تحلیل شرایط وارونگی قیمت در بازارهای برق تحت مدلهای مختلف تخصیص پشتسرهم و همزمان

محمد فرشباد^ا

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۲/۹ تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۹/۲۵

چکیده:

تحلیل رفتار بازیگران و شرایط بازارهای برق از طریق شبیه سازی می تواند تصمیم گیران بازار را در طراحی و سیاست گذاری مناسب قبل از اجرای واقعی یاری نموده و از هزینه ها و مشکلات احتمالی آینده بکاهد. توجه به بازارهای خدمات جانبی در کنار بازار انرژی در شبیه سازی ها این امکان را فراهم می سازد که مدل های مختلف اجرای مناقصات و تخصیص کالاها به طور کارآمدتری مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرند. در این مقاله، تاثیر اجرای انواع مدل های تخصیص پشت سرهم و همزمان انرژی، رزرو چرخشی و رزرو جایگزین بر رفتار بازیگران، احتمال وقوع وارونگی قیمت و همچنین مبالغ پرداختی در بازارها مورد ارزیابی قرار می گیرد. در این راستا، ابتدا روشی مبتنی بر سیستم چندعاملی و الگوریتم یادگیری تقویتی جهت شبیه سازی رفتار بازیگران در بازارهای انرژی، رزرو چرخشی و رزرو جایگزین بیان می شود. سپس یادگیری تقویتی جهت شبیه سازی رفتار بازیگران در بازارهای انرژی، رزرو چرخشی و رزرو جایگزین بیان می شود. سپس این روش تحت انواع مدل های تخصیص پشت سرهم و همزمان بر روی یک سیستم نمونه شامل ۱۷ تولید کننده با مشخصات هزینه ای و ظرفیتی گوناگون پیاده سازی می شود. تحلیل ها و نتایج ارزیابی ها در خصوص شرایط وقوع وارونگی قیمت و مبالغ پرداختی تحت انواع مدل ها برای تصمیم گیران و سیاست گذاران بازارهای برق مفید خواهد بود.

بازار انرژی، بازار رزرو جایگزین، بازار رزرو چرخشی، سیستم چندعاملی، وارونگی قیمت، یادگیری تقویتی

مقدمه

مباحث مهمی پیرامون تجدید ساختار صنعت برق مطرح شدهاند که چگونگی طراحی و اجرای مناقصات، چگونگی محاسبه پرداختها، مناسبات مالی در محیط بازار و پیشنهاد قیمت راهبردی شرکت کنندگان از آن جمله میباشند. یکی از وظایف مهم قانون گذاران و تصمیم گیران، تجزیه و تحلیل بازارهای برق در مدلها و طرحهای ممکن و انتخاب بهترین آنها با توجه به سیاست گذاریها و اهداف کلی موردنظر میباشد. پیش بینی رفتار راهبردی بازیگران بازار در مناقصات مختلف برق و شبیه سازی محیط بازار، در انتخاب مدل و قانون مناسب سودمند و کارا میباشد. شبیه سازی بازار نیازمند مدل سازی مناسب هر یک از بازیگران بازار، استفاده از عاملهای موشمند می توانند تصمیمات خود را کنترل نموده و با محیط تقابل کنند [11].

در محیط تجدید ساختار یافته صنعت برق، معمولا بازارهای مهمی همچون بازار انواع خدمات جانبی آنیز وجود دارند که طراحی آنها بههمراه طراحی بازار انرژی دارای اهمیت است. انواع ظرفیت رزرو یکی از مهمترین انواع خدمات جانبی هستند که در راستای دستیابی به قابلیت اطمینان مطلوب سیستم تامین می گردند. اشتراک و وابستگی در سمت عرضه بازارهای انرژی و انواع رزرو می تواند باعث تاثیر گذاری متقابل این بازارها بر یکدیگر شود [4]. توجه به تاثیر متقابل بازارهای انرژی و انواع رزرو در شبیهسازیها، هم از دیدگاه متولی بازار و هم بهلحاظ مولفههای رفتار قیمتدهی تولیدکنندگان، دارای اهمیت فراوانی بوده و منجر به انطباق بیشتر شبیهسازیها با واقعیت خواهد شد. در [13]، مقایسهای مابین قوانین مختلف قیمت گذاری تنها با درنظر گرفتن بازار انرژی انجام شدهاست. هر چند در مواردی همچون مابین قوانین مختلف قیمت گذاری تنها با درنظر گرفتن بازار انرژی انجام شدهاست. هر چند در مواردی همچون تاکنون کمتر به مقایسه و تجزیه و تحلیل انواع طراحیهای ممکن در بازارهای رزرو به صورت توام با بازار انرژی پرداخته شدهاست. البته در [3] روشی مبتنی بر سیستم چندعاملی آبرای شبیهسازی بازارهای انرژی و رزرو پیشنهاد شده و از طریق شدهاست. البته در [3] روشی مبتنی بر سیستم چندعاملی آبرای شبیهسازی بازارهای انرژی و رزرو پیشنهاد شده و از طریق شدهاست. البته در این در احاظ هزینه فرصت از دسترفته آبرای رداخت به برندگان مناقصات مورد ارزیابی قرار گرفته است.

یکی از مباحث مهم در طراحی و اجرای بازارهای انرژی و رزرو، نحوه تخصیص کالاهای مختلف بین تولید کنندگان بازار و تعیین برندگان مناقصات میباشد. تخصیص کالاهای مختلف در مناقصات بازار برق در واقع یک مساله بهینه سازی است که نحوه فرمول بندی و اجرای آن باید به صورت یک قانون مشخص و شفاف ارائه گردد. انتخاب هر یک از مدل های تخصیص ممکن، از جمله شکل های مختلف تخصیص پشت سرهم و همزمان، می تواند تاثیر قابل توجهی بر رفتار بازیگران،

¹⁾ Intelligent Agents

²⁾ Ancillary Services

³⁾ Multi-Agent System

⁴⁾ Lost Opportunity Cost

مبالغ پرداختی بابت کالاهای مختلف و بهرهوری بازار داشته باشد. یکی از مشکلاتی که می تواند در اثر وضع و اجرای نادرست قانون تخصیص در مناقصات رخ دهد، وارونگی قیمت است. وارونگی قیمت بدین معنی است که کالای با کیفیت پایین تر قیمت بیشتری نسبت به کالای با کیفیت بالاتر داشته باشد. این رخداد باعث ایجاد خدشه در ماهیت رقابتی بازار شده و متعاقباً قیمت برخی از انواع کالای رزرو به صورت غیرمعقولی افزایش می یابد. در واقع، یکی از نشانههای بارز نقص طراحی بازارهای انواع رزرو که باعث می شود این بازارها عملاً رقابتی نباشند، وارونگی قیمت است. وقوع وارونگی قیمت تبعات خاص خود را بههمراه دارد و باعث پدیدار شدن قدرت در بازارهای پر اهمیت و کاهش بهرهوری بازارها می گردد. منظور از کاهش بهرهوری بازار در اینجا، نوسانات و ناپایداری زیاد قیمت، کمبود در کالای رزرو باکیفیت و وقوع پیک قیمتهای تصادفی در هنگام اجرای بازار است [10].

هدف اصلی این مقاله، ارائه تحلیلهایی مفید برای قانون گذاران بازار در خصوص شرایط وقوع وارونگی قیمت است. در این مقاله، از طریق شبیه سازی مناقصات بازارهای انرژی و انواع رزرو بر پایه سیستم چندعاملی، تاثیر اجرای انواع مدلهای تخصیص پشت سرهم و همزمان بر رفتار بازیگران، احتمال وقوع وارونگی قیمت و همچنین مبالغ پرداختی در بازارها مـورد ارزیابی قرار می گیرد. در سیستم چندعاملی موردنظر این مقاله، هر عامل بر اساس یادگیری تقویتی Q-Learning رفتار یکی از تولیدکنندگان را مشابه سازی کرده و اقدام به قیمت دهی در مناقصات بازارهای انرژی و انواع رزرو می نماید.

در ادامه مقاله، نمایی کلی از فضای مورد بحث بیان شده و انواع مدلهای تخصیص مورد مقایسه معرفی می گردند. سپس خلاصهای از الگوریتم یادگیری تقویتی Q-Learning بیان می شود. در ادامه، نحوه شبیه سازی مناقصات بازارهای انرژی و انواع رزرو ارائه می گردد. در نهایت نیز یک سیستم نمونه شامل ۱۷ تولیدکننده با مشخصات هزینه ای و ظرفیتی گوناگون مدنظر قرار گرفته و نتایج مقایسه و ارزیابی ها در خصوص آن ارائه می شوند.

نمایی کلی از فضای مورد بحث

قبل از پرداختن به جزئیات مدلهای تخصیص انرژی و انواع رزرو، لازم است فضای کلی سیستم مورد بحث ترسیم شود. در سیستم موردنظر، ظرفیت رزرو چرخشی (SR) و ظرفیت رزرو جایگزین (RR) ، به عنوان انواع کالای رزرو موردنیاز تامین می گردند. ظرفیت SR موردنیاز سیستم تنها توسط ژنراتورهای در مدار قابل تامین بوده و باید طی مدت حداکثر ۱۰ دقیقه در دسترس باشد. ظرفیت RR موردنیاز سیستم نیز می تواند توسط ژنراتورهای در مدار و یا خارج از مدار تامین گردد، ولی باید طی مدت حداکثر ۶۰ دقیقه در دسترس باشد.

¹⁾ Price Reversal

²⁾ Reinforcement Learning

³⁾ Spinning Reserve

⁴⁾ Replacement Reserve

در فضای موردبحث، اجرای مناقصات بازارهای برق بر عهده بهرهبردار مستقل سیستم (ISO) است. همچنین مناقصات بازارهای انرژی، SR و RR به صورت روز قبل اجرا شده و هر یک از شرکت کنندگان بازار، قیمت پیشنهادی و مشخصات فنی خود را برای هر ساعت روز بهرهبرداری به ISO ارائه می دهند. ISO نیز پس از دریافت پیشنهادها، مساله بهینهسازی تخصیص انـرژی، SR و RR را بـر اسـاس حـداقل سـازی هزینـه اجتمـاعی [10] و بـرای ۲۴ سـاعت روز بهرهبرداری حل کرده و میزان و نوع ظرفیت تخصیصیافته برای هر ساعت روز بهرهبرداری را به شـرکت کننـدگان اعـلام می نماید. برندگان بازارهای SR و RR و RR، مبلغ آمادگی (رزو [6] را متناسب با مقدار ظرفیت تخصیصیافته به آنها دریافت می کنند. در سیستم موردنظر، قانون تسویه یکنواخت برای تعیین قیمت و محاسبه پرداختی به برندگان بازارها اجرا می شود.

در این مقاله، چهار مدل مساله بهینه سازی تخصیص در فضای ترسیم شده مورد مقایسه قرار خواهند گرفت. در ادامه، فرمول بندی ها برای این چهار مدل ارائه شده اند. از آنجا که این فرمول بندی ها با ساده سازی و صرفنظر از محدودیت هایی مانند حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحدها و به طور کلی، محدودیت های وابسته به زمان، برای هر ساعت روز بهره برداری بیان شده اند، مساله های بهینه سازی مربوطه برای هر ساعت روز بهره برداری به طور جداگانه قابل حل خواهند بود.

مدل بهینهسازی پشتسرهم

در این مدل، مساله بهینهسازی تخصیص به صورت پشتسرهم و بهترتیب کیفیت کالا اجرا می شود. یعنی ابتدا مساله بهینهسازی تخصیص انرژی بر اساس فرمول بندی (1-|lb)-(1-c) حل می شود. در این فرمول بندی که برای یک ساعت روز بهرهبرداری ارائه شده است، رابطه (1-|lb) تابع هدف مساله و روابط (1-v)-(1-c) قیود مساله بهینهسازی را نمایش می دهند. لازم به یادآوری است که ظرفیت SR تنها توسط ژنراتورهای در مدار (سنکرون) قابل تامین است. لـذا در ایـن فرمول بندی، قید (1-c) مدنظر قرار گرفته تا در مرحله تخصیص SR، سیستم با کمبود ظرفیت سنکرون مواجه نشود.

$$\min_{\alpha_i,P_i} \sum_i \alpha_i.P_i.\rho e_i$$
 (i.e.)

$$\alpha_i.P_i^{\min} \le P_i \le \alpha_i.P_i^{\max}$$
 (ب-۱)

¹⁾ Independent System Operator

²⁾ Day-Ahead

³⁾ ocial Cost

⁴⁾ Availability Payment

⁵⁾ Uniform Settlement Rule

⁶⁾ Sequential Optimization Model

$$\sum_{i} \alpha_{i} \cdot P_{i} = P^{Load}$$

$$\sum_{i} \alpha_{i} \cdot \min(SR_{i}^{\max}, P_{i}^{\max} - P_{i}) \ge SR^{\text{Re}q}$$

$$(>-1)$$

$$\sum_{i} \alpha_{i} \cdot \min(SR_{i}^{\max}, P_{i}^{\max} - P_{i}) \ge SR^{\text{Re}q} \tag{5-1}$$

در روابط فوق، P_i مقدار برنده شده واحد i ام در بازار انرژی، $ho e_i$ قیمت پیشنهادی واحد i ام در بازار انرژی، $lpha_i$ نماد برنده شدن و یا نشدن واحد i ام در بازار انرژی $(\cdot$ یا ۱)، حداکثر توانایی تولید واحد i ام، P_i^{min} حداقل توانایی تولید واحد i ام، P^{Load} مقدار بار مصرفی سیستم، SR_i^{max} حداکثر توانایی تامین رزرو چرخشی واحد i ام و SR^{Req} میزان ظرفیت رزرو چرخشی مورد نیاز سیستم میباشد.

پس از تخصیص انرژی، برندگان بازار SR از بین ظرفیتهای باقیمانده مشخص می شوند. فرمول بندی این مساله بهينه سازي به صورت روابط (7-1)است كه رابطه (7-1)ان تابع هدف و روابط (7-y)(7-y) قيود مي باشند.

$$\min_{SR_i} \sum_i lpha_i^* .SR_i .
ho s r_i$$
 (خالت)

$$P_i^* + SR_i \le \alpha_i^* . P_i^{\max}$$
 (--7)

$$0 \le SR_i \le \alpha_i^* . SR_i^{\max}$$
 (E-7)

$$\sum_{i} \alpha_{i}^{*}.SR_{i} = SR^{\text{Re}q} \tag{5-7}$$

در روابط فوق، SR_i مقدار برنده شده واحد i ام در بازار رزرو چرخشی و $ho s r_i$ قیمت پیشنهادی واحد i ام در بـازار رزرو چرخشی است. همچنین، α_i^* و α_i^* مقادیر بهینه بدستآمده از حل مساله تخصیص انرژی (۱–الف)-(1-1) میباشند.

در نهایت امر، مساله تخصیص RR بر اساس فرمولبندی (m-1)اف)(m-1) حل می شود. در این فرمول بندی که برای یک ساعت ارائه شدهاست، رابطه ($^{-}$ الف) تابع هدف مساله بهینه سازی و روابط ($^{-}$ -)- ($^{-}$ -) قیود را بیان می کنند.

$$\min_{RR_i} \sum_i (RR_i \cdot \rho r r_i)$$
 (ν)

$$\alpha_i^* . P_i^* + \alpha_i^* . SR_i^* + RR_i \le P_i^{\max}$$
 (--7)

$$0 \le RR_i \le RR_i^{\max} \tag{E-T}$$

$$\sum_{i} RR_{i} = RR^{\text{Re}q} \tag{5-7}$$

در فرمولبندی فوق، RR_i مقدار برنده شده واحد i ام در بازار رزرو جایگزین، $hormall r_i$ قیمت پیشنهادی واحد i ام در بـازار رزرو جایگزین، RR_i^{max} حداکثر توانایی تامین رزرو جایگزین واحد i ام و RR_i^{Req} میزان ظرفیت رزرو جایگزین مـورد نیـاز سيستم است. همچنين، α_i^* و P_i^* مقادير بهينه بدستآمده از حل مساله تخصيص انرژی (۱–الـف)–(١–) و مساله تخصيص SR (٢-الف)-(٢-د) مي باشند.

مدل بهینهسازی به صورت جزئی پشتسرهم ٔ

بر اساس تعریف کالای SR، برای اینکه واحدی بتواند آن را تامین کند، باید در بازار انرژی نیـز پذیرفتـه شـود. لـذا در اینجا، بازار انرژی و بازار SR بهدلیل ارتباط داخلی قوی، یک مجموعه درنظر گرفته شدهاند. در این مدل، ابتدا تخصیص انرژی و SR به صورت همزمان انجام می شود و در مرحله بعد، مساله بهینه سازی تخصیص RR با توجه به نتایج حاصل در مرحله قبل حل می گردد. مساله بهینه سازی تخصیص همزمان انرژی و SR برای یک ساعت روز بهرهبرداری، در روابط (4-10-1) نشان داده شدهاست که رابطه (4-10-10) تابع هدف و روابط (4-10-10) قیود آن را نمایش می دهند.

$$\underset{\alpha_{i}, P_{i}, SR_{i}}{\text{Min}} \sum_{i} (\alpha_{i}.P_{i}.\rho e_{i} + \alpha_{i}.SR_{i}.\rho sr_{i})$$
(i)—*f)

$$P_i + SR_i \le \alpha_i . P_i^{\max}$$
 (ب-۴)

$$lpha_i.P_i^{\min} \leq P_i$$
 (E-4)

$$0 \le SR_i \le \alpha_i . SR_i^{\max} \tag{5-4}$$

$$\sum_{i} lpha_{i}.P_{i} = P^{Load}$$

$$\sum_{i} lpha_{i}.SR_{i} = SR^{Req}$$
(9-4)

$$\sum_{i} \alpha_{i} . SR_{i} = SR^{\text{Re}q} \tag{9-4}$$

در این مدل، مساله تخصیص RR که بعد از تخصیص انرژی و SR حل می شود، همان (۳-الف)-(۳-د) است.

مدل بهينهسازي همزمان بدون جانشييني تقاضا

در این مدل، هر سه کالای انرژی، SR و RR به صورت همزمان و در قالب یک مساله بهینه سازی تخصیص می یابند. فرمول بندی مساله بهینه سازی تخصیص همزمان انرژی، SR و RR برای یک ساعت روز بهرهبرداری، در روابط (۵−الف)-(-4) آمدهاست. رابطه (-4)لف) تابع هدف مساله و روابط (-4) قیود مساله بهینه سازی را بیان می کنند.

$$\min_{\alpha_i, P_i, SR_i, RR_i} \sum_i (\alpha_i.P_i.\rho e_i + \alpha_i.SR_i.\rho sr_i + RR_i.\rho rr_i)$$
 (ف)

$$\alpha_i.P_i + \alpha_i.SR_i + RR_i \le P_i^{\max}$$
 (...-۵)

$$\alpha_i.P_i^{\min} \le P_i \le \alpha_i.P_i^{\max}$$
 (E-\Delta)

$$0 \le SR_i \le \alpha_i . SR_i^{\max}$$
 (5-\Delta)

$$0 \le RR_i \le RR_i^{\max}$$
 (_a-a)

¹⁾ Partially Sequential Optimization Model

²⁾ Simultaneous Optimization Model without Demand Substitution

$$\sum_{i} lpha_{i}.P_{i} = P^{Load}$$
 (9- Δ)

$$\sum_{i} \alpha_{i}.SR_{i} = SR^{Req} \tag{5-1}$$

$$\sum_{i} RR_{i} = RR^{\text{Re}q} \tag{5-2}$$

همانطور که در فرمولبندی فوق مشاهده میشود، هر نوع کالای رزرو دقیقاً به میزان موردنیاز تعیین شده تامین خواهـ د شد. به عبارت دیگر، امکان هیچگونه جانشینی تقاضای ا [10] رزرو وجود ندارد. کیفیت کالای رزرو معمولاً با توجه به زمان یاسخدهی و قابلیت اطمینان تامین اَن تعیین می گردد. فراهم بودن امکان جانشینی تقاضا بدین معنی است که میزان نیاز سیستم به هریک از انواع رزرو با توجه به کیفیت کالای رزرو قابل جانشینی باشد، مثلاً بتوان از میزان RR موردنیاز در سیستم کاست و بههمان مقدار به میزان SR که کالای با کیفیت تری است، اضافه نمود.

مدل بهینهسازی همزمان با در نظر گرفتن جانشینی تقاضیا ۲

در این مدل نیز هر سه کالای انرژی، SR و RR به صورت همزمان و در قالب یک مساله بهینه سازی تخصیص می یابند. فرمول بندی مساله بهینه سازی تخصیص همزمان با درنظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا، برای یک ساعت روز بهرهبرداری، در روابط (8-لف)-(8-ح) آمدهاست. رابطه (8-لف) تابع هدف مساله و روابط (8--)-(8--) قیـود مساله را نمایش میدهند.

$$\min_{\alpha_{i},P_{i},SR_{i},RR_{i}} \sum_{i} (\alpha_{i}.P_{i}.\rho e_{i} + \alpha_{i}.SR_{i}.\rho sr_{i} + RR_{i}.\rho rr_{i}) \tag{$-$\emptyset$}$$

$$\alpha_i.P_i + \alpha_i.SR_i + RR_i \le P_i^{\max}$$
 (9--9)

$$\alpha_i.P_i^{\min} \le P_i \le \alpha_i.P_i^{\max}$$
 (E-5)

$$0 \le SR_i \le \alpha_i . SR_i^{\max}$$
 (3–5)

$$0 \le RR_i \le RR_i^{\max}$$
 (_&>>)

$$\sum_{i} \alpha_{i}.P_{i} = P^{Load}$$

$$\sum_{i} \alpha_{i}.SR_{i} \ge SR^{Req}$$

$$\sum_{i} RR_{i} + \sum_{i} \alpha_{i}.SR_{i} = RR^{Req} + SR^{Req}$$

$$(5-8)$$

$$\sum_{i} \alpha_{i}.SR_{i} \ge SR^{\kappa cq} \tag{5-8}$$

$$\sum_{i} RR_{i} + \sum_{i} \alpha_{i} . SR_{i} = RR^{\text{Re}q} + SR^{\text{Re}q}$$
(2-5)

¹⁾ Demand Substitution

²⁾ Simultaneous Optimization Model Considering Demand Substitution

همانطور که در روابط (8-i) و (8-j) مشاهده می شود، امکان جانشینی تقاضای کالای رزرو فراهم شده است و می توان در صورت داشتن صرفه اقتصادی، به جای ظرفیت RR موردنیاز، ظرفیت SR تامین نمود.

Q-Learning الگوريتم

یادگیری تقویتی یک یادگیری بدون ناظر است که در آن، هر عامل باید در تقابل با محیط و با آزمایش عملها، عملی را که پاداش بیشتری در پی دارد، پیدا کند [14]. الگوریتم Q-Learning یکی از الگوریتمهای یادگیری تقویتی است که برای مسائل تصمیم گیری در بازیهای تکراری که بقیه بازیگران ناشناخته هستند، مانند مساله قیمتدهی راهبردی در مناصب است [7,8,12,17,18].

برای بیان فرمول بندی ریاضی الگوریتم Q-Learning، فرض کنید که یک عامل در مراحل زمانی گسسته $S=\{s_1,s_2,...,s_g\}$ با محیط خود در تعامل است. مجموعه های متناهی حالتها و عمل ها برای این عامل $S=\{s_1,s_2,...,s_g\}$ با محیط خود در تعامل است. مجموعه های متناهی حالتها و عمل ها برای این عامل $A=\{a_1,a_2,...,a_w\}$ میباشند. در هر مرحله زمانی t عامل حالت کنونی محیط خود را که t میباشند، دریافت می کند و بر اساس آن، یک عمل t را انتخاب می نماید. در نتیجه، انتخاب این عمل، عامل یک پاداش لحظه ای t را دریافت می کند و حالت محیط به حالت جدید t تغییر میبابد. هدف، یافتن راهبرد بهینه ر حالت t و حالت محیط به حالت جدید t برای هر حالت t میباشد، به گونه ای که کل پاداش دریافتی در بلندمدت حداکثر گردد. الگوریتم Q-Learning از طریـق t و که کل پاداش دریافتی و تکراری و بر اساس اطلاعات موجود t را از طریق یک روش بازگشتی و تکراری و بر اساس اطلاعات موجود t را از طریق یک روش بازگشتی و تکراری و بر اساس اطلاعات موجود t را از طریق یک روش بازگشتی و تکراری و بر اساس اطلاعات موجود t را از طریق یک روش بازگشتی و تکراری و بر اساس اطلاعات موجود t را از طریق یک روش بازگشتی و تکراری و بر اساس اطلاعات موجود t را از طریق یک روش بازگشتی و تکراری و بر اساس اطلاعات موجود t را از طریق یک روش بازگشتی و تکراری و بر اساس اطلاعات موجود t را از طریق یک روش بازگشتی و تکراری و بر اساس اطلاعات موجود t را از طریق یک روش بازگشتی و تکراری و بر اساس اطلاعات موجود t را از طریق یک روش بازگشتی و تکراری و بر اساس اطلاعات موجود t را از طریق یک روش بازگشتی و تکراری و بر اساس اطلاعات موجود t به را به نام و تو به رون رسانی در این الگوریتم به صورت زیر می باشد t

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha [r_{t+1} + \gamma \max_{a} Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)] \tag{Y}$$

در رابطه فوق، پارامتر α نرخ یادگیری و پارامتر γ ضریب تنزیل است که هر دو این پارامترها مقداری بین صفر و یک دارند. نرخ یادگیری α رفتار یادگیری عامل را منعکس می کند به نحوی که هر چه مقدار این پارامتر برای یک عامل بزرگتر باشد، تاثیر اطلاعات جدید شامل حالت مقصد و پاداش بدست آمده، بیشتر شده و تاثیر مقدار قدیمی Q در فرایند به بهروز رسانی آن کمتر خواهد شد. ضریب تنزیل γ نیز رفتار آینده نگری عامل را منعکس می کند به گونه ای که هر چه مقدار این پارامتر برای یک عامل بزرگتر درنظر گرفته شود، عامل برای رسیدن به یک پاداش بالا در بلنده دت تشویق خواهد شد و هر چه مقدار آن کمتر باشد، عامل رفتاری فرصت طلب برای دریافت پاداش های لحظه ای خواهد داشت.

شبیهسازی بازارها و رفتار بازیگران

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، در این مقاله، بازارهای انرژی و انواع رزرو و همچنین رفتار بازیگران در مناقصات این بازارها بر پایه سیستم چندعاملی شبیهسازی می شوند. کلیات روش شبیهسازی مورد استفاده در این مقاله مشابه شیوه ارائه شده در [3] است. در سیستم چندعاملی موردنظر، هر یک از عاملها که مبین تولید کنندگان بازار هستند، بر اساس الگوریتم یادگیری تقویتی Q-Learning در مناقصات قیمت دهی می کنند. آماده سازی دو رکن اساسی محیط و عامل برای شبیه سازی و اجرای الگوریتم Q-Learning در سیستم ضروری است.

در سیستم چندعاملی موردنظر، محیط برای هر عامل شامل شرایط و قوانین حاکم بر بازار همچون مدل های مختلف مساله بهینه سازی تخصیص و همچنین رفتار سایر عامل ها در بازار می باشد. هر عامل دو سیگنال ورودی شامل سیگنال حالت و سیگنال پاداش را از محیط دریافت می کند. در این مقاله، چون قانون تسویه بازار به صورت یکنواخت درنظر گرفته شده است، حالت محیط در هر ساعت بر اساس قیمت بسته شدن بازارهای انرژی، RR و RR تعیین می گردد. برای گریـز از مشکل نفرین ابعاد نیز از طریق گسسته سازی، تعداد محدودی حالت بین قیمت کف و قیمت سقف بازارهای انرژی، RR و RR به به به به RR و RR بازارهای انرژی، RR و RR بازارهای انرژی، RR و RR بازارهای حالت موجود در فضای حالت ترابر RR برابر RR و خواهد بود. حالت RR به معنای قرار گرفتن قیمت بسته شدن بازارهای انرژی، RR و RR و RR و بازه همی متناظر در فضای حالت می باشد.

در این مقاله فرض می شود شرکت کنندگان بازار تمامی ظرفیت حداکثر خود را به بازار عرضه می کنند و پنهان سازی ظرفیت وجود ندارد. لذا هر عامل باید تنها برای پیشنهاد قیمت خود در مناقصات بازارهای انرژی، RR و RR برای هر ساعت تصمیم گیری نماید. بار دیگر از طریق گسسته سازی، تعداد محدودی عمل برای هر عامل بین هزینه تامین و قیمت سقف بازارهای انرژی، RR و R درنظر گرفته می شوند. اگر محدوده قیمت پیشنهادی هر عامل در بازارهای انرژی، R و R بازه کوچکتر تقسیم شود، آنگاه تعداد عمل های موجود در فضای عمل R مربوطه برابر R و R به معنای انتخاب قیمت های تصادفی برای بازارهای انرژی، R و R از بازههای متناظر در فضای عمل خواهد بود.

ياداش هر عامل در ساعت h ام تحت عمل a و حالت s به صورت زير قابل محاسبه خواهد بود [18]:

¹⁾ Curse of Dimensionality

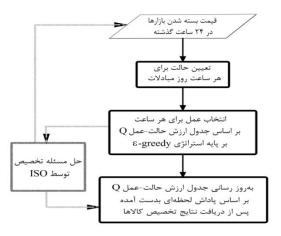
²⁾ State Space

³⁾ Action Space

$$r_h(s,a) = r(h) \times \left(\frac{AUR(h)}{TUR(h)}\right)^b \tag{(A)}$$

که r(h) برابر مبلغ دریافتی عامل در ساعت h ام منهای هزینههای تامین در آن ساعت، TUR(h) نرخ بکارگیری ظرفیت h مطلوب در ساعت h ام و h بیانگر اهمیت نرخ بکارگیری ظرفیت واقعی در ساعت h ام و h بیانگر اهمیت نرخ بکارگیری ظرفیت تخصیصی به عامل در بازارها در ساعت h ام تقسیم بر حداکثر توانایی تولید آن است.

مراحل اجرای الگوریتم یادگیری و قیمت دهی هر عامل در شکل (۱) نمایش داده شده اند. بر اساس مراحل نمایش داده شده در شکل (۱)، در شروع هر روز مبادلات برق، هر عامل بر اساس قیمت بسته شدن بازارهای انرژی و انواع رزرو مربوط به ۲۴ ساعت گذشته، حالت هر ساعت آن روز را تعیین می کند. پس از تعیین حالت، هر عامل با توجه به جدول ارزش حالت حمل (Q(s,a)) در هر ساعت، عملی را برای آن ساعت بر اساس راهبرد greedy انتخاب می نماید. در این راهبرد، با احتمال 3 - 1 عمل مربوط به بهترین ارزش Q انتخاب می شود و با احتمال 3 بدون توجه به مقادیر ارزش Q انتخاب تصادفی عمل انجام خواهد شد. در پایان هر روز مبادلات برق، پس از آنکه مساله بهینه سازی تخصیص کالاها حل شد و میزان توان تخصیص یافته به هر عامل در بازارهای انرژی و انواع رزرو و همچنین قیمت بسته شدن بازارها در هر ساعت مشخص شد، هر عامل با توجه به پاداش لحظه ای بدست آمده از رابطه (۸)، مقادیر جدول ارزش حالت –عمل ساعت مشخص شد، هر عامل را) به روز می کند.



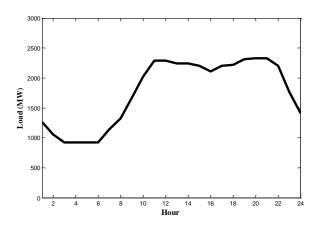
شكل ۱) مراحل اجراي الگوريتم يادگيري و قيمتدهي هر عامل در سيستم چندعاملي

ارزیابی مدلهای تخصیص بر روی سیستم نمونه

در این بخش، با پیادهسازی سیستم چندعاملی بر روی یک سیستم نمونه، شبیهسازیها تحت مدلهای بهینهسازی تخصیص مختلف اجرا شده و نتایج مقایسه ارائه خواهند شد. سیستم نمونه موردمطالعه شامل ۱۷ تولیدکننده با مشخصات هزینه ای و ظرفیتی و فرفیتی و فرفیتی و پارامترهای رفتاری برای هر یک از هارهای مربوط در جدول (۱) ارائه شدهاند. لازم به ذکر است که مقادیر پارامترهای رفتاری جز α ، هه در مرحله یادگیری اولیه و هم مرحله قیمت دهی اصلی عاملها به کار گرفته می شوند. مقدار α ارائه شده در جدول (۱)، تنها در مرحله قیمت دهی اصلی عاملها استفاده می شود و در مرحله یادگیری اولیه عاملها، مقدار عکس تعداد دفعات رجوع به جفت قیمت حالت – عمل (۲) تا روز مبادله مدنظر قرار می گیرد [3,9,18]. بار فصلی پیش بینی شده برای α ۲ ساعت روزانه نیز در شکل (۲) نمایش داده شده است. در ضمن، ظرفیت موردنیاز سیستم برای هر نوع کالای SR و RR برابر ۵۱ درصد مقدار بار پیش بینی شده در هر ساعت می باشد. کف قیمت انرژی، SR و RR و سیستم موردمطالعه برابر صفر است. سقف قیمت در بازارهای انرژی، SR و RR به ۵ بازه بین کیف و سیقف قیمت مربوط برای تعیین حالت، محدوده قیمت در هر یک از بازارهای انرژی، SR و RR به ۵ بازه بین گینه تامین و سقف قیمت تقسیم می شود. همچنین برای قیمت دهی عامل در بازارهای انرژی، SR و RR و RR که بازه بین هزینه تامین و سقف قیمت مربوط در نظر گرفته می شوند. بدین ترتیب، فضای حالت شامل ۲۵ حالت و فضای عمل هر عامل شامل ۲۵ عمل می باشد.

جدول ۱) مشخصات فنی و هزینهای واحدهای تولیدی و پارامترهای رفتاری عاملهای مربوط در سیستم موردمطالعه

Gen. No.	حداقل توانایی تولید (MW)	حداکثر توانایی تولید (MW)	حداکثر توانایی تامین (MW) SR	حداکثر توانایی تامین MW) RR)		تامین SR		نرخ یادگیری α	ضریب تنزیل γ	ع در داهبرد -e greedy	نرخ بکارگیری ظرفیت TUR	اهمیت نرخ بکارگیری b
1	150	440	100	300	20.0	7.5	1.0	0.7	0.1	0.25	0.9	2.0
2	150	440	100	300	22.0	4.5	2.5	0.4	0.3	0.25	0.9	2.0
3	100	300	100	300	20.0	5.0	1.0	0.1	0.5	0.25	0.8	2.0
4	80	250	100	250	24.0	4.0	1.0	0.7	0.1	0.25	0.8	2.0
5	80	250	140	250	28.0	7.5	2.5	0.4	0.3	0.25	0.7	2.0
6	80	200	100	200	22.0	5.0	3.0	0.1	0.5	0.25	0.7	1.5
7	80	200	100	200	29.0	4.0	3.0	0.1	0.5	0.25	0.9	1.5
8	65	200	135	200	26.0	5.5	4.5	0.4	0.3	0.25	0.9	1.5
9	50	150	100	150	31.0	3.5	3.0	0.7	0.1	0.25	0.9	1.5
10	50	150	100	150	33.0	4.0	3.0	0.4	0.3	0.25	0.8	1.5
11	50	150	100	150	29.0	2.5	2.0	0.1	0.5	0.25	0.8	1.5
12	35	100	65	100	35.0	2.5	1.5	0.4	0.3	0.25	0.7	1.0
13	35	100	65	100	36.0	1.5	1.0	0.7	0.1	0.25	0.7	1.0
14	35	100	65	100	31.0	4.0	3.5	0.1	0.5	0.25	0.9	1.0
15	15	50	35	50	44.0	2.0	2.0	0.4	0.3	0.25	0.7	1.0
16	15	50	35	50	47.0	2.5	2.0	0.7	0.1	0.25	0.7	1.0
17	15	50	35	50	36.0	1.0	1.0	0.1	0.5	0.25	0.9	1.0



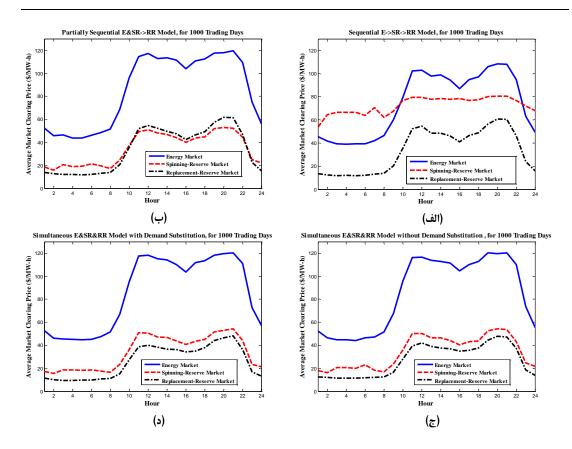
شکل ۲) بار پیش بینی شده فصلی توسط ISO برای ۲۴ ساعت

همانطور که اشاره شد، چهار مدل بهینه سازی تخصیص بر روی سیستم نمونه مـورد ارزیـابی و مقایسـه قـرار خواهنـد گرفت. در ابتدای امر و در مرحله یادگیری اولیه، برای بدست آوردن مقادیر اولیه مناسب بـرای جـدول ارزش حالـت-عمـل (جدول مقادیر (Q(s,a))، الگوریتم قیمتدهی عاملها برای ۵۰۰۰ روز مبادلات بازار برق و تحت هـر یـک از چهـار مـدل فرمول بندی مساله بهینه سازی تخصیص به طور جداگانه اجرا شده است. مقادیر ارزش حالت-عمل (جدول مقـادیر (Q(s,a)) بدست آمده در فرآیند یادگیری اولیه، در مرحله قیمتدهی اصلی مورد استفاده قرار می گیرند.

در مرحله قیمت دهی اصلی، الگوریتم قیمت دهی عامل ها در محیط بازار، تحت هر یک از چهار مدل فرمول بندی مساله بهینه سازی تخصیص به طور جداگانه و برای ۱۰۰۰ روز مبادلات اجرا شده است.

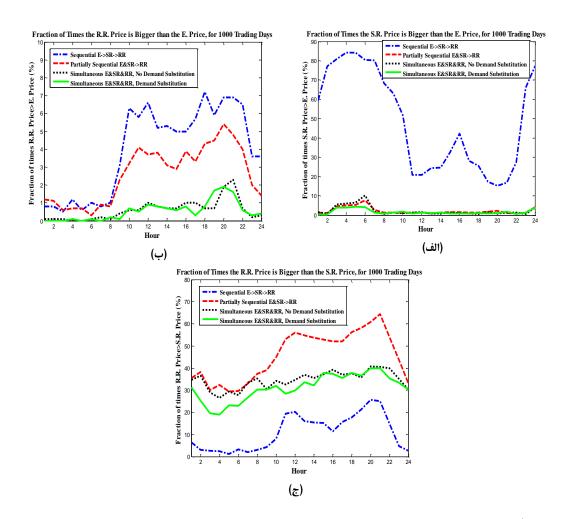
تاثیر مدل تخصیص بر قیمت بسته شدن بازارها و وقوع وارونگی قیمت

پس از اجرای شبیه سازی برای ۱۰۰۰ روز مبادلات برق، یک متوسط گیری انجام شده و متوسط قیمت بسته شدن بازارهای انرژی، RR و RR تحت چهار مدل بهینه سازی تخصیص به دست آمده است. شکلهای ($^{-}$ الف) الی ($^{-}$ -د)، متوسط قیمت بسته شدن سه بازار انرژی، RR و RR را به ترتیب تحت مدلهای بهینه سازی پشت سرهم، به صورت جزئی پشت سرهم، همزمان بدون امکان جانشینی تقاضا و همزمان با درنظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا نمایش می دهند.



شکل ۳) متوسط قیمت بستهشدن بازارها تحت مدل بهینهسازی: الف- پشتسرهم، ب- بهصورت جزئی پشتسرهم، ج-همزمان و بدون امکان جانشینی تقاضا، د- همزمان و با درنظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا

همانطور که در شکل (۳–الف) مشاهده می شود، در مدل تخصیص پشت سرهم، قیمت متوسط SR در برخی ساعات از قیمت متوسط انرژی بیشتر شده است. با بررسی شکل (۳–ب) نیز می توان دریافت که در مدل تخصیص به صورت جزئی پشت سرهم، قیمت متوسط SR در برخی از ساعات شبانه روز از قیمت متوسط SR فراتر رفته است. به عبارت دیگر، در هر دو مدل تخصیص پشت سرهم، بازار برق مستعد وقوع وارونگی قیمت می باشد. همانگونه که در شکل های (۳–ج) و (۳–د) مشاهده می شود، در مدل های تخصیص همزمان به لحاظ قیمت متوسط وارونگی رخ نداده است. البته مقادیر نشان داده شده در شکل های (۳–د) الی (۳–د) مقادیر متوسط قیمت هستند. لذا برای بررسی دقیق تر، درصد دفعات وقوع وارونگی قیمت در شکل های (۴–الف) الی (۴–ج) نمایش داده شده است.



شکل ۴) درصد تعداد دفعاتی که تحت چهار مدل تخصیص: الف- قیمت رزرو چرخشی از قیمت انرژی بیشتر شدهاست، ب- قیمت رزرو جایگزین از قیمت انرژی بیشتر شدهاست، ج- قیمت رزرو جایگزین از قیمت رزرو چرخشی بیشتر شدهاست.

شکل ($^{+}$ الف) درصد دفعاتی را که قیمت SR از قیمت انرژی بیشتر شدهاست برای هر ساعت شبانهروز نشان می دهد. از نتایج ارائه شده در این شکل می توان دریافت که در مدل بهینه سازی پشت سرهم، در اکثر اوقات وارونگی قیمت بین انرژی و SR رخ داده است. همچنین کمترین تعداد وقوع وارونگی قیمت بین انرژی و SR نیز مربوط به مدل بهینه سازی همزمان با امکان جانشینی تقاضا بوده است.

درصد دفعاتی که قیمت RR از قیمت انرژی بیشتر شده، برای هر ساعت شبانهروز در شکل (* -ب) نمایش داده شده است. بر اساس نتایج این شکل می توان نتیجه گرفت که درصد وقوع وارونگی قیمت بین انرژی و RR در هر چهار

Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-19]

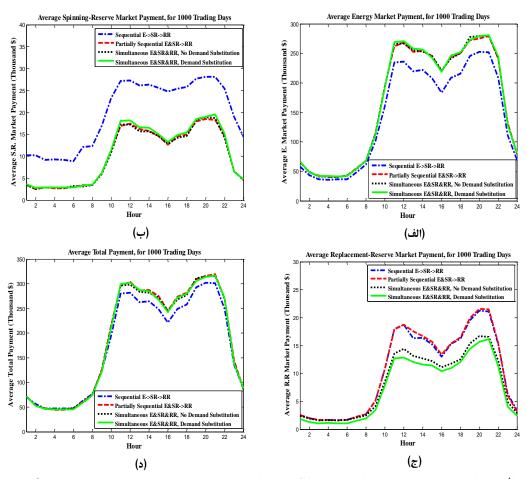
مدل تخصیص نسبتا پایین می باشد. البته تعداد دفعات وقوع این نوع وارونگی در مدلهای تخصیص پشت سرهم نسبت به دو مدل تخصیص همزمان بیشتر بودهاست.

همچنین شکل (۴–ج) درصد دفعاتی را که قیمت RR از قیمت SR بیشتر شدهاست برای هر ساعت شبانه روز ارائه می دهد. بر اساس نتایج این شکل می توان دریافت که بیشترین تعداد دفعات وقوع وارونگی قیمت بین SR و RR مربوط به مدل بهینه سازی به صورت جزئی پشت سرهم بوده است. این در حالی است که وارونگی قیمت بین SR و RR در مدل بهینه سازی پشت سرهم کمتر رخ داده است. همچنین با مقایسه نتایج مربوط به دو مدل بهینه سازی همزمان، مشاهده می شود که درنظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا باعث کاهش تعداد دفعات وقوع وارونگی قیمت بین SR و RR شده است.

بر اساس نتایج شکلهای (۴-الف) الی (۴-ج) می توان نتیجه گرفت که امکان وقوع وارونگی قیمت در هر چهار مدل بهینه سازی تخصیص وجود دارد. البته مدل بهینه سازی همزمان با درنظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا به لحاظ کاهش دفعات وقوع وارونگی قیمت، در اکثر مواقع نسبت به سه مدل دیگر برتری داشته است.

تاثیر مدل تخصیص بر مبالغ پرداختی

پس از اجرای شبیهسازی برای ۱۰۰۰ روز مبادلات برق، متوسط مبالغ پرداختی در بازارها در این ۱۰۰۰ روز محاسبه شده است. شکلهای (۵-الف) الی (۵-ج) به ترتیب متوسط پرداختی بابت انـرژی، SR و RR و تحت هـر چهـار مـدل تخصیص نمایش میدهند. بر اساس شکل (۵-الف) می توان دریافت که متوسط پرداختی بابت انرژی در مدل پشـتسـرهم کمتر از سه مدل دیگر است. همچنین در شکل (۵-ب) مشاهده می شود متوسط پرداختی بابت SR در مـدل پشـتسـرهم بیشتر از سه مدل دیگر می باشد. بر اساس شکل (۵-ج) نیز می توان دریافت کـه متوسط پرداختی بابت RR در مـدل همزمان با امکـان پشتسرهم بیشتر از دو مدل همزمان است، ضمن آنکه کمترین میزان پرداختی بابت RR در مـدل همزمان بـا امکـان جانشینی تقاضا رخ داده است. شکل (۵-د)، متوسط مجموع پرداختیها در سه بـازار را تحت چهـار مـدل بهینـهسـازی می دهد. بر اساس نتایج شکل (۵-د) می توان دریافت که متوسط مجموع پرداختیها در سه بازار تحت مـدل بهینـهسـازی پشتسرهم کمتر از سه مدل دیگر می باشد. باید توجه نمود که در سیستم موردمطالعه، چـون پرداختی بـه برنـدگان طبـق قانون تسویه یکنواخت و بر اساس بالاترین قیمت پذیرفته شده در هر بازار محاسبه می شود، متاثر نبودن بازار انرژی از دیگر قانون تسویه یکنواخت و بر اساس بالاترین قیمت پذیرفته شده در هر بازار محاسبه می شود، متاثر نبودن بازار انرژی از دیگر بازارها، به دلیل زیاد بودن میزان تقاضا در این بازار می تواند میزان کل پرداختی به برندگان بازارها را کاهش دهد.



شکل ۵) متوسط پرداختی تحت چهار مدل تخصیص: الف- بابت انرژی، ب- بابت رزرو چرخشی، ج- بابت رزرو جایگزین، د- بابت انرژی، رزرو چرخشی و رزرو جایگزین

نحوه تکرار مطالعات برای بازارهای با قانون تسویه تمایزی

در این مقاله، قانون تسویه بازارها به صورت یکنواخت درنظر گرفته شد. یکی دیگر از انواع قوانین تسویه که در بازارهایی همچون ایران رعایت می شود، قانون تسویه تمایزی است. بر اساس قانون تسویه تمایزی، پرداختها به برندگان مناقصات بر پایه قیمت پیشنهادی خود آنها صورت می گیرد. در چنین حالتی، وقوع وارونگی قیمت از طریق مقایسه میانگین قیمت تامین انواع کالاها بررسی خواهد شد. لازم به ذکر است که با مدنظر قرار دادن حداقل سازی هزینه اجتماعی، مساله بهینه سازی تخصیص برای هر دو قانون تسویه یکنواخت و تمایزی مشابه بوده و تنها تفاوت موجود در نحوه محاسبه

¹⁾ Pay-as-Bid Settlement Rule

پرداختی به برندگان بازارها و تسویه مالی بازار خواهد بود. البته باید دقت نمود که در هنگام شبیهسازی بازارهای با قانون تسویه یکنواخت، حالت در هر ساعت بر اساس قیمت بسته شدن بازارها تعیین می شد ولی در صورتی که قانون تسویه بازار به صورت تمایزی لحاظ شود، حالت در هر ساعت بر اساس میانگین قیمت تامین کالا در بازارها تعیین خواهد شد.

نتيجهگيرى

در این مقاله، از طریق شبیه سازی توام بازارهای انرژی و انواع رزرو بر پایه سیستم چندعاملی و به کمک الگوریتم یادگیری تقویتی Q-Learning، چهار مدل بهینه سازی تخصیص در یک سیستم نمونه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. خلاصه نتایج حاصل از شبیه سازی بازارها و مقایسه چهار مدل بهینه سازی تخصیص به شرح ذیل می باشند:

الف – با بررسی متوسط قیمت بسته شدن بازارها مشخص گردید که تحت هر دو مدل تخصیص پشت سرهم، سیستم مستعد وقوع وارونگی قیمت است در حالی که تحت دو مدل تخصیص همزمان، احتمال بروز وارونگی قیمت به طور متوسط کم است.

- تحت مدل تخصیص پشت سرهم، در اکثر اوقات وارونگی قیمت بین انرژی و SR رخ دادهاست. کمت رین دفعات وقوع وارونگی قیمت بین انرژی و SR نیز مربوط به مدل تخصیص همزمان با امکان جانشینی تقاضا بودهاست.

RR ج- دفعات وقوع وارونگی قیمت بین انرژی و RR تحت هر دو مدل تخصیص پشت سرهم نسبت به دو مدل تخصیص همزمان بیشتر بوده است.

د- بیشترین دفعات وقوع وارونگی قیمت بین SR و RR مربوط به مدل تخصیص به صورت جزئی پشت سرهم بودهاست. این در حالی است که وارونگی قیمت بین SR و RR در مدل تخصیص پشت سرهم کمتر رخ دادهاست. همچنین با مقایسه نتایج مربوط به دو مدل تخصیص همزمان می توان نتیجه گرفت که درنظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا می تواند باعث کاهش احتمال وقوع وارونگی قیمت بین SR و RR شود.

هـ- متوسط پرداختی بابت انرژی در مدل تخصیص پشتسرهم کمتر از سه مدل دیگر بودهاست.

و- متوسط پرداختی بابت SR در مدل تخصیص پشتسرهم بیشتر از سه مدل دیگر بودهاست.

ز- متوسط پرداختی بابت RR تحت هر دو مدل تخصیص پشتسرهم بیشتر از دو مدل تخصیص همزمان بودهاست.

ح- میزان کل پرداختی در بازارها در مدل تخصیص پشتسرهم بهطور متوسط نسبت به سه مدل دیگر کمتر بودهاست.

بر اساس تحلیلها و نتایج بدست آمده، انتخاب یک مدل یا طرح می تواند باعث کاهش احتمال وارونگی قیمت و افزایش بهرهوری بازار گردد ولی در مقابل ممکن است هزینههای بیشتری را در بخشهای دیگر تحمیل کند. به عنوان

مثال، احتمال وقوع وارونگی قیمت در مدل تخصیص همزمان با امکان جانشینی تقاضا نسبت به مدل تخصیص پشتسر هم کمتر است ولی انتخاب این مدل می تواند با افزایش مبلغ پرداختی کل در بازارها همراه باشد. بنابراین، قانون گذار و طراح بازار باید بین افزایش بهرهوری بازار و کاستن هزینه ها یک تعادل منطقی ایجاد کند و مدل مطلوب را بر اساس سیاست های کلی و ویژگی ها و شرایط سیستم انتخاب نماید.

سیاسگزاری

در اینجا لازم میدانم از حمایتهای بیدریغ دانشگاه آزاد اسلامی واحد مینودشت در انجام این تحقیق در قالب طرح پژوهشی تشکر نمایم.

منابع

- [1] Abgottspon, H., and Andersson, G., (2013) "Strategic bidding of ancillary services for a hydro power producer," *10th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, Stockholm, Sweden, pp. 1-7.
- [2] Faria, P., Vale, Z., Soares, J., Khodr, H., and Canizes, B., (2010) "ANN based day-ahead ancillary services forecast for electricity market simulation," *15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, Valletta, Malta, pp. 1159-1164.
- [3] Farshad, M., "Multi-agent based simulation of simultaneous electricity market auctions in restructured environment," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2015. Early Access: http://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/accepted.htm
- [4] Farshad, M., Rajabi-Mashhadi, H., and Sadeh, J., "Analysis of interaction between energy-spinning reserve and replacement reserve markets," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 39, pp. 660-679, 2011.
- [5] Fujii, Y., Okamura, T., Inagaki, K., and Yamaji, K., (2004) "Basic analysis of the pricing processes in modeled electricity markets with multi-agent simulation," *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Hong Kong, pp. 257-261.
- [6] Gan, D., and Litvinov, E., "Energy and reserve market designs with explicit consideration to lost opportunity costs," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 1, pp. 53-59, 2003.

- [7] Kebriaei, H., Rahimi-Kian, A., and Ahmadabadi, M.N., "Model-based and learning-based decision making in incomplete information cournot games: a state estimation approach," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 45, No. 4, pp. 713-718, 2015.
- [8] Lim, Y., and Kim, H. M., "Strategic bidding using reinforcement learning for load shedding in microgrids," *Computers and Electrical Engineering*, Vol. 40, No. 5, pp. 1439-1446, 2014.
- [9] Nie, J., and Haykin, S., "A dynamic channel assignment policy through Q-Learning," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 10, No. 6, pp. 1443-1455, 1999.
- [10] Oren, S.S., (2001) "Design of ancillary service markets," *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii, USA, pp. 1-9.
- [11] Praqa, I., Ramos, C., and Vale, Z. A., (2001) "Competitive electricity markets: simulation to improve decision making," *IEEE Porto Power Tech Conference (PPT)*, Porto, Portugal, Vol. 1, pp. 1-6.
- [12] Rahimiyan, M., and Rajabi Mashhadi, H., "An adaptive q-learning algorithm developed for agent-based computational modeling of electricity market," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, Vol. 40, No. 5, pp. 547-556, 2010.
- [13] Sugianto, L. F., and Zhigang Liao, K., "Comparison of different auction pricing rules in the electricity market," *Modern Applied Science*, Vol. 8, No. 1, pp. 147-163, 2014.
- [14] Sutton, R.S., and Barto, A.G., (1998) *Reinforcement Learning: An Introduction*. The MIT Press, A Bradford Book, MA, USA.
- [15] Vale, Z. A., Ramos, C., Faria, P., Soares, J. P., Canizes, B. R., and Khodr, H.M., (2009) "Ancillary service market simulation," *Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, COEX Convention Center, Seoul, Korea, pp. 1-4.
- [16] Vale, Z. A., Ramos, C., Faria, P., Soares, J. P., Canizes, B., and Khodr, H.M., (2010) "Ancillary services market clearing simulation: a comparison between deterministic and heuristic methods," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 1-6.
- [17] Xiong, G., Hashiyama, T., and Okuma, S., "A supplier bidding strategy through Q-learning algorithm in electricity auction markets," *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, Vol. 123, No. 6, pp. 1134-1141, 2003.
- [18] Xiong, G., Okuma, S., and Fujita, H., (2004) "Multi-agent based experiments on uniform price and pay-as-bid electricity auction markets," *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, Vol. 1, pp. 72-76.

[19] Yu, N. P., Liu, C. C., and Price, J., "Evaluation of market rules using a multi-agent system method," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 1, pp. 470-479, 2010.