پیشبینی قیمت تسویه بازار برای خوشه های زمانی رقابت پذیری بازار با استفاده از شبکه عصبی بهبود یافته با الگوریتم ژنتیک: مطالعه بازار برق ایران

بختیار استادی[۱] ، امید معتمدی[۲]، علی حسین زاده کاشان [۳]، محمد رضا امین ناصری [۴]

۱- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها - دانشگاه تربیت مدرس - تهران- ایران
Bostadi@modares.ac.ir –
۲- دانشجو دکترا، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها - دانشگاه تربیت مدرس - تهران- ایران
Omid.motamedi@modares.ac.ir–
۳- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها - دانشگاه تربیت مدرس - تهران- ایران
a.kashan@modares.ac.ir –
۴- استاد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها - دانشگاه تربیت مدرس - تهران- ایران
amin_nas@modares.ac.ir–

چکیده: **با قانون‌زدایی بازار و شکل‌گیری بازار روز بعد انرژی، در هرروز تولیدکنندگان انرژی اقدام به ارائه پیشنهاد قیمت خود برای هر واحد به تفکیک ساعت، در حداکثر ۱۰ پله به مدیریت‌شبکه می‌کنند و مدیریت‌شبکه با تعیین میزان تقاضا در روزبعد، قیمت‌تسویه بازار برای روز آتی را به همراه برندگان بازار اعلام می‌کند و بر اساس قیمت پیشنهادی تولیدکنندگان با آنها تسویه می‌کند. از این رو پیشبینی قیمت تسویه بازار برای شرکت کنندگان در بازار حائز اهمیت می‌باشد و پیشبینی دقیق آن تاثیر بسزایی بر روی سود آنها خواهد داشت. نظر به رفتار فصلی قیمت تسویه‌بازار، در این مقاله از الگوریتم K-Means به منظور خوشه بندی فضای رقابتی بازار ایران استفاده شده است که مطابق با نتایج آن، رقابت در بازار برق ایران شامل سه خوشه رقابت بالا (فصول سرد سال)، رقابت کم (فصول گرم سال) و خوشه گذار می‌باشد، در نهایت با به کارگیری الگوریتم ژنتیک جهت انجام فرایند آموزش شبکه‌عصبی، قیمت تسویه بازار برای هر خوشه رقابتی به صورت مجزا پیشبینی شده است که مطابق با نتایج حاصله، مدل ارائه شده قابلیت پیشبینی قیمت تسویه بازار در روز بعد با دقت ۹۵ درصد را دارد.**

واژه های کلیدی: **شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک، خوشه بندی رقابتی بازار برق، پیشبینی قیمت تسویه بازار**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۶/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۲/۲۲

نام نویسنده‌ی مسئول : بختیار استادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی صنایع، طبقه ۵

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

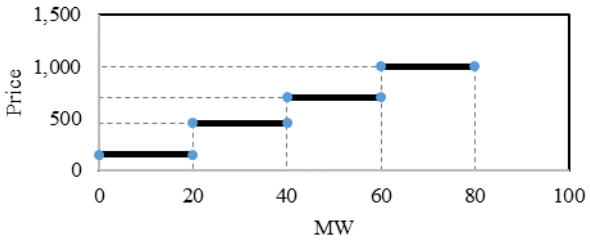
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.8.2]

۱- مقدمه

در گذشته، لزوم سرمایه گذاریهای کلان در زمینه تولید، انتقال و توزیع برق، وجود انحصار دولتی برای این صنعت را توجیه می نمود، به گونه ای که صنعت برق تا دو دهه اخر قرن نوزدهم میلادی با ساختاری یک پارچه که وظیفه تولید، توزیع، انتقال و خدمات مشترکین را بر عهده داشته است به کار خود ادامه می دهد ولی در سال ۱۹۸۲ کشورهای آرژانتین و شیلی به منظور کاهش هزینه های تولید و توزیع برق، رفع ناکارامدیهای صنعت برق انحصاری، افزایش قدرت انتخاب مشتری، جبران کمبود سرمایه گذاری توسط بخش دولتی، کاهش تصدی گری دولتی و شفافیت هزینه ها به منظور فراهم کردن شرایط منطقی برای برنامه ریزی گسترش شبکه و تاسیسات برق شروع به خصوصی سازی این صنعت نمودند و به عنوان اولین بازار که در آن به برق به جای یک خدمات، به صورت کالا نگاه شده است، شروع به کار کرد [1].

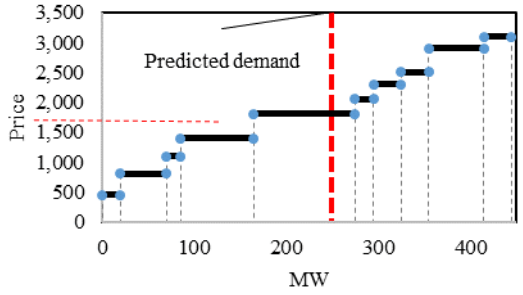
به دنبال واگذاری نیروگاهها به شرکتهای خصوصی، بازار برق تحت عنوان بازار روز بعد شکل گرفته شد که در آن شرکتهای تولید انرژی الکتریکی با یکدیگر بر سر فروش انرژی با قیمت پیشنهادی به رقابت می پردازند. مکانیزم بازار به این صورت است که شرکتهای تولید انرژی برای توان تولیدی خود (به ازای هر واحد تولید انرژی) در روز بعد قیمت یا قیمتهای (تولید کنندگان مجاز به ارائه چند قیمت برای سطوح مختلف تولید می باشند) پیشنهادی را به بهره‌بردار بازار اعلام میکند سپس بهره بردار بازار بر اساس میزان تقاضای برآورد شده در روز بعد، پیشنهاد قیمتهای پذیرفته شده را با در نظر گرفتن هزینه تولید، انتقال و محدودیتهای شبکه اعلام می‌کند و با توجه به نوع بازار (پرداخت بر اساس پیشنهاد و پرداخت به صورت یکسان) با تولید کنندگان انرژی تسویه حساب انجام می‌شود به گونه ای که در بازار پرداخت بر اساس پیشنهاد، پرداخت بر اساس قیمت پیشنهادی انجام می گیرد و در بازار پرداخت به صورت یکسان، معیار تسویه حساب قیمت تسویه بازار است.[1]

در ایران نیز بازار برق از ابتدای سال ۱۳۸۲ به صورت یک بازار متمرکز خرید از تمام تولید کنندگان شکل گرفته است و در ان تولید کنندگان مختلف با ارائه پیشنهاد قیمت روزانه برای هر واحدبا یکدیگر به رقابت می پردازند. در بازار رقابتی ایران که به صورت بازار یک روز بعد است، تولیدکنندگان می‌بایست، در هر روز برای تمامی واحدهای تحت تملک، بار و قیمت پیشنهادی خود را برای تمامی ساعات شبانه روز برای روز بعد، حداکثر در ۱۰ سطح پیشنهادی (مطابق شکل ۱) در سامانه مدیریت شبکه بارگذاری نمایند[2].



شکل (۱) نمونه پله های پیشنهاد قیمت تولید کننده انرژی

به دنبال آن مدیریت شبکه با پیشبینی تقاضای برق مورد نیاز در روز آینده، برای هر ساعت از میان تمامی پیشنهادهای قیمت‌های ارائه شده توسط تولید کنندگان، تقاضای مورد نیاز آن ساعت را با کمترین قیمت های پیشنهادی برآورده میکند و در نهایت از محل برخورد نمودار پیشنهاد قیمت در هر ساعت و پیش بینی میزان تقاضا در آن ساعت، قیمت تسویه بازار به عنوان بیشترین قیمت پذیرفته شد در آن ساعت به دست می‌آید و هر پیشنهاد قیمت کمتر از آن پذیرفته و سایر پیشنهاد قیمتها رد خواهند شد. (مطابق با شکل ۲)



شکل (۲) تعیین قیمت تسویه بازار در بازار روز فروش انرژی ایران

بعد از تعیین قیمت تسویه بازار، با تمامی تولید کنندکان تسویه انجام می‌شود. مبلغ پرداختی به تولید کنندگان در بازار روز بعد ایران، از دو قسمت تولید و آمادگی تشکیل می‌شود که با در نظر گرفتن واحد pppام از نیروگاه PPام در ساعت h ام میزان مبلغ پرداختی برای تولید آن نیروگاه بر اساس قیمت پیشنهاد داده شده انجام می‌گیرد و مبلغ پرداختی بابت آمادگی آن واحد از معادله ۱ محاسبه می شود.

$$Paymenant_AV_{pp,ppg,h} = A_{pp,ppg,h} + B_{pp,ppg,h} - C_{pp,ppg,h} \quad (1)$$

که در آن پارامترها از معادلات ذیل محاسبه میشوند.

$$A_{pp,ppg,h} = \max\left\{\left[\left(p_\mathrm{Dec}_{pp,ppg,h} - \frac{E - Co_{pp,ppg,h}}{1 - \%L_G_{pp,h}}\right) \times CPA_h \times BAR\right], 0\right\} \quad (2)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.8.2]

$$B_{pp,ppg,h} = X_FOG_{pp,ppg,h} \times \max\left\{\left[\begin{pmatrix}\mathrm{E_TGU}_{pp,ppg,h} \\ -\begin{pmatrix}P_S_{pp,ppg,h} \times \\ \left(1-\rho_IC_{pp,ppg,h}\right)\end{pmatrix}\end{pmatrix} \times \right] 0\right\} \quad (3)$$

$$C_{pp,ppg,h} = X_FOG_{pp,ppg,h} \times \max\left\{\left[\begin{pmatrix}\min\begin{pmatrix}\mathrm{E_TGU}_{pp,ppg,h}, p_\mathrm{Dec}_{pp,ppg,h}, \\ Avcap_\mathrm{Max}_{pp,ppg,h} \times \left(1-\rho_IC_{pp,ppg,h}\right)\end{pmatrix} - \\ \left(P_S_{pp,ppg,h} \times \left(1-\rho_I_{pp,ppg,h}\right)\right)\end{pmatrix} \right], 0\right\} \quad (4)$$

که در آن پارامترها به ترتیب عبارتند از:

$Paymenant_AV_{pp,ppg,h}$: بهای پرداختی بابت خالص آمادای واحد pppg ام نیروگاه pp ام در ساعت h ام

$p_\mathrm{Dec}_{pp,ppg,h}$: میزان خالص ظرفیت ابراز شده واحد ppg ام نیروگاه pp ام در ساعت h ام

$E-Co_{pp,ppg,h}$: میزان ظرفیت تخصیص داده شده به واحد ppg ام نیروگاه pp ام در ساعت h ام بابت تعهدات خارج از بازار روز فروش

$\mathrm{E_TGU}_{pp,ppg,h}$: میزان انرژی خالص تولید شده واحد ppg ام نیروگاه pp ام در کل ساعت h ام

$P_S_{pp,ppg,h}$: قدرت عملی پردازش شده نهایی ناخالص ساعتی واحد ppg ام نیروگاه pp ام در ساعت h ام

$Avcap_\mathrm{Max}_{pp,ppg,h}$: میزان سقف مجاز ابراز آمادای برای واحد ppg ام نیروگاه pp ام در ساعت hام

$\%L_G_{pp,h}$: درصد تلفات انتقال انرژی از نیروگاه pp ام تا نقطه مرجع شبکه در ساعت h ام که برای هر نیروگاه توسط مدیر بازار اعلام میشود.

$\rho_IC_{pp,ppg,h}$: درصد مصرف داخلی واحد ppg ام نیروگاه pp ام که مورد تأیید کارشناس منتخب هیأت تنظیم بازار برق میباشد.

CPF_h: ضریب بهای آمادگی ظرفیت در ساعت h ام.

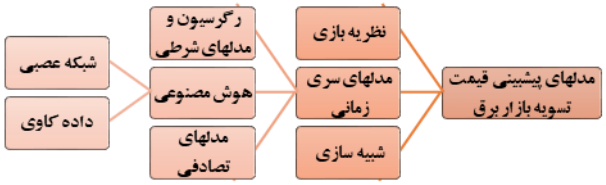
BAR: نرخ پایه بهای آمادگی ظرفیت که در هر سال توسط هیأت تنظیم بازار برق تعیین میشود

$X_FOG_{pp,ppg,h}$: برای واحدهای دارای سیستم خنک کن از تاریخ ۱۵ خرداد تا ۱۵ شهریور برابر با ۱ و در سایر موارد برابر صفر محاسبه میشود.

با توجه به تابع پرداختی از سوی مدیریت شبکه، همواره تولید کنندگان تمایل دارند با ارائه پله های قیمتی بهینه، سود خود را بیشینه کنند اما در مطالعات قیمت‌دهی، پیشنهادهای رقبا در بازار روز بعد و به دنبال آن قیمت تسویه بازار در روز بعد همواره عامل‌های غیر قطعی می‌باشند که منجر به پیچیده شدن مسئله میشود. در این شرایط اگر تولید کننده ای قیمت پذیر باشد از آنجا که قیمت تسویه بازار (با فرض کامل بودن بازار) مستقل از استراتژی انتخابی تولید کننده است، به جای تخمین تعداد زیادی پارامتر غیر قطعی، پارامتر قیمت تسویه بازار (MCP) را به عنوان تنها پارامتر غیرقطعی تخمین می‌زند .[3].

مدلهای پیشبینی قیمت تسویه بازار روز بعد را می توان به سه گروه، نظریه بازی، سری زمانی و شبیه سازی تقسیم نمود (مطابق با شکل ۳) که در روشهای نظریه بازی، با به دست آوردن نقطه تعادل بر اساس پیش بینی رفتار سایر رقبا اقدام به پیشنهاد قیمت می‌شود.[3]

در روشهای سری زمانی بدون در نظر گرفتن و پیش بینی رفتار رقبا، سعی در پیش بینی نقطه تسویه بازار بر اساس داده‌های تاریخی می شود که در آن می‌توان از هر یک از روشهای AR,ARMA, Garch, Arch استفاده نمود و در شبیه سازی، با استخراج توزیع آماری قیمت تسویه بازار، شرایط بازار مدل می گردد.[4]



شکل(۳) مدلهای پیش‌بینی قیمت تسویه بازار

از جمله مطالعات صورت گرفته بر روی بازار برق و استفاده از شبکه عصبی به منظور پیشبینی کوتاه مدت قیمت تسویه بازار میتوان به مقاله گائو و گوان در سال ۲۰۰۰ اشاره نمود که در آن از شبکه عصبی ۳ لایه با مکانیزم پس انتشار خطا برای پیش بینی کوتاه مدت قیمت تسویه بازار استفاده شده است[۵] به دنبال آن هونگ و هیسو در مقاله خود روشی برای پیشبینی کوتاه مدت قیمت حدی محلی با استفاده از شبکه عصبی بازگشتی را ارائه نمودند.[۶] در مقاله دیگر از شبکه عصبی به عنوان مدل پیشبینی قیمت تسویه بازار و قیمت حدی سیستم استفاده شده است و مطابق با نتایج به دست آمده از مطالعه آنها، شبکه عصبی جهت پیشبینی قیمت تسویه بازار کارایی بالایی دارد.[7] به دنبال آن مقدم و اسلامی برای پیشبینی قیمت بلند مدت، قیمت حدی محلی به عنوان یک راهبرد جهت تعیین قیمت تولید کننده ها برای برنامه ریزی توسعه تولید استفاده کرده اند.[8] در سال ۲۰۰۴ یو و همکاران از یک شبکه عصبی با مکانیزم پس انتشار خطا و یک مدل خطی بازگشتی برای پیش‌بینی میان‌مدت و بلندمدت قیمت تسویه بازار استفاده کردند به گونه ای که مدل ارائه شده در این مقاله قابلیت بررسی تاثیرات قدرت بازار بر روی قیمت را در بازارهای ناکارا را دارد و نتایج حاصل از آن نشان دهنده عملکرد بالای شبکه عصبی بهبود یافته است.[9]

به منظور بهبود دقت شبکه عصبی در پیشبینی قیمت تسویه بازار، در مطالعه صورت گرفته در سال ۲۰۱۸ توسط بنتو و همکاران، از الگوریتم فرابتکاری خفاش در فرایند آموزش شبکه عصبی استفاده شده است

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.8.2]

که مطابق با نتایج به دست آمده، مدل ارائه شده نسبت به شبکه عصبی از دقت بالاتری برخوردار است.[10] در مطالعه ای دیگر توسط مدنی و ون ویور در همان سال، از تابع تبدیل کسینوسی به منظور اصلاح پارامترهای ورودی در شبکه عصبی جهت پیشبینی قیمت تسویه بازار استفاده شده است. [11]

جدول (۱). مرور ادبیات

سال	نویسندگان	الگوریتم آموزش
۲۰۰۰	گائو و گوان	پس انتشار خطا
۲۰۰۲	هونگ و هیسو	پس انتشار خطا
۲۰۱۶	وونگ و رمزی	پس انتشار خطا
۲۰۰۵	مقدم و اسلامی	پس انتشار خطا
۲۰۱۴	یو وهمکاران	پس انتشار خطا
۲۰۱۸	بنتو و همکاران	الگوریتم خفاش
۲۰۱۸	مدنی و ون ویور	پس انتشار خطا+تابع تبدیل کسینوسی

جدول ۱، بیانگر مدلهای شبکه عصبی بررسی شده در حوزه بازار برق می باشد که مطابق با این جدول، عموم مدلها از الگوریتم پس انتشار خطا جهت آموزش شبکه عصبی استفاده نموده اند این الگوریتم روشی کند و حساس به جواب اولیه بوده که امکان به دام افتادن در مینیممهای محلی را دارد و عموما منجر به عدم تحقق جواب بهینه میشود.[12] لذا در این مطالعه از الگوریتم ژنتیک در کنار شبکه عصبی به منظور بهبود فرآیند آموزش شبکه استفاده شده است. همچنین بررسیهای انجام شده نشان میدهد، در اکثر مقالات تعداد لایههای شبکه عصبی و نرونهای موجود در هر لایه از طریق آزمون و خطا تعیین شده است[13] در حالی که در این مقاله تعداد بهینه نرونها با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین میشود. از این رو نوآوری های ارائه شده در این مطالعه عبارتند از:

- خوشه بندی فضای رقابتی بازار برق ایران
- پیشبینی قیمت تسویه بازار در خوشه های رقابتی به صورت مجزا
- استفاده از از الگوریتم ژنتیک جهت آموزش شبکه عصبی به منظور تعیین قیمت تسویه بازار برق ایران.

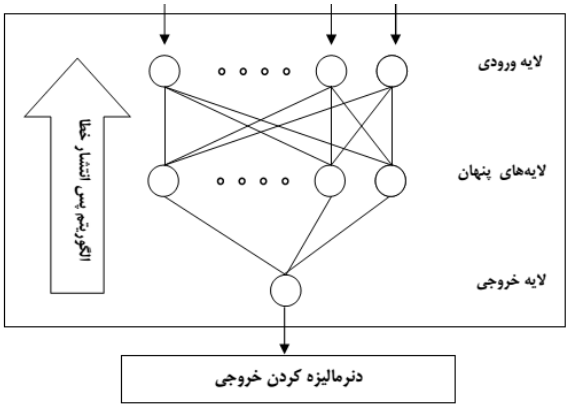
۲- مدل پیشنهادی پیشبینی قیمت تسویه بازار

با توجه به توضیحات آورده شده در مقدمه، میخواهیم با به کارگیری الگوریتم ژنتیک به عنوان مدل بهینه ساز وزنها و ساختار شبکه عصبی، قیمت تسویه بازار را در خوشه های زمانی بازار را پیشبینی نماییم، لذا در این قسمت بعد از ارائه توضیحات در خصوص شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک به معرفی مدل پیشنهادی و ارائه نتایج حاصل از اجرای آن پرداخته شده است.

۲-۱- شبکه عصبی پرسپترون چندلایه پیش‌خور

شبکه‌ای عصبی مصنوعی، یکی از روش‌های محاسباتی است که به کمک فرآیند یادگیری و با استفاده از پردازشگرهایی بنام نرون تلاش می‌کند با شناخت روابط ذاتی بین داده‌ها، نگاشتی میان فضای ورودی (لایه ورودی) و فضای مطلوب (لایه خروجی) ارائه دهد به گونه ای که لایه یا لایه‌های مخفی، اطلاعات دریافت شده از لایه ورودی را پردازش کرده و در اختیار لایه خروجی قرار می‌دهند. در شبکه عصبی پرسپترون چندلایه پیش‌خور تعداد لایه‌های پنهان محدودیتی ندارند، اما افزایش نابجای آن‌ها تنها زمان خروجی گرفتن از شبکه را طولانی‌تر کرده و ممکن است منجر به بیش‌برازش شود. [14].

در این شبکه‌ها نرون های هر لایه به نرون‌های لایه بعد از خود سیگنال می‌فرستند. گره‌ها توسط اتصالاتی به یکدیگر متصل بوده و هر اتصال دارای وزن قابل تغییر مربوط به خود است. چیدمان گره‌ها در لایه‌هایی موازی انجام می‌شود و گره‌های هر لایه فقط به گره‌های دو طرف خود متصل می‌شوند (مطابق شکل ۴).هر نرون یا گره، مانند پردازش‌گر عمل می‌کند و از راه اتصالات اطلاعات را از لایه قبل از خود دریافت می‌کند و بر روی آن‌ها پردازش انجام می‌دهد و نتیجه را از طریق اتصالات خروجی به لایه بعد از خود می‌فرستد.[14].



شکل (۴) ساختار شبکه عصبی

زمانی که بردار ورودی به شبکه داده می‌شود، گره‌های لایه ورودی آن را دریافت کرده و بدون انجام هیچ پردازشی آن را به گره‌های اولین لایه پنهان بعد از خود می‌فرستند. گره‌های لایه‌های پنهان بر روی اطلاعات رسیده پردازش انجام می‌دهند، تا در نهایت نتیجه نهایی به عنوان بردار خروجی از گره لایه خروجی ارائه می‌گردد. به همین دلیل این نوع از شبکه‌ها را شبکه‌های پیش‌خور می‌نامند[14].

با فرض X به عنوان پارامترهای ورودی شبکه عصبی به صورت اسکالر $x_i(i=1,...,n)$ و W به عنوان وزن بین هر دو گره به صورت یک ماتریس n در n هر عنصر بردار X در عنصر متناظر از بردار W ضرب می‌شود. و با یک جمله بایاس W_0 جمع می‌شود.سپس خروجی Y_j از گره j، به عنوان ورودی به گره‌های لایه بعدی فرستاده می‌شود و

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.8.2]

این فرایند تا رسیدن به لایه خروجی ادامه می‌یابد. لایه خروجی، نتیجه نهایی پردازش ورودی‌ها توسط شبکه عصبی است. از آنجایی که در مسئله مورد بررسی، شبکه عصبی به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی مورد استفاده قرار خواهد گرفت، خروجی تولید شده توسط شبکه عصبی برابر با مقدار معادله ۵ است

$$\hat{y}(k) = \sum w_i f_i \left(\sum w_i x_i (k) + w_{j0} \right) + w_0 \qquad (5)$$

که در آن Xi(k) برابر با بردار متغیرهای ورودی در زمان k و y(k) متغیر هدف، wi ضریب اتصال نرون پنهان jام به لایه اخر و w0 اریبی لایه خروجی و wij ضرایب اتصال ورودی iام به نرون j ام لایه پنهان است. fi نیز تابع فعال سازی غیر خطی نرون jام لایه پنهان می‌باشد. [14]

۲-۲- الگوریتم ژنتیک

حساب تکاملی، برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط آقای ریچنبرگ ارائه شد که تحقیق وی در مورد استراتژی تکامل بود.بعدها نظریه او توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفت تا اینکه الگوریتم ژنتیک توسط جان هولند در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه میشیگان ,ارائه شد.

این الگوریتم کار خود را با k جواب قابل قبول که به عنوان جمعیت اولیه شناخته می‌شود شروع میکند و سپس با استفاده از یک تابع برازندگی میزان مطلوبیت هر جواب محاسبه می‌گردد و بعد از ان از بین جوابهای موجود دو جواب با بیشترین مطلوبیت به عنوان والد انتخاب می‌گردد که بر اثر امیزش جوابهای والد، فرزندان جدید ایجاد می‌گردند که با افزودن فرزندان به جمعیت قبلی، جمعیت جدید به دست می‌آید.[15]

به منظور استفاده از الگوریتم ژنتیک برای آموزش شبکه عصبی، از یک شبکه عصبی پرسپترون سه لایه، شامل لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی و از دو ماتریس وزن برای انتقال خروجی از لایه ورودی به لایه پنهان، و انتقال خروجی از لایه پنهان به لایه خروجی، به صورت معادله ۶ استفاده می‌کنیم.

$$W_i = \{W_i^{[1]}, W_i^{[2]}\} \qquad (6)$$

لذا در ابتدا با توجه به ماتریس وزنها تعداد N0 جواب اولیه به صورت تصادفی ایجاد میشود. در این حالت با فرض n ورودی برای شبکه عصبی و لایه پنهان به طول m گره، هر جواب اولیه برداری به طول m*n خواهد بود به گونه ای که kامین جواب به صورت معادله ۷ می‌باشد.

$$x_0(k) = (x_{01}(k), x_{02}(k), ..., x_{0m*n}(k)) \qquad (7)$$

به گونه ای که

$$x_{0n}(k) \in [x_{\min,n}, x_{\max,n}], 1 \le n \le D \qquad (8)$$

در اینجا $x_{\min,n}$ و $x_{\max,n}$ حدود بالا و پایین برای بعد n ام هستند .

به دنبال آن برای هر یک از جوابهای جمعیت اولیه (وزنهای پیشنهادی)، با استفاده از داده های تست، شبکه عصبی اجرا خواهد شد و مقدار $\hat{y}(k)$ برای داده های تست به دست خواهد آمد. در نهایت مطابق با مدل ورون در سال ۲۰۱۴ به منظور ارزیابی برازندگی جواب (درصد خطای مدل) برای دوره تست داده ها، از معادله ۹ استفاده میشود.

$$MASE_{T,M} = \frac{1}{T} \sum_{h=1}^{T} \frac{|y_h - \hat{y}_h|}{\frac{1}{T-m} \sum_{h=m+1}^{T} |y_h - \hat{y}_{h-m}|} \qquad (9)$$

که در آن به ترتیب h بیانگر hامین ساعت دوره تست است، T طول دوره تست را بیان میکند و m طول چرخه مورد بررسی است که از عدد ۲۴ برای آن استفاده شده است. به دنبال ارزیابی جوابهای اولیه، با به کارگیری چرخه رولت جوابهایی به عنوان والد انتخاب شده و با انجام عمل آمیزش، جهش و انتخاب نسل جدید ایجاد میشود و فرایند محاسبه برازندگی با اجرای شبکه عصبی برای هر جواب دوباره انجام خواهد شد. این فرایند تا زمان عدم تغییر جواب بهینه با دقت ۰.۰۰۰۱ انحام خواهد گرفت و در نهایت بهترین جواب اخرین نسل به عنوان جواب بهینه گزارش میشود.

۳- اجرای مدل پیشنهادی پیشبینی قیمت تسویه بازار در بازار برق ایران

بازار برق ایران با ظرفیت نامی نسب شده معادل با ۷۳۷۵۸ مگاوات و متوسط مصرف ۳۱۳۲۲ مگاوات ساعت انرژی که ۳۲ درصد آن مصرف خانگی، ۳۴ درصد آن مصرف صنعتی و مابقی آن مصرف کشاورزی و عمومی است، به فعالیت خود ادامه می‌دهد. مطابق با آمار منتشر شده، ۴۴ درصد از ظرفیت نامی نسب شده در اختیار بخش خصوصی بوده که به صورت روزانه در کنار بخش دولتی پیشنهاد قیمت خود را برای پله های انرژی به مدیریت شبکه ارائه خواهند داد.[17] در راستای ارائه بهینه قیمتهای پیشنهادی، برآورد قیمت تسویه بازار امری مهم می‌باشد.[17]

به منظور پیشبینی قیمت تسویه بازار در روز بعد و تعیین احتمال پذیرش قیمتها، بر اساس داده های تاریخی، پارامترهای متعددی تاثیر گذار هستند که مطابق با مدل ارائه شده توسط آگراوال و همکاران، تعداد ۳۶ پارامتر تاثیر گذار که در ۵ گروه تقسیم شده اند، به عنوان پارامترهای اصلی و موثر بر قیمت تسویه بازار شناسایی شده است که به منظور پیشبینی قیمت تسویه دربازرا ایران از این بین، ۱۰ پارامتر ذیل به عنوان پارامترهای تاثیر گذار جمع آوری شده است.[3]

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.8.2]

جدول (۲) پارامترهای تاثیر گذار بر پیشبینی قیمت بازار در مدلهای پیشین

گروه	پارامتر
ویژگی های بازار	۱) تـوان تـاریخی، ۲) میـزان واردات / صـادرات، ۳) ظرفیت مازاد / کسری
عـدم قطعیتهـای غیـر استراتژیک	۴) میزان توان برآورد شده
سایر عدم قطعیتها	۵) وضعیت خطـوط انتقـال، ۶) وضـعیت نیروگاههـای مجاور
شاخصهای رفتاری	۷) قیمت های تاریخی، ۸) قیمت تسویه بازار روزهـای قبل
رفتارهای دمایی	۹) نوع روز، ۱۰) ماه مربوطه

به منظور پیشبینی قیمت تسویه بازار، با توجه به رونـد فصـلی قیمـت تسویه بازار، ابتدا به بررسی فضای رقابتی در طول سال پرداخته شده و به دنبال آن، پیشبینی قیمت تسویه بازار برای هـر خوشـه بـه صـورت مجزا محاسبه شده است.

۳-۱- خوشه بندی رقابتی بازار برق در ایران

در بازار روز بعد، هر روز تولیدکنندگان، براساس مدل مد نظر، اقدام به ارائه پیشنهاد قیمت خود در ۱۰ پله انـرژی بـه مـدیریت شـبکه اقـدام میکنند و مدیریت شبکه در روز بعد بر اساس قیمتهای پیشنهادی ارائه شده قیمت تسویه بازار برای هر ساعت از شبانه روز را اعلام مـی کنـد. مطابق با تحقیق ارائه شده توسط جانکزورا و ورون قیمت تسویه بازار و سطح مصرف روند فصلی از خود نمایش میدهند و به شدت وابسته بـه زمان است، لذا به منظور پیشبینی قیمت تسـویه در بـازار بـرق ایـران، ابتدا فضای رقابتی با استفاده از الگـوریتم k-means بـه خوشـه هـای مختلف تقسیم شده و به دنبال آن قیمت تسویه بازار برای هـر خوشـه به صورت مجزا محاسبه شده است..[16]

در برخی از مقاطع سال و در ساعاتی از روز به دلیـل محـدودیت هـای فنی، در بازار برق ایران عرضه برابر با تقاضا می باشد و بازیگران نیـز از این موضوع مطلع بوده، لذا عملاً اکثر نیروگاهها به دلیل وجـود تقاضـا باید وارد مدار شوند و در این حالت رقابت پـذیری بـی معنـی خواهـد شد.[18] لذا قبل از ارائه مدل پیشبینی قیمت تسویه بازار در بازار برق ایران، ابتدا بـا اسـتفاده از الگـوریتم K-means فضـای رقـابتی ایـران خوشه‌بندی شده است کـه مطـابق بـا ایـن الگـوریتم و بـا اسـتفاده از شاخص دیوید بولین در کل سه روند دوره ای در بازار برق ایران حـاکم است. که این سه روند در حقیقت نشان دهنده زمان اوج مصرف، زمان مصرف کم و زمان گذار از هر یک از این دوره ها به دیگـری را نمـایش میدهند. مطابق جدول ۳:

جدول (۳) خوشه‌های تقسیم تقاضا در طول سال ۱۳۹۳

خوشه ۱	خوشه ۲	خوشه ۳
۲۵روز اول فروردین ۱۰ روز آخر مهر آبان آذر دی بهمن اسفند	۵روز آخر فروردین اردیبهشت ۲۰ روز اول خرداد ۲۰ روز اول مهر	۱۰ روز آخر خرداد تیر مرداد شهریور

۳-۱-۱- خوشه ۱:

خوشه اول بیانگر زمانی است که از ۱۰ روز اخر مهر ماه شروع شده و تا ۲۵ روز اول فروردین ماه سال بعد ادامه خواهد داشت. در این دوره بـه علت افزایش دما در عموم شهرهای کشور، میـزان تقاضـا بـرای کـالای برق کاهش میابد و به دنبال آن قیمت تسویه بازار در پایینترین نقطـه خود قرار دارد،

این خوشه که فصول سرد سال را شامل می‌شود، سطح پایین تقاضـا و پایین بودن تغییرات در میزان تقاضا در طول روز از جمله ویژگی هـای اصلی این خوشه می‌باشد، لذا در این خوشه انتظار میرود که معـاملات در سطوح میانی قیمت و نزدیک به قیمت تمام شده انجام پذیرد.

۳-۱-۲- خوشه ۲:

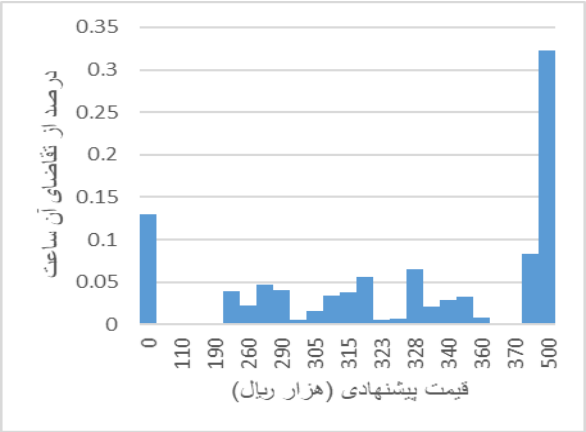
خوشه دوم از ۲۵ فروردین تا ۲۰ خرداد را شامل می‌شـود کـه در ایـن زمان با افزایش دما به مرور افزایش تقاضا و بـه دنبـال آن نوسـانات در قیمت تسویه بازار را شاهد هستیم.از سوی دیگر، این خوشه شـامل ۲۰ روز اول مهر ماه نیز می باشد که بیان کننـده دوره کـاهش تقاضـا (بـا حرکت از فصول گرم به فصول سرد)است. به عبـارت دیگـر خوشـه دو بیانگر زمان گذر از خوشه ۱ به خوشه ۳ می باشد و بالعکس.

در این خوشه بیشترین اشفتگی در تقاضا وجود دارد. با بررسی توزیـع قیمت تسویه بازار ناشی از پیشنهاد قیمت و رفتـار تولیـد کننـدگان در این خوشه، میتوان الگوی پیشنهاد قیمت تولید کنندگان این خوشه را به پنج گروه تقسیم نمود، گروه اول کـه تـامیین کننـده ۱۲ درصـد از انرژی مورد نیاز آن ساعت می‌باشند، پیشنهاد قیمـت صـفر داده انـد و عموما نیروگاههای دولتی می باشـند، گـروه دوم کـه شـامل بـازیگران ریسک گریز بازار است، در محدوده متوسط قیمت بـازار پیشـنهاد داده اند، گروه سوم با پیشبینی صـحیح قیمـت متوسـط و پـذیرش انـدکی ریسک به ارائه قیمت پرداخته اند و گروه چهارم، در برآورد رونـد بـازار اشتباه محاسباتی داشته اند و گروه پنجم هم شامل نیروگاههـایی کـه به علت محدودیت شبکه و یا شرایط حاکم همیشـه در شـبکه حضـور

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.8.2]

دارند. رقابت اصلی میان تامین ۴۸ درصد از میـزان تقاضـا توسـط سـه گروه میانی انجام می‌پزیرد. (مطابق با شکل ۵)



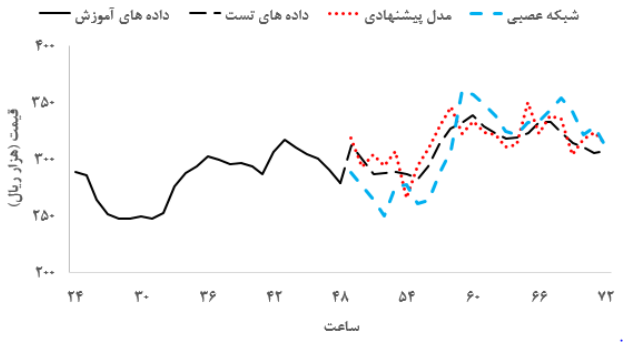
شکل(۵) توزیع قیمتهای ارائه شده در خوشه زمانی دوم

۳-۱-۳- خوشه ۳:

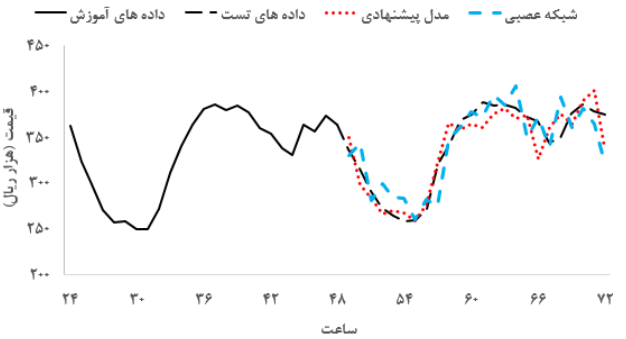
خوشه سوم شامل ۱۰ روز انتهایی خرداد ماه و کل فصل تابستان است که در این دوره با افزایش دما، تقاضا به شدت افزایش یافته و به دنبـال آن قیمت تسویه بازار بالا میرود. در این خوشه قیمت در بالاترین سطح خود قرار دارد و کمترین نوسانات را در میـزان قیمـت و تقاضـا شـاهد هستیم، خوشه سه بیانگر گرمترین روزهای سال می باشد که بیشترین تقاضا سالانه در روزهای این خوشه اتفاق می افتد. با بـالا رفـتن حجـم تقاضا در روزهای این خوشه، قیمتهای پیشنهادی تولید کننـدگان نیـز به بالاترین سطح خود می‌رسد به گونه ای کـه در ایـن خوشـه، در ۹۶ درصد موارد، قیمت تسویه بـازار در دهـک بـالایی سـقف قیمـت قـرار میگیرد.

۳-۲- پیشبینی قیمت تسویه بازار در خوشه های رقابتی

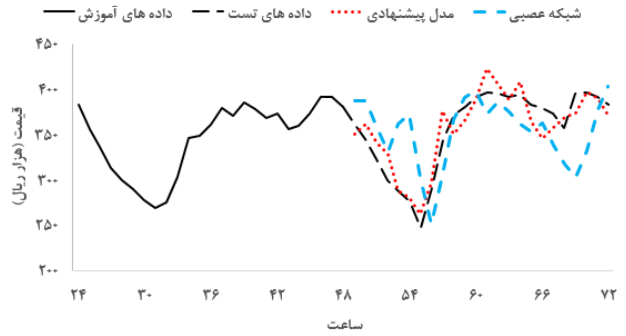
به منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی، آن را برای پیشبینی قیمـت تسویه بازار در هر خوشه به صورت مجزا مورد بررسی قرار داده ایم بـه گونه ای که ¾ از داده های هر خوشه را برای آمـوزش شـبکه در نظـر گرفتیم و ¼ از داده ها را برای تست آن و نتایج حصل برای پیشـبینی قیمت تسویه بازار را با شبکه عصبی ساده بـدون خوشـه بنـدی زمـان مقایسه کردیم که نتایج آن برای هر خوشه مطابق شـکل هـای ۶ تـا ۸ است:



شکل (6) نتیجه مدل پیشبینی قیمت تسویه بازار در خوشه زمانی ۱



شکل (7) نتیجه مدل پیشبینی قیمت تسویه بازار در خوشه زمانی دوم



شکل (8) نتیجه مدل پیشبینی قیمت تسویه بازار در خوشه زمانی سوم

نظر به نتایج حاصله از اجرای شبکه عصـبی بهبـود یافتـه بـا الگـوریتم ژنتیک برای خوشه های رقابتی در مقایسه با شبکه عصبی با الگـوریتم پس انتشار خطا، نتـایج دو مـدل را بـر اسـاس سـه پـارامتر MAPE، DMAE و MSAE با معادلات ذیل جهت ارزیابی خطا مقایسـه شـده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.8.2]

$$MAPE = \frac{1}{T}\sum_{h=1}^{T}\frac{\left|P_h - \hat{P}_h\right|}{P_h} \quad (10)$$

$$DMAE = \frac{1}{T}\sum_{h=1}^{T}\frac{\left|P_h - \hat{P}_h\right|}{\bar{P}_h} \quad (11)$$

$$MASE_{T,M} = \frac{1}{T}\sum_{h=1}^{T}\frac{\left|y_h - \hat{y}_h\right|}{\frac{1}{T-m}\sum_{h=m+1}^{T}\left|y_h - \hat{y}_{h-m}\right|} \quad (12)$$

که نتایج حاصل از مقایسه مطابق با جداول ۴، ۵ و ۶ است.

جدول(۴) نتایج حاصل از اجرای مدل با استفاده از مدل MAPE برای خوشه های زمانی

	MAPE		
	خوشه ۱	خوشه ۲	خوشه ۳
مدل پیشنهادی	3.6%	۵.8%	4.1%
شبکه عصبی	5.8%	5.1%	10.7%

جدول(۵) نتایج حاصل از اجرای مدل با استفاده از مدل DMAE برای خوشه های زمانی

	DMAE		
	خوشه ۱	خوشه ۲	خوشه ۳
مدل پیشنهادی	3.6%	۴.9%	4.0%
شبکه عصبی	5.7%	5.0%	10.0%

جدول(۶) نتایج حاصل از اجرای مدل با استفاده از مدل MASE برای خوشه های زمانی

	MASE		
	خوشه ۱	خوشه ۲	خوشه ۳
مدل پیشنهادی	3.6%	۷.9%	4.0%
شبکه عصبی	5.8%	۹.0%	10.3%

مطابق با نتایج به دست آمده، در تمامی خوشه ها، مدل پیشنهادی نسبت به شبکه عصبی با الگوریتم پس انتشار خطا عملکرد بهتری داشته است و در عموم حالات با دقت بالایی توانسته است قیمت تسویه بازار را پیشبینی نماید. اما با توجه به حالت ۰ و ۱ بودن پذیرش قیمت پیشنهادی، با احتصاب حاشیه ریسک و با استفاده از مدل پیشنهادی میتوان قیمت تسویه بازار را به خوبی پیشبینی نمود.

از سوی دیگه مطابق با نتایج به دست آمده، مشاهده میشود پیشبینی قیمت تسویه بازار در خوشه زمانی ۲ (خوشه گذار) بیشترین خطا را به همراه داشته است که علت اصلی آن وجود نوسانات در تقاضا و قیمت های پیشنهادی در این خوشه است. از طرف دیگر قیمت تسویه بازار در خوشه ۱ با بالاترین دقت پیش بینی شده است و علت اصلی آن کاهش تقاضا و رقابتی شدن عرضه است به گونه ای که عموم تولید کننده ها در محدوده بهای تمام شده نسبت به پیشنهاد قیمت اقدام میکنند و قیمت تسویه بازار از یک ثبات نسبی برخوردار است. به طور مشابه در خوشه سوم به علت پیک بازار، همواره قیمتها در لایه انتهایی مجاز هستند و نوسانات قیمت در این ایام نسبتا کم است، لذا پیشبینی قیمت تسویه بازار در این خوشه نیز با دقت بالایی همراه است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی و شناسایی الگوی رقابتی و پیشبینی قیمت تسویه بازار در بازار برق ایران پرداخته شده است به گونه ای که ابتدا با جمع آوری دادههای تاریخی قیمت تسویه بازار و با استفاده از الگوریتم K-Means، سه خوشه زمانی مجزا برای فضای رقابتی در بازار برق ایران شناسایی شده است. خوشه زمانی اول بیانگر فصول سرد سال با سطح رقابت شدید با قیمت تسویه در پایین ترین سطح می باشد، خوشه زمانی سوم بیانگر فصول گرم با بالاترین سطح قیمت تسویه بازار می باشد و خوشه زمانی دوم بیانگر زمانهای گذار از خوشه ۱ به خوشه ۳ و بالعکس می باشد، لذا نوسانات قیمت در این خوشه در بالاترین سطح است. بعد از شناسایی خوشه های رقابتی، به منظور پیشبینی قیمت تسویه بازار در هر خوشه، از شبکه عصبی استفاده شده است که به منظور افزایش دقت آن فرایند آموزش شبکه عصبی، با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت پذیرفته است. مطابق با نتایج به دست آمده از اجرای مدل اصلاح شده با الگوریتم ژنتیک برای داده های واقعی، با در نظر گرفتن شاخص MASE دقت مدل پیشنهادی در پیشبینی قیمت تسویه بازار در هر یک از خوشه های رقابتی به ترتیب برابر با 96.4، 91.1 و 96 درصد می باشد که در مقایسه با شبکه عصبی با فرایند آموزش پس انتشار خطا، دقت مدل اصلاح شده در خوشه‌های رقابتی به ترتیب 2.2، 1.1 و 6.3 درصد بهبود داشته است.

۵- مراجع

[1] *Lora AT, Santos JMR, Exposito AG, Ramos JLM, Santos JCR. Electricity market price forecasting based on weighted nearest neighbors techniques. Power Systems, IEEE Transactions on. 2007;22(3):1294-301.*

[2] *Bigdeli N, Afshar K, Fotuhi-Firuzabad M. Bidding strategy in pay-as-bid markets based on supplier-market interaction analysis. Energy Conversion and Management. 2010;51(12):2419-3*

[3] *Aggarwal SK, Saini LM, Kumar A. Electricity price forecasting in deregulated markets: A review and evaluation. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2009;31(1):13-22.*

[4] *Kwon RH, Frances D. Optimization-based bidding in day-ahead electricity auction markets: A review of models for power producers. Handbook of Networks in Power Systems I: Springer; 2012. p. 41-59*

[5] *Gao, X. Guan, X. Cao, A. Papalexopoulos, "Forecasting Power Market Clearing Price and Quantity Using a*

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.8.2]

Neural Network Method" IEEE PES Winter Meeting, pp. 2183-2188, 2000.

[6] Hong, Y. Hsiao, C. "Locational Marginal Price Forecasting in Deregulated Electricity Markets Using Artificial Intelligence", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 149,No.5., pp. 621- 626, 2002.

[7] Wang, A. Ramsay, B. "Prediction of System Marginal Price in the UK Power Pool", Int. Conf. on Neural Networks and Systems, Vol. 1, pp. 2116- 2120, 1997.

[8] M. P. Moghaddam, M. K. Sheikh-El-Eslami, S. Jadid, "A Price Guideline for Generation Expansion Planning in Competitive Electricity Markets" IEEE Conf., pp. 1-5, 2005

[9] Hu, Z, Yu, Y. Wang, Z. Sun, W. Gan, D. Han, Z. "Price Forecasting Using an Integrated Approach" IEEE Int. Conf. on Electric Utility, April 2014, Hong Kong.

[10] Bento, P. M. R., Pombo, J. A. N., Calado, M. R. A. Marlano, S. J. P. S. 2018. A bat optimized neural network and wavelet transform approach for short-term price forecasting. Applied Energy, 210, 88-97.

[11] Gholipour Khajeh M, Maleki A, Rosen MA, Ahmadi MH. Electricity price forecasting using neural networks with an improved iterative training algorithm. Int J Ambient Energy 2017:1–12

[12] J. P. S. Catal˜ao, S.J.P.S. Mariano, V. M. F. Mendes and L. A. F. M. Ferreira, "Short-term electricity price forecasting in a competitive market: A neural network approach," Electric Power Systems Research, Vol.77, No. 10, pp. 1297-1304, 2007.

[13] V. Vahidinasab, S. Jadid and A. Kazemi, "Day-ahead price forecasting in restructured power system using artificial neural networks". Electric Power Systems Research, Vol. 78, No. 8, pp. 1332-1342, 2008

[14] Trippi, R.R. and E. Turban, Neural Networks in Finance and Investing: Using Artificial Intelligence to Improve Real World Performance. 1992: McGraw-Hill, Inc.

[15] Uritskaya OY, Uritsky VM. Predictability of price movements in deregulated electricity markets. Energy Economics. 2015;49:72-81.

[16] Regime-switching models for electricity spot prices Introducing heteroskedastic base regime dynamics and shifted spike distributions

[17] Yousefi, G. R., Kaviri, S. M., Latify, M. A. Rahmati, I. Electricity industry restructuring in Iran. Energy Policy.2017: 108, 212-226

[۱۸] اسمعیل ابونوری. حسن لاجوردی. . تأثیر تشکیل بازار برق ایران بر نیروگاه کارایی های برق. *نشریه علمی پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران*. ۱۳۹۲. ۳:۲

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.8.2]