

## تحلیل شرایط و ارونگی قیمت در بازارهای برق تحت مدل‌های مختلف تخصیص پشت‌سرم و همزمان

محمد فرشاد<sup>۱</sup>

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۵/۲/۹

تاریخ دریافت مقاله:

۹۴/۹/۲۵

### چکیده:

تحلیل رفتار بازیگران و شرایط بازارهای برق از طریق شبیه‌سازی می‌تواند تصمیم‌گیران بازار را در طراحی و سیاست‌گذاری مناسب قبل از اجرای واقعی یاری نموده و از هزینه‌ها و مشکلات احتمالی آینده بکاهد. توجه به بازارهای خدمات جانبی در کنار بازار انرژی در شبیه‌سازی‌ها این امکان را فراهم می‌سازد که مدل‌های مختلف اجرای مناقصات و تخصیص کالاها به‌طور کارآمدتری مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرند. در این مقاله، تاثیر اجرای انواع مدل‌های تخصیص پشت‌سرم و همزمان انرژی، رزرو چرخشی و رزرو جایگزین بر رفتار بازیگران، احتمال وقوع و ارونگی قیمت و همچنین مبالغ پرداختی در بازارها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این راستا، ابتدا روشی مبتنی بر سیستم چندعاملی و الگوریتم یادگیری تقویتی جهت شبیه‌سازی رفتار بازیگران در بازارهای انرژی، رزرو چرخشی و رزرو جایگزین بیان می‌شود. سپس این روش تحت انواع مدل‌های تخصیص پشت‌سرم و همزمان بر روی یک سیستم نمونه شامل ۱۷ تولیدکننده با مشخصات هزینه‌ای و ظرفیتی گوناگون پیاده‌سازی می‌شود. تحلیل‌ها و نتایج ارزیابی‌ها در خصوص شرایط وقوع و ارونگی قیمت و مبالغ پرداختی تحت انواع مدل‌ها برای تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران بازارهای برق مفید خواهد بود.

### کلمات کلیدی:

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

(۱) استادیار گروه برق، واحد مینودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مینودشت، ایران

## 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 قانون‌گذاران و تصمیم‌گیران، تجزیه و تحلیل بازارهای برق در مدل‌ها و طرح‌های ممکن و انتخاب بهترین آنها با توجه به سیاست‌گذاری‌ها و اهداف کلی موردنظر می‌باشد. پیش‌بینی رفتار راهبردی بازیگران بازار در مناقصات مختلف برق و شبیه‌سازی محیط بازار، در انتخاب مدل و قانون مناسب سودمند و کارا می‌باشد. شبیه‌سازی بازار نیازمند مدل‌سازی مناسب هر یک از بازیگران خواهد بود. روش معمول برای مدل کردن هر یک از بازیگران بازار، استفاده از عامل‌های هوشمند<sup>۱</sup> است. این عامل‌های هوشمند می‌توانند تصمیمات خود را کنترل نموده و با محیط تقابل کنند [11].

در محیط تجدید ساختار یافته صنعت برق، معمولاً بازارهای مهمی همچون بازار انواع خدمات جانبی<sup>۲</sup> نیز وجود دارند که طراحی آنها به همراه 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 می‌گردند. اشتراک و وابستگی در سمت عرضه بازارهای انرژی و انواع رزرو می‌تواند باعث تاثیرگذاری 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 به لحاظ مولفه‌های رفتار قیمت‌دهی تولیدکنندگان، دارای اهمیت فراوانی بوده و منجر به انطباق بیشتر شبیه‌سازی‌ها با واقعیت خواهد شد. در [13]، مقایسه‌ای مابین قوانین مختلف قیمت‌گذاری تنها با در نظر گرفتن بازار انرژی انجام شده است. هر چند در مواردی همچون [1,2,5,15,16,19]، اثر برخی بازارهای خدمات جانبی نیز در مطالعات و شبیه‌سازی‌های بازار برق لحاظ شده است، ولی تاکنون کمتر به مقایسه و تجزیه و تحلیل انواع طراحی‌های ممکن در بازارهای رزرو به صورت توأم با بازار انرژی پرداخته شده است. البته در [3] روشی مبتنی بر سیستم چندعاملی<sup>۳</sup> برای شبیه‌سازی بازارهای انرژی و رزرو پیشنهاد شده و از طریق آن، تاثیر لحاظ هزینه فرصت از دست‌رفته<sup>۴</sup> در مدل پرداخت 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 تولیدکنندگان بازار و تعیین برندگان مناقصات می‌باشد. تخصیص کالاهای مختلف در مناقصات بازار برق در واقع یک مساله بهینه‌سازی است که نحوه فرمول‌بندی و اجرای آن باید به صورت یک قانون مشخص و شفاف ارائه گردد. انتخاب هر یک از مدل‌های تخصیص ممکن، از جمله شکل‌های مختلف تخصیص پشت‌سرهم و همزمان، می‌تواند 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 می‌تواند در اثر وضع و اجرای نادرست قانون تخصیص در مناقصات رخ دهد، وارونگی قیمت<sup>۱</sup> است. وارونگی قیمت بدین معنی است که کالای با کیفیت پایین‌تر 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 می‌یابد. در واقع، یکی از نشانه‌های بارز نقص طراحی بازارهای انواع رزرو که باعث می‌شود این بازارها عملاً رقابتی نباشند، وارونگی قیمت است. وقوع وارونگی قیمت تبعات خاص خود را به همراه دارد و باعث پدیدار شدن قدرت در بازارهای پر اهمیت و کاهش بهره‌وری بازارها می‌گردد. منظور از کاهش بهره‌وری بازار در اینجا، نوسانات و ناپایداری زیاد قیمت، کمبود در کالای رزرو با کیفیت و وقوع پیک قیمت‌های تصادفی در هنگام اجرای بازار است [10].

هدف اصلی این مقاله، ارائه تحلیل‌هایی مفید برای قانون‌گذاران بازار در خصوص شرایط وقوع وارونگی قیمت است. در این مقاله، از طریق شبیه‌سازی مناقصات بازارهای انرژی و انواع رزرو بر پایه سیستم چندعاملی، تاثیر اجرای انواع مدل‌های تخصیص پشت‌سرهم و همزمان بر رفتار بازیگران، احتمال وقوع وارونگی قیمت و همچنین مبالغ پرداختی در بازارها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در سیستم چندعاملی موردنظر این مقاله، هر عامل بر اساس یادگیری تقویتی<sup>۲</sup> Q-Learning رفتار یکی از تولیدکنندگان را مشابه‌سازی کرده و اقدام به قیمت‌دهی در مناقصات بازارهای انرژی و انواع رزرو می‌نماید.

در ادامه مقاله، نمایی کلی از فضای مورد بحث بیان شده و انواع مدل‌های تخصیص مورد مقایسه معرفی می‌گردند. سپس خلاصه‌ای از الگوریتم یادگیری تقویتی Q-Learning بیان می‌شود. در ادامه، نحوه شبیه‌سازی مناقصات بازارهای انرژی و انواع رزرو ارائه می‌گردد. در نهایت نیز یک سیستم نمونه شامل ۱۷ تولیدکننده با مشخصات هزینه‌ای و ظرفیتی گوناگون مدنظر قرار گرفته و نتایج مقایسه و ارزیابی‌ها در خصوص آن ارائه می‌شوند.

### 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)<sup>۳</sup> و ظرفیت رزرو جایگزین (RR)<sup>۴</sup>، به عنوان انواع کالای رزرو موردنیاز تامین می‌گردند. 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 می‌تواند 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 مورد بحث، اجرای مناقصات بازارهای برق بر عهده بهره‌بردار مستقل سیستم (ISO)<sup>۱</sup> است. همچنین مناقصات بازارهای انرژی، SR و RR به صورت روز قبل<sup>۲</sup> اجرا شده و هر یک از شرکت‌کنندگان بازار، قیمت پیشنهادی و مشخصات فنی خود را برای هر ساعت روز بهره‌برداری به ISO ارائه می‌دهند. ISO نیز پس از دریافت پیشنهادها، مساله بهینه‌سازی تخصیص انرژی، SR و RR را بر اساس حداقل سازی هزینه اجتماعی<sup>۳</sup> [10] و برای ۲۴ ساعت روز بهره‌برداری حل کرده و میزان و نوع ظرفیت تخصیص یافته برای هر ساعت روز بهره‌برداری را به شرکت‌کنندگان اعلام می‌نماید. برندگان بازارهای SR و RR، مبلغ آمادگی<sup>۴</sup> رزرو [6] را متناسب با مقدار ظرفیت تخصیص یافته به آنها دریافت می‌کنند. در سیستم مورد نظر، قانون تسویه یکنواخت<sup>۵</sup> برای تعیین قیمت و محاسبه پرداختی به برندگان بازارها اجرا می‌شود.

در این مقاله، چهار مدل مساله بهینه‌سازی تخصیص در فضای ترسیم شده مورد مقایسه قرار خواهند گرفت. در ادامه، فرمول‌بندی‌ها برای این چهار مدل ارائه شده‌اند. از آنجا که این فرمول‌بندی‌ها با ساده‌سازی و صرف‌نظر از محدودیت‌هایی مانند حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحدها و به طور کلی، محدودیت‌های وابسته به زمان، برای هر ساعت روز بهره‌برداری بیان شده‌اند، مساله‌های بهینه‌سازی مربوطه برای هر ساعت روز بهره‌برداری به‌طور جداگانه قابل حل خواهند بود.

#### مدل بهینه‌سازی پشت‌سرهم<sup>۶</sup>

در این مدل، مساله بهینه‌سازی تخصیص به صورت پشت‌سرهم و به ترتیب کیفیت کالا اجرا می‌شود. یعنی ابتدا مساله بهینه‌سازی تخصیص انرژی بر اساس فرمول‌بندی (۱-الف)-(۱-د) حل می‌شود. در این فرمول‌بندی که برای یک ساعت روز بهره‌برداری ارائه شده‌است، رابطه (۱-الف) تابع هدف مساله و روابط (۱-ب)-(۱-د) قیود مساله بهینه‌سازی را نمایش می‌دهند. لازم به یادآوری است که ظرفیت SR تنها توسط ژنراتورهای در مدار (سنکرون) قابل تامین است. لذا در این فرمول‌بندی، قید (۱-د) مدنظر قرار گرفته تا در مرحله تخصیص SR، سیستم با کمبود ظرفیت سنکرون مواجه نشود.

$$\text{Min} \sum_i \alpha_i \cdot P_i \cdot \rho e_i \quad (۱-الف)$$

$$\alpha_i \cdot P_i^{\min} \leq P_i \leq \alpha_i \cdot P_i^{\max} \quad (۱-ب)$$

- 1) Independent System Operator
- 2) Day-Ahead
- 3) Social Cost
- 4) Availability Payment
- 5) Uniform Settlement Rule
- 6) Sequential Optimization Model

$$\sum_i \alpha_i \cdot P_i = P^{Load} \quad (ج-۱)$$

$$\sum_i \alpha_i \cdot \min(SR_i^{max}, P_i^{max} - P_i) \geq SR^{Req} \quad (د-۱)$$

در روابط فوق،  $P_i$  مقدار برنده شده واحد  $i$  ام در بازار انرژی،  $\rho e_i$  قیمت پیشنهادی واحد  $i$  ام در بازار انرژی،  $\alpha_i$  نماد برنده شدن و یا نشدن واحد  $i$  ام در بازار انرژی (۰ یا ۱)،  $P_i^{max}$  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 می باشد.

پس از تخصیص انرژی، برندگان بازار SR از بین ظرفیت های باقیمانده مشخص می شوند. فرمول بندی این مساله بهینه سازی به صورت روابط (۲-الف)-(۲-د) است که رابطه (۲-الف) تابع هدف و روابط (۲-ب)-(۲-د) قیود می باشند.

$$\text{Min}_{SR_i} \sum_i \alpha_i^* \cdot SR_i \cdot \rho sr_i \quad (الف-۲)$$

$$P_i^* + SR_i \leq \alpha_i^* \cdot P_i^{max} \quad (ب-۲)$$

$$0 \leq SR_i \leq \alpha_i^* \cdot SR_i^{max} \quad (ج-۲)$$

$$\sum_i \alpha_i^* \cdot SR_i = SR^{Req} \quad (د-۲)$$

در روابط فوق،  $SR_i$  مقدار برنده شده واحد  $i$  ام در بازار رزرو چرخشی و  $\rho sr_i$  قیمت پیشنهادی واحد  $i$  ام در بازار رزرو چرخشی است. همچنین،  $\alpha_i^*$  و  $P_i^*$  مقادیر بهینه بدست آمده از حل مساله تخصیص انرژی (۱-الف)-(۱-د) می باشند.

در نهایت امر، مساله تخصیص RR بر اساس فرمول بندی (۳-الف)-(۳-د) حل می شود. در این فرمول بندی که برای یک ساعت ارائه شده است، رابطه (۳-الف) تابع هدف مساله بهینه سازی و روابط (۳-ب)-(۳-د) قیود را بیان می کنند.

$$\text{Min}_{RR_i} \sum_i (RR_i \cdot \rho rr_i) \quad (الف-۳)$$

$$\alpha_i^* \cdot P_i^* + \alpha_i^* \cdot SR_i^* + RR_i \leq P_i^{max} \quad (ب-۳)$$

$$0 \leq RR_i \leq RR_i^{max} \quad (ج-۳)$$

$$\sum_i RR_i = RR^{Req} \quad (د-۳)$$

در فرمول بندی فوق،  $RR_i$  مقدار برنده شده واحد  $i$  ام در بازار رزرو جایگزین،  $\rho rr_i$  قیمت پیشنهادی واحد  $i$  ام در بازار رزرو جایگزین،  $RR_i^{max}$  حداکثر توانایی تامین رزرو جایگزین واحد  $i$  ام و  $RR^{Req}$  میزان ظرفیت رزرو جایگزین مورد نیاز سیستم است. همچنین،  $\alpha_i^*$ ،  $P_i^*$  و  $SR_i^*$  مقادیر بهینه بدست آمده از حل مساله تخصیص انرژی (۱-الف)-(۱-د) و مساله تخصیص SR (۲-الف)-(۲-د) می باشند.

مدل بهینه‌سازی به صورت جزئی پشت‌سرهم<sup>۱</sup>

بر اساس تعریف کالای SR، برای اینکه واحدی بتواند آن را تامین کند، باید در بازار انرژی نیز پذیرفته شود. لذا در اینجا، بازار انرژی و بازار SR به دلیل ارتباط داخلی قوی، یک مجموعه در نظر گرفته شده‌اند. در این مدل، ابتدا تخصیص انرژی و SR به صورت همزمان انجام می‌شود و در مرحله بعد، مساله بهینه‌سازی تخصیص RR با توجه به نتایج حاصل در مرحله قبل حل می‌گردد. مساله بهینه‌سازی تخصیص همزمان انرژی و SR برای یک ساعت روز بهره‌برداری، در روابط (۴-الف)-(۴-و) نشان داده شده‌است که رابطه (۴-الف) تابع هدف و روابط (۴-ب)-(۴-و) قیود آن را نمایش می‌دهند.

$$\text{Min}_{\alpha_i, P_i, SR_i} \sum (\alpha_i \cdot P_i \cdot \rho e_i + \alpha_i \cdot SR_i \cdot \rho sr_i) \quad (۴-الف)$$

$$P_i + SR_i \leq \alpha_i \cdot P_i^{\max} \quad (۴-ب)$$

$$\alpha_i \cdot P_i^{\min} \leq P_i \quad (۴-ج)$$

$$0 \leq SR_i \leq \alpha_i \cdot SR_i^{\max} \quad (۴-د)$$

$$\sum_i \alpha_i \cdot P_i = P^{\text{Load}} \quad (۴-ه)$$

$$\sum_i \alpha_i \cdot SR_i = SR^{\text{Req}} \quad (۴-و)$$

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

مدل بهینه‌سازی همزمان بدون جانشینی تقاضا<sup>۲</sup>

در این مدل، هر سه کالای انرژی، SR و RR به صورت همزمان و در قالب یک مساله بهینه‌سازی تخصیص می‌یابند. فرمول‌بندی مساله بهینه‌سازی تخصیص همزمان انرژی، SR و RR برای یک ساعت روز بهره‌برداری، در روابط (۵-الف)-(۵-ح) آمده‌است. رابطه (۵-الف) تابع هدف مساله و روابط (۵-ب)-(۵-ح) قیود مساله بهینه‌سازی را بیان می‌کنند.

$$\text{Min}_{\alpha_i, P_i, SR_i, RR_i} \sum (\alpha_i \cdot P_i \cdot \rho e_i + \alpha_i \cdot SR_i \cdot \rho sr_i + RR_i \cdot \rho rr_i) \quad (۵-الف)$$

$$\alpha_i \cdot P_i + \alpha_i \cdot SR_i + RR_i \leq P_i^{\max} \quad (۵-ب)$$

$$\alpha_i \cdot P_i^{\min} \leq P_i \leq \alpha_i \cdot P_i^{\max} \quad (۵-ج)$$

$$0 \leq SR_i \leq \alpha_i \cdot SR_i^{\max} \quad (۵-د)$$

$$0 \leq RR_i \leq RR_i^{\max} \quad (۵-ه)$$

1) Partially Sequential Optimization Model

2) Simultaneous Optimization Model without Demand Substitution

$$\sum_i \alpha_i . P_i = P^{Load} \quad (و-۵)$$

$$\sum_i \alpha_i . SR_i = SR^{Req} \quad (ز-۵)$$

$$\sum_i RR_i = RR^{Req} \quad (ح-۵)$$

همانطور که در فرمول بندی فوق مشاهده می شود، هر نوع کالای رزرو دقیقاً به میزان مورد نیاز تعیین شده تامین خواهد شد. به عبارت دیگر، امکان هیچگونه جانشینی تقاضای<sup>۱</sup> [10] رزرو وجود ندارد. کیفیت کالای رزرو معمولاً با توجه به زمان پاسخ دهی و قابلیت اطمینان تامین آن 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 مورد نیاز در سیستم کاست و به همان مقدار به میزان SR که کالای با کیفیت تری است، اضافه نمود.

#### مدل بهینه سازی همزمان با در نظر گرفتن جانشینی تقاضا<sup>۲</sup>

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 در نظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا، برای یک ساعت روز بهره برداری، در روابط (۶-الف)-(۶-ح) آمده است. رابطه (۶-الف) تابع هدف مساله و روابط (۶-ب)-(۶-ح) قیود مساله را نمایش می دهند.

$$\text{Min}_{\alpha_i, P_i, SR_i, RR_i} \sum_i (\alpha_i . P_i . \rho e_i + \alpha_i . SR_i . \rho sr_i + RR_i . \rho rr_i) \quad (۶-الف)$$

$$\alpha_i . P_i + \alpha_i . SR_i + RR_i \leq P_i^{\max} \quad (۶-ب)$$

$$\alpha_i . P_i^{\min} \leq P_i \leq \alpha_i . P_i^{\max} \quad (۶-ج)$$

$$0 \leq SR_i \leq \alpha_i . SR_i^{\max} \quad (۶-د)$$

$$0 \leq RR_i \leq RR_i^{\max} \quad (۶-ه)$$

$$\sum_i \alpha_i . P_i = P^{Load} \quad (۶-و)$$

$$\sum_i \alpha_i . SR_i \geq SR^{Req} \quad (۶-ز)$$

$$\sum_i RR_i + \sum_i \alpha_i . SR_i = RR^{Req} + SR^{Req} \quad (۶-ح)$$

1) Demand Substitution

2) Simultaneous Optimization Model Considering Demand Substitution

همانطور که در روابط (۶-ز) و (۶-ح) مشاهده می‌شود، امکان جانشینی تقاضای کالای رزرو فراهم شده‌است و می‌توان در صورت داشتن صرفه اقتصادی، به جای ظرفیت RR موردنیاز، ظرفیت SR تامین نمود.

### الگوریتم Q-Learning

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 تصمیم‌گیری در بازی‌های تکراری که بقیه بازیگران ناشناخته هستند، مانند مساله قیمت‌دهی راهبردی در مناقصات بازار برق، مناسب است [7,8,12,17,18].

برای بیان فرمول‌بندی ریاضی الگوریتم Q-Learning، فرض کنید که یک عامل در مراحل زمانی گسسته ( $t=1,2,3,\dots$ ) با محیط خود در تعامل است. مجموعه‌های متناهی حالت‌ها و عمل‌ها برای این عامل  $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  و  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  می‌باشند. در هر مرحله زمانی  $t$ ، عامل حالت کنونی محیط خود را که  $s_t \in S$  می‌باشد، دریافت می‌کند و بر اساس آن، یک عمل  $a_t \in A$  را انتخاب می‌نماید. در نتیجه، انتخاب این عمل، عامل یک پاداش لحظه‌ای  $r_{t+1}$  را دریافت می‌کند و حالت محیط به حالت جدید  $s_{t+1} \in S$  تغییر می‌یابد. هدف، یافتن راهبرد بهینه  $\pi^*(s) \in A$  برای هر حالت  $s$  می‌باشد، به گونه‌ای که کل پاداش دریافتی در بلندمدت حداکثر گردد. الگوریتم Q-Learning از طریق تخمین مقادیر بهینه ارزش  $Q$  برای جفت حالت-عمل  $Q^*(s, a)$ ، به راهبرد بهینه می‌رسد. الگوریتم Q-Learning مقادیر بهینه  $Q^*(s, a)$  را از طریق یک روش بازگشتی و تکراری و بر اساس اطلاعات موجود  $s_t, a_t, s_{t+1}$  و  $r_{t+1}$  پیدا می‌کند. نحوه به‌روز رسانی در این الگوریتم به صورت زیر می‌باشد [14]:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha [r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)] \quad (7)$$

در رابطه فوق، پارامتر  $\alpha$  نرخ یادگیری و پارامتر  $\gamma$  ضریب تنزیل است که هر دو این پارامترها مقداری بین صفر و یک دارند. نرخ یادگیری  $\alpha$  رفتار یادگیری عامل را منعکس می‌کند به نحوی که هر چه مقدار این پارامتر برای یک عامل بزرگتر باشد، تاثیر اطلاعات جدید شامل حالت مقصد و پاداش بدست‌آمده، بیشتر شده و تاثیر مقدار قدیمی  $Q$  در فرایند به‌روز رسانی آن کمتر خواهد شد. ضریب تنزیل  $\gamma$  نیز رفتار آینده‌نگری عامل را منعکس می‌کند به گونه‌ای که هر چه مقدار این پارامتر برای یک عامل بزرگتر در نظر گرفته شود، عامل برای رسیدن به یک پاداش بالا در بلندمدت تشویق خواهد شد و هر چه مقدار آن کمتر باشد، عامل رفتاری فرصت‌طلب برای دریافت پاداش‌های لحظه‌ای خواهد داشت.



## شعبه‌سازی 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 می‌شوند. 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 تولیدکنندگان بازار هستند، بر اساس الگوریتم یادگیری تقویتی Q-Learning در مناقصات قیمت‌دهی می‌کنند. آماده‌سازی دو رکن اساسی محیط و عامل برای شبیه‌سازی 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 مدل‌های مختلف مساله بهینه‌سازی تخصیص و همچنین رفتار سایر عامل‌ها در بازار می‌باشد. هر عامل دو سیگنال ورودی شامل سیگنال حالت و سیگنال پاداش را از محیط دریافت می‌کند. در این مقاله، چون قانون تسویه بازار به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است، حالت محیط در هر ساعت بر اساس قیمت بسته‌شدن بازارهای انرژی، SR و RR تعیین می‌گردد. برای گریز از مشکل نفرین ابعاد<sup>۱</sup> نیز از طریق گسسته‌سازی، تعداد محدودی حالت بین قیمت کف و قیمت سقف بازارهای انرژی، SR و RR در نظر گرفته می‌شوند. اگر محدوده قیمت در بازارهای انرژی، SR و RR به ترتیب به  $m, n, p$  بازه کوچکتر تقسیم شود، آنگاه تعداد حالات موجود در فضای حالت<sup>۲</sup> برابر  $p.m.n$  خواهد بود. حالت  $s$ ، به معنای قرار گرفتن قیمت بسته‌شدن بازارهای انرژی، SR و RR در بازه‌های متناظر در فضای حالت می‌باشد.

در این مقاله فرض می‌شود شرکت‌کنندگان بازار تمامی ظرفیت حداکثر خود را به بازار عرضه می‌کنند و پنهان‌سازی ظرفیت وجود ندارد. لذا هر عامل باید تنها برای پیشنهاد قیمت خود در مناقصات بازارهای انرژی، SR و RR برای هر ساعت تصمیم‌گیری نماید. بار دیگر از طریق گسسته‌سازی، تعداد محدودی عمل برای هر عامل بین هزینه تامین و قیمت سقف بازارهای انرژی، SR و RR در نظر گرفته می‌شوند. اگر محدوده قیمت پیشنهادی هر عامل در بازارهای انرژی، SR و RR به ترتیب به  $i, j, k$  بازه کوچکتر تقسیم شود، آنگاه تعداد عمل‌های موجود در فضای عمل<sup>۳</sup> مربوطه برابر  $k.j.i$  خواهد بود. اتخاذ عمل  $a$  به معنای انتخاب قیمت‌های تصادفی برای بازارهای انرژی، SR و RR از بازه‌های متناظر در فضای عمل خواهد بود.

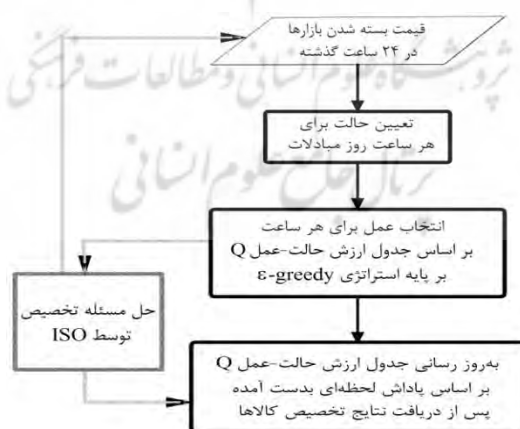
پاداش هر عامل در ساعت  $h$  ام تحت عمل  $a$  و حالت  $s$  به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود [18]:

- 1) Curse of Dimensionality
- 2) State Space
- 3) Action Space

$$r_h(s, a) = r(h) \times \left( \frac{AUR(h)}{TUR(h)} \right)^b \quad (۸)$$

که  $r(h)$  برابر مبلغ دریافتی عامل در ساعت  $h$  ام منهای هزینه‌های تامین در آن ساعت،  $TUR(h)$  نرخ بکارگیری ظرفیت<sup>۱</sup> مطلوب در ساعت  $h$  ام،  $AUR(h)$  نرخ بکارگیری ظرفیت واقعی در ساعت  $h$  ام و  $b$  بیانگر اهمیت نرخ بکارگیری ظرفیت می‌باشد. شایان ذکر است  $AUR(h)$  برابر مجموع ظرفیت تخصیصی به عامل در بازارها در ساعت  $h$  ام تقسیم بر حداکثر توانایی تولید آن است.

مراحل اجرای الگوریتم یادگیری و قیمت‌دهی هر عامل در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند. بر اساس مراحل نمایش داده شده در شکل (۱)، در شروع هر روز مبادلات برق، هر عامل بر اساس قیمت بسته‌شدن بازارهای انرژی و انواع رزرو مربوط به ۲۴ ساعت گذشته، حالت هر ساعت آن روز را تعیین می‌کند. پس از تعیین حالت، هر عامل با توجه به جدول ارزش حالت-عمل  $(Q(s, a))$  در هر ساعت، عملی را برای آن ساعت بر اساس راهبرد  $\epsilon$ -greedy انتخاب می‌نماید. در این راهبرد، با احتمال  $1-\epsilon$  عمل مربوط به بهترین ارزش  $Q$  انتخاب می‌شود و با احتمال  $\epsilon$  بدون توجه به مقادیر ارزش  $Q$ ، انتخاب تصادفی عمل انجام خواهد شد. در پایان هر روز مبادلات برق، پس از آنکه مساله بهینه‌سازی تخصیص کالاها حل شد و میزان توان تخصیص‌یافته به هر عامل در بازارهای انرژی و انواع رزرو و همچنین قیمت بسته‌شدن بازارها در هر ساعت مشخص شد، هر عامل با توجه به پاداش لحظه‌ای بدست‌آمده از رابطه (۸)، مقادیر جدول ارزش حالت-عمل  $(Q(s, a))$  را بر اساس رابطه (۷) به‌روز می‌کند.



شکل (۱) مراحل اجرای الگوریتم یادگیری و قیمت‌دهی هر عامل در سیستم چندعاملی

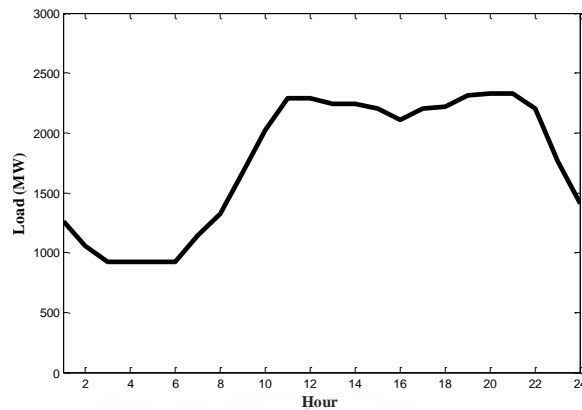
1) Utilization Rate

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 مورد مطالعه شامل ۱۷ تولیدکننده با مشخصات هزینه‌ای و ظرفیتی گوناگون می‌باشد. اطلاعات هزینه‌ای و ظرفیتی واحدهای تولیدی و پارامترهای رفتاری برای هر یک از عامل‌های مربوط در جدول (۱) ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که مقادیر پارامترهای رفتاری جز  $\alpha$ ، هم در مرحله یادگیری اولیه و هم مرحله قیمت‌دهی اصلی عامل‌ها به کار گرفته می‌شوند. مقدار  $\alpha$  ارائه شده در جدول (۱)، تنها در مرحله قیمت‌دهی اصلی عامل‌ها استفاده می‌شود و در مرحله یادگیری اولیه عامل‌ها، مقدار عکس تعداد دفعات رجوع به جفت حالت-عمل  $(s,a)$  تا روز مبادله مدنظر قرار می‌گیرد [3,9,18]. بار فصلی پیش‌بینی شده برای ۲۴ ساعت روزانه نیز در شکل (۲) نمایش داده شده‌است. در ضمن، ظرفیت مورد نیاز سیستم برای هر نوع کالای SR و RR برابر ۱۵ درصد مقدار بار پیش‌بینی شده در هر ساعت می‌باشد. کف قیمت انرژی، SR و RR در سیستم مورد مطالعه برابر صفر است. سقف قیمت در بازارهای انرژی، SR و RR نیز به ترتیب برابر  $150\$/MWh$ ،  $100\$/MW$  و  $100\$/MW$  در نظر گرفته شده‌است. برای تعیین حالت، محدوده قیمت در هر یک از بازارهای انرژی، SR و RR به ۵ بازه بین کف و سقف قیمت مربوط تقسیم می‌شود. همچنین برای قیمت‌دهی هر عامل در بازارهای انرژی، SR و RR، ۵ بازه بین هزینه تامین و سقف قیمت مربوط در نظر گرفته می‌شوند. بدین ترتیب، فضای حالت شامل ۲۵ حالت و فضای عمل هر عامل شامل ۲۵ عمل می‌باشد.

جدول (۱) مشخصات فنی و هزینه‌ای واحدهای تولیدی و پارامترهای رفتاری عامل‌های مربوط در سیستم مورد مطالعه

Gen. No.	حداقل توانایی تولید (MW)	حداکثر توانایی تولید (MW)	حداکثر توانایی تامین (MW) SR	حداکثر توانایی تامین (MW) RR	هزینه تولید انرژی (\$/MWh)	هزینه تامین SR (\$/MW)	هزینه تامین RR (\$/MW)	نرخ یادگیری $\alpha$	ضریب تنزیل $\gamma$	در $\epsilon$ راهبرد 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



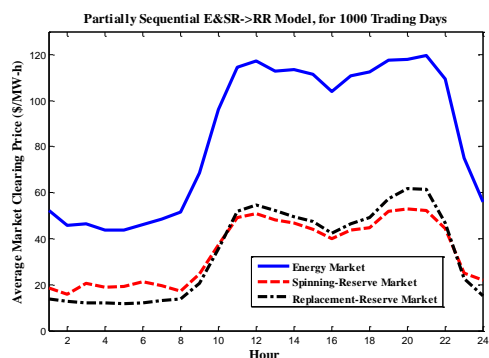
شکل ۲) بار پیش‌بینی شده فصلی توسط ISO برای ۲۴ ساعت

همانطور که اشاره شد، چهار مدل بهینه‌سازی تخصیص بر روی سیستم نمونه مورد ارزیابی و مقایسه قرار خواهند گرفت. در ابتدای امر و در مرحله یادگیری اولیه، برای بدست آوردن مقادیر اولیه مناسب برای جدول ارزش حالت-عمل (جدول مقادیر  $Q(s,a)$ )، الگوریتم قیمت‌دهی عامل‌ها برای ۵۰۰۰ روز مبادلات بازار برق و تحت هر یک از چهار مدل فرمول‌بندی مساله بهینه‌سازی تخصیص به‌طور جداگانه اجرا شده‌است. مقادیر ارزش حالت-عمل (جدول مقادیر  $Q(s,a)$ ) بدست آمده در فرآیند یادگیری اولیه، در مرحله قیمت‌دهی اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

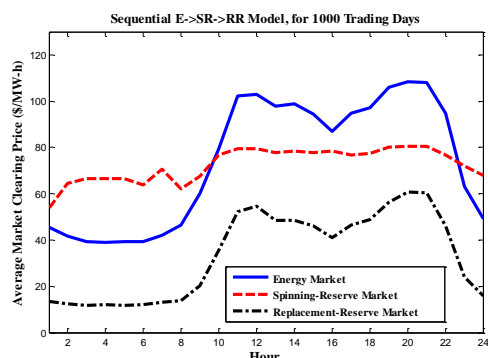
در مرحله قیمت‌دهی اصلی، الگوریتم قیمت‌دهی عامل‌ها در محیط بازار، تحت هر یک از چهار مدل فرمول‌بندی مساله بهینه‌سازی تخصیص به‌طور جداگانه و برای ۱۰۰۰ روز مبادلات اجرا شده‌است.

#### تاثیر مدل تخصیص بر قیمت بسته‌شدن بازارها و وقوع وارونگی قیمت

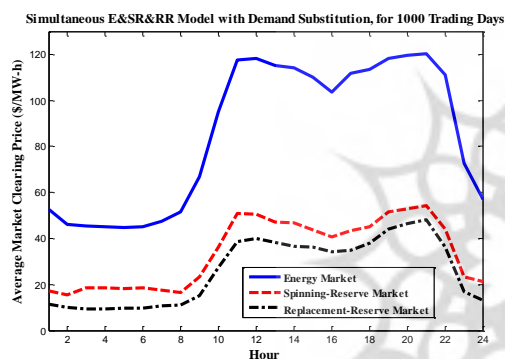
پس از اجرای شبیه‌سازی برای ۱۰۰۰ روز مبادلات برق، یک متوسط‌گیری انجام شده و متوسط قیمت بسته‌شدن بازارهای انرژی، SR و RR تحت چهار مدل بهینه‌سازی تخصیص به دست آمده‌است. شکل‌های (۳-الف) الی (۳-د)، متوسط قیمت بسته‌شدن سه بازار انرژی، SR و RR را به ترتیب تحت مدل‌های بهینه‌سازی پشت‌سرهم، به صورت جزئی پشت‌سرهم، همزمان بدون امکان جانشینی تقاضا و همزمان با در نظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا نمایش می‌دهند.



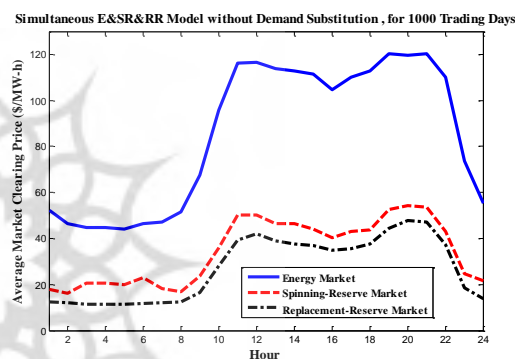
(ب)



(الف)



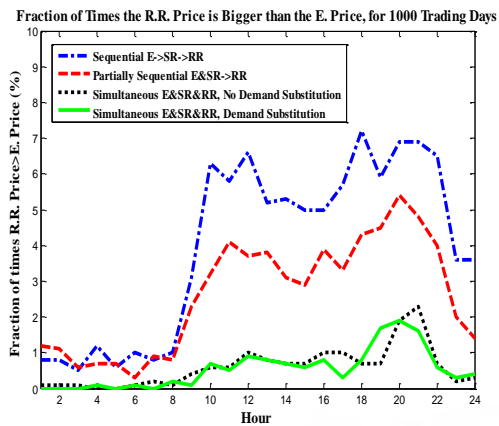
(د)



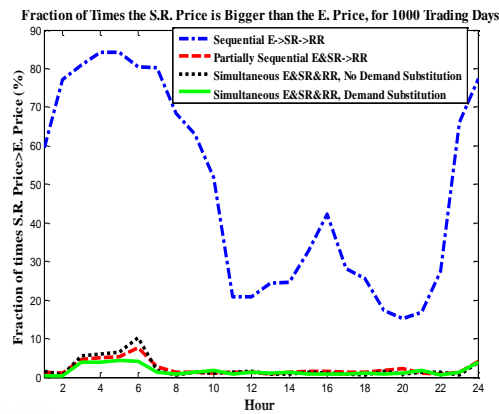
(ج)

شکل ۳) متوسط قیمت بسته شدن بازارها تحت مدل بهینه سازی: الف- پشت سرهم، ب- به صورت جزئی پشت سرهم، ج- همزمان و بدون امکان جانشینی تقاضا، د- همزمان و با در نظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا

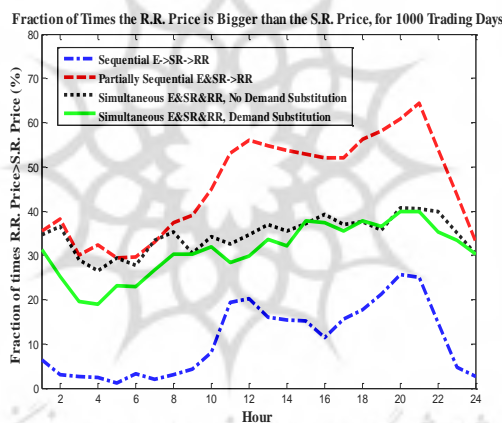
همانطور که در شکل (۳-الف) مشاهده می شود، در مدل تخصیص پشت سرهم، قیمت متوسط SR در برخی ساعات از قیمت متوسط انرژی بیشتر شده است. با بررسی شکل (۳-ب) نیز می توان دریافت که در مدل تخصیص به صورت جزئی پشت سرهم، قیمت متوسط RR در برخی از ساعات شبانه روز از قیمت متوسط SR فراتر رفته است. به عبارت دیگر، در هر دو 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-الف) الی (۳-د) مقادیر متوسط قیمت هستند. لذا برای بررسی دقیق تر، درصد دفعات وقوع وارونگی قیمت در ۱۰۰۰ روز مبادلات و تحت چهار مدل بهینه سازی تخصیص در شکل های (۴-الف) الی (۴-ج) نمایش داده شده است.



(ب)



(الف)



(ج)

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

شکل ۴-الف) درصد دفعاتی را که قیمت SR از قیمت انرژی بیشتر شده است برای هر ساعت شبانه روز نشان می‌دهد. از نتایج ارائه شده در این شکل می‌توان دریافت که در مدل بهینه‌سازی پشت‌سرهم، 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 بهینه‌سازی همزمان با امکان جانشینی تقاضا بوده است.

درصد دفعاتی که قیمت RR از قیمت انرژی بیشتر شده، برای هر ساعت شبانه روز در شکل ۴-ب) نمایش داده شده است. بر اساس نتایج این شکل می‌توان نتیجه گرفت که درصد وقوع وارونگی قیمت بین انرژی و RR در هر چهار

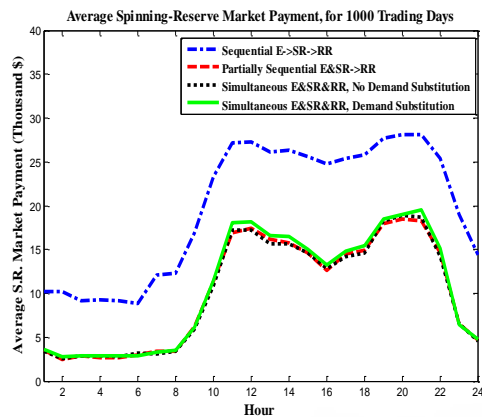
مدل تخصیص نسبتاً پایین می‌باشد. البته تعداد دفعات وقوع این نوع وارونگی در مدل‌های تخصیص پشت‌سرهیم نسبت به دو مدل تخصیص همزمان بیشتر بوده‌است.

همچنین شکل (۴-ج) درصد دفعاتی را که قیمت RR از قیمت SR بیشتر شده‌است برای هر ساعت شبانه روز ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج این شکل می‌توان دریافت که بیشترین تعداد دفعات وقوع وارونگی قیمت بین SR و RR مربوط به مدل بهینه‌سازی به‌صورت جزئی پشت‌سرهیم بوده‌است. این درحالی است که وارونگی قیمت بین SR و RR در مدل بهینه‌سازی پشت‌سرهیم کمتر رخ داده‌است. همچنین با مقایسه نتایج مربوط به دو مدل بهینه‌سازی همزمان، مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا باعث کاهش تعداد دفعات وقوع وارونگی قیمت بین SR و RR شده‌است.

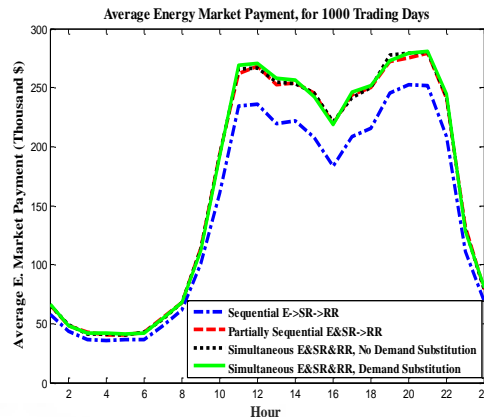
بر اساس نتایج شکل‌های (۴-الف) الی (۴-ج) می‌توان نتیجه گرفت که امکان وقوع وارونگی قیمت در هر چهار مدل بهینه‌سازی تخصیص وجود دارد. البته مدل بهینه‌سازی همزمان با در نظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا به‌لحاظ کاهش دفعات وقوع وارونگی قیمت، در اکثر مواقع نسبت به سه مدل دیگر برتری داشته‌است.

#### تأثیر مدل تخصیص بر مبالغ پرداختی

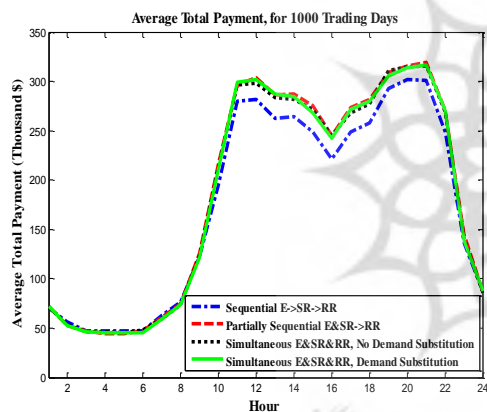
پس از اجرای شبیه‌سازی برای ۱۰۰۰ روز مبادلات برق، متوسط مبالغ پرداختی در بازارها در این ۱۰۰۰ روز محاسبه شده‌است. شکل‌های (۵-الف) الی (۵-ج) به ترتیب متوسط پرداختی بابت انرژی، SR و RR را تحت هر چهار مدل تخصیص نمایش می‌دهند. بر اساس شکل (۵-الف) می‌توان دریافت که متوسط پرداختی بابت انرژی در مدل پشت‌سرهیم کمتر از سه مدل دیگر است. همچنین در شکل (۵-ب) مشاهده می‌شود متوسط پرداختی بابت SR در مدل پشت‌سرهیم بیشتر از سه مدل دیگر می‌باشد. بر اساس شکل (۵-ج) نیز می‌توان دریافت که متوسط پرداختی بابت RR در دو مدل پشت‌سرهیم بیشتر از دو مدل همزمان است، ضمن آنکه کمترین میزان پرداختی بابت RR در مدل همزمان با امکان جانشینی تقاضا رخ داده‌است. شکل (۵-د)، متوسط مجموع پرداختی‌ها در سه بازار را تحت چهار مدل تخصیص نشان می‌دهد. بر اساس نتایج شکل (۵-د) می‌توان دریافت که متوسط مجموع پرداختی‌ها در سه بازار تحت مدل بهینه‌سازی پشت‌سرهیم کمتر از سه مدل دیگر می‌باشد. باید توجه نمود که در سیستم مورد مطالعه، چون پرداختی به برندگان طبق قانون تسویه یکنواخت و بر اساس بالاترین قیمت پذیرفته‌شده در هر بازار محاسبه می‌شود، متاثر نبودن بازار انرژی از دیگر بازارها، به دلیل زیاد بودن میزان تقاضا در این بازار می‌تواند میزان کل پرداختی به برندگان بازارها را کاهش دهد.



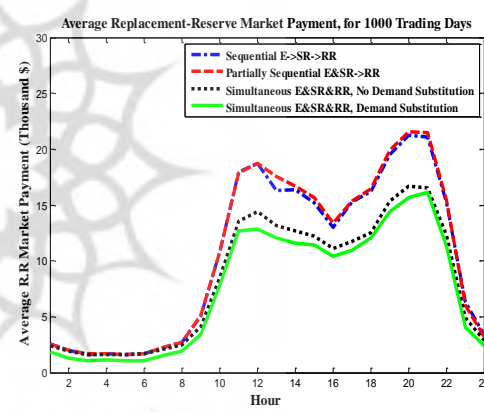
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

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 در نظر گرفته شد. یکی دیگر از انواع قوانین تسویه که در بازارهایی همچون ایران رعایت می‌شود، قانون تسویه تمایزی<sup>۱</sup> است. بر اساس قانون تسویه تمایزی، پرداخت‌ها به برندگان مناقصات بر پایه قیمت پیشنهادی خود آنها صورت می‌گیرد. 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 حداقل‌سازی هزینه اجتماعی، مساله بهینه‌سازی 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 می‌شود 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.

### نتیجه‌گیری

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

الف- با بررسی متوسط قیمت بسته‌شدن بازارها مشخص گردید که تحت هر دو مدل تخصیص پشت‌سرهم، سیستم مستعد وقوع وارونگی قیمت است در حالی که تحت دو مدل تخصیص همزمان، احتمال بروز وارونگی قیمت به‌طور متوسط کم است.

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

ج- دفعات وقوع وارونگی قیمت بین انرژی و RR تحت هر دو مدل تخصیص پشت‌سرهم نسبت به دو مدل تخصیص همزمان بیشتر بوده‌است.

د- بیشترین دفعات وقوع وارونگی قیمت بین SR و RR مربوط به مدل تخصیص به‌صورت جزئی پشت‌سرهم بوده‌است. این در حالی است که وارونگی قیمت بین SR و RR در مدل تخصیص پشت‌سرهم کمتر رخ داده‌است. همچنین با مقایسه نتایج مربوط به دو مدل تخصیص همزمان می‌توان نتیجه گرفت که در نظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا می‌تواند باعث کاهش احتمال وقوع وارونگی قیمت بین SR و RR شود.

ه- 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 بدست‌آمده، انتخاب یک مدل یا طرح می‌تواند 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 می‌تواند با افزایش مبلغ پرداختی کل در بازارها همراه باشد. بنابراین، قانون‌گذار و طراح بازار باید بین افزایش بهره‌وری بازار و کاستن هزینه‌ها یک تعادل منطقی ایجاد کند و مدل مطلوب را بر اساس سیاست‌های کلی و ویژگی‌ها و شرایط سیستم انتخاب نماید.

### سپاسگزاری

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., Adaptive 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., 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, *IEEE 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.

