فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی/ سال بیست‌ویکم / شماره ۸۷/ زمستان ۱۴۰۴/ صفحات ۱۹۶-۱۶۹

پیش‌بینی قیمت برق در بازارهای نقد و آتی فروش برق با مدل غیرخطی

آرش جالبی [۱]
دانشجوی دکتری مهندسی مالی، گروه مهندسی مالی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران
(a.jalebi@iau.ac.ir)

محمود خدام
استادیار حسابداری، گروه حسابداری، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران
(m.khoddam@iau.ac.ir)

حسین محمدنژاد
استادیار، گروه برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، (h.mohamadnejad@iau.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

چکیده

تلقی عمومی در مورد صنعت برق و تعرفه‌های آن مبتنی بر نظام تعرفه گذاری با نرخ‌های ثابت و پله‌ای می‌باشد. این دیدگاه به دلیل عدم آگاهی نسبت به وجود بازار رقابتی در صنعت برق است. در واقع قیمت‌های برق ساختار با نرخ تعرفه گذاری ثابت ندارند. یعنی حداقل چنین نرخ گذاری برای فعالان این حوزه معنادار نیست. پیش‌بینی دقیق قیمت برق در بازارهای نقد و آتی به دلیل نوسانات بالا و تأثیر عوامل متعدد مانند تقاضا، تولید انرژی تجدیدپذیر و شرایط اقتصادی، از اهمیت بسزایی برخوردار است. هدف مقاله حاضر پیش‌بینی قیمت برق در بازارهای نقد و سلف و طراحی مدل بهینه فروش برق در بازارهای مذکور با رویکرد رگرسیون انتقال ملایم (STR) می‌باشد. برای این منظور از اطلاعات روزانه در بازه زمانی ۱۴۰۱-۱۳۹۶ و به منظور انجام پیش‌بینی از مدل غیرخطی رگرسیون انتقال ملایم استفاده گردید. نتایج نشان داد استفاده از مدل غیرخطی ذکر شده توانایی و قدرت بالایی در پیش‌بینی قیمت برق دارد.

طبقه‌بندی JEL: K۲۲, L۳۳, M۱۰, C۳۰.

کلیدواژه‌ها: قیمت برق، پیش‌بینی، بازار نقدی، بازار سلف، تابع کاپولا.

---

۱. نویسنده مسئول

۱- مقدمه

صنعت برق ایران، از سال‌های آغازین دهه ۱۳۷۰، تجدید ساختار خود را به تبعیت از تغییر فلسفه مدیریت دولتی، بنا نهاد؛ نخست به تمرکززدایی تمام عیار همت گماشت؛ آنگاه به خودمختاری نهادهای نامتمرکز پرداخت و سرانجام به جداسازی بنیادی نهادهای تولید[1]، انتقال[2] و توزیع[3] اقدام نمود تا همه زمینه‌های لازم برای انحصارزدایی، مقررات‌زدایی[4] و خصوصی‌سازی[5] در صنعت برق فراهم آید.

مقدمات لازم به منظور پیاده سازی این ساختار جدید و مجزا نمودن سه بخش اصلی سیستم قدرت (تولید، انتقال و توزیع) از اواخر دهه ۱۳۷۰ وارد مرحله عملیاتی گردید. با تصویب «آیین نامه اجرائی بند ب ماده ۲۵ قانون برنامه چهارم» توسعه توسط هیات وزیران و تصویب «قانون استقلال شرکت‌های توزیع» توسط مجلس شورای اسلامی و نیز تفسیر اصل ۴۴ قانون اساسی، به تدریج کلیه بخش‌های صنعت برق درگیر تغییرات و تحولات جدی شدند. آخرین تحول ساختاری در این حوزه مصوبه جلسات مورخ ۸۹/۷/۲۷ و مورخ ۹۲/۱۲/۲۸ هیات وزیران به استناد ماده (۱۳) قانون اجرای سیاست‌های کلی اصل ۴۴ قانون اساسی (مصوب ۱۳۶۸) و ماده واحده قانون «استفساریه در خصوص اختیار اصلاح اساسنامه سازمان‌ها، شرکت‌ها و مؤسسات دولتی و وابسته به دولت» (مصوب۱۳۷۷)، مبنی بر تشکیل شرکت مادر تخصصی تولید نیروی برق حرارتی و تشکیل این شرکت در تاریخ ۹۴/۷/۱۵ پس از تایید اساسنامه آن توسط شورای نگهبان و تفکیک معاونت هماهنگی تولید شرکت مادر تخصصی تولید، انتقال و توزیع نیروی برق ایران (توانیر) بود (مهرآرا و همکاران، ۱۳۹۹).

در بین بازیگران بازار برق ایران، تولیدکنندگان بازار به دلیل عمدتاً خصوصی بودن (سهم بخش خصوصی از فروش برق در بازار به صورت مستقیم و غیرمستقیم بیش از ۶۳ درصد است) به شدت تحت تاثیر تغییرات قیمت و نیازمند توجه ویژه هستند. زیرا شرکت‌های انتقال (شرکت‌های برق منطقه‌ای) و خریداران (شرکت‌های توزیع نیروی برق) عملاً دولتی بوده و از طریق منابع ناشی از بودجه، تعهدات خود را انجام می‌دهند

1. Generation
2. Transmission
3. Distribution
4. Deregulation
5. Privitization

در حالی که شرکت‌های تولید کننده خصوصی به شدت وابسته به منابع مالی ناشی از فروش برق هستند و بنابراین تغییرات قیمت به شدت بر درآمدها و مدیریت منابع آنها اثرگذار است.

برای فعالان بازار موضوع تعیین نسبت بهینه پوشش ریسک اهمیت شایان توجهی دارد زیرا بدون اطلاع از این نسبت، پوشش دهندگان ریسک با یکی از دو حالت پوشش ریسک بیش از حد یا پوشش ریسک کمتر از حد مواجه خواهند بود (کاستلو و رستا[1]، ۲۰۲۵). پوشش ریسک بیش از حد به حالتی گفته می‌شود که فرد اقدام به نگهداری موقعیت‌های تعهدی آتی به تعدادی بالاتر از میزان مورد نیاز خود می‌نماید که با توجه به لزوم تودیع وجوه تضمین اولیه برای اتخاذ موقعیت تعهدی در بازار قراردادهای آتی هزینه اضافی را به وی تحمیل می‌نماید که در نتیجه هزینه پوشش ریسک را افزایش خواهد داد. اما در صورت اتخاذ استراتژی پوشش ریسک کمتر از حد فرد تعداد موقعیت‌های تعهدی ناکافی را اتخاذ می‌نماید که با بروز نوسان‌های قیمت، دارایی پایه فرد را در معرض ریسک قرار خواهد داد. از این رو، تعیین نسبت بهینه پوشش ریسک یکی از ملزومات اصلی اتخاذ سیاست پوشش ریسک کارامد است. با توجه به تغییرات قیمت برق، آنچه گفته شد، لزوم پوشش ریسک تغییرات قیمت برق توسط بازیگران بازار را مشخص می‌سازد. عمده‌ترین ابزارهایی که برای پوشش ریسک در اختیار فعالان بازارهای برق در سرتاسر جهان است، شامل انواع مشتقات مالی از جمله قرارداد پیمان آتی، قرارداد آتی‌ها، انواع اختیارات معامله و ... می‌باشد. در ایران، ابزار مدیریت ریسک، قراردادهای سلف موازی استاندارد است که در بورس انرژی ایران مورد معامله قرار می‌گیرد و قرابت زیادی با قرارداد پیمان آتی و قرارداد آتی‌ها دارد. نکته‌ای که در مورد معاملات این قراردادها می‌توان ذکر نمود محدود بودن معاملات آن به نیروگاه‌های بخش خصوصی است.

طی سال‌های اخیر، گرایش شدید به مقررات‌زدایی بازارهای برق و تجدید ساختار آن در اکثر کشورهای جهان شـکل گرفته و ایران نیز از این قاعده مستثنا نبوده است. حرکت به سمت بازارهای رقابتی به جای بازارهای انحصاری و واگذاری بخش‌های دولتی به دست بخش خصوصی و در نتیجه، تغییر رویکرد ناشی از آن در تفکر اقتصادی بنگاه

1. Castello and Resta

های فعال در بازار برق، روز به روز بازار برق را با وجود تفاوت‌های ساختاری بیشتر شبیه به سایر بازارهای کالایی می‌کند. ناگفته پیداست که این محیط جدید شرایط و مخاطرات جدیدی را نیز برای بازیگران این بازار ایجاد خواهد نمود. در بازار رقابتی تولیدکنندگان به دنبال حداکثر کردن سود و حداقل کردن هزینه‌ها و ریسک‌های مرتبط هستند. یکی از اصلی‌ترین اهداف تولیدکننـدگان در بازار برق تجدیدساختار یافته کنترل و مدیریت ریسک مالی است که شامل دو ریسک نوسان قیمت و ریسک نوسان حجم می‌شود (سهمانی اصل و همکاران، ۱۴۰۰).

معاملات قراردادهای سلف موازی استاندارد از اواخر اسفند ماه سال ۱۳۹۱ در بورس انرژی ایران آغاز گردیده است. براساس این نوع قرارداد، عرضه‌کننده مقدار معینی از دارایی پایه را مطابق مشخصات قرارداد سلف استاندارد در ازای بهای نقد به فروش می‌رساند تا در دوره تحویل به خریدار تسلیم نماید. دارنده اوراق می‌تواند، دارایی موضوع قرارداد را به شخص ثالثی بفروشد یا منتظر بماند تا دارایی را در موعد تحویل به صورت فیزیکی تسویه نماید. نکته‌ای که در مورد معاملات این قراردادها می‌توان ذکر کرد، محدود بودن معاملات آن به نیروگاه‌های بخش خصوصی است. از آنجا که سهم بخش خصوصی از هزینه خرید در بازار به صورت مستقیم و غیر مستقیم در پایان سال ۱۳۹۶ بیش از ۶۳ درصد است، اهمیت پوشش ریسک قیمت برای این بخش بزرگ از بازار مشخص می‌گردد. بنابراین پوشش ریسک قیمت تولیدکنندگان خصوصی صنعت برق در بازار عمده فروشی برق ایران با استفاده از قراردادهای سلف موازی استاندارد برق معامله شده در بورس انرژی ایران هدف این مطالعه است. بر این اساس در این مطالعه به بررسی پیش‌بینی قیمت برق در بازار نقدی و آتی با استفاده از رویکرد رگرسیون انتقال ملایم پرداخته شده است.

۲- ادبیات تحقیق

در یک بازار عمده فروشی آزاد شده، برق مشابه هر کالای دیگری معامله می‌شود. برق متفاوت از کالاهای دیگر است، از آن جهت که نمی‌توان آن را در مقادیر بالا ذخیره کرد. بنابراین عرضه برق که به شبکه صورت می‌گیرد بایستی با میزان مصرف برق برابر باشد تا پایداری سیستم قدرت حفظ گردد.

قیمت‌های برق رفتار بازگشت به میانگین، فصلی بودن، نوسان شدید و پرش‌های قیمتی را از خود نشان می‌دهند. واضح است که چنین تغییرات شدیدی در قیمت برق می‌تواند بر سودآوری خریداران و فروشندگان اثر گذاشته و با تاثیراتی که در ثبات مالی شرکت‌ها می‌گذارد باعث اخلال در برنامه‌ریزی دقیق کسب و کار گردد که این امر، منجر به کاهش انگیزه‌های سرمایه‌گذاری می‌شود. لذا پیش‌بینی قیمت‌های برق برای تمامی بازیگران بازار از اهمیت ویژه برخوردار است. زیرا روند تغییر قیمت در مدیریت منابع و انجام اقدامات تامینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

ریسک ناشی از نوسان قیمت‌ها و نحوه مقابله با آن، یکی از دغدغه‌های فعالان و نظریه‌پردازان اقتصادی و مالی است. نوسان‌های پیش‌بینی نشده قیمت‌ها علاوه بر مختل نمودن امکان برنامه‌ریزی دقیق کسب و کار، آثار رفاهی نامطلوبی نیز به دنبال دارند. در میان روش‌های مختلفی که برای کاهش ریسک ناشی از نوسان‌های قیمت دارایی‌ها وجود دارد، ساده‌ترین و شاید جا افتاده‌ترین ابزار پوشش ریسک، استفاده از قراردادهای آتی است. قرارداد آتی توافق نامه‌ای مبنی بر خرید یا فروش دارایی در زمان معین در آینده و با قیمت مشخص است، به این معنا که افراد قراردادهای آتی را با یکدیگر خرید و فروش می‌نمایند که این قراردادها بر پایه یک دارایی پایه منعقد میگردند؛ چنانچه فرد در قرارداد آتی موقعیت خرید اتخاذ نماید به معنای آن است که مقدار مشخصی از دارایی پایه را می‌بایست در تاریخ مشخصی در آینده با قیمتی که در ابتدای قرارداد (زمان انعقاد قرارداد) تعیین شده است از فروشنده تحویل گیرد. بدیهی است این فرد به دلیل اینکه از افزایش قیمت (نقدی) دارایی پایه در طول زمان نگران است اقدام به اتخاذ موقعیت خرید در بازار آتی نموده است؛ این در حالی است که چنانچه فرد به هر دلیلی کاهش قیمت را نامطلوب بداند می‌بایست در بازار معاملات قراردادهای آتی موقعیت فروش اتخاذ نماید که در آن صورت می‌بایست مقدار معین از دارایی مشخص‌شده در زمان فروش قرارداد را در آینده با قیمت تعیین شده در ابتدای قرارداد به خریدار تحویل دهد (بهرامی و میرزاپور، ۱۳۹۱).

به استراتژی‌هایی که در آن به میزان موقعیت نقدی فرد پوشش دهنده ریسک، موقعیت تعهدی در بازار قراردادهای آتی اتخاذ می‌شود استراتژی پوشش ریسک گفته می‌شود. برای یک سیاست پوشش ریسک کارامد لازم است سرمایه گذار نسبت بهینه

پوشش ریسک خود را تعیین نماید. نسبت بهینه پوشش ریسک عبارت است از تعداد موقعیت‌های تعهدی در بازار قراردادهای آتی که برای پوشش ریسک تعداد معینی از موقعیت‌های (خرید یا فروش) در بازار نقدی مورد نیاز است. به عبارت دیگر، نسبت بهینه پوشش ریسک تعیین کننده تعداد قراردادهای آتی است که فرد می‌بایست برای مقابله با نوسان قیمت‌ها نگهداری نماید (نیک پسند و همکاران، ۱۴۰۴).

اوکونر و همکاران[1] (۲۰۲۵) به مروری بر مدل‌های پیش‌بینی قیمت برق در بازارهای روز پیش‌رو، میان‌روز و متعادل‌کننده پرداختند. پیش‌بینی قیمت برق نقش اساسی در تضمین عملکرد کارآمد بازار و تصمیم‌گیری آگاهانه ایفا می‌کند. با افزایش ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، قیمت‌ها دچار نوسان بیشتری شد. پیش‌بینی آن‌ها دشوارتر می‌شود، که این امر ضرورت پیش‌بینی دقیق در فرآیندهای پیشنهاددهی، برنامه‌ریزی و مدیریت ریسک را افزایش داده است. این مطالعه مروری جامع بر مدل‌های پیش‌بینی نقطه‌ای برای بازارهای برق ارائه می‌دهد و شامل رویکردهای آماری کلاسیک (با و بدون ورودی‌های خارجی) و تکنیک‌های مدرن یادگیری ماشینی و یادگیری عمیق، از جمله روش‌های ترکیبی و معماری‌های هیبریدی می‌شود. برخلاف مرورهای استاندارد که تنها بر بازار روز پیش‌رو تمرکز دارند، این مطالعه عملکرد مدل‌ها را در بازارهای روز پیش‌رو، میان‌روز و متعادل‌کننده ارزیابی می‌کند، که هر یک به دلیل تفاوت در رزولوشن زمانی، دسترسی به داده‌ها و ساختار بازار، چالش‌های منحصربه‌فردی دارند. این مطالعه با نگاهی خاص به هر بازار، بینش‌هایی از مجموعه گسترده‌ای از مطالعات را ادغام می‌کند، چالش‌های مداوم مانند کیفیت داده‌ها، تفسیرپذیری مدل و قابلیت تعمیم‌پذیری را شناسایی و جهت‌گیری‌های نویدبخشی را برای تحقیقات آینده ترسیم می‌نماید. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌های هیبریدی و ترکیبی در بازار روز پیش‌رو عملکرد قوی دارند، شبکه‌های عصبی بازگشتی در بازار میان‌روز غالب هستند و مدل‌های آماری ساده‌تر مانند LEAR در بازار متعادل‌کننده، جایی که نوسانات و کمبود داده‌ها همچنان چالش‌های حیاتی هستند، عملکرد نسبتاً مؤثری دارند.

1. O’Connor and et al

بلنگور و همکاران[1] (۲۰۲۵) به پیش‌بینی کوتاه‌مدت قیمت برق از طریق پیش‌بینی تقاضا و تولید تجدیدپذیر پرداختند. این مطالعه یک مدل پیش‌بینی هیبریدی را برای اسپانیا معرفی می‌کند. این مدل شامل چهار ابزار پیش‌بینی است که سه مورد از آن‌ها بر شبکه‌های عصبی مصنوعی تکیه دارند، در حالی که مدل پیش‌بینی تقاضا از رویکرد روزهای مشابه با اصلاح دما استفاده می‌کند. این مدل می‌تواند توسط شرکت‌های تجارت انرژی الکتریکی برای بهبود استراتژی‌های معاملاتی در بازار روز پیش‌رو و بازارهای مشتقه با افق زمانی دو تا ده روز به کار گرفته شود. نتایج نشان می‌دهد که با افق پیش‌بینی دو روزه، پیش‌بینی قیمت دارای rMAE (میانگین نسبی خطا) ۸/۱۸ درصد است. بعلاوه، این مدل به یک عامل بازار امکان می‌دهد تا در ۶۹/۹ درصد از روزها به‌طور دقیق تصمیم بگیرد که آیا انرژی را در بازار روزانه یا در بازار مشتقه خریداری کند.

بارا و همکاران[2] (۲۰۲۳) به پیش‌بینی قیمت برق بازار نقدی با مدل حافظه بلندمدت کوتاه‌مدت در یک زمینه اقتصادی و ژئوپلیتیکی پرداختند. در این مطالعه، یک پیش‌بینی کوتاه‌مدت قیمت برق (EPF) با استفاده از شبکه عصبی بازگشتی (RNN)، به‌ویژه مدل حافظه بلندمدت کوتاه‌مدت (LSTM)، انجام شده است که از الگوریتمی برای انتخاب متغیرها و بهینه‌سازی هایپرپارامترها بهره می‌برد. نتایج با یکی از الگوریتم‌های برجسته یادگیری ماشینی، یعنی گرادیان بوستینگ شدید (XGB)، مقایسه شده‌اند. برخلاف سایر راه‌حل‌های پیش‌بینی قیمت برق که عمدتاً بر بازارهای روز پیش‌رو (DAM) کشورهای آلمان، اتریش، استرالیا، اسپانیا و کشورهای نوردیک تمرکز دارند، این مطالعه بر پیش‌بینی قیمت برق برای یکی از کشورهای شرق اروپا، یعنی رومانی، متمرکز است که قوانین بازار آن با قوانین بازار روز پیش‌رو برق اتحادیه اروپا هم‌راستا می‌باشد. این مطالعه به بررسی بازه زمانی قبل و بعد از همه‌گیری کرونا و درگیری در اوکراین پرداخته است. این مطالعه شامل ایجاد مجموعه داده‌ای از ژانویه ۲۰۱۹ تا اوت ۲۰۲۲ و ارائه الگوریتمی برای شناسایی بهترین معماری LSTM چندلایه برای مقابله با چالش پیش‌بینی کوتاه‌مدت قیمت برق است. الگوریتم پیشنهادی،

1. Belenguer and et al
2. Bâra and et al

متغیرهای مرتبط را با استفاده از آستانه همبستگی شناسایی کرده و ترکیبی از سه پارامتراندازه لایه مخفی، نرخ حذف و نرخ یادگیری را برای دستیابی به بهترین نتایج پیش‌بینی قیمت برق بهینه‌سازی می‌کند.

جانسون (۲۰۲۲) به پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت در بازار برق در انگلیس پرداخت. در این مطالعه برای پیش‌بینی قیمت تسویه بازار با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه، بر پایه مدل هیبریدی ژنتیک و رقابت استعماری استفاده شده است. این مدل هیبریدی در مقایسه با شبکه‌های عصبی مرسوم (بر پایه الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر گرادیان) دقت بهتری داشته و قابلیت همگرا شدن به سمت بهینه مطلق را دارد. نتایج حاصله دقت بالای این مدل در پیش‌بینی کوتاه مدت سیگنال قیمت برق را بیان می‌کند.

هانلی و همکاران (۲۰۱۹) نسبت بهینه پوشش ریسک و اثر بخشی آن را در سه بازار برق فعال در اروپا یعنی نوردپول، APXUK و فلیکس[1] بررسی می‌نمایند. در این مطالعه که در دو افق زمانی هفتگی و ماهانه و با استفاده از دو معیار واریانس و ارزش در معرض خطر صورت گرفته، تفاوت‌های معناداری هم در نسبت بهینه پوشش ریسک و اثر بخشی آن در بازارهای مختلف بدست آمده است. عملکرد مناسب در پوشش ریسک مربوط به بازار نوردپول و عملکرد ضعیف مربوط به بازار فلیکس است. به طور کلی بازیگران بازار با بکارگیری قراردادهای آتی، کاهش ریسک کمی را تجربه خواهند کرد.

فریرا و سباستیاو (۲۰۱۷) رابطه بین قیمت‌های نقدی و آتی را در بازار برق اسپانیا مطالعه نمودند. تمرکز آنها بر پاداش آتی تحقق یافته در قراردادهای آتی ماهانه است. طبق نتایج این مطالعه، پاداش ریسک به طور متوسط مقدار منفی در بازار برق اسپانیا دارد. همچنین مشخص می‌گردد که قیمت قراردادهای آتی تخمین زن نااریب از قیمت نقدی است. بنابراین نتایج این مقاله، نتایج مدل بی-ال را تایید نمی‌کند.

فلتن[2] و همکاران (۲۰۱۵) پاداش پیمان‌های آتی برقی که در بازارهای برق نوردیک، آلمان - اتریش معامله می‌شوند را مورد بررسی قرار می‌دهند. این مطالعه نتایج بسمیندر و لمون را تایید می‌کند. طبق یافته‌ها پاداش آتی در بازار نوردپول بیشتر است. این دو نیز از قیمت سوخت به عنوان متغیر موثر بر پاداش آتی بهره می‌گیرند، ولی

1. Phelix
2. Fleten

مشابه با آنچه در خصوص مقاله داگلاس و پوپوآ (۲۰۰۸) گفته شد، قیمت سوخت بر پاداش آتی در ایران بی‌تاثیر خواهد بود.

هایسمن[1] و کیلیج[2] (۲۰۱۲) قدرت پیش‌بینی قیمت‌های آتی‌ها را از قیمت نقدی و امکان وجود پاداش ریسک را مورد ارزیابی قرار دادند. بازارهای مورد بررسی عبارتست از بازار برق هلند که بیشتر برق تولیدی از منابع فسیلی قابل ذخیره تولید می‌کند و بازار برق نوردیک که عمده برق خود را از منابع آبی تامین می‌نماید. نتایج نشان می‌دهند در بازارهایی با منابع قابل ذخیره کامل همچون انرژی فسیلی، قیمت قراردادهای آتی هم در خصوص قیمت نقد مورد انتظار و هم پاداش ریسک متغیر در طول زمان، حاوی اطلاعات مفیدی برای بهره برداری در پیش‌بینی‌ها است.

لوسیا[3] و تورو[4] (۲۰۱۱) رابطه بین قیمت‌های نقدی و آتی را برای قراردادهای با سر رسید کوتاه مدت در بازار برق نوردپول بررسی نمودند. یافته‌ها نشان دهنده وجود پاداش آتی مثبت و معنادار در قراردادهای آتی برق کوتاه مدت است. همچنین مدل بی-ال در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد که یافته‌ها تاییدی بر برقراری این مدل است بدین ترتیب که پاداش آتی در دوره‌هایی بالاست که تقاضا بالاست.

ضحاکی و صادقی (۱۴۰۳) به مدل‌سازی و پیش‌بینی مصرف کوتاه‌مدت برق ایران با استفاده از شبکه عصبی بازگشتی و الگوریتم بهینه‌سازی TPE پرداختند. نقش واسطه‌ای برق برای صنایع مختلف و ارتباط آن با رفاه جامعه، باعث افزایش اهمیت آن شده‌است، به طوری که اطلاع از مقدار تقاضای این انرژی، در هدایت کشور به سمت توسعه از اهمیت به سزایی برخورداراست. طی چند سال اخیر به دلیل توسعه مدل‌های یادگیری عمیق و افزایش دقت این گونه مدل ها، استفاده از آنها رواج یافته است. در این پژوهش، از متغیرهای تاثیرگذاری چون: تولید ناخالص داخلی بدون نفت، میانگین دمای کشور، روزهای تعطیل و روند مصرف برق، با به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی TPE برای بهینه‌سازی مدل LSTM استفاده شده‌است. برای مقایسه نتایج، مدل دیگری طراحی شده که فاقد دو متغیر تولید ناخالص داخلی و روزهای تعطیل بوده و همچنین با الگوریتم TPE، بهینه شده‌است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مدل

1. Huisman
2. Kilic
3. Lucia
4. Torró

دارای متغیرهای: تولید ناخالص داخلی بدون نفت و روزهای تعطیل نسبت به مدل فاقد این‌دو متغیر، از دقت بالاتری برخوردار است.

سهرابی و معظمی (۱۴۰۲) به بررسی یک روش ترکیبی برای پیش‌بینی احتمالاتی میان-مدت قیمت برق با استفاده از یادگیری عمیق پرداختند. با تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، پیش‌بینی قیمت برق برای مدیریت بازار برق بسیار مهم شده و نقش کلیدی در عملیات در بازار برق و شبکه‌های هوشمند ایفا می‌کند. در این مقاله یک روش ترکیبی برای پیش‌بینی احتمالاتی قیمت برق پیشنهاد می‌شود. در این روش ماتریس ویژگی‌ها با استفاده از روش تحلیل اجزای همسایگی استخراج و از مجموعه‌های هدف که شامل مقادیر مشاهده شده قیمت برق است، بخش ثابت یا به عبارتی بخش فصلی آن جدا می‌شود. پس از آماده شدن داده‌های آموزش، این مجموعه به دو زیرمجموعه آموزش و اعتبارسنجی تقسیم می‌گردد. پس از آن با استفاده از شبکه حافظه با سه لایه مخفی و با استفاده از روش آموزش ترتیبی مدل پیش‌بینی آموزش داده می‌شود و در دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد روش ترکیبی پیشنهادی در این مطالعه موجب کاهش خطای پیش‌بینی‌های نقطه‌ای می‌شود. بهترین نتیجه به دست آمده مربوط به مدل Winsorized با میانگین مطلق درصد خطا برابر با ۹/۲۰۰۹ است که حاکی از کاهش خطا به میزان ۹/۶۳۳ درصد نسبت به روش ارائه شده جهت مقایسه می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد روش پیشنهادی برای پیش‌بینی قیمت برق روش کارآمدی است و می‌توان از آن برای پیش‌بینی میان‌مدت قیمت برق بهره گرفت.

پورقربان و ممی‌پور (۱۳۹۹) به مدلسازی و پیش‌بینی قیمت برق در ایران با استفاده از مدل گارچ بر پایه موجک پرداختند. پس از تجدید ساختار بازار برق ایران در سال ۲۰۰۵، قیمت برق توسط نیروهای حاکم بر بازار تعیین می‌شود. هدف اصلی این مطالعه، ارائه روشی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی قیمت برق براساس ویژگی‌های پیچیده آن همانند نامانایی، غیرخطی و نوسانات زیاد در ایران طی دوره زمانی بهار ۲۰۱۳ تا زمستان ۲۰۱۸ است. برای دست‌یابی به این هدف، با بهره‌گیری از ابزار تبدیل موجک داده‌های سری زمانی قیمت متوسط موزون روزانه بازار در ابعاد فرکانس-زمان به یک سری تقریبی (فرکانس پایین) و چهار سری جزییات (فرکانس بالا) تجزیه شده است.

سری‌های تجزیه شده توسط مدل‌های ARMA و GARCH برآورد و پیش‌بینی می‌شود و سپس قیمت برق با بازسازی و ترکیب مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از فرکانس‌های مختلف به عنوان روش پیشنهادی (Wavelet-ARMA-GARCH) پیش‌بینی می‌شود. نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد مدل ارائه شده از قدرت پیش‌بینی بالاتری برخوردار بوده و قادر است رفتار نوسانی قیمت برق را با لحاظ ابعاد مختلف فرکانس-زمان با دقت بیشتری پیش‌بینی نماید؛ ولی عدم بهره‌گیری از تبدیل موجک منجر به افزایش خطای پیش‌بینی قیمت برق می‌شود. مقادیر میانگین درصد خطای مطلق برای روش پیشنهادی طی بهار ۲۰۱۷ تا زمستان ۲۰۱۸ به طور قابل توجهی کمتر از روش جایگزین است و روش پیشنهادی می‌تواند ویژگی‌های پیچیده قیمت برق را بهتر و با دقت بیشتری تبیین نماید.

طیب نیا و همکاران (۱۳۹۷) به کاربرد قراردادهای سلف موازی استاندارد بورس انرژی در پوشش ریسک قیمت بازار برق ایران پرداختند. این مطالعه کاهش ریسک مالی نیروگاه‌های بخش خصوصی در بازار برق ایران را مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج این مطالعه برتری استراتژی‌های پویا را از منظر اثر بخشی پوشش ریسک نشان می‌دهد. در بین روش‌های پویا، برتری با مدل‌های واریانس ناهمسانی شرطی خودرگرسیونی با ضرایب همبستگی پویا و ایستا بود، ولی با توجه به قید نقدینگی در معاملات قرارداد سلف استاندارد و تفاوت جزئی در کارایی و اثربخشی بین این مدل ها، موثر بودن روش گارچ مشخص گردید.

ممی پور و همکاران (۱۳۹۷) به پیش‌بینی نوسانات قیمت برق در بازار برق ایران با استفاده از مدل مارکوف سویچینگ گارچ پرداختند. هدف این مطالعه، پیش‌بینی نوسانات قیمت برق در بازار برق ایران با استفاده از مدل‌های تک‌رژیمی و چندرژیمی و مقایسه قدرت پیش‌بینی این مدل‌ها طی دوره زمانی ابتدای فروردین ماه ۱۳۹۲ تا پایان شهریور ماه ۱۳۹۷ است. برای این منظور از مدل‌های گارچ متقارن و نامتقارن به عنوان مدلسازی تک‌رژیمی و از مدل مارکوف سویچینگ گارچ (MSGARCH) به عنوان مدلسازی چندرژیمی برای پیش‌بینی نوسانات قیمت برق در افق‌های پیش‌بینی کوتاه‌مدت شامل یک‌روزه و پنج‌روزه و افق بلندمدت شامل ده‌روزه و بیست‌روزه با توزیع‌های مختلف استفاده شده‌است. نتایج حاصل از مقایسه خطاهای پیش‌بینی هر یک

از مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل MSGARCH برای همه افق‌های زمانی، نسبت به مدل‌های تک‌رژیمی از کارایی بیشتری در پیش‌بینی نوسانات قیمت برق برخوردار است. همچنین مقایسه نتایج بین مدل‌های تک رژیمی با توزیع‌های مختلف نشان می‌دهد مدل نامتقارن EGARCH نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری داشته و قدرت پیش‌بینی این مدل‌ها به نوع توابع توزیع جملات خطا و افق زمانی پیش‌بینی بستگی دارد.

منظور و یادی‌پور (۱۳۹۵) به ارزیابی و پیش‌بینی نوسانات قیمت در بازار برق ایران به کمک مدل ARMAX-GARCH پرداختند. در این مطالعه با اجرای مدل خودرگرسیون میانگین متحرک (ARMAX) با مدل خودرگرسیون میانگین شرطی تعمیم یافته (GARCH)، برترین مدل برای برازش بازده و نوسانات قیمت‌های روزانه بازار برق در بازه زمانی ۱۳۹۳-۱۳۹۱ معرفی گردید. بنابراین، مدل ARMAX در ترکیب با مدل GARCH، EGARCH،GJR-GARCH، و توزیع‌های Gaussian، Student-t، Generalized Error، مقایسه خواهد شد.

۳- روش شناسی تحقیق

روش انجام این پژوهش توصیفی و مبتنی بر اسناد کتابخانه‌ای است که با آزمون‌های آماری دنبال خواهد شد. در تحقیق حاضر، ابتدا به منظور مرور ادبیات تحقیق، از اسناد و مدارک موجود شامل مقالات، کتب علمی و داده‌های آماری رسمی منتشر شده به شیوه کتابخانه‌ای استفاده می‌شود. در مرحله بعد، جهت استنباط و آزمون فرضیه‌ها و پاسخ به سوالات تحقیق، اطلاعات آماری مورد نظر از اسناد منتشره توسط دستگاه‌های تولیدکننده آمار و اطلاعات، جمع آوری و پردازش می‌شوند. در این مطالعه دو داده اصلی، قیمت نقدی خرید از نیروگاه‌ها در بازار عمده فروشی برق و دیگری قیمت آتی در بورس انرژی ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد. داده‌های مربوط به قیمت بازار از شرکت مدیریت شبکه برق ایران و داده‌های معاملات قراردادهای سلف موازی استاندارد برق از شرکت بورس انرژی ایران گردآوری شده است. نرم افزار مورد استفاده در این تحقیق Eviews8 خواهد بود. برای این منظور ابتدا آزمون‌های آماری بررسی ریشه واحد و آزمون هم انباشتگی بین متغیرها انجام شده و در نهایت به مدلسازی پیش‌بینی قیمت نقدی و آتی پرداخته می‌شود.

روش گردآوری اطلاعات در تحقیق حاضر از نوع کتابخانه‌ای شاخه اسنادی است، زیرا اطلاعات مربوط به متغیرهای تحقیق بین سال‌های ۱۴۰۱-۱۳۹۵ بر اساس فراوانی روزانه در بازار برق ایران استخراج و مدل بر اساس این اطلاعات تدوین خواهد شد. لذا از جدیدترین اطلاعات نمونه طی سال‌های اخیر استفاده خواهد شد. در این تحقیق به منظور بازبینی ادبیات نظری مربوط به موضوع، اطلاعات مربوطه از طریق متن خوانی، استفاده از فیش، آمارخوانی، اینترنت، اطلاعات آماری ورازت نیرو، توانیر، بورس اوراق بهادار تهران و ... گردآوری می‌گردد و به بیان دیگر روش گردآوری اطلاعات از نوع کتابخانه‌ای است. مدل غیرخطی خودرگرسیون انتقال ملایم (STR) به شکل استاندارد زیر تعریف می‌شود؛

$$y_t = \beta' z_t + \theta'\, z_t G(s_t;\gamma.c) + \varepsilon_t.\ \ t = 1.\dots T \qquad (۱)$$

که در آن y_t متغیر وابسته، z_t بردار متغیرهای مستقل که نقش توضیحی آنها می‌تواند در میان دو رژیم بواسطه ضرایب β' متفاوت باشد، β' بردار ضرایب متغیرهای قسمت خطی مدل، θ' بردار ضرایب متغیرهای قسمت غیر خطی مدل، $G(s_t;\gamma.c)$ تابع انتقال تعیین کننده رژیم و محدود به عدد بین صفر و یک خواهد بود، s_t ضریب متغیر انتقال، Υ تعیین کننده شکل تابع انتقال، c مقدار آستانه متغیر انتقال است.

لازم به ذکر است مهمترین مرحله در مدل‌های خود رگرسیون انتقال ملایم، تشخیص و تعیین متغیر انتقال (s_t) برای تابع انتقال (G) است، به این علت که متغیر یا متغیرهای انتقال پویایی‌های متغیر وابسته (در این تحقیق بازده شاخص) را توضیح می‌دهند. عموما تحقیقات صورت گرفته به علت رویکرد کاملا آماری از جزء خودرگرسیون متغیر وابسته (بازده شاخص) به عنوان متغیر انتقال استفاده نموده‌اند. در این پژوهش از میان مجموعه متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده در مدل بهترین متغیر انتقال برای تابع انتقال که به شرح زیر است، انتخاب خواهد گردید.

$$G(s_t;\gamma.c) = \left(1 + \exp\{-\gamma \textstyle\prod_{i=1}^{k}(s_t - c_i\,)\}\right)^{-1} \gamma > 0 \qquad (۲)$$

k ؛ تعداد دفعات تغییر رژیم؛ در صورت برابر بودن با عدد یک به معنی وجود دو رژیم است.

تابع انتقال در این مدل به عنوان یک تابع لاجیت تعریف گردیده است. سارانتیس (۲۰۰۱)، مک میلان (۲۰۰۱) و اسلانیدیس و همکاران (۲۰۰۳) استفاده از قالب لاجیبت در مقابل قالب نمایی برای این مدل را ترجیح داده‌اند، زیرا حالت S شکل تابع لاجیت بیشتر به لحاظ بصری قابلیت شناسایی رژیم‌های رشدی و ریزشی یا رونق در برابر رکود را دارد، این در حالی است که در مقابل حالت U شکل تابع نمایی این قابلیت تشخیص را ندارد.

تابع انتقال که رژیم‌ها را تعیین می‌نماید، خودش تابع متغیر انتقال s_t است. سرعت انتقال در این تابع بوسیله γ تعیین می‌گردد. هنگامی که $\gamma \to \infty$ انتقال بیشتر و بیشتر ناگهانی و تند خواهد شد و تابع انتقال تبدیل به تابع پله‌ای (شبیه به متغیر مجازی محدود به مقدار صفر یا یک) و در واقع مدل STR به مدل TAR (مدل خود رگرسیون آستانه) تبدیل خواهد گردید. تابع انتقال با توجه به متغیر انتقال محدود به مقدار بین صفر و یک است و پارامتر c مقدار آستانه متغیر می‌باشد که با توجه به موقعیت متغیر انتقال نسبت به آن، مقدار تابع انتقال تعیین می‌گردد. به طور مثال تابع انتقال در صورتی برابر $G(s_t;\gamma.c) = ۰/۵$ خواهد بود که $s_t = \gamma$ باشد. نکته مهم درخصوص این مدل‌ها عددی است که برای متغیر k انتخاب می‌شود و بر اساس آن رفتار تابع انتقال لاجیت تعیین می‌گردد. دو انتخاب متداول در ادبیات تعویض رژیم برای متغیر k در نظر گرفته می‌شود؛ k=۱ و k=۲ . در مدل انتقال ملایم لاجیت با k=۱ و به عبارتی (LSTR(۱)) بردار پارمترها به طور یکنواخت به صورت تابع s_t از β به $\beta + \theta$ تغییر می‌نمایند. این توانایی مدل LSTR(۱) را در مشخص و توصیف نمودن ویژگی‌ها پویا نشان می‌دهد که در یک رژیم بالا از آنچه که در رژیم پایین است، متفاوت می‌باشد. مدل LSTR(۲) با k=۲ نشان دهنده وجود سه رژیم است، به گونه‌ای که دو رژیم بالا و پایین و یک رژیم میانی است. این نوع مدل برای شرایطی مناسب است که فرآیند پویایی در مقادیر بالا و پایین متغیر انتقال، رفتاری مشابه داشته و فقط در مقادیر میانی رفتاری متفاوت از خود نشان دهد.

۴- برآورد مدل

۴-۱- بررسی آمار توصیفی متغیرها

جدول (۱) برخی از اطلاعات داده‌های مورد استفاده را نمایش می‌دهد.

جدول ۱. آمار توصیفی متغیرها

متغیر	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	آماره جارگ-برا	سطح معنی‌داری
بازده قیمت نقدی	۰/۰۰۰۷۲	۰/۰۳۸	۰/۲۱	۶/۸۷	۱۰۵۰	۰/۰۰۰
بازده قیمت آتی	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۲۶	-۱/۱۳	۶۴/۷	۲۶۴۹۳۵	۰/۰۰۰

بنابر اطلاعات جدول (۱)، هر دو سری بازده قیمت نقدی و بازده قیمت آتی، دارای کشیدگی و چولگی بوده و بنابراین غیر نرمال می‌باشند و این موضوع کاملاً در آماره جارگ - برا مشخص است و مقدار سطح معنی‌داری، فرضیه صفر نرمال بودن را رد می‌کند. با توجه به اینکه تحلیل مورد استفاده در این مطالعه مبتنی بر داده‌های سری زمانی می‌باشد، ضروری است وجود یا عدم وجود ریشه واحد در داده‌های مورد استفاده، بررسی شود. بدین منظور وجود ریشه واحد با لحاظ عرض از مبدا و همچنین روند و عرض از مبدا برای تفاضل لگاریتم قیمت با استفاده از آزمون KPSS مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۲- آزمون‌های تشخیصی متغیرهای مدل

انجام آزمون ریشه واحد به این دلیل است که از بروز رگرسیون کاذب به دلیل وجود داشتن ریشه واحد در متغیرهای تحقیق و متغیر بودن میانگین سری‌های زمانی در طول زمان و بدست آمدن نتایج غیرقابل اتکا جلوگیری شود. آزمون ریشه واحد در سطح و با وجود عرض از مبداء و روند در مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در جدول (۲) گزارش شده است.

جدول ۲. آماره‌های آزمون ریشه واحد و هم انباشتگی متغیرهای تحقیق

آماره	بازده قیمت نقدی	بازده قیمت آتی
ADF	(۰,۱۸) -۱/۴۱	(۰,۴۸) -۲/۲۳
KPSS	(۰,۰۰) ۳/۵۲	(۰,۰۰) ۴/۱۵

در جدول فوق اعداد داخل پرانتز بیانگر سطح معنی‌داری است. بر اساس نتایج بدست آمده در آزمون مشاهده می‌شود که تمامی متغیرهای تحقیق در سطح نامانا بوده و فرضیه صفر مبنی بر ریشه واحد را رد نکرده و این متغیرها با یکبار تفاضل‌گیری مانا می‌شوند. براساس نتایج حاصل از آزمون هم انباشتگی مشخص گردید که رابطه بلندمدت بین متغیرها وجود داشته است.

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمون هم انباشتگی فصلی

Regressand	Regressors	t_φ	t_{λ_1}	t_{λ_2}	$F: \lambda_1 \cap \lambda_2$	LM(4)
$Z_1(y_t)$	$Z_1(x_t)$	-۳/۹۲	-۳/۲۶	-	-	۱۱/۱۸
	$Z_1(x_t)$	-۴/۲۳	-	-۳,۱۱	۳/۵۸	۱۰/۸۷

مقادیر بحرانی در سطح ۵ درصد عبارت از؛

$t_\varphi = -3.25. t_{\lambda_1} = -3.34.\ t_{\lambda_2} = -2.17\ F: \lambda_1 \cap \lambda_2 = 6.67$ است.

فرض صفر مربوط به وجود ریشه واحد رد شده و از طرفی وجود رابطه هم انباشتگی بین متغیرها تائید می‌گردد.

۴-۳- نتایج برآورد رگرسیون انتقال ملایم

مرحله مدل‌سازی انتخاب متغیر انتقال از میان مجموعه متغیرهای گذار یا انتقال بالقوه می‌باشد، زیرا این امکان نیز وجود دارد که تئوری‌ها به محدود کردن (یا حذف) برخی متغیرها و یا به معرفی برخی متغیرهای جدید بپردازند. پس از تعریف متغیر گذار، آزمون بدین شکل انجام می‌شود که هر بار یکی از متغیرهای موجود در بردار s تابع انتقال بعنوان متغیرگذار استفاده می‌شود. اگر فرض صفر مبنی بر خطی بودن برای بیشتر از یک متغیر گذار رد شد، همانطور که قبلا بیان گردید متغیری انتخاب می‌شود که مقدار $\mathrm{P-Value}$ آزمون برای آن حداقل باشد، زیرا فرض صفر خطی بودن را نسبت

به سایر متغیرهای گذار با قدرت بیشتری رد می‌کند. در این تحقیق پس از تخمین مدل با متغیرهای گذار مختلف متغیر قیمت نقدی بعنوان متغیرگذار انتخاب شد، زیرا نتایج تخمین برای آن رضایت بخش‌تر از سایر متغیرها بود. پس از انتخاب متغیرگذار، گام بعدی برای تخمین مدل غیرخطی، انتخاب نوع مدل است که باید در بین مدل‌های STR مختلف برای تصریح مدل یکی را انتخاب و استفاده نمود. همانطور که گفته شد نوع تابع به دو صورت LSTR1 و LSTR2 است. نتایج حاصل از انجام آزمون در این خصوص در جدول (۴) خلاصه شده و مقادیر ارائه شده در آن سطح عدم اطمینان آمارهF(Prob F) را نشان می‌دهد. بر این اساس ستون اول نشان دهنده سطح عدم اطمینان در رد فرضیه خطی بودن و ستون بعدی به ترتیب مربوط به سطح اطمینان رد فرضیات H_{02}، H_{03} و H_{04} است.

بر اساس نتایج ستون اول فرضیه H_0 مبنی بر خطی بودن مدل با در نظر گرفتن نرخ ارز به عنوان متغیر انتقال در سطح اطمینان ۹۵ درصد رد می‌شود. همچنین مقدار P-value در این آزمون برای متغیر نرخ ارز کمتر از دیگر متغیرها است. بنابراین متغیر قیمت نقدی به عنوان متغیر انتقال مناسب انتخاب می‌شود. نتایج حاصل از سه ستون دیگر حاکی از رد فرضیات H_{02}، H_{03} و H_{04} با در نظر گرفتن قیمت نقدی به عنوان متغیر انتقال است. بر این اساس فرم تابعی مناسب پیشنهاد شده برای تابع انتقال به صورت LSTR1 است. تایید این فرم تابعی برای تابع انتقال نشان دهنده وجود یک حد آستانه است. بنابراین رابطه بین متغیرها حول یک سطح از بازدهی قیمت نقدی برق که همان نقطه حد آستانه است، دچار تغییر رژیم شده و این تغییر رژیم به صورت ملایم تحت تابع انتقال اتفاق می‌افتد.

جدول ۴. نتایج آزمون‌های خطی بودن، تعیین متغیر انتقال و فرم تابعی مناسب

متغیر انتقال	سطح معنی‌داری				فرم تابعی پیشنهادی
	فرضیه H_0	فرضیه H_{02}	فرضیه H_{03}	فرضیه H_{04}	
بازده قیمت نقدی	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۴۵	۰/۰۴۲۱	غیرخطی
بازده قیمت آتی	۰/۰۰۹۴	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۵۸	۰/۰۸۳۷	خطی

با توجه به انتخاب نوع مدل LSTR1 مبنی بر وجود دو رژیم حاکم بر بازدهی قیمت برق تحت تاثیر متغیر گذار، نتایج نهایی حاصل از تخمین این مدل غیرخطی در در جدول (۵) بشرح زیر نمایش داده شده است.

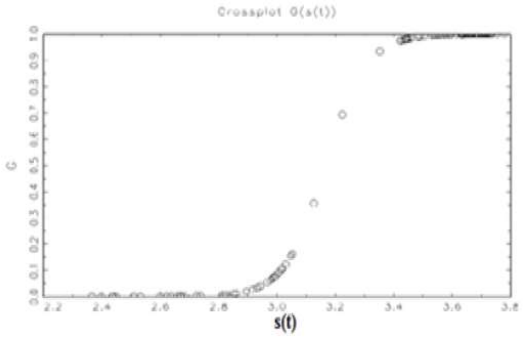
جدول ۵. نتایج برآورد مدل (متغیر وابسته: بازده قیمت نقدی برق)

بخش خطی مدل	
ضرایب معناداری	
عرض از مبداء	۰/۶۵ (۰/۰۱)
وقفه بازدهی قیمت نقدی برق	۰/۱۷ (۰/۰۳)
بازدهی قیمت آتی	۰/۳۲ (۰/۰۰)
بخش غیر خطی مدل	
عرض از مبداء	۰/۰۲۲ (۰/۰۴)
وقفه بازدهی قیمت نقدی برق	۰/۱۱ (۰/۰۰)
بازدهی قیمت آتی	۰/۱۸ (۰/۰۰)
ضریب گاما	۳/۲۰
ضریب C	۰/۵۴

با توجه به اینکه تمامی متغیرهای تحقیق در سطح خطای ۵ درصد، اختلاف معنی داری از صفر دارند، نتیجه بیانگر تاثیر گذاری وقفه بازدهی قیمت نقدی و بازدهی قیمت آتی بر بازدهی قیمت نقدی برق است. نتایج بدست آمده از آزمون‌های تشخیصی مدل بیانگر عدم وجود خودهمبستگی و مشکل واریانس ناهمسانی در جملات اخلال مدل بوده است. همچنین همانطور که اشاره شد، مدل غیر خطی دارای دو رژیم حدی LG (متناظر با مقادیر پایین بازدهی قیمت نقدی برق) و HG (متناظر با مقادیر بالای بازدهی قیمت نقدی برق) است.

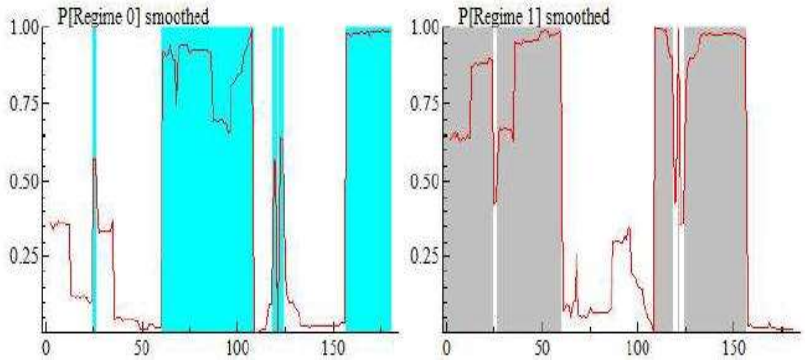
مدل STR با در نظر گرفتن متغیرهای انتقال و توانایی مدل‌سازی تغییرات رژیم‌های اقتصادی، برای بازار برق ایران مناسب است. این مدل می‌تواند اثرات تورم و نوسانات تقاضا را در پیش‌بینی قیمت‌ها لحاظ کند. همچنین، استفاده از داده‌های روزانه امکان تحلیل دقیق‌تر الگوهای قیمتی را فراهم می‌کند. در مدل برآورد شده مشاهده می‌شود که متغیر بازدهی قیمت آتی برق در بخش خطی و غیرخطی مدل اثرات مثبت و معنی داری بر بازدهی قیمت نقدی برق داشته و افزایش در قیمت آتی منجر به افزایش در قیمت نقدی برق می‌شود. مدل LSTR برآورد شده حاکی است قیمت نقدی برق نسبت به سطوح متفاوت متغیر گذار رفتاری نامتقارن از خود نشان می‌دهد و در میان دو رژیم بالا و پایین رشد قیمت در حرکت است. سرعت انتقال بین این دو

رژیم قیمت برق با رشد بالا و پایین با پارامتر گذار تخمین زده شده (g_{it}) معادل ۳/۲۰ تعیین می‌گردد.



نمودار ۱. تابع لاجستیک مربوط به تغییر رژیم

نمودار (۱) تابع انتقال حاکی از نحوه اثر گذاری قیمت آتی برق بر قیمت نقدی، بر حسب مقادیر متغیر انتقال است.



نمودار ۲. روند رژیم‌های هموار حاکم بر بازار

در مدل فوق با توجه به تعداد مشاهدات و تجزیه آن به دوران مختلف و با توجه به متغیر گذار انتخاب شده، میزان احتمال ماندن در دو رژیم سالانه برای مدل مطابق شکل ۲ با استفاده از روش مرحله پیش‌بینی پیش رو[1] به دست آمده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، رژیم دوم نسبت به رژیم اول پایدارتر است و به عبارتی بهتر دوره‌های با نوسانات بالا بیش‌تر از دوره‌های با نوسانات پایین است. در نهایت پس از به دست آمدن ارتباط بین متغیرها، به کمک آن به شبیه‌سازی مقادیر آتی متغیر

1. Forward forecasting

وابسته پرداخته شده و بر اساس آن مقادیر آماره محاسبه خطای پیش‌بینی محاسبه شده است.

جدول ۶. نتایج پیش‌بینی مدل STR و OLS

مدل	*MSE*	*RMSE*
STR	۰/۰۰۴۵۱	۰/۰۰۳۲
OLS	۰/۰۰۸۹۳	۰/۰۰۶۷

نتایج این دو مدل نشان می‌دهد که مدل STR از قدرت پیش‌بینی بالاتری برخوردار است.

۵- نتیجه گیری

صنعت برق به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی اقتصاد هر کشور، نقش کلیدی در توسعه اقتصادی و تأمین نیازهای انرژی جامعه ایفا می‌کند. در ایران، بازار برق با ویژگی‌های رقابتی و نوسانات قیمتی بالا، تحت تأثیر عوامل متعددی مانند تقاضای انرژی، تولید انرژی تجدیدپذیر، قیمت سوخت‌های فسیلی، شرایط اقتصادی و سیاست‌های تنظیم‌گری قرار دارد. برخلاف تصور عمومی که تعرفه‌های برق را ثابت و پله‌ای می‌داند، قیمت‌گذاری در بازارهای نقد و سلف برق پویا بوده و برای فعالان این حوزه، پیش‌بینی دقیق این قیمت‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. این پیش‌بینی‌ها به شرکت‌های تولید و توزیع برق، معامله‌گران انرژی و سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا استراتژی‌های بهینه‌ای برای مدیریت ریسک، برنامه‌ریزی تولید و معاملات بازار طراحی کنند. هدف مقاله حاضر پیش‌بینی قیمت برق در بازارهای نقد و سلف با رویکرد مدل رگرسیون انتقال ملایم بود. برای این منظور از اطلاعات روزانه در بازه زمانی ۱۴۰۱-۱۳۹۶ و به منظور انجام پیش‌بینی از مدل‌های سری زمانی و رویکرد OLS و STR استفاده گردید. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که مدل غیرخطی مبتنی بر روش رگرسیون انتقال ملایم (STR) دقت بالاتری در پیش‌بینی قیمت نسبت به مدل OLS داشته است. با توجه به نتایج بدست آمده برای بهبود عملکرد بازار برق ایران، پیشنهاد می‌شود که تعرفه‌های خرید برق به‌صورت دوره‌ای و متناسب با نرخ تورم اصلاح شوند تا از زیان مالی شرکت‌های تولیدکننده جلوگیری شود. همچنین، سیاست‌گذاران

باید قیمت‌های نقد و سلف را در تدوین سیاست‌های تنظیم‌گری بازار در نظر بگیرند تا تعادل بین عرضه و تقاضا حفظ شود.

براساس نتایج بدست آمده پیشنهاد می‌شود که اصلاح تعرفه خرید برق متناسب با تورم در صنعت برق صورت گیرد. همچنین به منظور تعیین سیاست‌های حوزه برق، قیمت نقدی و آتی مورد توجه قرار گیرد. با توجه به مدل برآورد شده شرکت‌های مدیریت شبکه برق، باید سامانه‌های جمع‌آوری و انتشار داده‌های بازار را بهبود بخشند تا دسترسی به داده‌های به‌روز و باکیفیت برای مدل‌های پیش‌بینی فراهم شود. این امر می‌تواند با ایجاد پایگاه داده‌های یکپارچه و استفاده از فناوری‌های کلان‌داده محقق شود. علاوه بر این برای کاهش تأثیر نوسانات قیمت سوخت بر قیمت برق، سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی باید افزایش یابد. این امر می‌تواند از طریق مشوق‌های مالیاتی و حمایت‌های دولتی تسهیل شود. توسعه ابزارهای مالی مشتقه، مانند قراردادهای آتی بلندمدت، می‌تواند به شرکت‌های معامله‌گر کمک کند تا ریسک‌های قیمتی را بهتر مدیریت کنند. این امر نیازمند اصلاحات قانونی و نظارتی در بازار برق است.

Electricity Price Forecasting in Spot and Futures Electricity Sales Markets with a Nonlinear Model

Arash Jalibi [1]
PhD Student in Financial Management, Department of Management, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran, (eco2015th@gmail.com)

Mahmoud Khoddam
Assistant Professor of Accounting, Department of Accounting, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran, (m.khoddam@iau.ac.ir)

Hossein Mohammadnejad
Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, (h.mohamadnejad@iau.ac.ir)

Received: 2025/02/01 Accepted: 2025/09/21

Abstract

The general perception of the electricity industry and its tariffs is based on a tariff system with fixed and step rates that is more prominent and of interest from the distribution and consumer perspective. This view is due to the lack of awareness of the existence of a competitive electricity market. In fact, electricity prices do not have a fixed tariff structure, which means that such a rate is not meaningful for the actors in this field at least. With the start of electricity markets in Iran and the world, the behavior of electricity market prices has been more affected by the inherent nature of electricity production and consumption. The aim of this paper was to forecast electricity prices in spot and futures markets and design an optimal electricity sales model in the aforementioned markets using the Smooth Transition Regression (STR) approach. For this purpose, daily data in the period 2019-2023 was used. The Smooth Transition Regression nonlinear model was used to make the forecast. The results showed that the use of the aforementioned nonlinear model had a high ability and power in predicting electricity prices.

JEL Classification: K22, L33, M10, C30.
Keywords: Electricity price, forecast, spot market, forward market, copula function.

1. Corresponding Author

منابع

- آقاابراهیمی، محمدرضا، طاهریان، حسین، ناظر کاخکی، سید ایمان، فرشاد، محسن و گلدانی، سعیدرضا (۱۳۹۳)، پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت در بازار برق با درنظر گرفتن تاثیر تولید واحدهای بادی، هوش محاسباتی در مهندسی برق، ۵(۱)، ۱۰۵-۱۲۲.
- پیش بهار، اسماعیل، عبدالکریم صالح، خدیجه و دشتی، قادر (۱۳۹۵)، محاسبه نسبت بهینه پوشش ریسک برای نهاده ذرت وارداتی صنعت طیور ایران، ۲۶(۱)، ۱۶۷-۱۷۴ .
- سجاد، رسول و طروسیان، آدنا (۱۳۹۳)، نسبت بهینه پوشش ریسک نرخ ارز به وسیله قراردادهای آتی سکه طلا در ایران. دانش سرمایه‌گذاری، ۳(۱۲)، ۱-۲۴.
- سهرابی، محمدصادق و معظمی، مجید (۱۴۰۲). یک روش ترکیبی برای پیش‌بینی احتمالاتی میان-مدت قیمت برق با استفاده از یادگیری عمیق. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۲۰ (۴)، ۱۲۳-۱۳۲.
- سهمانی اصل, محمد علی , نصیری‌فر, هاشم و ویسی حصار, ثریا (۱۴۰۰). تأثیر رقابت در بازار محصول بر ارتباط بین مسئولیت‌پذیری اجتماعی و اهرم مالی شرکت‌ها. نشریه پژوهش‌های حسابداری مالی، ۱۳(۴)، ۹۳-۱۱۴.
- ضحاکی راحت، مجتبی و صادقی سقدل، حسین (۱۴۰۳). مدل‌سازی و پیش‌بینی مصرف کوتاه‌مدت برق کشور با استفاده از شبکه عصبی بازگشتی و الگوریتم بهینه‌سازی TPE. فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۲۰(۸۳)، ۱۵۹-۱۸۲.
- طیب نیا، علی، مهر آرا، محسن و کیانوند، مهران (۱۳۹۷)، کاربرد قراردادهای سلف موازی استاندارد بورس انرژی در پوشش ریسک قیمت بازار برق ایران، اقتصاد مالی، ۱۲(۴۳)، ۱۵۳-۱۷۸.
- علیمرادی، محمد (۱۳۹۲)، برآورد نسبت‌های بهینه پوشش ریسک ایستا و پویا و مقایسه میزان اثربخشی آنها در بازار آتی‌های گاز طبیعی، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۲(۸)، ۱۰۹-۱۲۸.
- ممی پور، سیاب، منصوری، فهیمه و ناظمی، علی (۱۳۹۷)، پیش‌بینی نوسانات قیمت برق در بازار برق ایران با استفاده از مدل مارکوف سویچینگ گارچ، مدلسازی اقتصادسنجی، ۳(۲)، ۹۳-۱۲۲.

- منظور، داود و یادی پور، مهدی (۱۳۹۵)، ارزیابی و پیش‌بینی نوسانات قیمت در بازار برق ایران به کمک مدل ARMAX-GARCH، اقتصاد مقداری، ۱۳(۱)، ۹۷-۱۱۷.
- نیک پسند، محمود، میرعرب، سیدعلیرضا و فرح بخش، ندا (۱۴۰۴). ابزارهای مشتقه مالی و مدیریت ریسک؛ ارائه مدل و تبیین به روش گراندد تئوری. دانش سرمایه‌گذاری، ۱۴(۵۴)، ۱۰۷-۱۲۸.
- Aggarwal, S. K., Saini, L. M., & Kumar, A. (2009a). Electricity price forecasting in deregulated markets: A review and evaluation. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 31, 13–22.
- Bâra, A., Oprea, S., & Băroiu, A. (2023). Forecasting the Spot Market Electricity Price with a Long Short-Term Memory Model Architecture in a Disruptive Economic and Geopolitical Context. Int J Comput Intell Syst, 16, 130-145.
- Belenguer, E., Segarra-Tamarit, J., Pérez, E. & Vidal-Albalate, R. (2025). Short-term electricity price forecasting through demand and renewable generation prediction. Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM), Elsevier, vol. 229(3), 350-361.
- Benth, F. E., Kholodnyi, V. A., & Laurence, P. (2014). Quantitative Energy Finance:Modeling, Pricing, and Hedging in Energy. New York: Springer.
- Bordignon, S., Bunn, D. W., Lisi, F., & Nan, F. (2013). Combining day-ahead forecasts for British electricity prices. Energy Economics, 35, 88–103.
- Bunn, D., & Chen, D. (2013). The Forward Premium in Electricity Futures. Journal of Empirical Finance, 23, 173-186.
- Castello, O., & Resta, M. (2025). Univariate and multivariate forecasting of the electricity futures curve using Dynamic Recurrent Neural Networks. Applied Energy, Elsevier, 394(3), 45-59.
- Chai Sh., (2015). Dependence Structure and Hedging of U.S. Spot and Futures Markets in Financial Crisis, Accounting and Finance Research, 4(3), 77-87.
- Cotter J., Hanly J. (2006). Re-examining Hedging Performance. Journal of Futures Markets, 26, 657-676.
- Diko, P., Lawford, S., & Limpens, V. (2006). Risk Premia in Electricity Forward Prices. Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics, 10(3), 1-24.
- Fanelli V., Maddalena L., Musti S. (2016). Modelling electricity futures prices using seasonal path-dependent volatility, Applied Energy, 173, 92-102.
- Girish G.P., Rath B.N., Akram V. (2018) . Spot Electricity Price Discovery in Indian Electricity Market. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 73-79.

- Hanly J., Morales L. & Cassells D. (2018). The Efficacy of Financial Futures as a Hedging Tool in Electricity Markets. International Journal of Finance & Economics, 23(1), 29-40.
- Hsu C.-C., Tseng C.-P. & Wang Y.-H. (2008). Dynamic Hedging with Futures: A Copula-Based GARCH Model. Journal of Futures Markets, 28(11), 1095-1116.
- Liebl, D. (2013). Modeling and Forecasting Electricity Spot Prices: a Functional Data Perspective. Annals of Applied Statistics, 7(3), 1562–1592.
- Longstaff, F. A., & Ashley, W. W. (2004). Electricity Forward Prices: A High-Frequency Empirical Analysis. The Journal of Finance, 59, 1877 - 1900.
- Lucia, J. J., & Torró, H. (2011). On The Risk Premium in Nordic Electricity Futures Prices. International Review of Economics & Finance, 20(4), 750-763.
- Maitra D., Dey, K. (2014). Copulas and Dependence Structures: Evidences from India's and Asian Rubber Futures Markets. International Journal of Financial Markets & Derivatives, 3(4), 322-357.
- Niimura, T. (2006). Forecasting techniques for deregulated electricity market prices — extended survey. In Proceedings of IEEE PSCE2006 (pp. 51–56).
- O'Connor, C., Bahloul, M., Prestwich, S., & Visentin, A. (2025). A Review of Electricity Price Forecasting Models in the Day-Ahead, Intra-Day, and Balancing Markets. Energies, 18(12), 3097. https://doi.org/10.3390/en18123097.
- Pourghorban, M., & Memipour, S. (2019). Modeling and forecasting electricity prices in Iran using wavelet-based GARCH model, Iranian Journal of Economic Studies, 9(1), 233-260.
- Redl, C., & Bunn, D. W. (2013). Determinants of The Premium in Forward Contracts. Journal of Regulatory Economics, 43(1), 90–111.
- Vehviläinen, I. (2002). Basics of Electricity Derivative Pricing in Competitive Markets. Applied Mathematical Finance. 9. 45-60. 10.1080/13504860210132879.
- Weron, R. (2014). Electricity Price Forecasting: A Review of The State-of-The-Art With a Look into The Future. International Journal of Forecasting, 30(4), 1030-1081.
- Weron, R., Bierbrauer, M., & Trück, S. (2004). Modeling Electricity Prices: Jump Diffusion and Regime Switching. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 336(1–2), 39-48.