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

محمد فرشاد[۱]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۹/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۲/۹

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 پشت‌سرهم و همزمان انرژی، رزرو چرخشی و رزرو جایگزین بر رفتار بازیگران، احتمال وقوع وارونگی 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 پشت‌سرهم 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 وارونگی 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، وارونگی قیمت، یادگیری تقویتی

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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 شرکت‌کنندگان 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 مدل‌کردن هر یک از بازیگران بازار، استفاده از عامل‌های هوشمند[1] است. این عامل‌های هوشمند می‌توانند 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[2] نیز 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 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 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 قیمت‌گذاری تنها با درنظر گرفتن بازار انرژی انجام شده‌است. هر چند در مواردی همچون [1,2,5,15,16,19]، اثر برخی بازارهای خدمات جانبی نیز در مطالعات و شبیه‌سازی‌های بازار برق لحاظ شده‌است، ولی 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[3] برای شبیه‌سازی بازارهای انرژی و رزرو پیشنهاد شده و از طریق آن، تاثیر لحاظ هزینه فرصت از دست‌رفته[4] 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 به‌صورت یک قانون مشخص و شفاف ارائه گردد. انتخاب هر یک از مدل‌های تخصیص ممکن، از جمله شکل‌های مختلف تخصیص پشت‌سرهم و همزمان، می‌تواند تاثیر قابل‌توجهی بر رفتار بازیگران،

1) Intelligent Agents
2) Ancillary Services
3) Multi-Agent System
4) Lost Opportunity Cost

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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[1] 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 به‌همراه 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 باکیفیت 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[2] 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)[3] و ظرفیت رزرو جایگزین (RR)[4]، 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

در فضای موردبحث، اجرای مناقصات بازارهای برق بر عهده بهره‌بردار مستقل سیستم (ISO)[1] است. همچنین مناقصات بازارهای انرژی، SR و RR به صورت روز قبل[2] 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[3] [10] و برای ۲۴ ساعت روز بهره‌برداری حل کرده و میزان و نوع ظرفیت تخصیص‌یافته برای هر ساعت روز بهره‌برداری را به شرکت‌کنندگان اعلام می‌نماید. برندگان بازارهای SR و RR، مبلغ آمادگی[4] رزرو [6] را متناسب با مقدار ظرفیت تخصیص‌یافته به آنها دریافت می‌کنند. در سیستم موردنظر، قانون تسویه یکنواخت[5] برای تعیین قیمت و محاسبه پرداختی به برندگان بازارها اجرا می‌شود.

در این مقاله، چهار مدل مساله بهینه‌سازی تخصیص در فضای ترسیم‌شده 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[6]

در این مدل، مساله بهینه‌سازی تخصیص به صورت پشت‌سرهم و به‌ترتیب 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.

$$\underset{\alpha_i, P_i}{Min} \sum_i \alpha_i . P_i . \rho e_i \qquad (۱–الف)$$

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

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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

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

در روابط فوق، P_i مقدار برنده‌شده واحد i ام در بازار انرژی، ρe_i قیمت پیشنهادی واحد i ام در بازار انرژی، α_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 می‌باشد.

پس از تخصیص انرژی، برندگان بازار SR از بین ظرفیت‌های باقیمانده مشخص می‌شوند. فرمول‌بندی این مساله بهینه‌سازی به‌صورت روابط (۲-الف)-(۲-د) است که رابطه (۲-الف) تابع هدف و روابط (۲-ب)-(۲-د) قیود می‌باشند.

$$\underset{SR_i}{Min} \sum_i \alpha_i^* . SR_i . \rho sr_i \quad (۲-الف)$$

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

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

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

در روابط فوق، SR_i مقدار برنده‌شده واحد i ام در بازار رزرو چرخشی و ρsr_i قیمت پیشنهادی واحد i ام در بازار رزرو چرخشی است. همچنین، α_i^* و P_i^* مقادیر بهینه بدست‌آمده از حل مساله تخصیص انرژی (۱-الف)-(۱-د) می‌باشند.

در نهایت امر، مساله تخصیص RR بر اساس فرمول‌بندی (۳-الف)-(۳-د) حل می‌شود. در این فرمول‌بندی که برای یک ساعت ارائه شده‌است، رابطه (۳-الف) تابع هدف مساله بهینه‌سازی و روابط (۳-ب)- (۳-د) قیود را بیان می‌کنند.

$$\underset{RR_i}{Min} \sum_i (RR_i . \rho rr_i) \quad (۳-الف)$$

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

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

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

در فرمول‌بندی فوق، RR_i مقدار برنده‌شده واحد i ام در بازار رزرو جایگزین، ρrr_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، α_i^*، P_i^* و SR_i^* مقادیر بهینه بدست‌آمده از حل مساله تخصیص انرژی (۱-الف)-(۱-د) و مساله تخصیص SR (۲-الف)-(۲-د) می‌باشند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

مدل بهینه‌سازی به صورت جزئی پشت‌سرهم[1]

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 به‌دلیل ارتباط داخلی قوی، یک مجموعه درنظر گرفته شده‌اند. در این مدل، ابتدا تخصیص انرژی و SR به‌صورت 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.

$$\underset{\alpha_i,P_i,SR_i}{Min}\sum_i(\alpha_i.P_i.\rho e_i+\alpha_i.SR_i.\rho sr_i) \quad (۴\text{-الف})$$

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

$$\alpha_i.P_i^{\min}\le P_i \quad (۴\text{-ج})$$

$$0\le SR_i\le\alpha_i.SR_i^{\max} \quad (۴\text{-د})$$

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

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

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[2]

در این مدل، هر سه کالای انرژی، SR و RR به‌صورت 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.

$$\underset{\alpha_i,P_i,SR_i,RR_i}{Min}\sum_i(\alpha_i.P_i.\rho e_i+\alpha_i.SR_i.\rho sr_i+RR_i.\rho rr_i) \quad (۵\text{-الف})$$

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

$$\alpha_i.P_i^{\min}\le P_i\le\alpha_i.P_i^{\max} \quad (۵\text{-ج})$$

$$0\le SR_i\le\alpha_i.SR_i^{\max} \quad (۵\text{-د})$$

$$0\le RR_i\le RR_i^{\max} \quad (۵\text{-هـ})$$

1) Partially Sequential Optimization Model
2) Simultaneous Optimization Model without Demand Substitution

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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

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

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

همانطور که در فرمول‌بندی فوق مشاهده می‌شود، هر نوع کالای رزرو دقیقاً به میزان موردنیاز تعیین‌شده تامین خواهد شد. به عبارت دیگر، امکان هیچگونه جانشینی تقاضای[1] [10] رزرو وجود ندارد. کیفیت کالای رزرو معمولاً با توجه به زمان پاسخ‌دهی و قابلیت اطمینان تامین آن تعیین می‌گردد. فراهم‌بودن 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 کیفیت‌تری است، اضافه نمود.

مدل بهینه‌سازی همزمان با درنظر گرفتن جانشینی تقاضا[2]

در این مدل نیز هر سه کالای انرژی، SR و RR به‌صورت همزمان و در قالب یک مساله بهینه‌سازی تخصیص می‌یابند. فرمول‌بندی مساله بهینه‌سازی تخصیص همزمان با درنظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا، برای یک ساعت روز بهره‌برداری، در روابط (۶–الف)–(۶–ح) آمده‌است. رابطه (۶–الف) تابع هدف مساله و روابط (۶–ب)–(۶–ح) قیود مساله را نمایش می‌دهند.

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

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

$$\alpha_i.P_i^{\min} \le P_i \le \alpha_i.P_i^{\max} \quad (۶–ج)$$

$$0 \le SR_i \le \alpha_i.SR_i^{\max} \quad (۶–د)$$

$$0 \le RR_i \le RR_i^{\max} \quad (۶–هـ)$$

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

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

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

1) Demand Substitution
2) Simultaneous Optimization Model Considering Demand Substitution

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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، به‌جای 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,…) با محیط خود در تعامل است. مجموعه‌های متناهی حالت‌ها و عمل‌ها برای این عامل $S=\{s_1,s_2 \ldots,s_g\}$ و $A=\{a_1,a_2,\ldots,a_w\}$ 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]:

$$Q(s_t,a_t) \leftarrow Q(s_t,a_t) + \alpha[r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1},a) - Q(s_t,a_t)] \qquad (۷)$$

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 می‌کند به‌نحوی‌که 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 γ نیز رفتار آینده‌نگری عامل را منعکس می‌کند به گونه‌ای که هر چه مقدار این پارامتر برای یک عامل بزرگتر درنظر 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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 می‌شوند. کلیات روش شبیه‌سازی مورد استفاده در این مقاله مشابه شیوه ارائه‌شده 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 درنظر گرفته شده‌است، حالت محیط در هر ساعت بر اساس قیمت بسته‌شدن بازارهای انرژی، SR و RR تعیین می‌گردد. برای گریز از مشکل نفرین ابعاد[1] نیز از طریق گسسته‌سازی، تعداد محدودی حالت بین قیمت کف و قیمت سقف بازارهای انرژی، SR و RR درنظر گرفته می‌شوند. اگر محدوده قیمت در بازارهای انرژی، SR و RR به‌ترتیب به n، m و p بازه کوچکتر تقسیم شود، آنگاه تعداد حالات موجود در فضای حالت[2] 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 درنظر گرفته می‌شوند. اگر محدوده قیمت پیشنهادی هر عامل در بازارهای انرژی، SR و RR به‌ترتیب به i، j و k بازه کوچکتر تقسیم شود، آنگاه تعداد عمل‌های موجود در فضای عمل[3] 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]:

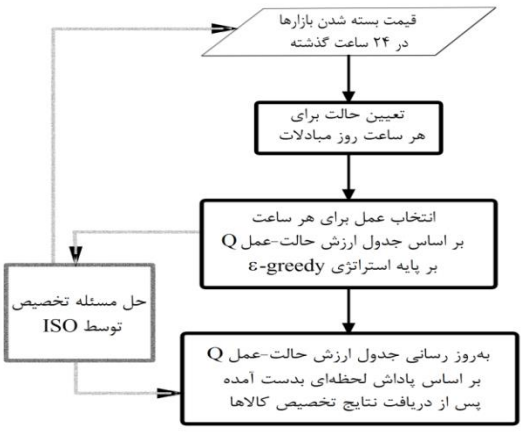
1) Curse of Dimensionality
2) State Space
3) Action Space

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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

که $r(h)$ برابر مبلغ دریافتی عامل در ساعت h ام منهای هزینه‌های تـامین در آن سـاعت، $TUR(h)$ نـرخ بکـارگیری ظرفیت[1] 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 بـر 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 مربـوط به ۲۴ ساعت گذشته، حالت هر ساعت آن روز را تعیین می‌کند. پس از تعیین حالت، هر عامـل بـا توجـه بـه جـدول ارزش حالت–عمل ($Q(s,a)$) در هر ساعت، عملی را برای آن ساعت بر اسـاس راهبـرد ε-greedy انتخـاب مـی‌نمایـد. در ایـن راهبرد، با احتمال ε-1 عمل مربوط به بهترین ارزش Q انتخاب می‌شود و با احتمال ε بـدون توجـه بـه مقـادیر 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 بسـته‌شـدن بازارهـا در هـر ساعت مشخص شد، هر عامل با توجه به پاداش لحظه‌ای بدسـت‌آمـده از رابطـه (۸)، مقـادیر جـدول ارزش حالـت–عمـل ($Q(s,a)$) را بر اساس رابطه (۷) به‌روز می‌کند.



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

1) Utilization Rate

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

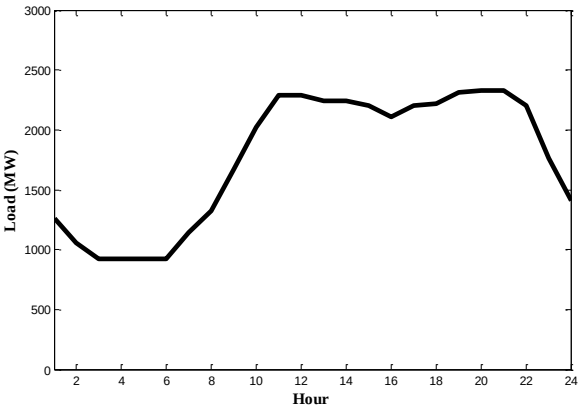
ارزیابی مدل‌های تخصیص بر روی سیستم نمونه

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 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 α، هم در مرحله یادگیری اولیه و هم مرحله قیمت‌دهی اصلی عامل‌ها به‌کار گرفته می‌شوند. مقدار α ارائه‌شده 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 پیش‌بینی‌شده برای ۲۴ ساعت روزانه نیز در شکل (۲) نمایش داده شده‌است. در ضمن، ظرفیت موردنیاز سیستم برای هر نوع کالای SR و RR برابر ۱۵ درصد مقدار بار پیش‌بینی‌شده در هر ساعت می‌باشد. کف قیمت انرژی، SR و RR در سیستم موردمطالعه برابر صفر است. سقف قیمت در بازارهای انرژی، SR و RR نیز به‌ترتیب برابر 150$/MWh، 100$/MW و 100$/MW درنظر 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 درنظر 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 موردمطالعه

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 α	ضریب تنزیل γ	ε در راهبرد ε- 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



شکل ۲) بار پیش‌بینی‌شده فصلی توسط ISO برای ۲۴ ساعت

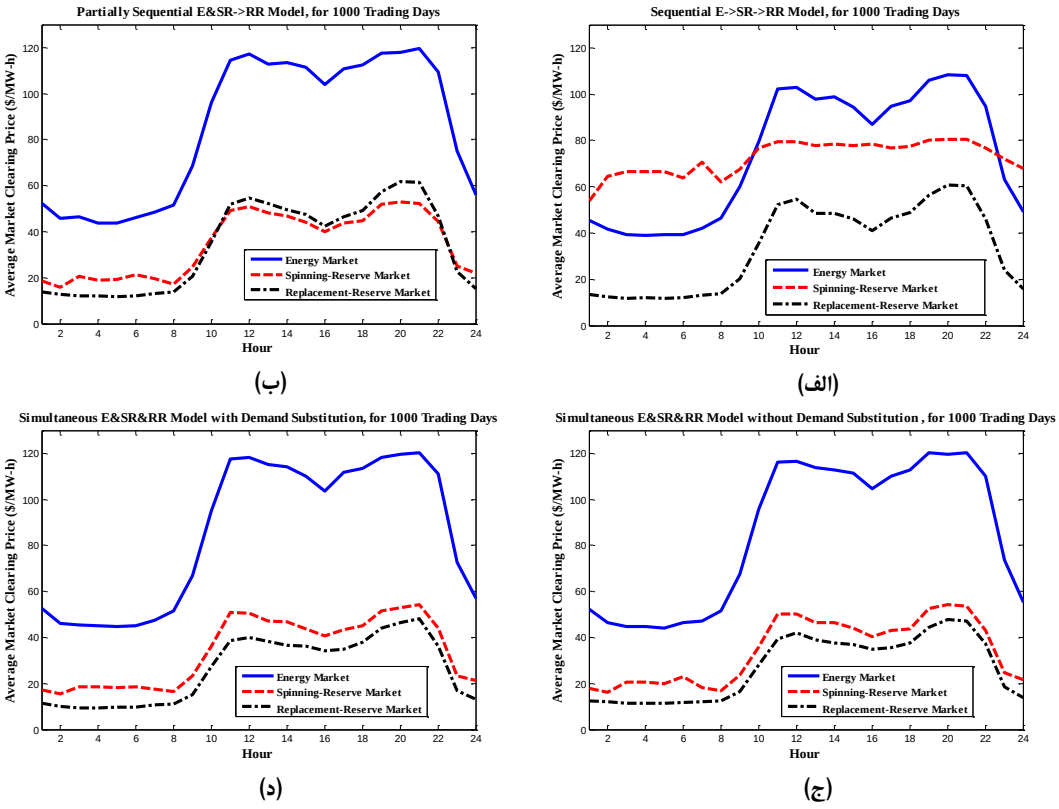
همانطور که اشاره شد، چهار مدل بهینه‌سازی تخصیص بر روی سیستم نمونه مورد ارزیابی و مقایسه قرار خواهند گرفت. در ابتدای امر و در مرحله یادگیری اولیه، برای بدست آوردن مقادیر اولیه مناسب برای جدول ارزش حالت–عمل (جدول مقادیر $Q(s,a)$)، الگوریتم قیمت‌دهی عامل‌ها برای ۵۰۰۰ روز مبادلات بازار برق و تحت هر یک از چهار مدل فرمول‌بندی مساله بهینه‌سازی تخصیص به‌طور جداگانه اجرا شده‌است. مقادیر ارزش حالت–عمل (جدول مقادیر $Q(s,a)$) بدست‌آمده در فرآیند یادگیری اولیه، در مرحله قیمت‌دهی اصلی مورداستفاده 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 به‌ترتیب تحت مدل‌های بهینه‌سازی پشت‌سرهم، به‌صورت جزئی پشت‌سرهم، همزمان بدون امکان جانشینی تقاضا و همزمان با درنظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا نمایش می‌دهند.

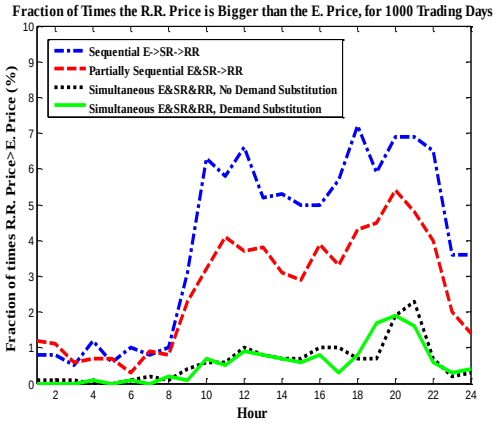
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



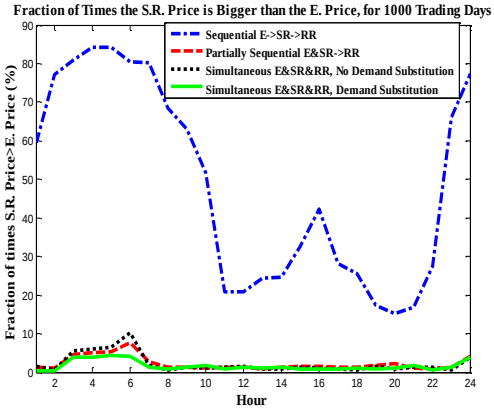
شکل ۳) متوسط قیمت بسته‌شدن بازارها تحت مدل بهینه‌سازی: الف- پشت‌سرهم، ب- به‌صورت جزئی پشت‌سرهم، ج- همزمان و بدون امکان جانشینی تقاضا، د- همزمان و با درنظر گرفتن امکان جانشینی تقاضا

همانطور که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود، در مدل تخصیص پشت‌سرهم، قیمت متوسط SR در برخی ساعات از قیمت متوسط انرژی بیشتر شده‌است. با بررسی شکل (۳-ب) نیز می‌توان دریافت که در مدل تخصیص به‌صورت جزئی پشت‌سرهم، قیمت متوسط RR در برخی از ساعات شبانه‌روز از قیمت متوسط SR فراتر رفته‌است. به‌عبارت دیگر، در هر دو مدل تخصیص پشت‌سرهم، بازار برق مستعد وقوع وارونگی قیمت می‌باشد. همانگونه که در شکل‌های (۳-ج) و (۳-د) مشاهده می‌شود، در مدل‌های تخصیص همزمان به‌لحاظ قیمت متوسط وارونگی رخ نداده است. البته مقادیر نشان داده شده در شکل‌های (۳-الف) الی (۳-د) مقادیر متوسط قیمت هستند. لذا برای بررسی دقیق‌تر، درصد دفعات وقوع وارونگی قیمت در ۱۰۰۰ روز مبادلات و تحت چهار مدل بهینه‌سازی تخصیص در شکل‌های (۴-الف) الی (۴-ج) نمایش داده شده‌است.

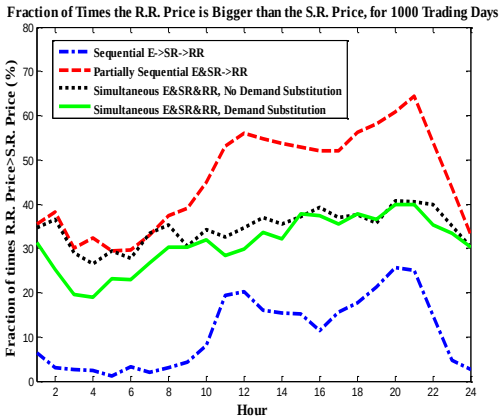
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



(ب)



(الف)



(ج)

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 (۴-الف) درصد دفعاتی را که قیمت SR از قیمت انرژی بیشتر شده‌است برای هر ساعت شبانه‌روز نشان می‌دهد. از نتایج ارائه‌شده در این شکل می‌توان دریافت که در مدل بهینه‌سازی پشت‌سرهم، در اکثر اوقات وارونگی قیمت بین انرژی و SR رخ داده‌است. همچنین کمترین تعداد وقوع وارونگی قیمت بین انرژی و SR نیز مربوط به مدل بهینه‌سازی همزمان با امکان جانشینی تقاضا بوده‌است.

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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

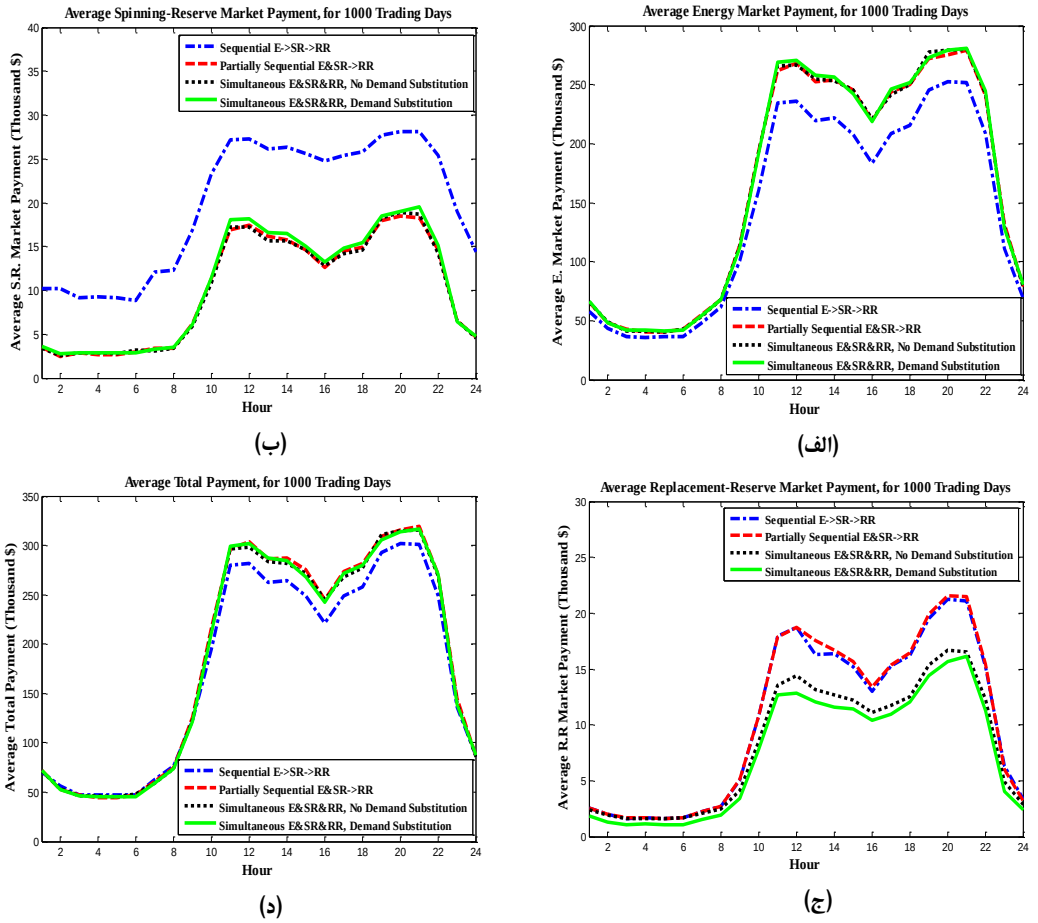
همچنین شکل (۴–ج) درصد دفعاتی را که قیمت RR از قیمت SR بیشتر شده‌است برای هر ساعت شبانه روز ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج این شکل می‌توان دریافت که بیشترین تعداد دفعات وقوع وارونگی قیمت بین SR و RR مربوط به مدل بهینه‌سازی به‌صورت جزئی پشت‌سرهم بوده‌است. این درحالی است که وارونگی قیمت بین SR و RR در مدل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

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 شده‌است. شکل‌های (۵–الف) الی (۵–ج) به‌ترتیب 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 پشت‌سرهم کمتر از سه مدل دیگر است. همچنین در شکل (۵–ب) مشاهده می‌شود متوسط پرداختی بابت SR در مدل پشت‌سرهم بیشتر از سه مدل دیگر می‌باشد. بر اساس شکل (۵–ج) نیز می‌توان دریافت که متوسط پرداختی بابت RR در دو مدل پشت‌سرهم 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 پشت‌سرهم کمتر از سه مدل دیگر می‌باشد. باید توجه نمود که در سیستم موردمطالعه، 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، به‌دلیل زیاد بودن میزان تقاضا در این بازار می‌تواند میزان کل پرداختی به برندگان بازارها را کاهش دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



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 به‌صورت یکنواخت درنظر گرفته شد. یکی دیگر از انواع قوانین تسویه که در بازارهایی همچون ایران رعایت می‌شود، قانون تسویه تمایزی[1] 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

پرداختی به برندگان بازارها و تسویه مالی بازار خواهد بود. البته باید دقت نمود که در هنگام شبیه‌سازی بازارهای بـا قـانون تسویه یکنواخت، حالت در هر ساعت بر اساس قیمت بسته شدن بازارها تعیین می‌شد ولی در صورتی که قانون تسویه بازار به‌صورت 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 سیسـتم چنـدعاملی و بـه کمـک الگـوریتم یادگیری تقویتی Q-Learning، چهار مدل بهینه‌سازی تخصیص در یـک سیسـتم نمونـه مـورد مقایسـه و ارزیـابی قـرار 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 پشت‌سـرهم، سیسـتم مستعد وقوع وارونگی قیمت است در حالی که تحت دو مدل تخصیص همزمان، احتمال بروز وارونگی قیمـت بـه‌طـور متوسط کم است.

ب- تحت مدل تخصیص پشت‌سرهم، در اکثر اوقات وارونگی قیمت بین انرژی و SR رخ داده‌اسـت. کمتـرین دفعـات 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 مـدل تخصـیص بـه‌صـورت جزئـی پشـت‌سـرهم بوده‌است. این در حالی است که وارونگی قیمت بین SR و RR در مدل تخصیص پشـت‌سـرهم کمتـر رخ داده‌اسـت. همچنین با مقایسه نتایج مربوط به دو مدل تخصیص همزمان می‌توان نتیجه گرفت که درنظر گرفتن امکان جانشـینی تقاضا می‌تواند 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 بدست‌آمده، انتخاب یک مدل یا طرح می‌توانـد باعـث کـاهش احتمـال وارونگـی قیمـت و افزایش بهره‌وری بازار گردد ولی در مقابل ممکن است هزینه‌های بیشتری را در بخش‌های دیگر تحمیل کنـد. بـه عنـوان

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

[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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

[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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]