‌شود، پرداخت به برنده بر مبنای پیشنهادی که ارائه کرده و برنده شده است صورت می‌گیرد، در این حالت بی‌ثباتی و متغیر بودن قیمت که ناشی از خطا در پیش‌بینی مصرف است کمتر از روش قیمت یکسان است. روش دوم که «پرداخت بر مبنای قیمت تسویه بازار»[۹] خوانده می‌شود، یک قیمت در بازار تعیین می‌شود و تمام برندگان همین قیمت را دریافت می‌کنند. این پیشنهادها از کمترین به بیش‌ترین قیمت مرتب شده و برق از واحدهایی که دارای کمترین قیمت‌ها هستند خریداری می‌شود. این عمل تا جایی که عرضه و تقاضا برابر شوند ادامه می‌یابد. قیمت یکسانی که بابت هر کیلووات ساعت به فروشندگان پرداخت می‌شود قیمت آخرین پیشنهاد پذیرفته‌شده یا اولین پیشنهاد رد شده است. در حالتی که فقط تولیدکنندگان یا فروشندگان قیمت را پیشنهاد می‌کنند، تلاقی نیاز مصرف با منحنی فروشنده نقطه تسویه بازار را تعیین می‌کند و پیشنهاد فروشندگانی که قیمت پیشنهادی آن‌ها بالاتر از این میزان باشد رد می‌شود. در صورتی که اگر پیشنهاد خریدار را نیز داشته باشیم نقطه تلاقی منحنی فروشنده و خریدار، نقطه تسویه بازار را تعیین می‌کند و فروشندگانی که قیمت بالاتر و خریدارانی که قیمت پایین تری پیشنهاد داده‌اند در این رقابت انتخاب نخواهند شد (هیأت تنظیم بازار برق ایران، ۱۳۸۵).

در روش معامله دو جانبه تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به صورت مستقل و تحت ضوابط بهره‌بردار مستقل سیستم عمل می‌کنند. در این حالت میزان انرژی مبادله شده به منظور رعایت محدودیت‌های سیستم انتقال باید با هماهنگی بهره‌بردار مستقل سیستم صورت گیرد. در این روش چون مصرف‌کنندگان ارزان‌ترین تولیدکنندگان را انتخاب می‌کنند کارایی بازار بهبود می‌یابد اما محدودیت‌های شبکه انتقال ممکن است استفاده از این روش را دشوار سازد. روش معاملات چندجانبه تعمیم مبادلات دو جانبه است. در این دو روش در صورت نقض محدودیت‌های شبکه انتقال، جریمه‌هایی به تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان تعلق می‌گیرد.

---

۵ Marginal producer

۶ Marginal cost

۷ Spot price

۸ Pay-as-Bid

۹ Market clearing Price

۳. اهمیت و ضرورت پیش بینی قیمت برق

پیش‌بینی قیمت امری مهم و چالش‌برانگیز در بازارهای رقابتی انرژی است. ارزیابی قیمت بازار یکی از نگرانی‌های بسیار مهم بازیگران و همچنین تنظیم‌کنندگان بازار برق در هر کشوری است. چرا که از یک سو تخمین قیمت برق از جمله اطلاعات مهم و حیاتی برای تعیین راهبردهای مناقصه و ترتیب تولید در بازار بوده و از سوی دیگر تنظیم‌کنندگان بازار در تلاش‌اند تا به تحلیل هرچه دقیق تر رفتار بازار پرداخته و سیر تکاملی بازار را مورد ارزیابی قرار دهند. به همین دلیل پیش‌بینی قیمت ابزار مفیدی را برای پیش‌گویی در مورد آینده بازار و محاسبه تنظیمات احتمالی مورد نیاز این بازار فراهم می‌کند (امجدی و همتی، ۲۰۰۶).

به طور کلی، پیش‌بینی قیمت برق را می‌توان در برنامه‌ریزی افق زمانی، به سه دسته تقسیم‌بندی کرد:

پیش‌بینی کوتاه مدت (از چند ساعت تا چند روز)

پیش‌بینی میان‌مدت (از چند روز تا چند هفته یا چند ماه)

پیش‌بینی بلندمدت (از چند ماه تا چند سال)

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 (کرشن و همکاران، ۱۳۸۶). به منظور رقابت در بازار و به دست آوردن سهم بازار، پیش‌بینی قیمت به عنوان یک ابزار ارزشمند جهت پیشنهاد قیمت و همچنین مصون ماندن در برابر نوسانات قیمت در بازارهای برق، توسط شرکت‌کنندگان در بازار مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به عوامل دخیل و موثر در نیروگاه‌های برق، عدم قطعیت‌های مختلف و همچنین راهبردهای مختلف پیشنهاد قیمت شرکت‌کنندگان در بازار، پیش‌بینی قیمت برق یکی از مراحل پیچیده در فرآیند فروش برق در بازار است. ازاین‌رو موضوع ابزارها و مدل‌های دقیق و موثر پیش‌بینی قیمت، یکی از زمینه‌های بسیار فعال برای پژوهشگران، به خصوص داده‌کاوان می‌باشد.

۴. روش های پیش بینی قیمت برق

در صنعت برق تجدید ساختار شده شرکت‌کنندگان مختلفی از جمله شرکت‌های تولیدی و مصرف‌کنندگان انرژی الکتریسیته در یک بازار حاضرشده و بر روی مقدار قیمت انرژی تصمیم‌گیری می‌کنند. در این ساختار جدید، پیش‌بینی مقدار تقاضا و قیمت برق به یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مهم برای مهندسان برق تبدیل شده است که محققان در این راستا به توسعه ابزارها و الگوریتم‌های آموزش می‌پردازند. در این میان پیش‌بینی بار به

پیشرفت بسیار مطلوبی نائل شده است. مدل‌های زیادی به منظور پیش‌بینی قیمت برق توسعه‌یافته‌اند و بیشتر این روش‌ها مشابه روش‌های پیش‌بینی بار در کوتاه مدت است. افق زمانی پیش‌بینی در روش‌های مختلف از افق ساعتی تا هفتگی متغیر می‌باشد کیم و همکاران (۲۰۰۶). بطور کلی میتوان انواع روش‌های پیش بینی را به سه دسته کلی تقسیم بندی کردکه عبارتند از : نظریه بازی ها، روش های شبیه سازی و روش های آماری .(سانجیو و همکاران، ۲۰۰۹) .

۴.۱. نظریه بازی‌ها

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. در این گروه مدل‌ها، مدل‌های تعادل [۱۰]به منظور تحلیل رفتار راهبری تعادل بازار بکار گرفته می‌شوند. برای این منظور چندین مدل تعادل وجود دارد که از آن جمله می‌توان مدل نش[۱۱] ، مدل کرنات[۱۲]، مدل برترند[۱۳] و مدل تعادل تابع عرضه[۱۴] را نام برد.ورودی‌های یک مدل تحلیل تعادل، عوامل بازار می‌باشند که

---

[۱۰] Equilibrium models

[۱۱] Nash equilibrium

[۱۲] cournot

[۱۳] bertrand

شامل ساختار بازار، مکانیزم بازار و قراردادها است. خروجی چنین مدل‌هایی روندهای قیمتی بلندمدت و پیش‌بینی رفتارهای بازار می‌باشد. تحلیل‌های تعادلی بر اثرات مشترک ساختار و مکانیزم بازار تکیه دارد و بنابراین این تحلیل‌ها برای ارزیابی کلی رفتار بازار مناسب است.

۴.۲. روش‌های شبیه‌سازی

دومین گروه مدل‌ها، مدل‌های شبیه‌سازی هستند. یک مدل شبیه‌سازی به تقلید عملیات خرد سیستم قدرت پرداخته و کلیه فرایندهای فیزیکی تحت سیستم را آزمایش می‌کند. به این مدل‌ها، مدل‌های ساختاری یا اساسی 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. از جمله ورودی‌های این مدل‌ها را می‌توان به موارد زیر اشاره کرد(باستین و ژو، ۱۹۹۹):

- داده‌های بار شامل بار پیش‌بینی‌شده و بار عدم انطباق[۱۵]
- داده‌های مربوط به واحدهای تولید
- داده‌های انتقال
- رزروهای چرخان

از جمله این مدل‌ها می‌توان به دو نوع مهم مدل‌های MAPS[۱۶] و MMOPF[۱۷] اشاره کرد. مدل MAPS، یک نوع مدل شبیه‌سازی تولید به ترتیب وقوع است که بیش از ۲۶ سال قبل توسعه یافته است. این نوع مدل کاربردهای زیر را شامل می‌شود:

- ارزیابی ساختارهای جایگزین بازار
- تخمین سرمایه‌گذاری‌ها در بخش تولید
- ارزیابی هزینه‌های انتقال
- شفاف ساختن رفتار بازار

مدل MMOPF یک مدل مبتنی بر هزینه تولید است. این مدل از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌کند. خروجی این مدل وابسته به کیفیت ورودی‌های آن می‌باشد. هر چه ورودی‌ها دقیق‌تر و شامل جزئیات بیشتری باشند، خروجی از کیفیت بالاتری برخوردار خواهد بود. به همین خاطر این نتایج باید توسط ISOها اعتبارسنجی شوند.

۴.۳. روش‌های آماری

مدل‌های آماری به مدل‌های جعبه سیاه[۱۸] 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 بکار می روند. در میان مدل‌های آماری مدل‌های سری زمانی از اهمیت فراوانی برخوردارند(سانجیو و همکاران، ۲۰۰۹). در رویکردهای سری زمانی دو شاخه اصلی وجود دارد که عبارتند از مدل‌های مبتنی بر رگرسیون و مدل‌های ابتکاری غیر خطی (یادگیری ماشین) و استفاده از روش‌های هوشمند. مدل‌های سومی نیز به نام مدل‌های احتمالی[۱۹] جزء روش‌های سری زمانی است که در آغاز برای بازارهای سهام بکار برده شد و پس از آن نیز در بازارهای کالا بکار گرفته شدند. این مدل‌ها بر روی گزینه های دارای ارزش متمرکز می شوند و به انتخاب بهترین آنها می پردازند ولی به طور مستقیم در پیش بینی بکار نمی‌روند (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۳) . شایان ذکر است که اخیراً مدل‌های هوشمند نیز در مدل‌های احتمالی استفاده شده اند.

---

[۱۴] Supply function equilibrium

[۱۵] Non-confirming loads

[۱۶] Market assessment and portfolio strategies

[۱۷] Multi-commodity multi area optimal power flow

[۱۸] Black-box

[۱۹] stochastic models

البته دقت و قابلیت روش‌های Model Based خصوصاً به تحلیل همگرایی سیستم و وجود پاسخ بهینه در اولویت اول می باشد.

۴.۳.۱. مدل‌های سری زمانی

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 سری زمانی تلاش می‌کنند تا از نظر تجربی ویژگی‌های مربوط به داده‌های مشاهده‌شده را تبیین نمایند. مدل‌های ARMA یکی از مهم‌ترین مدل‌های سری زمانی هستند. مدل‌های ARMA، ARIMA، S-ARIMA،ARIMAXیا مدل های تابع انتقال، مدل GARCH ازجمله مدل‌های مطرح در گروه مدل های سری زمانی می‌باشند. هنگامی که یک مدل ساختاری مناسبی وجود ندارد، مدل‌های سری زمانی می‌توانند مفید باشند. سانجیو و همکاران (۲۰۰۹)، به مقایسه انواع روش‌های آماری به کار گرفته‌شده در ادبیات موضوع پیش‌بینی قیمت پرداخته اند. در این تحقیق متغیرهای ورودی، رویه‌های پیش‌پردازش به کار گرفته‌شده و سایر مشخصات مدل ارائه‌شده است. مدلهای ابتکاری غیر خطی اغلب مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی هستند که هر نوع رابطه بین داده های ورودی – خروجی را با ساختار خاصی از ارتباطات درونی مدلسازی می کنند. مدلهای ابتکاری دیگر همانند سیستمهای فازی مدلهای آشفتگی[۲۰] و محاسبات تکاملی[۲۱] اغلب به منظور بهبود قابلیت مدلهای رگرسیونی و یا ANN به کار میروند (گائو و همکاران ۲۰۰۶)(یامینگ و همکاران، ۲۰۰۴). در تحقیق انجام شده توسط هو و همکاران (۲۰۰۹)، عوامل موثر بر قیمت برق و مدل-های مختلف مثل ANN، ARIMA و LSSVM معرفی و مقایسه شده‌اند. در این مقاله برای مدل‌های مختلف پیش‌بینی، ورودی‌های مختلف که تأثیر مهم بر پیش‌بینی قیمت برق دارند در نظر گرفته‌شده است. همچنین مشخص شده است که رویکرد سری‌های زمانی مثل ARIMA و مدل مارکوف مخفی(HMM)، داده‌های تاریخی مثل بار، قیمت و هزینه سوخت را تجزیه و تحلیل می‌کنند و شبکه‌های مصنوعی انعطاف‌پذیری بیشتری دارند و عوامل بیشتری مثل وضعیت آب و هوا، هزینه عملیاتی واحد، محدودیت‌های سیستم و ... را در نظر می‌گیرند. ژو و همکاران (۲۰۰۶)، جهت پیش‌بینی قیمت از مدل ARIMA استفاده کرده آند. برای بهبود دقت در این مدل از تصحیح خطا در پیش‌بینی قیمت استفاده‌شده و نیز فاصله اطمینان پیش‌بینی قیمت با فرض خطاهای باقیمانده در توزیع گاوس و توزیع نرمال برآورده شده است. در تحقیق دیگری، کونجو و همکاران (۲۰۰۵)، یک تکنیک جدید برای پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت برق بر اساس تبدیل موجک و مدل‌های ARIMA ارائه نموده‌اند. داده‌های تاریخی و داده‌های بدرفتار قیمت (میانگین و واریانس غیرثابت، داده‌های پرت، تأثیرات فصلی و تقویمی) با استفاده از تبدیل موجک در یک ساختار بهتر تجزیه می‌شوند سپس داده‌های آینده با استفاده از مدل‌های مناسب ARIMA پیش‌بینی می‌شوند. کانتراس و همکاران (۲۰۰۳)، دو مدل ARIMA جهت پیش‌بینی ساعتی قیمت در بازارهای برق اسپانیا و کالیفرنیا ارائه نموده‌اند. مدل اسپانیایی به پیش‌بینی ۵ ساعته قیمت برق پرداخته و در مدل کالیفرنیا، این زمان به ۲ ساعت کاهش یافته است که این تفاوت‌ها، ساختارهای پیشنهاد قیمت و مالکیت مختلف را نشان می‌دهد. سان و ژانگ (۲۰۰۸)، محجوب و همکاران (۲۰۰۸)، در تحقیقات جداگانه‌ای از ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و LS-SVM[۲۲] بهینه‌شده جهت پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت برق در بازارهای رقابتی ارائه کرده آند. در مرجع اخیر، نتایج پیش‌بینی این مدل ترکیبی با مدل‌های قبلی دیگر مثل MLP, ARIMA, WAVELET-ARIMA, Neuro-Fuzzy و سری‌های زمانی مقایسه شده است. همچنین یک مدل جدید SVM برای پیش‌بینی قیمت بر پایه سری‌های زمانی، توسط سان و همکاران (۲۰۰۶) پیشنهاد شده است. ورونین و همکاران (۲۰۱۳)، سری‌های زمانی قیمت روزانه برق را در دو لایه تجزیه و تحلیل کرده آند: رفتار طبیعی و رفتار نوسانی. دو تکنیک مختلف پیش‌پردازش داده جهت پردازش روند و فصلی بودن در سری‌های زمانی اعمال شده است. مدل ARIMA جهت گرفتن رابطه خطی بین محدوده نرمال سری‌های قیمت و متغیر

---

[۲۰] Chaotic models

[۲۱] evolutionary computation

[۲۲] Least Square Support Vector

توضیحی استفاده‌شده است. مدل GRACH جهت مشخص کردن ویژگی‌های باقیمانده استفاده‌شده و یک شبکه عصبی جهت ترکیب پیش‌بینی مدل ARIMA و مدل GRACH با قیمت‌های تاریخی و داده‌های تقاضا برای تولید محدوده نرمال نهایی پیش‌بینی استفاده‌شده است. جین و همکاران (۲۰۱۳)، تکنیک‌ها و مدل‌های گوناگون پیش‌بینی قیمت پیشنهادشده را به طور خلاصه بیان کرده آند. در این مقاله مدل‌های ARIMA, LS-SVM, LLWNN, ANN, ... مقایسه شده‌اند و نقاط قوت و نقاط ضعف هر مدل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۴.۳.۲. مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی

مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی را با نام مدل‌های ناپارامتری[۲۳] نیز نام‌گذاری کرده آند چرا که این مدل‌ها 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. مدل-های مبتنی بر هوش مصنوعی خود به ۲ دسته مهم شبکه‌های عصبی مصنوعی[۲۴] و مدل‌های مبتنی بر داده کاوی تقسیم‌بندی می‌شوند.

مدل های مبتنی بر شبکه‌های عصبی

شبکه‌های عصبی دارای چندین خصوصیت متمایز و منحصربه‌فرد می‌باشند که آن‌ها را به روش‌های مناسبی جهت کار پیش‌بینی سری‌های زمانی مبدل کرده است.مدل‌های ANN که تا به حال محققان با استفاده از آن‌ها به پیش‌بینی قیمت پرداخته‌اند عبارت‌اند از:

- شبکه عصبی پیشرو چند لایه[۲۵]
- شبکه با توابع پایه شعاعی[۲۶]
- نگاشت خود سازمانده[۲۷]
- شبکه بازگشتی[۲۸]

در تحقیقات صورت گرفته (اگریوال، ۲۰۰۹) انواع روش‌های مبتنی بر شبکه های عصبی بکارگرفته شده در ادبیات موضوع پیش بینی قیمت مورد مقایسه قرار گرفته و به منظور مقایسه بهتر، متغیر های ورودی، الگوریتم های یادگیری بکارگرفته شده در آنها و سایر مشخصات مدل در انها ارائه شده است. کاتالاو و همکاران (۲۰۰۶)، به معرفی روش‌های مختلف پیش‌بینی قیمت برق پرداخته‌اند و مدل‌های سری‌های زمانی سنتی، مدل‌های خود بازگشت (AR)، مدل‌های ARIMA، مدل‌های GRAGH و روش‌های Wavelet-ARIMA و شبکه‌های عصبی را معرفی کرده آند. در این تحقیق جهت پیش‌بینی قیمت ۲۴ ساعت آینده، شبکه‌های عصبی پیش خور پس انتشار سه سطحی پیشنهاد شده است. توسط همین محقق یک شبکه عصبی مصنوعی پیش خور سه سطحی که با الگوریتم لونبرگ-مارکوارت آموزش داده شده است جهت پیش‌بینی ۱۶۸ ساعت آینده قیمت برق معرفی شده است(کاتالاو، ۲۰۰۷). سرینی‌واسان و همکاران (۲۰۰۷)، عملکرد شبکه‌های عصبی تکامل‌یافته با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و شبکه‌های عصبی آموزش‌دیده با استفاده از الگوریتم PSO با شبکه‌های عصبی پس انتشار را در مقایسه کرده آند که این مقایسه نشان می‌دهد که شبکه‌های عصبی تکامل‌یافته و آموزش‌دیده با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و PSO برای پیش‌بینی قیمت نسبت به شبکه‌های عصبی پس انتشار دارای مزیت بیشتری هستند. موری و آواتا (۲۰۰۶)، متدی را پیشنهاد داده‌اند که از تکنیک برش یا قطع که یکی از روش‌های داده کاوی می‌باشد برای تسهیل ارتباط

---

[۲۳] Non-parametric models

[۲۴] ANN

[۲۵] Multilayer feed forward nn

[۲۶] Radial basis function

[۲۷] Self organizing map

[۲۸] Recurrent nn

بین متغیرهای ورودی و خروجی استفاده‌شده است. این تکنیک اعداد واقعی را جهت ساده‌سازی پردازش داده‌ها به اعداد دودویی تبدیل می‌کند. در این تحقیق، شبکه پایه شعاعی نرمال شده به عنوان یک شبکه عصبی مصنوعی برای ارزیابی قیمت پیش‌بینی‌شده استفاده‌شده است. آزودو و واله (۲۰۰۶)، از شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت پیدا کردن قیمت بازار برای یک دوره زمانی استفاده نموده‌اند. 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. یکی از مزایای متد استفاده‌شده در این تحقیق، این است که هیچ‌گونه فرض آماری در مورد توزیع احتمال داده‌های تاریخی ندارد. همچنین استفاده از متد خوشه‌بندی K-means به شبکه‌های عصبی اجازه یادگیری موثرتر از داده‌های تاریخی را می‌دهد. در تحقیق انجام‌شده توسط رنجبر و همکاران (۲۰۰۶)، 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. در تحقیق دیگری،آریکول و همکاران (۲۰۱۰)، یک مدل ترکیبی سری‌های زمانی و شبکه‌های عصبی موجک انطباقی[۲۹] را برای پیش‌بینی قیمت یک روز آینده در بازار برق ارائه کرده آند. رائو و سارادا (۲۰۱۳)، یک مدل جهت پیش‌بینی ساعتی قیمت دربازار برق با استفاده از تکنیک منطق فازی[۳۰] بر پایه رویکرد روزهای مشابه پیشنهاد کرده آند. در این مدل از روش استنتاج ممدانی[۳۱] و از ۲۴ گام برای پیش‌بینی قیمت ۲۴ ساعت آینده استفاده‌شده است. همچنین یک مدل ترکیبی با استفاده از شبکه‌های عصبی و سیستم استنتاج فازی[۳۲]، توسط گاپتا و همکاران (۲۰۱۳)، ارائه‌شده است. جهت بررسی این مدل از داده‌های بازار برق هند و با مقایسه کار آیی مدل‌های شبکه عصبی و مدل ترکیبی پیشنهادی بهره‌برداری شده که نتایج اجرای این مدل نشان‌دهنده بهبود عملکرد مدل ترکیبی FIS-ANN است. یک مدل ترکیبی با استفاده از موجک، ARIMA و شبکه‌های عصبی که به طور همزمان به پیش‌بینی قیمت برق و تقاضا می‌پردازد توسط ورونین و پارتانن (۲۰۱۳)، پیشنهاد شده است. در این مدل، متغیرهای دامنه زمان و دامنه موجک در مجموعه ویژگی‌ها برای پیش‌بینی قیمت و تقاضا در نظر گرفته‌شده و بهترین مجموعه ورودی توسط تحلیل همبستگی دومرحله‌ای[۳۳] انتخاب شده است. ارزیابی این مدل نیز توسط داده‌های بازار انرژی فینیش[۳۴] انجام‌شده است که نشان‌دهنده بهبود دقت پیش‌بینی نسبت به مدل‌های جداگانه می‌باشد. شریواستاوا و پانی‌گراهی (۲۰۱۴)، به بررسی عملکرد یک تکنیک شبکه عصبی به نام ELM[۳۵] در مسئله پیش‌بینی قیمت می‌پردازند. در این مدل، جهت بهبود پیش‌بینی و قابلیت اطمینان، ELM با روش موجک ترکیب‌شده و یک روش ترکیبی به نام WELM[۳۶] ارائه‌شده است و ویژگی‌های منحصربه‌فرد هر یک از تکنیک‌ها جهت گرفتن الگوهای مختلف داده‌ها، ترکیب‌شده‌اند. این مدل با استفاده از داده‌های بازارهای مختلف ارزیابی‌شده که نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادشده، مناسب‌ترین تکنیک جهت پیش‌بینی قیمت است. یک مدل ترکیبی دیگر که از ویژگی‌ها و قابلیت‌های ARFIMA[۳۷] و شبکه‌های عصبی پیش خور[۳۸] استفاده می‌کند توسط چابانه (۲۰۱۴)، پیشنهاد شده است. ارزیابی این مدل با استفاده از داده‌ّای بازار برق نوردپول[۳۹] انجام‌شده است و نتایج ارزیابی نشان‌دهنده بهبود دقت پیش‌بینی نسبت به سایر روش‌ها ذکر شده در این تحقیق است. در تحقیق انجام‌شده توسط مندل و همکاران (۲۰۰۹)، تحلیل حساسیت پارامترهای روزهای مشابه، جهت افزایش دقت پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی و روزهای مشابه ارائه‌شده

---

[۲۹] AWNN

[۳۰] Fuzzy Logic (FL)

[۳۱] Mamdani

[۳۲] Fuzzy Inference System (FIS)

[۳۳] two-step correlation analysis

[۳۴] Finnish

[۳۵] Extreme Learning Machine

[۳۶] Wavelet based ELM

[۳۷] Auto-Regressive Fractionally Integrated Moving Average

[۳۸] feedforward neural networks

[۳۹] Nordpool

است. قیمت‌های پیش‌بینی‌شده برای ۲۴ ساعت بعد ، تأیید می‌کند که کارایی و دقت شبکه عصبی هنگامی که تعداد ۵ پارامتر در نظر گرفته‌شده است، بهبود یافته است. در تحقیق دیگری، مندل و همکاران (۲۰۰۷)، به بررسی روشی از شبکه‌های عصبی مصنوعی بر پایه متد روزهای مشابه برای پیش‌بینی روز بعد قیمت برق در بازار برق می‌پردازند. 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(مندل، ۲۰۰۵). مندل و همکاران (۲۰۰۷)، شناسایی بهترین پارامترهای روزهای مشابه برای پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی را شرح می‌دهند. با توجه به این روش، قیمت روزهای مشابه مربوط به پیش‌بینی، بر اساس نرم اقلیدسی انتخاب می‌شود. در این مقاله مدل پیش‌بینی به ترتیب با انتخاب دو پارامتر برای روزهای مشابه، انتخاب ۳ پارامتر برای روزهای مشابه و انتخاب ۵ پارامتر روزهای مشابه شبیه‌سازی انجام‌شده است.

مدل های داده کاوی

اخیرا تکنیک های داده کاوی به منظور استنباط و تفسیر داده ها مورد توجه جدی محققان قرار گرفته است. از جمله این روشها را می توان به روش‌های دسته بندی کننده بیزین، دسته بندی کننده نزدیکترین k-همسایگی، دسته بندی کننده مبتنی بر استدلال و دسته بندی کننده مبتنی بر الگوریتم ژنتیک اشاره نمود. یانگ و همکاران(۲۰۰۵)، به معرفی برخی از تکنیک‌های داده کاوی که برای پیش‌بینی قیمت مناسب هستند، پرداخته‌اند.در این تحقیق، قیمت‌های نرمال توسط دسته‌بندی کننده بیزین و تکنیک‌های جستجوی مشابه برای کاوش پایگاه داده استفاده‌شده است. در این روش، یک ماژول پیش‌پردازش، سیگنال قیمت را به دو سیگنال جدا از هم تقسیم می‌کند. ماژول NN-Wavelet قیمت‌های نرمال برق را پیش‌بینی کرده و احتمال رخ دادن پیک قیمت را در مواقع خاص نیز برآورد می‌کند. اگر توسط این ماژول احتمال وقوع پیک قیمت شناسایی شود پیش‌بینی قیمت توسط ماژول پیش‌بینی پیک انجام می‌گیرد. مقدار پیک قیمت توسط رویکرد K-همسایگی تخمین زده می‌شود. در اغلب موارد درصد خطای ساعتی از ۱٪ تا ۳۱٪ متغیر است به طوری که در یکی از این موارد این خطا تا ۴۹٪ نیز گزارش شده است. (ژو و همکاران، ۲۰۰۵)، روش SVM و الگوریتم کلاسه بندی مبتنی بر احتمال را با رویکرد پیش‌بینی قیمت‌های نرمال ترکیب کرده تا روشی را برای یافتن احتمال وقوع پیک قیمت ارائه دهند. سپس یک کلاسه بندی کننده بیزین برای یافتن بازه پیک قیمت استفاده‌شده است و نیز رویکرد نزدیک‌ترین K-همسایگی را برای تخمین مقدار پیک به‌کاربرده‌اند. درصد خطای ساعتی پیش‌بینی با این رویکرد از ۵/۴۷٪ تا ۲۰٪ متغیر است به طوری که در یکی از موارد مقدار خطای ۴۹٪ نیز گزارش شده است. وو و همکاران(۲۰۰۶) از یکپارچه کردن روش‌های آماری بیزین و سیستم خبره بیزینیک روش عددی ترکیبی برای پیش‌بینی قیمت ارائه‌شده است. در این رویکرد سری‌های قیمت در ۳ دسته پیک‌های قیمت، قیمت‌های نرمال و قیمت‌های پایین دسته‌بندی شده‌اند. این کار توسط رویکرد دسته‌بندی بیزین انجام‌شده است. سپس از ترکیب روش‌های SVM و سیستم خبره بیزین برای پیش‌بینی مقادیر این ۳ دسته استفاده‌شده است. امجدی و دارایی پور (۲۰۰۸) از الگوریتم Relief جهت پیش‌بینی قیمت استفاده کرده آند. 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. ژائو و همکاران (۲۰۰۷)، 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(۲۰۰۸)، از ترکیب مدل‌های SVM و مدل آماری جهت پیش‌بینی قیمت استفاده نموده است. فن و همکاران (۲۰۰۶)، یک مدل جدید برای پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت برق بر اساس تجمیع دو فناوری یادگیری ماشین پیشنهاد می‌دهد: خوشه‌بندی بیزین پویا (BCD) و ماشین بردار پشتیبان (SVM). در این مدل، در ابتدا طبقه‌بندی BCD جهت خوشه‌بندی مجموعه داده‌های ورودی به چندین مجموعه به روش هدایت نشده اعمال می‌شود سپس گروه‌های ۲۴ تایی SVM برای مشخصات قیمت برق روز بعد به جهت متناسب کردن

داده‌های آموزشی هر زیرمجموعه استفاده‌شده است. جهت نشان دادن کارایی این مدل، مدل پیشنهادی با داده‌های تاریخی بازار برق نیوزلند آموزش و آزمایش‌شده‌اند. تکنیک‌های پیش‌پردازش ویژگی‌ها در یک مدل پیش‌بینی، حیاتی و مهم هستند و می‌تواند به میزان قابل‌توجهی بر روی دقت پیش‌بینی تأثیر بگذارد. ژائو و همکاران (۲۰۰۶)، یک مطالعه جامع در مورد تکنیک‌های پیش‌پردازش ویژگی‌ها ارائه می‌کنند. در تحقیق انجام‌شده توسط امجدی و همکاران (۲۰۱۱)، با استفاده از مکانیزم پیشنهادی حلقه بسته[۴۰] که شامل شبکه عصبی احتمالی PNN و سیستم ارزیابی شبکه عصبی ترکیبی HNES[۴۱] 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. هونگ و همکاران (۲۰۱۲)، به تأثیر تکنیک‌های مختلف داده کاوی بر دسته‌بندی داده‌ها پرداخته‌اند. 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 این مدل با استفاده از سه تکنیک محبوب انتخاب ویژگی[۴۲]، Relief، Correlation-based feature selection و Mutual information و نیز چهار مدل دسته‌بندی رایج درخت تصمیم، پرسپترون چند لایه، بیز و نزدیک‌ترین همسایه، به طبقه‌بندی قیمت در ۲۴ ساعت آینده می‌پردازد. مدل پیشنهادی داده‌های ورودی را به صورت بازگشتی و در چند مرحله طبقه‌بندی می‌نماید. بار محاسباتی و عملیات تکراری در این مدل که با یک مجموعه بزرگ آغاز می‌شود، ممکن است منجر به کاهش درجه دقت و صحت مدل گردد.

۵.نتیجه‌گیری

در این مقاله فرایند فروش انرژی و روش‌های قیمت گذاری و پرداخت در بازار رقابتی برق بررسی و معرفی گردید. همچنین روش‌های ارائه شده جهت پیش‌بینی قیمت برق در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته دسته‌بندی و ارائه شد. نتایج به دست آمده از تحقیقات صورت گرفته در زمینه پیش‌بینی قیمت برق، مدل‌ها و روش‌های پیش‌بینی، نظریه بازی‌ها، مدل‌های شبیه‌سازی، مدل‌های آماری، سری‌های زمانی، مدل‌های هوش مصنوعی، روش‌های مبتنی بر داده کاوی و شبکه‌های عصبی بیان گردید. مروری بر تحقیقات انجام شده و روش‌های بکارگرفته شده در این زمینه نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری، مدل فروش انرژی، ساختار داده‌ها و ساختار بازار برق مورد مطالعه نقش قابل توجهی در انتخاب روش پیش‌بینی، مدل پیشنهادی و پارامترهای ورودی آن دارند. همچنین با توجه به نتایج حاصل از تحقیقات و مدل‌های ارائه شده، میتوان گفت مدل‌های آماری و سری‌های زمانی در پیش‌بینی بلند مدت و میان مدت قیمت برق نتایج بهتری را ارائه داده‌اند. از طرفی با کوتاه شدن بازه زمانی پیش‌بینی (چند روز تا چند ساعت)، مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و شبکه‌های عصبی نتایج بهتری داشته‌اند. روش‌های مبتنی بر داده‌کاوی مانند خوشه‌بندی، کلاس‌بندی، نزدیکترین همسایگی و .. عمدتاً به منظور پیش‌بینی وقوع جهش قیمت و نیز پیش‌بینی قیمت در این ساعات بکار گرفته شده‌اند. روش‌های ترکیبی و بکارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. با توجه به مطالعه صورت گرفته میتوان گفت با تحلیل ساختار بازار برق مورد مطالعه و نیز حساسیت سنجی قیمت برق نسبت به پارامترها و عوامل مؤثر و انتخاب کمترین و مناسب‌ترین پارامترها، بکارگیری ترکیبی از روش‌های پیشنهاد شده در زمینه پیش‌بینی قیمت برق منجر به افزایش قابل توجه دقت مدل و کاهش خطای پیش‌بینی خواهد گردید.

---

[۴۰] Closed Loop

[۴۱] Hybrid neuro-evolutionary system

[۴۲] Feature Selection

۶.قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری و حمایت دفتر تحقیقات و استانداردهای سازمان آب و برق خوزستان تشکر و قدردانی می-گردد.

۷.منابع

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.

مهدوی، م.۱۳۸۵.ساختار عصبی با یادگیری بیزین و کاربرد آن در مسائل پیش‌بینی(شرایط خاص).پایان- نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

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.

Aggarwal S.K, Saini L.M, Kumar A.2009. Electricity price forecasting in deregulated markets: A review and evaluation, Jornal Electricity Power Energy Systems, 1:13–22.

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

Amjady N, Hemmati M.2006.energy price forecasting. IEEE power & energy magazine, pp:20-28.

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

Amjady N, Keynia F.2010.Electricity market price spike analysis by a hybrid data model and feature selection technique. *Electricity. Power Systems. Research.*, 3:318–327. 2010.

Amjady N.2006. Day-Ahead Price Forecasting of Electricity Markets by a New Fuzzy Neural Network. *IEEE Transaction. Power System,2:* 887–896.

Areekul P, Senjyu T, Toyama H, Yona A.2010. A Hybrid ARIMA and Neural Network Model for Short-Term Price Forecasting in Deregulated Market. *IEEE Trans. Power Syst,1:* 524–530.

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

Bastian J, Zhu J, Banunaryanan V, Mukherji R.1999. Forecasting energy prices in a competitive market. IEEE Comput Appl Power, pp:40–5.

Catalao J, Mariano J, Mendes V, Mendes M.2006. Application of Neural Networks on Next-Day Electricity Prices Forecasting. *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*, pp:1072–1076.

Catalao J, Mariano V, Mendes F, Ferreira M.2007. Artificial Neural Network Approach for Short-Term Electricity Prices Forecasting. 2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, pp:1–6.

Catalao J, Mariano V, Mendes F, Ferreira M.2007.Short-term electricity prices forecasting in a competitive market: A neural network approach. Electricity Power System Research,10: 1297–1304

Chaâbane N,2014.A hybrid ARFIMA and neural network model for electricity price prediction, Electrical Power and Energy Systems ,55:187–194.

Chakravarty S,Dash P,2011.Dynamic filter weights neural network model integrated with differential evolution for day-ahead price forecasting in energy market,Expert Systems with Applicationsvol,9:10974–10982.

Che J,Wang J.2010.Short-term electricity prices forecasting based on support vector regression and Auto-regressive integrated moving average modeling, Energy Conversion and Management,10:1911–1917.

Christensen T, Hurn A, Lindsay K.2012.Forecasting spikes in electricity prices. International Jornal Forecast, 2:400–411.

Coelho L,Santos A.2011.A RBF neural network model with GARCH errors: Application to electricity price forecasting, Electric Power Systems Researchvol,1:74–83.

Ghodsi R,SalehZakerinia M.2012.Forecasting Short Term Electricity Price Using Artificial Neural Network and Fuzzy Regression. International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences,1:286–293.

GAO C, Napole E. B. 2006. Forecasting demands and prices in competitive power markets.

Gianfreda A, Grossi L.2012. Forecasting Italian electricity zonal prices with exogenous variables. *Energy Econ*, 6:2228–2239.

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.

Hong y, Wu C. 2012.Day-Ahead Electricity Price Forecasting Using a Hybrid Principal Component Analysis Network, Energies 2012, 5: 4711-4725.

Hu L, Taylor G, Wan H, Irving M.2009. A Review of Short-term Electricity Price Forecasting Techniques in Deregulated Electricity Markets.

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

Khosravi A,Nahavandi S,Creighton D,2013.A neural network-GARCH-based method for construction of Prediction Intervals. Electric Power Systems Research, pp:185–193.

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.

Mahjoob M.J,Abdollahzade M,Zarringhalam R.2008.GA based optimized LS-SVM forecasting of short term electricity price in competitive power markets.2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications,pp:73–78.

Mandal P, Senjyu T, Funabashi T.2006. Neural networks approach to forecast several hourahead electricity prices and loads in deregulated market. Energy Conversion and Management,47:2128–2142.

Mandal P, Senjyu T, Urasaki N, Funabashi T.2006. Electricity Price and Load Short-Term Forecasting Using Artificial Neural Networks. International Jornal Emergency. Electricity. Power System, vol. 7, no. 4

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

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

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

Mandal P,Senjyu T,Urasaki N,Funabashi T,Srivastava A.K.2007.A Novel Approach to Forecast Electricity Price for PJM Using Neural Network and Similar Days Method. . IEEE Transaction on Power Systems,4:2058–2065.

Mori H, Awata A.2006. A Hybrid Method of Clipping and Artificial Neural Network for Electricity Price Zone Forecasting. *2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, pp: 1–6.

Niimura T.2006.Forecasting Techniques for Deregulated Electricity Market Prices - Extended Survey.2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition,pp:51–56.

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

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.

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.

Senjyu T.2010. Next day price forecasting in deregulated market by combination of Artificial Neural Network and ARIMA time series models. *2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp:1451–1456.

Shrivastava N.A, Panigrahi B.K.2014.A hybrid wavelet-ELM based short term price forecasting for electricity markets. Int. J. Electr. Power Energy Syst, 55:41–50.

Srinivasan D, Yong F, Liew A.2007. Electricity Price Forecasting Using Evolved Neural Networks. *2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems*,pp: 1–7.

Sun W,Zhang J.2008.Forecasting Day Ahead Spot Electricity Prices Based on GASVM. 2008 International Conference on Internet Computing in Science and Engineering,pp:73-78.

Sun W.E.I, Lu J, Meng M.2006.Application of time Series Based SVM Model on Next-Day Electricity Price Forcasting Under Deregulated Power Market. Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Dalian, 13-16 August 2006, pp 13–16.

Voronin S, Partanen J, Kauranne T.2013.A hybrid electricity price forecasting model for the Nordic electricity spot market. Trans. Electr. Energy Syst, Feb. 2013.

Voronin S,Partanen J.2013.Forecasting electricity price and demand using a hybrid approach based on wavelet transform, ARIMA and neural networks. International Jornal of Energy Research,

Wu W, Zhou J, Mo L, Zhu C. 2006.Forecasting electricity market price spikes based on Bayesian expert with support vector machine. Lecture notes in artificial intelligence LNAI 4093. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. P: 205–12.

Yaming M, Kasiviswanathan K, Ni E. 2004. A neural network-based method for forecasting zonal locational marginal prices. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 296-302.

Zhang L,Kasiviswanathan K. 2003. Energy clearing price prediction and confidence interval estimation with cascaded neural networks. IEEE Trans. Power Syst, 18:99-105.

Zhao J, Ieee S, Dong Z, Ieee M, Li X.2006.Electricity price forecasting with effective feature preprocessing.2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting.

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

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