Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538



Research Article

Three-Stage Stochastic Modeling for Optimal Scheduling of a Flexible Virtual Power Plant Considering the Inter-Day Market of Responsive Loads

Ehsan Nokandi [a], Saeed Reza Goldani [b], Mostafa Vahedipour-Dahraie*[b, c], and Homa Rashidizadeh-Kermani [c]

[a]*Department of Industrial Economics and Technology Management, Faculty of Economics, Trondheim, Norway*
[b]*Department of Power Electrical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran*
[c] *Research and Innovation Division, Nowocert, Dublin, Ireland*
** corresponding author*

UNCORRECTED PROOF

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2022-03-13
Revised: 2022-05-12
Accepted: 2022-10-19

Keywords:

Flexible virtual power plant,
Demand response,
Electricity market,
Uncertainty,
Stochastic programming,
Load aggregators.

ABSTRACT

This paper proposes a novel framework for the optimal bidding strategy of a flexible virtual power plant (VPP) in the day-ahead market while considering the participation of responsive loads in local energy markets. In the proposed structure, a co-opimization model for energy and reserve scheduling is developed to analyze the impact of inter-day trading of responsive loads on the VPP's profit, taking into account the operators' risk-aversion indices. Moreover, the effect of VPP participation in the local market on its operational behavior in other markets is examined. The results demonstrate how such participation can compensate for the imbalances caused by forecasting errors and significantly reduce the VPP's transactions in the real-time market. The proposed model is formulated as a three-stage stochastic bi-level optimization problem and solved using a stochastic dual dynamic programming approach. Simulation results reveal that participation in the inter-day market can increase the VPP's profit by up to 2.5%, while notably decreasing its real-time market transactions—sometimes nearly to zero.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2024.31282.2495

*** Corresponding author.**
E-mail address: vahedipour_m@birjand.ac.ir

How to cite this article:

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

مدل‌سازی تصادفی سه‌مرحله‌ای برای برنامه‌ریزی نیروگاه مجازی انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن بازار میان‌روزی بارهای پاسخگو

احسان نوکندی[۱]، سعیدرضا گلدانی[۲]، مصطفی واحدی‌پور دهرائی[۲،۳*] و هما رشیدی‌زاده کرمانی[۳]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳

واژگان کلیدی:
نیروگاه مجازی انعطاف‌پذیر،
پاسخگویی بار،
بازار برق،
عدم قطعیت،
برنامه‌ریزی تصادفی،
تجمیعگرهای بار.

چکیده

در این مقاله، ساختار جدیدی برای دستیابی به روش بهینه‌ی پیشنهاددهی نیروگاه مجازی انعطاف‌پذیر در بازار روز آینده با در نظر گرفتن مشارکت بارهای پاسخگو در بازارهای محلی مدل‌سازی شده‌است. در ساختار پیشنهادی، ضمن ارائه مدلی برای برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره، تاثیر مبادلات میان‌روزی بارهای پاسخگو در بهبود میزان سود نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن شاخص‌های ریسک‌پذیری بهره‌برداران ارزیابی و تحلیل شده است. همچنین، میزان تغییر رفتار نیروگاه مجازی در دیگر بازارها ناشی از حضور در بازار محلی نیز مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده‌است تا چه حد مشارکت در این بازار می‌تواند عدم تعادل ناشی از خطای پیش-بینی‌ها را جبران نموده و میزان مبادلات نیروگاه مجازی در بازار زمان‌واقعی را کاهش دهد. مدل پیشنهادی به عنوان یک مسئله دوسطحی برنامه‌ریزی تصادفی سه مرحله‌ای فرمول‌بندی شده و برای حل آن از روش برنامه‌ریزی پویای دوگان تصادفی استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد با مشارکت در بازار میان‌روزی سود نیروگاه مجازی تا ۲/۵درصد افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، حضور در این بازار توانسته است به صورت چشمگیری میزان مبادلات در بازار زمان--واقعی را کاهش داده و حتی در مواردی تقریباً به صفر برساند.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2024.31282.2495

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

UNCORRECTED PROOF

۱-مقدمه

برنامه‌ریزی نیروگاه‌های مجازی همواره با عدم‌قطعیت‌هایی زیادی همراه است که این امر ریسک تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهد. بخش عمده‌ی این عدم‌قطعیت ناشی از نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر، به عنوان اجزای اصلی نیروگاه مجازی، و خطاهای موجود در پیش‌بینی توان تولیدی این واحدها است. به طور معمول، برای کاهش اثرات منفی ناشی از این عدم‌قطعیت‌ها، از تجهیزاتی مانند ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی [۱] و واحدهای تولید توان قابل کنترل [۲] در ساختار نیروگاه مجازی استفاده می‌شود.

*نویسنده مسئول- vahedipour_m@brjand.ac.ir
۱- دانشکده اقتصاد - دپارتمان اقتصاد صنعتی و مدیریت تکنولوژی- ترونداهایم-نروژ
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
۳- مرکز پژوهش و نوآوری، نووسرت-دوبلین-ایرلند.

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

با این حال، در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی روی مسئله‌ی مدیریت سمت تقاضا و تاثیر اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار روی برنامه‌ریزی نیروگاه‌های مجازی صورت گرفته است [۳-۸]. بسیاری از این مطالعات پاسخ‌گویی بار را به روش‌های مبتنی بر قیمت اعمال نموده‌اند [۵-۳] و برخی نیز از روش‌های مبتنی بر تشویق برای ترغیب سمت تقاضا جهت مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار استفاده کرده‌اند [۸-۶]. با این حال، تعداد کمی از این مطالعات نیز هر دو روش مبتنی بر قیمت و مبتنی بر تشویق را برای مشارکت‌دهی بارها در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به کار گرفته‌اند [۲].

در ساختار شبکه‌های هوشمند بازار تبادلات بارهای پاسخگو، یا به طور اختصار بازار DRX، چارچوبی برای خرید و فروش خدمات مربوط به پاسخ‌گویی بار است که در آن فروشندگانی همچون بارهای بزرگ و یا تجمیعگرها و خریدارانی مانند شرکت‌های انتقال و توزیع، ریزشبکه‌ها، نیروگاه‌های مجازی و ... در آن مشارکت می‌کنند. این مبادلات می‌تواند از طریق ساختار حوضچه‌ای[۴] و یا قراردادهای دوجانبه[۵] باشد.

اولین بار، مفهوم DRX در [۹] معرفی گردید که در آن پاسخ‌گویی بار به عنوان کالایی قابل مبادله فرض شد که میان خریدار و فروشنده دادوستد می‌شود. بهره‌بردار این بازار پیشنهادهای مربوط به عرضه و تقاضا را دریافت کرده و بر اساس آن و با هدف بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی تسویه بازار را انجام می‌دهد. فرایند انجام شده در این سازوکار بر اساس مدل مبادلات حوضچه‌ای بوده و قراردادهای دوجانبه پاسخ‌گویی بار در آن لحاظ نشده است. در مدل پیشنهادی [۱۰]، علاوه بر حوضچه پاسخ‌گویی بار، امکان خرید پاسخ-گویی بار برای یک خرده‌فروش[۶] از طریق قراردادهای پیش‌رو، برای بازه زمانی بلندمدت، و قراردادهای مبتنی بر تشویق برای بازه‌ی زمانی کوتاه‌مدت نیز فراهم است. در [۱۰] مدلی احتمالاتی مبتنی بر روش تصمیم‌گیری به‌منظور مشارکت بهینه‌ی یک تولیدکننده توان بادی[۷] (WPP) در بازار رقابتی معرفی گردیده است. در این مدل، WPP در سه بازار روز بعد، میان‌روزی مبادلات بارهای پاسخگو[۸] (IDRX) و لحظه‌ای مشارکت می‌کند. WPPمی‌تواند از طریق حضور در بازار IDRX، عقد قراردادهای دوجانبه و یا مبادلات حوضچه‌ای به خرید DR بپردازد. در [۱۱] نیز مدلی برای نحوه مشارکت تجمیعگران در بازار IDRX پیشنهاد شده که در آن تجمیعگر، در یک برنامه‌ی زمانبندی‌شده، پیشنهادهای خود را بنابر رفتار مصرف‌کنندگان زیرمجموعه‌ی خود تنظیم کرده و به بازار IDRX ارائه می‌دهد. تجمیعگر می‌تواند در دو بازار روز بعد و IDRX شرکت کند. در بازار IDRX، تجمیعگر به عنوان تأمین‌کننده پاسخ‌گویی بار و در نقش یک فروشنده ظاهر می‌شود در حالی که در بازار روز بعد به عنوان یک بار منفی در سمت تقاضا ایفای نقش می‌کند.

در [۱۲]، یک نیروگاه مجازی شامل چندین تجمیعگر بارهای پاسخگو[۹] (DRA) در نظر گرفته شده که هر DRA مجموعه‌ای از واحدهای تولیدی تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر، بارهای انعطاف‌پذیر و غیرانعطاف‌پذیر و نیز تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی است. DRAها پیشنهادهای خود را شامل میزان کاهش مصرف و پیشنهاد قیمت آن به نیروگاه مجازی ارائه داده و نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن این پیشنهادها بهترین تصمیم را برای مشارکت در بازارهای روز بعد و لحظه‌ای اتخاذ می‌نماید. در [۱۳]، به تفاوت واکنش مصرف‌کنندگان مختلف در قبال نرخ‌های تشویقی اعلامی توسط نیروگاه مجازی توجه شده است. در همین راستا مصرف‌کنندگان مختلف در چند دسته‌ی متفاوت بر اساس پیشنهادهایشان برای ارائه خدمات کاهش بار و با استفاده از روش‌های داده‌کاوی طبقه‌بندی شده‌اند.

اگر چه مقالات مرور شده از روش پیشنهاددهی DRPها در درون نیروگاه مجازی برای تأمین پاسخ‌گویی بار مورد نیاز نیروگاه مجازی استفاده کرده‌اند، ب این حال ساختار مشخصی برای به‌کارگیری یک بازار مجزا برای تبادل پاسخ-گویی بار ارائه نکرده‌اند. بعلاوه، در اکثر مطالعات نیروگاه مجازی مشارکت مستقلی در بازار DRX ندارد و تنها در بازار انرژی و یا در بازار ذخیره مشارکت می‌کند.

برای پوشش خلاء مطالعاتی فوق، در این مقاله، یک مدل دقیق و کارآمد برای بهره‌گیری از پاسخگویی بار در

[4] Pool-Based
[5] Demand-Side Managment
[6] Retailer
[7] Wind Power Producer
[8] Intraday Demand Response Exchange
[9] Demand Response Aggregator

UNCORRECTED PROOF

پیشنهاددهی نیروگاه مجازی مبتنی بر بازار داخلی و خارجی IDRX ارائه شده است. در مدل پیشنهادی، تبادلات پاسخگویی بار در بازه زمانی میان‌روزی به منظور جبران خطای پیش‌بینی پارامترهای عدم قطعیت انجام می‌شوند. این مدل به صورت یک مسئله دوسطحی طراحی شده است تا همکاری بهینه بین نیروگاه مجازی و تجمیعگران بارهای پاسخگو با مدیریت مستقل فراهم شود و سود هر دو طرف به حداکثر برسد. چنین رویکرد دوسطحی در مطالعات پیشین مورد توجه قرار نگرفته و در آنها، نیروگاه مجازی معمولاً تنها به دنبال کسب سود خود بدون توجه به منافع زیرمجموعه‌ها عمل می‌کند.

نوآوری‌های اصلی این مقاله عبارتند از:

- ارائه مدلی جدید برای دستیابی به استراتژی بهینه پیشنهاددهی همزمان انرژی و رزرو در بازار روز بعد برای یک نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن مشارکت بارهای پاسخگو در بازار محلی،
- توسعه یک مدل دوسطحی برای بهینه‌سازی همزمان سود نیروگاه مجازی و تجمیعگران بارهای پاسخگو با مدیریت مستقل،
- تحلیل اثر مشارکت در بازار محلی IDRX بر تصمیم‌گیری نیروگاه مجازی تحت شرایط مختلف رفتار بارهای پاسخگو،

ساختار مقاله به ترتیب زیر است: در بخش ۲، مدل پیشنهادی برای پیشنهاددهی نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن بازار محلی IDRX ارائه می‌شود. در بخش ۳، مدل پیشنهادی در قالب یک مسئله دوسطحی فرمول‌بندی می‌گردد. بخش ۴ به شبیه‌سازی مدل و تحلیل نتایج عددی اختصاص دارد و در نهایت، مهم‌ترین دستاوردهای پژوهش در بخش نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲- مدل پیشنهادی برای پیشنهاددهی نیروگاه مجازی

در این مقاله مدلی برای پیشنهاددهی روز بعد نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن بازار محلی IDRX ارائه می‌شود. در مدل پیشنهادی نیروگاه مجازی علاوه بر بازار IDRX در بازارهای انرژی روز بعد و بازار لحظه توان نیز مشارکت می‌کند. نیروگاه در سه مرحله نیاز به اتخاذ تصمیماتی دارد که لازم است در مدل تصادفی چندمرحله‌ای در نظر گرفته شوند. فرایند تصمیم‌گیری نیروگاه مجازی در بازه‌ی مورد مطالعه به صورت زیر است:

مرحله‌ی روز بعد: در این مرحله نیروگاه مجازی باید پیشنهاد خود را در بازار انرژی روز بعد و بازار ذخیره ثبت کند. همچنین مسئله تخصیص را برای واحدهای حرارتی حل کرده و برنامه روشن و خاموش بودن آن‌ها برای بازه ۲۴ ساعته پیش رو را تعیین کند.

مرحله‌ی میان‌روزی: این مرحله تا یک ساعت پیش از لحظه‌ی مبادله انرژی را شامل می‌شود. بنابراین، در این مرحله قیمت بازار روز بعد مشخص بوده و روشن یا خاموش بودن واحدهای حرارتی نیز تعیین شده است. در چنین شرایطی نیروگاه مجازی برای خرید خدمات پاسخگویی بار از طریق بازار IDRX اقدام می‌کند. با این حال مقدار پاسخگویی بار قابل تأمین از طریق بازار IDRX با عدم قطعیت همراه است. اگر چه از طریق یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی تلاش می‌شود رفتار تجمیعگران در سمت فروش بازار حدس زده شده و مقدار پاسخگویی بار تأمین شده پیش‌بینی شود، با این حال این پیش‌بینی می‌تواند همراه با خطا باشد.

مرحله‌ی زمان‌واقعی: در این مرحله تجمیعگرها میزانی از پاسخگویی بار را که تمایل به فروش آن دارند اعلام کرده‌اند. با توجه به میزان تولید واحد بادی، میزان پاسخگویی بار خریداری شده و قیمت بازار، نیروگاه مجازی باید قید تعادل خود را از طریق تنظیم خروجی واحدهای حرارتی، شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز و همچنین خرید و فروش در بازار لحظه‌ای برقرار کند. این مرحله خالی از عدم قطعیت بوده و قیمت خرید و فروش انرژی در بازار زمان‌واقعی نیز معلوم فرض می‌شود. فرایند تصمیم‌گیری در مدل پیشنهادی دوسطحی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

۱-۲- مشارکت در بازار محلی IDRX

از آنجایی که بیشترین حجم مبادلات انرژی در بازار روز بعد انجام می‌شود، در نتیجه بازیگران بازار باید پیشنهاد خود برای روز آینده را به صورت ساعت به ساعت، چند ساعت پیش از بسته شدن بازار، به بهره‌بردار بازار ارائه نمایند. این پیشنهادها به‌طور طبیعی به واسطه‌ی ذات غیرقابل پیش‌بینی میزان تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر دارای عدم‌قطعیت‌اند. در صورت عدم امکان انجام تعهد میزان

UNCORRECTED PROOF

تولید، تولیدکننده مجبور به پرداخت خسارت می‌شود. بنابراین، حضور در بازارهای با بازه‌ی زمانی کوتاه‌مدت‌تر برای بازیگران بازار مسئله‌ای حیاتی است. به عبارت دیگر، برای بازیگران مطلوب آن است که در بین بازه‌ی زمانی بازار روز آینده و بازار لحظه‌ای، به واسطه به روزشدن اطلاعات، پیشنهادهای اولیه خود را در بازاری به نام بازار میان‌روزی به‌روز یا اصلاح نمایند. بازار میان‌روزی را به واسطه‌ی نزدیکی به ساعت انجام مبادلات، می‌توان بازار اصلاحی در نظر گرفت که این فرصت را در اختیار بازیگران قرار می‌دهد تا بتوانند پیشنهادهای خود را اصلاح نمایند [۱۴].

اعمال اصلاحی فوق به منظور از بین بردن عدم توازن منفی، می‌تواند خرید توان اضافه و یا استفاده از خدمات پاسخ‌گویی بار باشد. بهره‌گیری از پاسخ‌گویی بار به جای تولید توان علاوه بر به‌صرفه بودن از لحاظ اقتصادی، از مصرف بیشتر سوخت‌های فسیلی و آلودگی زیست‌محیطی نیز جلوگیری می‌کند و از این جهت مورد توجه ویژه محققان است. به همین منظور ساختار بازار میان‌روزی پاسخ‌گویی بار نیز در کنار ساختار بازار میان‌روزی انرژی

۳- فرمول‌بندی مسئله پیشنهادی

در این مقاله فرض شده است که نیروگاه مجازی شامل واحد تولید بادی، واحد حرارتی، ذخیره‌سازهای انرژی و بارهای قابل کنترل باشد. بعلاوه، تجمیعگران بار در نظر گرفته شده در این مقاله مستقل از نیروگاه مجازی عمل کرده در چارچوب بازار IDRX با نیروگاه مجازی مراوده انجام می‌دهند. همچنین فرض شده است که این نیروگاه مجازی فاقد قدرت بازار در بازار روز بعد و بازار لحظه‌ای بوده اما در بازار محلی IDRX به علت تعداد محدود شرکت‌کنندگان دارای قدرت بازار است.

۳-۱- مدل واحدهای حرارتی در نیروگاه مجازی

حضور واحدهای کنترل‌پذیر، همچون واحدهای حرارتی و ذخیره‌سازها، برای بهره‌بردار نیروگاه مجازی امکان جبران نوسانات خروجی واحدهای تجدیدپذیر را فراهم کرده و ریسک مشارکت در بازار را کاهش می‌دهد. متغیرهای تصمیم مربوط به واحدهای حرارتی را می‌توان به دو دسته متغیر گسسته و متغیرهای پیوسته تقسیم کرد. این دو گروه، علاوه بر تفاوت در نوع، از جهت دیگری نیز با هم متفاوتند. متغیرهای باینری مربوط به واحد حرارتی شکل گرفته که در آن فروشندگان پاسخ‌گویی بار خدمات خود را یک یا چند ساعت قبل از موعد مبادله‌ی توان به خریداران پاسخ‌گویی بار می‌فروشند [۱۵].

برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌های موجود در مسئله از روش برنامه‌ریزی تصادفی استفاده شده است. ساختار مسئله به صورت یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی تصادفی سه مرحله‌ای صورت‌بندی شده و درخت سناریو برای پارامترهای عدم قطعیت تشکیل می‌شود. پارامترهای عدم قطعیت در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل قیمت بازار توان روز بعد، تولید واحد بادی، عملکرد تجمیعگران در بازار IDRX، و درخواست اجرای رزرو چرخان توسط بهره‌بردار بازار است. لازم به ذکر است قیمت‌های بازار ذخیره چرخان و بازار زمان‌واقعی به صورت ضرایبی از قیمت بازار روز بعد در نظر گرفته شده‌اند. برای تولید سناریوهای مورد نیاز از تابع توزیع ویبال برای تولید سناریوهای مربوط به تولید بادی و توابع توزیع نرمال برای تولید سناریوهای مربوط به دیگر پارامترهای عدم قطعیت استفاده شده است [۱۲].

تابع هزینه واحدهای حرارتی با در نظر گرفتن تمامی متغیرهای آن از جمله متغیرهای باینری به صورت زیر خواهد بود:

$$CCPP_{t,s} = \sum_{c}\left(a_c^{CPP} I_{c,t}^{CPP} + \sum_{m=1}^{M} \lambda_{c,m}^{CPP} P_{c,m,t,s}^{CPP} + SU_c^{CPP} y_{c,t}^{CPP} + SD_c^{CPP} z_{c,t}^{CPP}\right); \quad \forall t,s \tag{۱}$$

$$0 \le P_{c,m,t,s}^{CPP} \le \bar{P}_{c,m}^{CPP}\ ;\ P_{c,t,s}^{CPP} = \underline{P}_c^{CPP} I_{c,t}^{CPP} + \sum_{m} P_{c,m,t,s}^{CPP} \tag{۲}$$

$$P_{c,t,s}^{CPP} - P_{c,t-1,s}^{CPP} \le \mathrm{UR}_c\left(1 - y_{c,t}^{CPP}\right) + \underline{P}_c^{CPP} y_{c,t}^{CPP} \tag{۳}$$

$$P_{c,t-1,s}^{CPP} - P_{c,t,s}^{CPP} \le \mathrm{DR}_c\left(1 - z_{c,t}^{CPP}\right) + \underline{P}^c z_{c,t}^{CPP} \tag{۴}$$

$$\sum_{h=1}^{t+\mathrm{UT}_c-1} I_{c,t}^{CPP} \ge \mathrm{UT}_c y_{c,t}^{CPP} \tag{۵}$$

$$\sum_{h=1}^{t+\mathrm{DT}_c-1} \left(1 - I_{c,t}^{CPP}\right) \ge \mathrm{DT}_c z_{c,t}^{CPP} \tag{۶}$$

$$y_{c,t}^{CPP} - z_{c,t}^{CPP} = I_{c,t}^{CPP} - I_{c,t-1}^{CPP}\ ;\ y_{c,t}^{CPP} + z_{c,t}^{CPP} \le 1 \tag{۷}$$

که در آن I_t^c، y_t^c و z_t^c متغیرهای کنترلی باینری و متعلق به مرحله روز بعد و $P_{t,s}^{c,m}$ و $P^{c,m}$ متغیرهای پیوسته نامنفی متعلق به مرحله زمان‌واقعی هستند. رابطه‌ی (۱) هزینه بهره‌برداری واحد حرارتی شامل هزینه تولید توان و هزینه روشن و خاموش کردن واحد را به دست می‌آورد.

UNCORRECTED PROOF

رابطه‌ی (۲) حد بالای انرژی دریافت شده از هر پله از تابع هزینه پله‌ای واحد حرارتی را مشخص می‌کند. قیود (۳) و (۴) رعایت حد حداکثر نرخ کاهش یا افزایش توان خروجی واحد حرارتی را در هر پله زمانی تضمین می‌کند. همچنین قیود (۵) و (۶) تضمین‌کننده رعایت حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحد حرارتی هستند. قید (۷) نیز رابطه‌ی متغیرهای باینری-کنترلی را برقرار می‌کند [۱۶].

۲-۳- مدل ذخیره سازی انرژی

ذخیره‌سازها برای ذخیره کردن انرژی مازاد تولیدی واحدهای تجدیدپذیر و یا ذخیره کردن انرژی در ساعاتی که قیمت انرژی در بازار پایین است و سپس استفاده از آن در زمان کاهش تولید واحدهای تجدیدپذیر یا افزایش میزان مصرف استفاده می‌شوند. روابط مورد نیاز برای مدل‌سازی واحدهای ذخیره‌ساز را می‌توان به صورت زیر فرمول‌بندی کرد [۱۶].

$$0 \le P^{B,D}_{b,t,s,s'} \le \bar{P}^{B,D}_{b}; \quad \forall\, b,t,s,s' \tag{۸}$$

$$0 \le P^{B,C}_{b,t,s,s'} \le \bar{P}^{B,C}_{b}; \quad \forall\, b,t,s,s' \tag{۹}$$

$$E^{B}_{b,t,s,s'} = E^{B}_{b,t-1,s,s'} + P^{B,C}_{b,t,s,s'}\eta^{B,C}_{b} - \frac{P^{B,D}_{b,t,s,s'}}{\eta^{B,D}_{b}}; \quad \forall b,t,s,s' \tag{۱۰}$$

$$\underline{E}^{B}_{b} \le E^{B}_{b,t,s,s'} \le \bar{E}^{B}_{b}; \quad \forall b,t,s,s' \tag{۱۱}$$

رابطه (۸) و (۹) حد بالای میزان شارژ و دشارژ ذخیره-ساز را تضمین می‌کند. رابطه (۱۰) تغییرات میزان انرژی ذخیره شده در هر پله زمانی را مشخص می‌کند. در نهایت رابطه (۱۱) حد بالا و پایین میزان انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز را تعیین کرده است. در مدل سه مرحله‌ای این مقاله، متغیرهای تصمیم مربوط به ذخیره‌ساز همگی متغیرهای مرحله سوم هستند.

۳-۳- فرمول‌بندی مسئله سطح بالا

تابع هدف مسئله سطح بالا از دید بهره‌بردار نیروگاه مجازی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{aligned}\max \sum_{t,s,s'} \pi_s \pi_{s'} \Big\{ & \lambda^{DA}_{t,s} P^{DA}_{t} \\ & + \left(\lambda^{Res+}_{t,s} + k^{Dep+}_{t,s,s'} \lambda^{Dep+}_{t,s}\right) P^{Res+}_{t} \\ & + \left(\lambda^{Res-}_{t,s} \right. \\ & \left. + k^{Dep-}_{t,s,s'} \lambda^{Dep-}_{t,s}\right) - k^{DR}_{t,s,s'} \sum_{a,d} \lambda^{DRI}_{t,s} . P^{DRI}_{a,d,t,s} \\ & + \left[-CCPP_{t,s,s'} + \lambda^{S}_{t,s,s'} P^{S}_{t,s,s'} - \lambda^{P}_{t,s,s'} P^{P}_{t,s,s'} \right. \\ & \left. + \lambda^{DA}_{24,s} E^{ST}_{24,s,s'}\right] \Big\}\end{aligned} \tag{۱۲}$$

دو سطر نخست در تابع هدف تعریف شده فوق مربوط به مسئله‌ی مرحله اول، سطر سوم مربوط به مرحله دوم و در نهایت دو سطر آخر نیز مربوط به مرحله سوم است. متغیرهای تصمیم مرحله اول شامل پیشنهاد بازار روز بعد (P^{DA}_{t}) و پیشنهادات به بازار رزرو چرخان (P^{Res+}_{t} و P^{Res-}_{t}) بوده و چنانکه مشخص است مستقل از سناریو بوده و فاقد اندیس سناریو هستند. متغیر مرحله دوم قیمت پیشنهادی به بازار میان‌روزی ($\lambda^{DRI}_{t,s}$) و دارای اندیس سناریوی $s \in S$ بوده که S مجموعه سناریوهای در نظر گرفته شده برای مرحله میان‌روزی است. متغیر $P^{DRI}_{a,t,s}$ میزان DR خریداری شده از تجمیعگران بوده و متغیر سطح پایین است. $k^{DR}_{t,s,s'}$ نیز ضریبی تصادفی با تابع توزیع نرمال و میانگین یک برای در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در میزان DR ارائه شده توسط تجمیعگران است. لازم به ذکر است، چنان که پیشتر نیز بیان شد، در مدل پیشنهادی این مقاله برای بازار IDRX، تجمیعگران پس از دریافت پیشنهاد قیمت خرید DR توسط نیروگاه مجازی، مقدار DR که مایل به فروش آن هستند را اعلام می‌کنند. سپس نیروگاه مجازی قادر خواهد بود بخشی یا تمام DR ارائه شده را خریداری کند. در تابع هدف فوق فرض می‌شود که نیروگاه مجازی تمام DR پیشنهاد شده توسط سطح پایین را خریداری می‌کند. اگر چه این مسئله ممکن است با واقعیت آنچه در مرحله میان‌روزی رخ خواهد داد کاملا مطابقت نداشته باشد، با این حال موجب انحراف تاثیرگذاری در پاسخ مسئله برنامه‌ریزی نیز نخواهد شد. زیرا در واقع نیروگاه مجازی تلاش می‌کند با مدل نمودن مسئله فراروی تجمیعگران رفتار آن ها را پیشبینی نموده و قیمت پیشنهادی خود را به گونه‌ای تنظیم کند که میزان DR مطلوب او توسط تجمیعگران در بازار ارائه شود.

در نهایت متغیرهای مرحله سوم در تابع هدف شامل پیشنهادات در بازار زمان‌واقعی ($P^{S}_{t,s,s'}$ و $P^{P}_{t,s,s'}$) و هزینه بهره‌برداری واحد حرارتی ($CCPP_{t,s,s'}$) است. چنانکه مشاهده می‌شود متغیرهای این مسئله دارای دو اندیس سناریوی $s \in S$ و $s' \in S'$ هستند که S' مجموعه سناریوهای مربوط به مرحله زمان‌واقعی است. همچنین $E^{ST}_{t,s,s'}$ نیز یکی دیگر از متغیرهای مرحله سوم است که نماینده انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز است. این متغیر یک متغیر حالت بوده و در تابع هدف حضور ندارد. با این

UNCORRECTED PROOF

حال عبارت $\lambda_{24,s}^{DA}E_{24,s,s'}^{ST}$ آخرین بخش تابع هدف مرحله سوم است که اشاره به تقریبی از ارزش انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز دارد. وجود این معادله سبب می‌شود که در پایان بازه برنامه‌ریزی الزاما شارژ ذخیره‌ساز در پایین‌ترین مقدار ممکن خود نباشد. در اینجا ارزش انرژی ذخیره شده برابر با حاصل ضرب میزان انرژی موجود در ذخیره‌ساز در قیمت انرژی بازار روز بعد در ساعت پایانی فرض شده است.

قیود مسئله سطح بالا در سه دسته قیود روزبعد (۱۳) تا (۱۵)، قیود میان‌روزی، و قیود زمان‌واقعی دسته‌بندی و معرفی می‌شوند.

$$\sum_{h=1}^{t+\mathrm{UT}_c-1} I_{c,t}^{CPP} \geq \mathrm{UT}_c y_{c,t}^{CPP} \quad (۱۳)$$

$$\sum_{h=1}^{t+\mathrm{DT}_c-1} (1-I_{c,t}^{CPP}) \geq \mathrm{DT}_c z_t^c \quad (۱۴)$$

$$y_{c,t}^{CPP} - z_{c,t}^{CPP} = I_{c,t}^{CPP} - I_{c,t-1}^{CPP};\ y_{c,t}^{CPP} + z_{c,t}^{CPP} \leq 1 \quad (۱۵)$$

قیود مربوط به مرحله زمان‌واقعی شامل قیود مربوط به واحدهای حرارتی و ذخیره ساز بعلاوه تعادل قید توان (۱۶) است.

$$\begin{aligned} P_t^{DA} - \sum_w (P_{w,t,s}^{Wind}) - \sum_c P_{c,t,s,s'}^{CPP} \\ - \sum_b (P_{b,t,s,s'}^{B,D} - P_{b,t,s,s'}^{B,C}) \\ - \sum_a P_{a,t,s}^{DR} - k_{t,s,s'}^{Dep-} P_t^{Res-} \\ + k_{t,s,s'}^{Dep+} P_t^{Res+} + P_{t,s,s'}^{S} - P_{t,s,s'}^{P} \\ = 0, \quad \forall\, t,s,s' \end{aligned} \quad (۱۶)$$

۴-۳- فرمول‌بندی مسئله سطح پایین

مسئله سطح پایین مربوط به برنامه‌ریزی تجمیعگران در بازه میان‌روزی و بازار IDRX بوده و با هدف بیشینه سازی رفاه اجتماعی به صورت زیر در غالب یک مسئله قطعی برای هر تجمیعگر، هر ساعت و هر سناریو تعریف می‌شود:

$$\max\left(\lambda_{t,s}^{DR}\sum_d P_{a,d,t,s}^{DR} - \sum_d \bar{\lambda}_{a,d,t,s}^{DR} P_{a,d,t,s}^{DR}\right) \quad (۱۷)$$

$$\sum_d P_{a,d,t,s}^{DR} = P_{a,t,s}^{DR} \quad (۱۸)$$

$$0 \leq P_{a,d,t,s}^{DR} \leq \bar{P}_{a,d,t,s}^{DR} \quad (۱۹)$$

که در آن $\bar{\lambda}_{a,d,t,s}^{DR}$ هزینه تامین DR برای تجمیعگر در پله d‌ام تابع عرضه پله‌ای است. مسئله‌ی فوق یک مسئله خطی بوده که می توان با اعمال شرایط بهینگی KKT آن را تبدیل به یک سری قیود برای مسئله سطح بالا نمود. این قیود به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\lambda_{t,s}^{DR} - \bar{\lambda}_{a,d,t,s}^{DR} - \gamma_{a,d,t,s}^{UB} + \gamma_{a,d,t,s}^{LB} = 0\ ,\quad \forall\, a,d,t,s \quad (۲۰)$$

$$0 \leq P_{a,d,t,s}^{DR} \leq \bar{P}_{a,d,t,s}^{DR} \quad (۲۱)$$

$$\gamma_{a,d,t,s}^{UB}\left(P_{a,d,t,s}^{DR} - \bar{P}_{a,d,t,s}^{DR}\right) = 0 \quad (۲۲)$$

$$\gamma_{a,d,t,s}^{LB} P_{a,d,t,s}^{DR} = 0 \quad (۲۳)$$

$$\gamma_{a,d,t,s}^{LB}, \gamma_{a,d,t,s}^{UB} \geq 0 \quad (۲۴)$$

که در آن $\gamma_{a,d,t,s}^{UB}$ و $\gamma_{a,d,t,s}^{LB}$ متغیرهای لاگرانژ هستند. در تابع هدف مسئله روز بعد هزینه روشن و خاموش بودن واحد حرارتی نیز لحاظ شده است زیرا متغیرهای تصمیم آن مربوط به مرحله روز بعد است. قیود فوق شامل عبارت غیرخطی در معادلات (۲۲) و (۲۳) هستند [۱۶]. این قیود، قیود مکمل زائد[10] بوده و برای خطی سازی آن‌ها می‌توان به قیمت افزودن متغیر باینری از روش M بزرگ[11] استفاده کرد [۱۶]. قیود (۱۱) و (۱۲) به صورت زیر خطی‌سازی می‌شوند:

$$\gamma_{a,d,t,s}^{UB} \leq M q_{a,d,t,s}^{DR,UB} \quad (۲۵)$$

$$P_{a,d,t,s}^{DR} - \bar{P}_{a,d,t,s}^{DR} \leq M(1-q_{a,d,t,s}^{DR,UB}) \quad (۲۶)$$

$$\gamma_{a,d,t,s}^{LB} \leq M q_{a,d,t,s}^{DR,LB} \quad (۲۷)$$

$$P_{a,d,t,s}^{DR} \leq M(1-q_{a,d,t,s}^{DR,LB}) \quad (۲۸)$$

چنانکه پیش‌تر نیز اشاره شد، تابع هدف مرحله میان‌روزی شامل یک عبارت غیرخطی ناشی از ضرب دو متغیر تصمیم $\lambda_{t,s}^{DR}P_{a,t,s}^{DR}$ در یکدیگر است. برای جایگزینی این عبارت غیرخطی رابطه (۲۰) را در $P_{a,d,t,s}^{DR}$ ضرب کرده تا عبارت زیر حاصل شود:

$$\lambda_{t,s}^{DR}P_{a,d,t,s}^{DR} = \bar{\lambda}_{a,d,t,s}^{DR}P_{a,d,t,s}^{DR} + \gamma_{a,d,t,s}^{UB}P_{a,d,t,s}^{DR} - \gamma_{a,d,t,s}^{LB}P_{a,d,t,s}^{DR} = 0\ ,\quad \forall\, a,d,t,s \quad (۲۹)$$

با جاگذاری (۲۲) و (۲۳) در (۲۹) عبارت رابطه (۳۰) حاصل می‌شود که در مدل‌سازی از آن استفاده شده است.

$$\bar{\lambda}_{a,d,t,s}^{DR}P_{a,d,t,s}^{DR} + \gamma_{a,d,t,s}^{UB}\bar{P}_{a,d,t,s}^{DR} \quad (۳۰)$$

در مرحله روز بعد در سطح بالا، نیروگاه مجازی پیشنهادات خود را در بازار انرژی روز بعد و بازار ذخیره چرخان ثبت کرده و وضعیت روشن/خاموش واحدهای حرارتی را تعیین می‌کند. در مرحله میان‌روزی (سطح پایین در ساختار دوسطحی)، با مشخص شدن قیمت‌های بازار روز

[10] Complementary Slackness Conditions

[11] Big M

UNCORRECTED PROOF

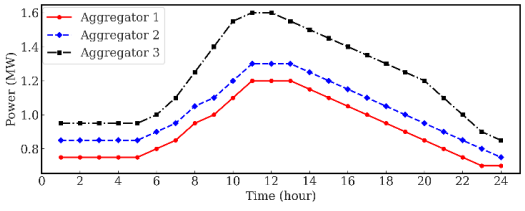
بعد و پیش‌بینی تولید واحد بادی، نیروگاه مجازی اقدام به خرید پاسخگویی بار از تجمیعگران می‌کند. در مدل دوسطحی، قیمت پیشنهادی DR که در سطح بالا توسط نیروگاه مجازی تعیین می‌شود، به‌عنوان ورودی مسئله سطح پایین تجمیعگران عمل کرده و تصمیمات آن‌ها را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهد. نیروگاه مجازی با آگاهی از مدل رفتاری تجمیعگران، قیمت پیشنهادی را به‌گونه‌ای انتخاب می‌کند که سود کل حاصل از حضور در بازارهای مختلف بیشینه شود.

۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج عددی

نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده، یک نیروگاه تجاری شامل یک واحد بادی، دو واحد حرارتی و یک ذخیره‌ساز است. پیش‌بینی میزان تولید واحد بادی، و همچنین، قیمت بازار روزبعد از بازار نوردپول[12] [۱۹] استخراج شده و در شکل ۱ نشان داده شده است. اطلاعات فنی مربوط به واحدهای حرارتی و واحد ذخیره‌ساز نیز از مرجع [۱۶] استخراج شده است. همچنین، در سمت عرضه بازار IDRX، سه تجمیعگر بار با الگوهای بار مختلف در نظر گرفته شده است. حداکثر میزان DR قابل عرضه برای این سه تجمیعگر در شکل ۲ نمایش داده‌شده است [۲۰].



شکل ۱- میزان تولید واحد بادی و قیمت بازار روز بعد.

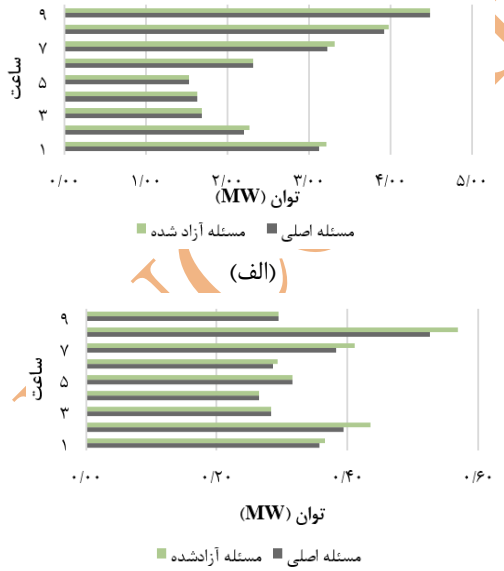


شکل ۲- حداکثر ظرفیت ارائه DR به بازار IDRX توسط سه تجمیعگر در نظر گرفته شده در مدل.

برای حل مسئله‌ی پیشنهادی از حلگر CPLEX v. 12.6 استفاده شده است. همچنین برای افزایش سرعت همگرایی الگوریتم، در تکرارهای ابتدایی الگوریتم برای تولید برش-های بندرز، مقدار فاصله نسبی[13] حلگر CPLEX بر روی ۱٪ تنظیم شده است [۲۱].

مدل ارائه شده برای ۹ حالت مختلف حل شده که در هر حالت، تجمیعگران با درصدی از ظرفیت خود (از ۰ تا ۱۰۰٪) در بازار IDRX شرکت کرده‌اند.

شایان ذکر است که بخشی از مدل شامل قیود مکمل و روابط غیرخطی است که با روش M بزرگ خطی‌سازی شده‌اند. برای حل مسئله دو سطحی و به‌دست آوردن دوگان زیرمسئله میان‌روزی، از مدل آزاد شده استفاده شده است. در این مدل، متغیرهای باینری مرحله میان‌روزی با متغیرهای پیوسته جایگزین شده‌اند، در حالی که سایر متغیرهای باینری، از جمله واحدهای حرارتی، حفظ شده‌اند. برای اعتبارسنجی دو مدل اصلی و آزاد شده میزان اختلاف مبادلات نیروگاه مجازی در بازار روز آینده و بازار IDRX برای ۹ ساعت ابتدایی شبانه‌روز در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳- میزان مبادلات نیروگاه مجازی در مسئله اصلی و مسئله آزاد شده، الف) بازار روز آینده و ب) بازار IDRX

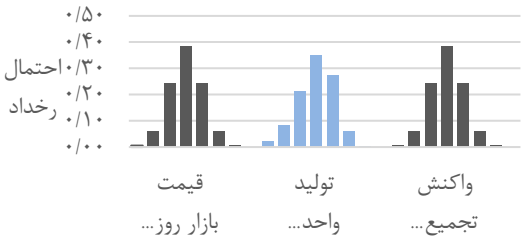
[12] Nord Pool Market

[13] Relative Gap

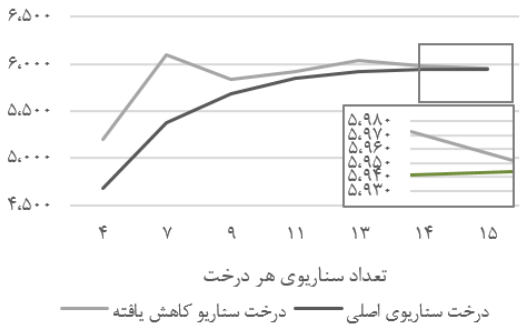
ACCEPTED PROOF

تحلیل این شکل نشان می‌دهد که شاخص مربعات خطا برای مبادلات بازار روز بعد و IDRX به ترتیب ۱٫۱٪ و ۲٫۳٪ است. این نتایج تایید می‌کند که مدل آزاد شده تقریب بسیار خوبی از مدل اصلی ارائه می‌دهد و پاسخ‌های بهینه کاملاً پایدار هستند.

لازم به ذکر است که در این مقاله قیمت بازار روز بعد و همچنین خروجی واحد بادی به عنوان متغیرهای عدم قطعیت مرحله میانروزی و پاسخ تجمیعگران به عنوان متغیر تصمیم زمان‌واقعی در نظر گرفته شده است. به منظور تولید سناریوهای مورد نیاز برای برنامه‌ریزی تصادفی پیش رو از توابع توزیع نرمال برای سناریوهای قیمت بازار و واکنش تجمیعگران، و تابع توزیع ویبال برای تولید سناریوهای مربوط به تولیید واحد بادی استفاده شده است. توابع توزیع احتمال، چنانکه در شکل ۴ نشان داده شده است، به هفت بازه، هر یک با طول $\frac{3}{4}\sigma$ است تقسیم شده‌اند. در نهایت هر کدام از قسمت‌های توابع احتمال فوق به عنوان یک رخداد احتمالاتی در نظر گرفته شده و درخت سناریوی میانروزی با ۴۹=۷×۷ سناریو و درخت زمان‌واقعی با ۷ سناریو تشکیل می‌شود. با ترکیب این دو درخت، درخت نهایی دارای ۳۴۳=۷×۴۹ سناریو خواهد بود. به منظور کاهش حجم محاسبات، تعداد سناریوهای درخت میانروزی، با استفاده از ابزار SCENRED2 نرم افزار GAMS، به ۱۵ عدد کاهش یافته است. در نهایت تعداد کل سناریوهای در نظر گرفته شده در مدل برابر ۱۰۵=۷×۱۵ است. انتخاب این تعداد نهایی سناریو بر اساس تحلیل خارج از نمونه و بررسی همگرایی امید ریاضی تابع هدف انجام شده که در شکل ۵ آورده شده است. بدین منظور، فرآیند تولید و کاهش سناریو برای مقادیر مختلف تکرار شده و تغییرات تابع هدف مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سناریوها تا ۱۰۵ سناریو در هر درخت کاهش‌یافته، مقدار امید ریاضی تابع هدف به مقدار پایدار همگرا شده و افزایش بیشتر تعداد سناریوها تأثیر معناداری بر دقت نتایج نداشته، در حالی که زمان حل مسئله به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. بنابراین، انتخاب ۱۰۵ سناریو نهایی تعادل مناسبی میان دقت مدل‌سازی عدم‌قطعیت و کارایی محاسباتی برقرار می‌کند و اعتبار نتایج عددی مدل سه‌مرحله‌ای را تضمین می‌نماید.



شکل ۴- سناریوهای تولید شده برای متغیرهای تصادفی



شکل ۵: روند همگرایی تحلیل داده خارجی برای کاهش سناریو

در شکل ۶ میزان فروش توان نیروگاه مجازی در ۲۴ ساعت شبانه‌روز در بازار روزبعد به ازای مقادیر مختلف DR در دسترس در بازار IDRX نمایش داده شده است. افزایش میزان DR در دسترس به‌طور پیوسته سبب تمایل نیروگاه مجازی به ارائه پیشنهاد مقدار بیشتری توان در بازار روزبعد شده است. امکان خرید DR بیشتر ریسک ناشی از خطاهای پیش‌بینی در بازار را کاهش و سود مورد انتظار در صورت پیشنهاد توان بیشتر در بازار روز بعد را افزایش می‌دهد. اختلاف میزان پیشنهاد توان فروخته شده در بازار روز بعد بدون در نظر گرفتن مشارکت DR و زمانی که تجمیعگرها با حداکثر ظرفیت خود در بازار IDRX مشارکت کردند حدود ۱۶٪ است.

از شکل ۷ مشاهده می‌شود که مشارکت بارهای پاسخ‌گو در بازار IDRX بر میزان مبادلات در بازار زمان‌واقعی شدیداً تاثیرگذار است. با این حال این تأثیر در مورد خرید انرژی بیش از فروش انرژی بوده است. امکان خرید خدمات DR می‌تواند تا حد زیادی جایگزین خرید انرژی در بازار زمان-واقعی شود. از سوی دیگر استفاده از خدمات DR می‌تواند نیاز به فروش انرژی در بازار زمان‌واقعی را نیز تا حد قابل

UNCORRECTED PROOF

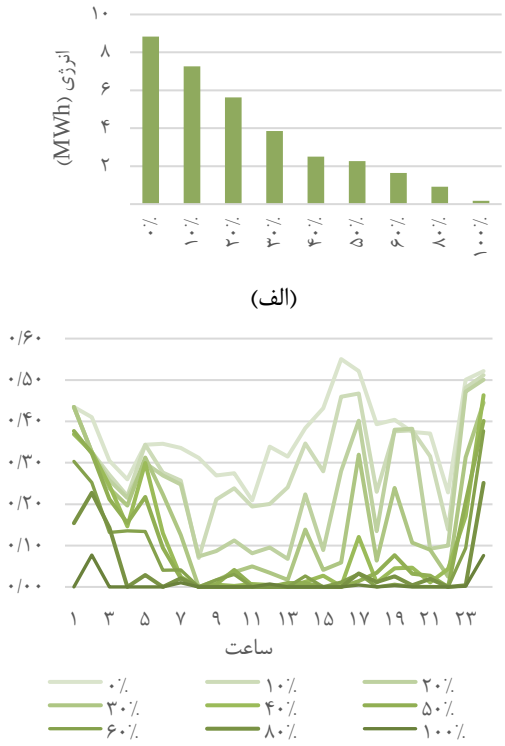
ملاحظه‌ای کاهش دهد. علت این امر به افزایش میزان توان پیشنهاد شده در بازار روز بعد در صورت امکان خرید DR باز می‌گردد که سبب می شود احتمال وجود مازاد انرژی در مرحله زمان‌واقعی نسبت به قبل به میزان قابل توجهی کاهش یابد.



شکل ۶- توان فروخته شده در بازار روز بعد به ازای درصد ظرفیت‌های مختلف DR قابل خرید در بازار IDRX. الف) مجموع توان فروخته شده و ب) میزان فروش ساعتی توان.

میزان مبادلات DR با تجمیعگرها، به ازای مشارکت بارهای پاسخ‌گو در بازار، با سه ظرفیت مختلف (۲۰٪، ۶۰٪ و ۱۰۰٪) در شکل ۸ نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، با افزایش میزان عرضه DR در بازار، خرید DR از تجمیعگر شماره ۱ که عرضه کننده ارزان تر DR است بیش از دیگر تجمیعگرها است. همچنین، بیشترین میزان DR مربوط به ساعات ۱۳ الی ۲۰ بوده، که در آن تولید بادی بیشترین مقدار خود را داشته و لذا عدم قطعیت‌ها در این ساعات بیش از دیگر ساعات بوده است.

در شکل ۹ میزان فروش ظرفیت رزرو چرخان توسط نیروگاه مجازی بر اساس میزان DR در دسترس نمایش داده شده است. امکان خرید خدمات DR در برخی از ساعات تاثیر مشهودی بر میزان فروش رزرو چرخان گذاشته است. در مورد ذخیره‌ی چرخان بالا، افزایش امکان خرید خدمات DR موجب کاهش ظرفیت ذخیره چرخان بالا و از سویی افزایش فروش ذخیره چرخان پایین شده است.



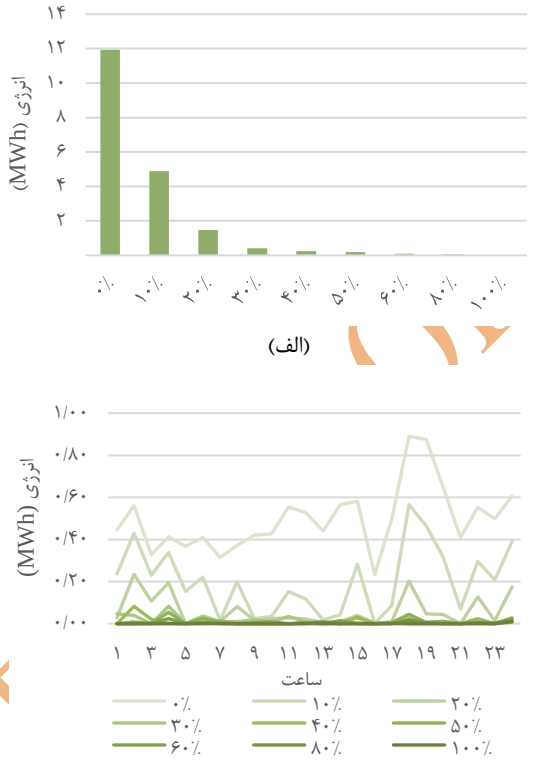
شکل ۷- انرژی فروخته شده در بازار زمان‌واقعی در مقادیر مختلف DR قابل خرید در بازار IDRX . الف) مجموع انرژی خریداری شده، و ب) میزان خرید ساعتی انرژی.

دلیل این موضوع آن است که با افزایش میزان پیشنهاد در بازار روز بعد، میزان خروجی واحدهای حرارتی به حد بالای خود نزدیک‌تر شده و هزینه‌ی تولید آن‌ها افزایش می‌یابد. این امر سبب می‌شود تامین انرژی فراخوانی شده برای رزرو بالا توجیه اقتصادی کمتری داشته باشد. به دلیل مشابه، فروش ظرفیت ذخیره چرخان پایین با افزایش DR در دسترس افزایش یافته است، زیرا کاهش تولید واحدهای حرارتی در میزان تولیدهای بالاتر صرفه اقتصادی بیشتری دارد.

در نهایت، میزان تغییرات سود مورد انتظار نیروگاه مجازی در مبادلات ۲۴ ساعت مورد برنامه‌ریزی شکل ۹ نشان داده شده‌است. افزایش میزان سود نیروگاه مجازی ناشی از حضور در بازار IDRX زمانی که تجمیعگران با

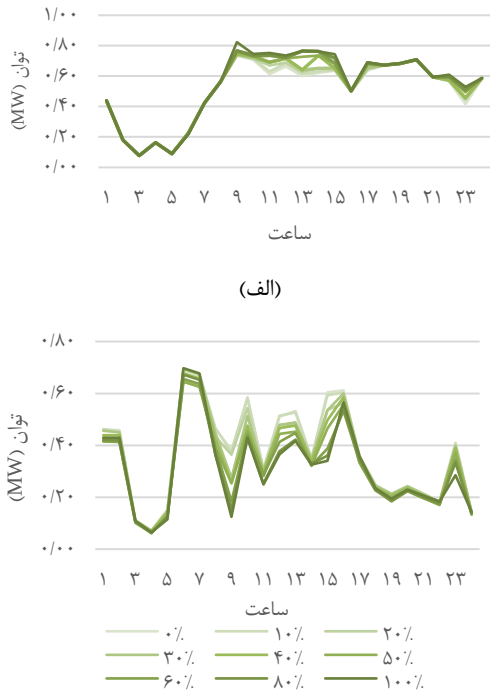
UNCORRECTED

حداکثر ظرفیت در بازار شرکت کرده‌اند نسبت به زمانی که امکان مشارکت در بازار وجود ندارد در حدود ۱/۵ درصد است.

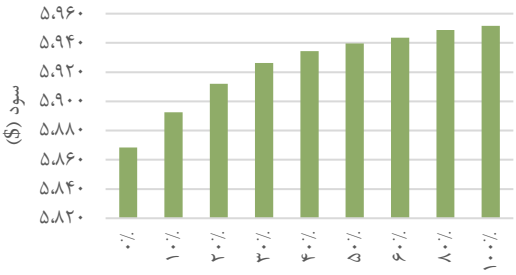


شکل ۸- انرژی خریداری شده در بازار زمان‌واقعی، الف) مجموع انرژی خریداری شده، ب) میزان انرژی در هر ساعت.

به‌منظور ارائه ارزیابی کمی و منسجم از عملکرد مدل پیشنهادی، جدول ۱ شاخص‌های کلیدی عملیاتی و اقتصادی نیروگاه مجازی را تحت دو سطح ریسک متفاوت ($\beta=0$) و ($\beta=1$) و در دو حالت با و بدون دسترسی به خدمات پاسخ‌گویی بار در بازار IDRX مقایسه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که دسترسی به DR به‌طور پیوسته موجب افزایش سود مورد انتظار و بهبود شاخص CVaR (۵٪ بدترین سناریوها) شده و این اثر در حالت ریسک‌پذیر ($\beta=0$) برجسته‌تر است، در حالی که با افزایش ریسک‌گریزی، شدت تأثیر کاهش می‌یابد. همچنین، حضور DR باعث افزایش بهره‌برداری از واحدهای حرارتی و کاهش وابستگی به خرید انرژی از بازار زمان واقعی تا نزدیک صفر شده است که بیانگر نقش مؤثر DR در جبران عدم قطعیت تولید بادی و کاهش ریسک عدم ایفای تعهدات بازار می‌باشد. از سوی دیگر، تعدیل فروش انرژی در بازار روز بعد در حضور DR نشان‌دهنده اتخاذ سیاست‌های محافظه‌کارانه‌تر در پیشنهاددهی و کاهش مواجهه با جریمه‌های احتمالی است. به‌طور کلی، نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که مشارکت در بازار IDRX نه‌تنها سودآوری نیروگاه مجازی را بهبود می‌بخشد، بلکه ساختار ریسک و تصمیمات بهره‌برداری آن را نیز به‌صورت معناداری تحت تأثیر قرار می‌دهد.



شکل ۹- میزان ذخیره چرخان فروخته شده توسط نیروگاه مجازی به ازای ظرفیت‌های مختلف DR در بازار IDRX. الف) ظرفیت چرخان پایین. ب) ظرفیت چرخان بالا.



شکل ۱۰- میزان سود نیروگاه مجازی در مبادلات ۲۴ ساعته به ازای مقادیر مختلف DR در بازار IDRX.

جدول ۱: شاخص‌های عملکرد کلیدی نیروگاه مجازی تحت دو سطح ریسک β=0 و β =1 با و بدون دسترسی به خدمات DR در بازار IDRX

شاخص	بدون DR (β=0)	۱۰۰٪ با DR (β=0)	بدون DR (β=1)	۱۰۰٪ با DR (β=1)	تغییر نسبت به حالت بدون DR	توضیح عملکرد
سود مورد انتظار (دلار)	۵۹۵۰	۵۹۸۰	۵۴۸۹	۵۴۹۲	β=۰; ۰٪/۵ β=۱; ٪/۰۵	سود نیروگاه مجازی در مبادلات ۲۴ ساعته افزایش یافته و با ریسک‌پذیری بالاتر (β=0) بیشترین رشد مشاهده می‌شود.
CVaR شاخص (۵٪ بدترین سناریو) (دلار)	۵۱۲۵	۵۲۵۰	۵۳۰۵	۵۳۱۰	β=۰; ۲٪/۴ β=۱; ۰٪/۰۹	DR ریسک ناشی از بدترین حالت‌ها را کاهش داده و شاخص CVaR افزایش می‌یابد.
مجموع خروجی واحد حرارتی (مگاوات ساعت)	۲۴.۴۲	۲۵.۰	۲۳.۴۸	۲۴.۴۲	β=۰; ۲٪/۷ β=۱; ۴٪	DR موجب افزایش بهره‌برداری از واحدهای حرارتی و کاهش وابستگی به ذخیره برای جبران نوسانات بادی شده است.
فروش انرژی در بازار روز بعد (مگاوات ساعت)	۱۷۹	۱۲۵	۱۲۷	۱۲۵	β=۰; -۳۰٪ β=۱; ۱٪/۶	کاهش فروش ناشی از DR ، تعهد کمتر به تحویل انرژی و کاهش ریسک جریمه ناشی از عدم تأمین انرژی است.
خرید انرژی در بازار زمان واقعی (مگاوات ساعت)	۱۳.۰۶	۰.۲	۱۰.۱۲	۰	تقریباً صفر	دسترسی به DR موجب کاهش کامل نیاز به خرید انرژی در بازار زمان واقعی شده است.
مجموع مبادلات DR (مگاوات ساعت)	–	۳۶.۷	–	۹.۸	–	مشارکت محافظه‌کارانه نیروگاه در بازار IDRXکاهش یافته و ریسک ناشی از عدم قطعیت بازار کنترل شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک ساختار نوآورانه برای تعیین روش بهینه پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار روز بعد ارائه شد که مشارکت بارهای پاسخگو در بازارهای محلی را نیز لحاظ می‌کند. مدل پیشنهادی با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره به‌صورت دوسطحی و ساختار تصادفی سه‌مرحله‌ای طراحی شده است تا بتواند عدم قطعیت تولید بادی و رفتار واحدهای زیرمجموعه نیروگاه مجازی را در تصمیم‌گیری‌های روز بعد، میان‌روزی و زمان واقعی لحاظ کند. این ساختار امکان تحلیل اثر سیاست‌های قیمت‌گذاری و تصمیمات سطح بالا بر رفتار بارهای پاسخگو و تصمیمات سطح پایین را فراهم می‌آورد و مدل‌سازی دقیق روابط دو سطحی، اثر حضور نیروگاه مجازی در بازارهای مختلف را قابل ارزیابی می‌سازد.

نتایج عددی نشان می‌دهد که مشارکت در بازار میان‌روزی IDRX موجب افزایش حدود ۲٫۵ درصدی سود مورد انتظار نیروگاه مجازی شده و استراتژی بهره‌برداری آن در سایر بازارها را تغییر داده است؛ به‌گونه‌ای که فروش انرژی در بازار روز بعد افزایش و مبادلات در بازار زمان واقعی بیش از ۹۰ درصد کاهش یافته است. علاوه بر این، حضور در بازار IDRX تمایل نیروگاه مجازی به فروش ظرفیت ذخیره چرخان پایین را افزایش و تمایل به فروش ظرفیت ذخیره چرخان بالا را کاهش داده است. این نتایج نشان می‌دهند که مشارکت در بازارهای میان‌روزی می‌تواند تعادل میان بازارهای روز بعد و زمان واقعی را بهبود بخشد، اما کاهش تمایل به ارائه خدمات جانبی، چالش‌هایی مانند افزایش هزینه بهره‌برداری از شبکه را به همراه دارد.

محدودیت‌های مدل شامل حساسیت نتایج به پارامترهای DR، ریسک‌پذیری نیروگاه مجازی، اثر ساده‌سازی‌های خطی‌سازی بر کیفیت پاسخ و فرضیات مدل‌سازی رفتار بارها است. این محدودیت‌ها می‌توانند در شرایط واقعی بازار تأثیرگذار باشند و نیازمند تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی بیشتر هستند. مسیرهای توسعه آینده شامل تعمیم مدل به سناریوهای شبکه پیچیده‌تر، تحلیل تعامل چند نیروگاه مجازی، بهینه‌سازی روش‌های کاهش پیچیدگی محاسباتی، و بررسی اثر سیاست‌های

UNCORRECTED

قیمت‌گذاری بر پایداری شبکه و بهره‌برداری از ذخیره‌سازی انرژی می‌باشد. همچنین، مطالعات آتی می‌توانند پیامدهای عملی حضور نیروگاه مجازی در بازارهای مختلف و تأثیر مشارکت DR بر عملکرد شبکه و بازار را به‌صورت کمی و تحلیلی ارزیابی کنند تا کاربرد عملی مدل در شرایط واقعی افزایش یابد.

مراجع

[1] Wang Jun, Jian Xu, Jingjing Wang, Deping Ke, Liangzhong Yao, Yue Zhou, and Siyang Liao. “Two-stage distributionally robust offering and pricing strategy for a price-maker virtual power plant.” Applied Energy 363 (2024): 123005.

[2] Jing Li, Huihong Mo, Qiming Sun, Wei Wei, and Kai Yin. "Distributed optimal scheduling for virtual power plant with high penetration of renewable energy." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 160 (2024): 110103.

[3] Obed N. Onsomu, Erman Terciyanlı, and Bülent Yeşilata. "Optimal Dispatch of a Virtual Power Plant Considering Distributed Energy Resources Under Uncertainty." Energies 18, no. 15 (2025): 4012.

[4] Vahedipour-Dahraie Mostafa, Rashidizadeh-Kermani Homa, Anvari-Moghaddam Amjad, and Siano Pierluigi. "Risk-averse probabilistic framework for scheduling of virtual power plants considering demand response and uncertainties." International Journal of Electrical Power and Energy Systems 121 (2020): 106126.

[۵] سید محمدباقر ساداتی، جمال مشتاق و میعادرضا شفیعی‌خواه، "تاثیر خودروهای الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار بر بهره‌برداری بهینه از شبکه‌ی توزیع در چهارچوب یک مدل دو سطحی جدید"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۵۳-۶۸.

[6] Pratik Harsh, Hongjian Sun, Debapriya Das, Goyal Awagan, and Jing Jiang. "Stochastic incentive-based demand response program for virtual power plant with distributed energy resources." IEEE Transactions on Industry Applications 61, no. 3 (2025): 4862-4875.

[۷] محمد حسن امیریون، میلاد علائی، "برنامه ریزی بهینه مصارف خانگی با استفاده از یک مدل پاسخگویی بار و با درنظر گرفتن رفاه ساکنین"، مجله مدلسازی در مهندسی، دوره ۲۱، شماره ۷۲، ۱۴۰۲، صفحه ۶۹-۸۲.

[8] Jaehyun Yoo and Jip Kim. "A risk-aware bi-level bidding strategy for virtual power plant with power-to-hydrogen system." *IEEE Transactions on Smart Grid* (Accepted/Published 2025).

[۹] نیلوفر گرامی و احمد قاسمی،"مدلسازی مصرف انرژی در فرآیندهای تولید واحدهای صنعتی بر مبنای روش تقریب خطی تکه‌ای با هدف اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار و مشارکت در بازار انرژی و خدمات جانبی"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۹، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۹۳-۱۷۹.

[10] Mao Yang, Yutong Huang, Zhao Wang, Bo Wang, and Xin Su. "A framework of day-ahead wind supply power forecasting by risk scenario perception." IEEE Transactions on Sustainable Energy 16, no. 3 (2025): 1659–1672.

[11] Heydarian-Forushani Ehsan, Shafie-Khah Miadreza, Yazdani Damavandi Maziar, and Catalão João P. S. “Risk-constrained offering strategy of wind power producers considering intraday demand response exchange,” IEEE Trans Sustain Energy, vol. 5, no. 4 (2014): 1036–1047.

[12] Hung T. Nguyen and Le Binh Le. "Bi-Objective-Based Cost Allocation for Cooperative Demand-Side Resource Aggregators." IEEE Transactions on Smart Grid 9, no. 5 (2018): 4220–4235.

[13] Zhiwei Luo, Shunhua Hong, and Yao Ming Ding. "A Data Mining-Driven Incentive-Based Demand Response Scheme for a Virtual Power Plant." Applied Energy 239 (2019): 549–559.

[14] Xin Liu, Tao Huang, Haifeng Qiu, Yang Li, Xueshan Lin, and Jianxiong Shi. "Optimal aggregation of a virtual power plant based on a distribution-level market with the participation of bounded rational agents." Applied Energy (2024): 123196. doi:10.1016/j.apenergy.2024.123196.

[15] Vahedipour-Dahraie Mostafa, Rashidizadeh-Kermani Homa, Shafie-Khah Miadreza, and Catalão João P. S. "Risk-Averse Optimal Energy and Reserve Scheduling for Virtual Power Plants Incorporating Demand Response Programs." IEEE Transactions on Smart Grid 12, no. 2 (2020): 1405–1415.

UNCORRECTED PROOF

[16] احسان نوکندی، "ارائه‌ی یک ساختار احتمالاتی دوسطحی برای برنامه‌ریزی بهینه‌ی نیروگاه‌های مجازی با در نظر گرفتن بازار مبادلات میان‌روزی پاسخگویی بار"، رساله دکتری، دانشگاه بیرجند، ۱۴۰۲.

[17] Jianfeng Zou, Shahab Ahmed, and Xiaodong A. Sun. "Stochastic Dual Dynamic Integer Programming." Mathematical Programming 175, no. 1–2 (2019): 461–502.

[18] Niels van der Laan and W. R. Oliveira. "A Converging Benders' Decomposition Algorithm for Two-Stage Mixed-Integer Recourse Models." Operations Research (2023). doi:10.1287/opre.2021.2223.

[19] "Nord Pool Market Data." https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/#/nordic/table (accessed Sep. 24, 2021).

[20] Rashidizadeh-Kermani, Homa, Vahedipour-Dahraie Mostafa, Shafie-Khah Miadreza, and and Siano Pierluigi,.
"A stochastic short-term scheduling of virtual power plants with electric vehicles under competitive markets", International Journal of Electrical Power and Energy Systems 124 (2021): 106343.

[21] Gholamreza Zakeri, Andrew B. Philpott, and David M. Ryan. "Inexact Cuts in Benders Decomposition", SIAM Journal on Optimization 10, no. 3 (2000): 643–657.

UNCORRECTED PROOF