Iranian Electric Industry Journal Quality & Productivity
P.P 54-66

Vol. 14/ No. 3/ Fall 2025
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

A new three-stage model for scheduling of virtual power plants considering flexible loads

Ehsan Nokandi, Mostafa Vahedipour-Dahraie, Saeedreza Goldani
ehsanno@ntnu.no
vahedipour_m@birjand.ac.ir
sgoldani@birjand.ac.ir

Abstract
With changes in the competitive structure of the electric energy market and the development of distributed generation resources and demand response loads, virtual power plant bidding has become one of the key topics. This paper investigates a probabilistic decision-making model for optimizing virtual power plant bidding in the day-ahead market, considering the participation of demand response loads in intra-day markets. The proposed model includes a three-stage programming approach for the simultaneous management of energy and reserve capacity and evaluates the impact of demand response load exchanges in intra-day markets on improving the plant's profit while considering risk tolerance. In the proposed model, the participation of the virtual power plant in both the energy market and the intra-day market is modeled in detail using an innovative method based on the stochastic dual dynamic programming (SDDP) approach. The study examines the effect of participation in the intra-day market on changing the virtual power plant's behavior and reducing imbalances caused by production forecast errors. The results show that participation in the intra-day market can increase the virtual power plant's profit by up to 2.5% and improve risk management by 2.7%.

Keywords: Probabilistic programming, Stochastic dual dynamic programming, Electricity market, Demand response aggregator, Virtual power plant.

Date of sending: 2024/10/08
Acceptance date: 2025/11/30

Corresponding author's name: Mostafa Vahedipour-Dahraie
Corresponding author's address: vahedipour_m@birjand.ac.ir

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۶۶-۵۴

Vol. 14 / No. 3/ Fall 2025
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

ارائه‌ی یک مدل سه‌مرحله‌ای جدید برای پیشنهاددهی نیروگاه‌های مجازی با در نظر گرفتن بارهای انعطاف‌پذیر

نوع مطالعه: پژوهشی

احسان نوکندی[۱،۲]، پست دکتری، مصطفی واحدی‌پور دهرائی[۲]، دانشیار، سعیدرضا گلدانی[۲]، استادیار
۱- دانشکده اقتصاد - دپارتمان اقتصاد صنعتی و مدیریت تکنولوژی- تروندهایم-نروژ
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران

ehsanno@ntnu.no, vahedipour_m@birjand.ac.ir, sgoldani@birjand.ac.ir.

چکیده: با تغییرات در ساختار رقابتی بازار انرژی الکتریکی و توسعه منابع تولید پراکنده و بارهای پاسخگو، پیشنهاددهی نیروگاه مجازی به یکی از موضوعات مهم تبدیل شده است. این مقاله به بررسی یک مدل تصمیم‌گیری احتمالاتی برای بهینه‌سازی پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار روز بعد، با در نظر گرفتن مشارکت بارهای پاسخگو در بازارهای میان‌روزی می‌پردازد. مدل پیشنهادی شامل یک برنامه‌ریزی سه‌مرحله‌ای برای مدیریت هم‌زمان انرژی و ظرفیت ذخیره است و تأثیر مبادلات میان‌روزی بارهای پاسخگو بر بهبود سود نیروگاه را با لحاظ ریسک‌پذیری ارزیابی می‌کند. در مدل پیشنهادی مشارکت نیروگاه مجازی در بازار انرژی و بازار میان روزی با جزئیات کامل با استفاده از یک روش ابتکاری بر پایه روش برنامه‌ریزی پویای دوگان تصادفی (SDDP) مدل‌سازی شده است. در این مطالعه اثر مشارکت در بازار میان‌روزی بر تغییر رفتار نیروگاه مجازی و کاهش عدم تعادل ناشی از خطای پیش‌بینی تولید بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که مشارکت در بازار میان‌روزی می‌تواند تا ۲.۵٪ سود نیروگاه مجازی را افزایش دهد و به بهبود ۳ درصدی در مدیریت ریسک منجر شود.

واژه های کلیدی: برنامه‌ریزی احتمالاتی، برنامه‌ریزی پویای دوگان تصادفی، بازار برق، تجمیعگر بارهای پاسخگو، نیروگاه مجازی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۴/۰۹/۰۹

نام نویسنده‌ی مسئول : مصطفی واحدی‌پور دهرائی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران- بیرجند- دانشگاه بیرجند

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]

۱- مقدمه

با گسترش تولیدات پراکنده و افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر، مسئله‌ی برنامه‌ریزی و تعیین استراتژی بهینه‌ی مشارکت در بازار برای نیروگاه‌های مجازی اهمیت روزافزونی یافته است. این نوع نیروگاه‌ها به صورت ذاتی با عدم قطعیت‌های ناشی از رفتار تولیدی واحدهای تجدیدپذیر و خطاهای پیش‌بینی توان آن‌ها روبه‌رو هستند که در نتیجه، ریسک فرایند تصمیم‌گیری را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Xie et al., 2025). معمولاً برای تعدیل تأثیر منفی این عدم قطعیت‌ها، از تجهیزاتی مانند ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی (Zhao et al., 2025) و واحدهای تولید توان قابل کنترل (Li et al., 2025; Zhao et al., 2024) در ساختارنیروگاه مجازی استفاده می‌شود. با این حال، امروزه استفاده از خدمات پاسخ‌گویی بار به عنوان یکی از مهم‌ترین راهکارها برای حل چالش عدم قطعیت بالای مسئله برنامه‌ریزی نیروگاه مجازی مورد توجه محققان قرار گرفته است (Vahedipour-Dahraie et al., 2020; Nokandi et al., 2022; Lv et al., 2025; محبوبی مقدم و همکاران ۱۴۰۱، نجفی و همکاران ۱۳۹۴). با پیشرفت سیستم‌های مخابراتی و ظهور شبکه‌های هوشمند، مفهوم پاسخ‌گویی بار در برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت و به‌ویژه در نیروگاه‌های مجازی اهمیت بسیار بالایی پیدا کرده است.

در دهه‌ی اخیر، مسئله‌ی تصمیم‌گیری و پیشنهاددهی بهینه‌ی نیروگاه مجازی در بازار برق توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده و مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است (Vahedipour-Dahraie et al., 2021; Ghorbankhani et al., 2018; Freire-Lizcano et al., 2019; Cui et al., 2019). اغلب این پژوهش‌ها، بازار روزبعد را به عنوان اصلی‌ترین بستر مبادله انرژی در نظر گرفته‌اند و در بسیاری از آنها از مدل‌های دو سطحی برای تحلیل رفتار بهره‌بردار نیروگاه مجازی و عوامل اثرگذار بر تسویه‌ی بازار استفاده شده است. در این مقالات نحوه پیشنهاددهی و عملکرد بهره‌بردار نیروگاه مجازی گاه به همراه نحوه عملکرد ISO در تسویه بازار و گاه نیز همراه با نحوه رفتار اجزای زیرمجموعه نیروگاه مجازی به منظور کسب سود بیشتر دو سطح بهینه‌سازی مدل BLP را تشکیل می‌دهند. به عنوان مثال، Shafikhani و همکاران (۲۰۱۹) مدلی به‌منظور دستیابی به روش بهینه مشارکت در بازار برای یک نیروگاه مجازی شامل چندین واحد تولیدی با مالکیت‌های مستقل ارائه داده‌اند. آنها تلاش کرده‌اند تا با به‌کارگیری مدلی مبتنی بر BLP علاوه بر بیشینه کردن سود بهره‌بردار نیروگاه مجازی، سود مالکین واحدهای تولیدی زیرمجموعه نیروگاه مجازی نیز بیشینه نمایند. همچنین، مسئله بهینه‌سازی سطح پایین به کمک شرایط کراش-کان-تاکر[1] (KKT) به سطح بالا منتقل کرده تا یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط عدد صحیح[2] (MINLP) تشکیل شود. به کمک تئوری دوگان[3]، مسئله MINLP به یک مسئله برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح[4] (MILP) تبدیل شده که توسط روش‌های ریاضی مرسوم قابل حل است. اگرچه در چه در برخی از دیگر مقالات همچون از الگوریتم‌های فراابتکاری نیز برای حل مسائل دوسطحی مشابه استفاده شده است (Goodarzi et al., 2024).

در مسائل تصمیم‌گیری و پیشنهاددهی بهینه‌ی نیروگاه مجازی، به دلیل گسترده بودن بازه‌ی تصمیم‌گیری و نیز وجود منابع پر تعداد عدم قطعیت و تلاش برای مدل کردن این عدم قطعیت‌ها در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی تصادفی، عمدتاً از روش تجزیه بندرز و دیگر مشتقات آن همچون برنامه‌ریزی پویای دوگان تصادفی[5] (SDDP) استفاده می‌شود. برای نمونه، Sevedi و همکاران (۲۰۲۵) روشی برای برنامه‌ریزی میان‌مدت یک نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن تحلیل ریسک و با کمک روش تجزیه بندرز ارائه داده‌اند. آنها مسئله چندمرحله‌ای تصادفی پیش‌رو را به یک مسئله دومرحله‌ای تصمیمات بازار روز بعد و تصمیمات لحظه‌ای تقلیل داده و به ترتیب به عنوان مسئله اصلی و زیرمسئله در روش تجزیه بندرز پیاده‌سازی کرده‌اند.

همچنین، Fatouros و همکاران (۲۰۱۹) از روش SDDP به منظور برنامه‌ریزی یک تجمیعگر منابع تولید پراکنده در بازه‌های زمانی شش ساعته تا یک ماهه استفاده شده است. همچنین عملکرد روش SDDP در حل مسئله تخصیص واحدها[6] با در نظر گرفتن متغیرهای حالت باینری مسئله برای یک بازه بیست و چهار ساعته توسط Li و همکاران (۲۰۲۵) مورد بررسی قرار گرفته است. Ma و همکاران (۲۰۲۴) نیز از روش SDDP به منظور فائق آمدن به حجم محاسبات بالا در برنامه‌ریزی بیست و چهار ساعته ذخیره‌ساز در یک ریز شبکه با در نظر گرفتن جزئیات دقیق عملکرد ذخیره‌ساز و قیود امنیتی ریزشبکه استفاده شده است.

در این مقاله مدل جدیدی برای دستیابی به استراتژی بهینه پیشنهاددهی در بازار روز بعد، به عنوان نقطه آغازین زنجیره مبادلات کوتاه مدت در بازار برق، برای یک نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن امکان مشارکت در یک بازار محلی و میانروزی پاسخگویی بارهای پاسخگو ارائه می‌شود. در مدل پیشنهادی، ضمن برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره، تاثیر مبادلات میان‌روزی بارهای پاسخگو در بهبود میزان سود نیروگاه با در نظر گرفتن شاخص‌های ریسک‌پذیری ارزیابی و تحلیل شده است. در روش پیشنهادی مشارکت نیروگاه مجازی در بازار انرژی و بازار میان روزی با جزئیات کامل با استفاده از یک روش ابتکاری بر پایه روش SDDP مدل‌سازی شده است. روش ابتکاری SDDP به منظور فائق آمدن بر حجم بالای محاسبات پیشنهاد شده و قادر است با آزادسازی متغیرهای باینری مرحله میان‌روزی موجب دستیابی به پاسخی دقیق شود. تمرکز اصلی این مقاله ارائه مدلی دقیق و کارامد برای پیشنهاددهی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]

نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن پاسخ‌گویی بار است. سازوکار پیشنهادی در مدل‌سازی مبتنی بر یک بازار میان‌روزی پاسخگویی بار داخلی و خارجی بوده که البته در بازه زمانی میان‌روزی به منظور جبران خطای پیش‌بینی پارامترهای عدم قطعیت اجرا می‌شود. نمایی از ساختار مدل پیشنهادی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

بررسی تحقیقات منتشر شده در این حوزه نشان می‌دهد تعداد بسیار محدودی از محققان اقدامات میان‌روزی را در مدل پیشنهادی خود گنجانده‌اند (Shafikhani et al., 2019; Ma et al., 2019). از دیگر ویژگی‌های مهم این پژوهش، مدل‌سازی مسئله به صورت دوسطحی است. این نکته بدان معنا است که در این طرح تلاش می‌شود شرایطی برای همکاری نیروگاه مجازی با تجمیعگران بارهای پاسخگو دارای مدیریت مستقل فراهم آید تا سود هر دو طرف بهینه گردد. چنین مدل دوسطحی‌ای در مراجع مذکور لحاظ نشده و نیروگاه مجازی فارغ از میزان عایدی زیرمجموعه خود، به دنبال کسب سود بیشتر خود است.

همچنین، با هدف بررسی تاثیر مشارکت در بازار میان‌روزی بر میزان ریسک فراروی نیروگاه مجازی در برنامه‌ریزی روزانه، از شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی[۶] (CVaR) استفاده شده است تا تاثیر میزان ریسک‌پذیری یا ریسک‌گریزی نیروگاه مجازی بر نحوه اتخاذ تصمیمات آن در بازارهای مختلف بررسی شود.

ادامه‌ی این مقاله بدین صورت سازماندهی شده است. در بخش ۲، مسئله‌ی پیشنهادی برای پیشنهاددهی نیروگاه مجازی بیان شده است. در بخش ۳، برنامه‌ی پیشنهادی در قالب یک مسئله SDDP مدل‌سازی شده است. روش پیاده‌سازی الگوریتم SDDP در بخش ۴ و نتایج عددی و تحلیل آنها در بخش ۵ آورده شده است. در نهایت، در بخش ۶، نتیجه‌گیری این مطالعه ارائه شده است.

۲- مدل پیشنهای برای پیشنهاددهی نیروگاه مجازی

در مدل پیشنهادی، تصمیم‌گیری برای مشارکت و پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در یک فرایند سه‌مرحله‌ای صورت می‌گیرد. بدین معنی که نیروگاه مجازی علاوه بر مشارکت در بازارهای انرژی روز بعد و بازار تعادل، به منظور کاهش جریمه‌های ناشی از نامتعادلی توان در زمان واقعی، در بازار میان‌روزی نیز مشارکت می‌کند. بنابراین، نیروگاه مجازی در سه مرحله نیاز به اتخاذ تصمیماتی دارد که می‌بایست در با یک مدل تصادفی سه مرحله‌ای مدل شود. در مرحله اول این مدل، که به «مرحله‌ی روز بعد» موسوم است، نیروگاه مجازی باید پیشنهاد خود را در بازار انرژی روز بعد و بازار ذخیره‌ی چرخان ارائه دهد. 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.

در مرحله دوم یا «مرحله‌ی میان‌روزی»، تا یک ساعت پیش از لحظه‌ی مبادله انرژی باید پیشنهادات اصلاحی خود را ارائه دهد. در این لحظه قیمت بازار روز بعد مشخص بوده و روشن یا خاموش بودن واحدهای حرارتی نیز تعیین شده است. همچنین، فرض می‌شود که در این مرحله خروجی واحد بادی نیز به صورت قطعی مشخص شده است. در چنین شرایطی نیروگاه مجازی برای خرید خدمات پاسخگویی بار از طریق بازار میان روزی اقدام می‌کند. با این حال مقدار خدمات پاسخگویی بار قابل تأمین از طریق بازار میان روزی با عدم قطعیت همراه بوده و قطعی نیست. اگر چه از طریق یک مدل بهینه سازی دو سطحی تلاش می شود رفتار تجمیعگران در سمت فروش بازار تخمین زده شود و مقدار خدمات پاسخگویی بار تأمین شده پیش‌بینی گردد، با این حال این پیش‌بینی می‌تواند همراه با خطا باشد.

در نهایت در مرحله سوم، که «مرحله‌ی زمان‌واقعی» نامیده می شود، تجمیعگران میزانی از خدمات پاسخگویی بار را که تمایل به فروش دارند اعلام کرده‌اند. با توجه به میزان تولید واحد بادی، میزان خدمات پاسخگویی بار خریداری شده و قیمت بازار، نیروگاه مجازی باید قید تعادل خود را از طریق تنظیم خروجی واحدهای حرارتی، شارژ و دشارژ ذخیره ساز 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 و به ترتیب ۱/۱ و ۰/۹ برابر قیمت بازار روز بعد فرض می‌گردند. فرآیند تصمیم‌گیری در مدل پیشنهادی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

۳- مدل‌سازی برنامه‌ی پیشنهادی در قالب یک مسئله SDDP

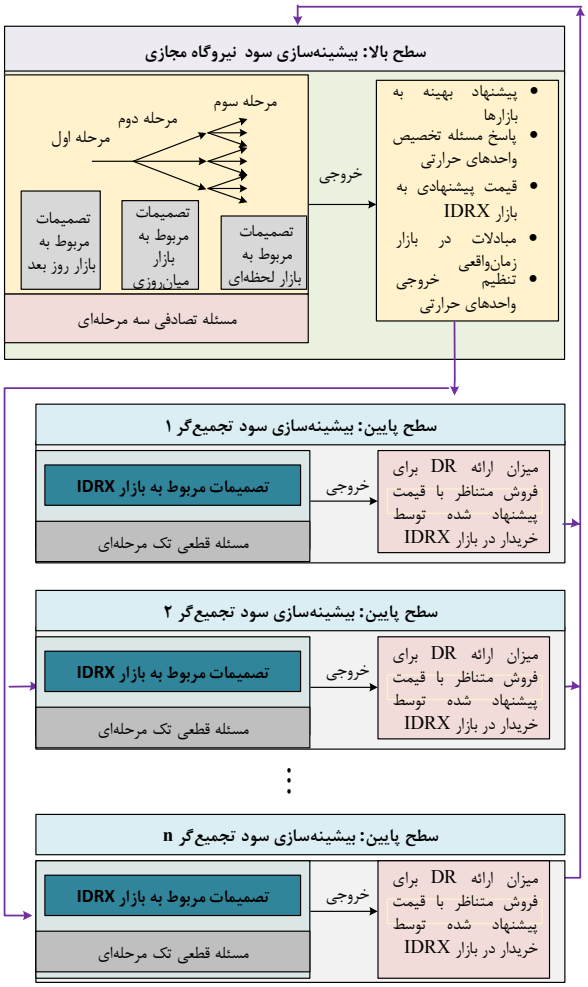
مسئله پیشنهادی را می‌توان به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی تصادفی سه مرحله‌ای فرمول‌بندی کرد. متغیرهای عدم قطعیت در این مسئله، تولید بادی، قیمت بازار و پاسخ بازیگران سطح پایین در نظر گرفته شده‌اند.

این مسئله به دلایل مختلف مسئله‌ای پیچیده بوده که حل آن توسط حلگرهای قدرتمند مانند CPLEX و Gurobi نیز با چالش مواجه است. دلایل پیچیدگی بالای این مسئله را می‌توان در موارد زیر خلاصه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]

نمود:

- تعداد بالای سناریوهای مورد نیاز به منظور در نظر گرفتن دقیق تمام پارامترهای عدم قطعیت مسئله،
- حضور پر تعداد متغیرهای عدد صحیح، هم در متغیرهای واحدهای حرارتی و هم در مدل دو سطحی بازار میان‌روزی،
- وجود متغیرهای پیچیده که مانع از تفکیک مسئله به اجزای کوچکتر، به عنوان مثال بر اساس سناریو، می‌شوند، مانند متغیرهای مرحله روز بعد،
- در نهایت وجود قیدهای پیچیده که پله‌های زمانی مسئله برنامه‌ریزی را به یکدیگر مرتبط می‌کنند، مانند قید انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز یا حداکثر نرخ افزایش و کاهش خروجی واحدهای حرارتی.



شکل ۱: شماتیکی از ساختار دو سطحی مدل پیشنهادی

برای فائق آمدن بر پیچیدگی‌های بالای مسئله پیش‌رو در این مقاله از روش SDDP استفاده شده است که با آزاد سازی متغیرهای پیچیده بتوان مسئله را به زیرمسئله‌های کوچکتر تقسیم کرد. روش SDDP به طور خاص برای حل مسائل برنامه‌ریزی چند مرحله‌ای تصادفی از روش تجزیه بندرز چندمرحله‌ای توسعه پیدا کرده است. فرض تصادفی بودن مسئله و همچنین طراحی درخت سناریو با ساختاری خاص سبب می شود روش SDDP نسبت به تجزیه بندرز چند مرحله‌ای در همگرایی به پاسخ نهایی سریع‌تر و بهینه‌تر عمل کند. در روش SDDP عدم قطعیت وارد مسائل دوم به بعد (زیرمسئله‌ها) می شود و هر زیرمسئله با مجموعه‌ای از زیرمسئله‌های محتمل نمایندگی می شود که هر یک دارای یک احتمال وقوع مختص به خود هستند. به منظور تخمین زیرمسئله‌ی کلی، امید ریاضی متغیرهای دوگان هر زیرمسئله‌های محتمل محاسبه شده و در نهایت برای تولید برش بندرز از مجموع وزنی همگی آن‌ها متناسب با احتمال رخدادشان استفاده می‌گردد. این برش های بندرز تخمینی از امید ریاضی زیرمسئله‌ها را به دست می‌دهند. در نهایت، کران‌های بالا و پایین به دست آمده در طی فرایند الگوریتم، در واقع، امید ریاضی این کران‌ها، و پاسخ نهایی نیز امید ریاضی پاسخ بهینه مسئله خواهد بود. در مورد SDDP نیز پس از نزدیک شدن مقادیر امید ریاضی کران‌های بالا و پایین الگوریتم تکرار متوقف می‌شود.

برای حل مسئله سه‌مرحله‌ای پیشنهادی لازم است هر مرحله به صورت جداگانه در قالب معادله بلمن[۸] صورت‌بندی شود. برای مسئله روز بعد خواهیم داشت:

$$\max\Bigg\{\sum_{t,s,s'}\pi_s\pi_{s'}\Bigg[\lambda_{t,s}^{DA}\,P_t^{DA} + \left(\lambda_{t,s}^{Res+} + k_{t,s,s'}^{Dep+}\lambda_{t,s}^{Dep+}\right)P_t^{Res+} + \left(\lambda_{t,s}^{Res-} + k_{t,s,s'}^{Dep-}\lambda_{t,s}^{Dep-}\right)P_t^{Res-} - \left(\sum_c\left(-I_{c,t}^{CPP} + SU_c^{CPP}y_{c,t}^{CPP} + SD_c^{CPP}z_{c,t}^{CPP}\right)\right)\Bigg] + \varphi_1\left(P_t^{DA}, P_t^{Res+}, P_t^{Res-}, I_{c,t}^{CPP}, y_{c,t}^{CPP}, z_{c,t}^{CPP}, S, S'\right)\Bigg\} \quad (۱)$$

$$s.t \qquad \sum_{h=1}^{t+\mathrm{UT}_c-1} I_h^c \geq \mathrm{UT}_c y_t^c \quad (۲)$$

$$\sum_{h=1}^{t+\mathrm{DT}_c-1}(1-I_h^c) \geq \mathrm{DT}_c z_t^c \quad (۳)$$

$$y_t^c - z_t^c = I_t^c - I_{t-1}^c\,;\;\; y_t^c + z_t^c \leq 1 \quad (۴)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]

$$P_t^{Res+} \le \sum_c I_t^c \,\mathrm{UR}^c + \sum_b MC_b \quad (۵)$$

$$P_t^{Res-} \le \sum_c I_t^c \,\mathrm{DR}^c + \sum_b MD_b \quad (۶)$$

که در آن π_s و $\pi_{s'}$ به ترتیب احتمال وقوع سناریوی $s \in S$ و $s' \in S'$ و همچنین φ_1 تابع سود آینده برای مرحله اول در معادله بلمن است. مسئله میان‌روزی به صورت زیر خواهد بود:

$$-\lambda_{t,s}^{DR} + \bar{\lambda}_{a,d,t,s}^{DR} + \gamma_{a,d,t,s}^{UB} - \gamma_{a,d,t,s}^{LB} = 0 \quad (۷)$$

$$0 \le P_{a,d,t,s}^{DR} \le \bar{P}_{a,d,t,s}^{DR} \quad (۸)$$

$$\gamma_{a,d,t,s}^{UB} \le M q_{a,d,t,s}^{DR,UB} \quad (۹)$$

$$P_{a,d,t,s}^{DR} - \bar{P}_{a,d,t,s}^{DR} \le M(1 - q_{a,d,t,s}^{DR,UB}) \quad (۱۰)$$

$$\gamma_{a,d,t,s}^{LB} \le M q_{a,d,t,s}^{DR,LB} \quad (۱۱)$$

$$P_{a,d,t,s}^{DR} \le M(1 - q_{a,d,t,s}^{DR,LB}) \quad (۱۱)$$

$$\gamma_{a,d,t,s}^{LB}, \gamma_{a,d,t,s}^{UB} \ge 0 \quad (۱۲)$$

$$P_{t,s}^{IDA} = P_t^{DA}$$

$$P_{t,s}^{IRes-} = P_t^{Res-} \quad (۱۳)$$

$$P_{t,s}^{IRes+} = P_t^{Res+} \quad (۱۴)$$

$$I_{c,t,s}^{ICPP} = I_{c,t}^{CPP} \quad (۱۵)$$

$$y_{c,t,s}^{ICPP} = y_{c,t}^{CPP} \quad (۱۶)$$

$$z_{c,t,s}^{ICPP} = z_{c,t}^{CPP} \quad (۱۷)$$

که در آن φ_2 تابع سود آینده برای مرحله دوم در معادله بلمن است. همچنین $P_{t,s}^{IDA}$، $P_{t,s}^{IRes-}$، $P_{t,s}^{IRes+}$، $I_{c,t,s}^{ICPP}$، $y_{c,t,s}^{ICPP}$ و $z_{c,t,s}^{ICPP}$ متغیرهای پیوسته متناظر با متغیرهای مرحله روز بعد هستند. اگر چه متغیرهای $I_{c,t,s}^{ICPP}$، $y_{c,t,s}^{ICPP}$ و $z_{c,t,s}^{ICPP}$ از نوع پیوسته تعریف شده اند، با این حال به واسطه‌ی قیود (۱۵) تا (۱۷) همواره مقادیری باینری اتخاذ خواهند کرد. همچنین وجود این متغیرها و قیود (۱۲) تا (۱۷) برای عملکرد صحیح SDDP ضروری است. این مسئله ناشی از این نکته است که روش تجزیه بندرز به عنوان پایه‌ی اصلی روش SDDP بر تخمین فضای حل مسئله مراحل بعدی برنامه‌ریزی از طریق برش‌های بندرز استوار است. این مهم تنها در شرایطی مقدور است که فضای حل تمام زیرمسئله‌ها مستقل از متغیرهای تصمیم مراحل قبل باشد. علت استفاده از دوگان زیرمسئله به جای خود زیرمسئله در تولید برش‌های بندرز نیز ناشی از همین دلیل است که فضای حل مسئله دوگان مستقل از متغیرهای تصمیم مرحله قبل است. عدم وجود قیود (۱۲) تا (۱۷) موجب خواهد شد برش‌های بندرز اضافه شده به مسئله مرحله میان‌روزی ناشی از حل دوگان مسئله زمان‌واقعی شامل متغیرهای تصمیم مرحله‌ی روز بعد باشد که این مشکل عملکرد صحیح الگوریتم SDDP را مختل می‌کند.

در نهایت مسئله‌ی مرحله‌ی زمان‌واقعی به صورت زیر خواهد بود:

$$max\left\{\sum_{t,s,s'} \pi_s \pi_{s'} \left[-\sum_{c,m} P_{c,m,t,s,s'}^{CPP} \lambda_{c,m}^{CPP} + \lambda_{t,s,s'}^{S} P_{t,s,s'}^{S} - \lambda_{t,s,s'}^{P} P_{t,s,s'}^{P} + \lambda_{24,s}^{DA} E_{24,s,s'}^{ST} \right]\right\} \quad (۱۸)$$

$$-\sum_{c,m} P_{c,m,t,s,s'}^{CPP} - \sum_b \left(P_{b,t,s,s'}^{B,D} - P_{b,t,s,s'}^{B,C}\right) + P_{t,s,s'}^{S} - P_{t,s,s'}^{P} \le \sum_c \underline{P}_c^{CPP} I_{c,t,s}^{ICPP} - P_{t,s}^{IDA} - \sum_w \left(P_{w,t,s}^{Wind}\right) + \sum_a P_{a,t,s}^{DR} + k_{t,s,s'}^{Dep-} P_{t,s}^{IRes-} - k_{t,s,s'}^{De-} P_{t,s}^{IRes+} \quad (۱۹)$$

$$\sum_m P_{c,m,t,s,s'}^{CPP} - \sum_m P_{c,m,t-1,s,s'}^{CPP} \le \mathrm{UR}^c\left(1 - y_{c,t,s}^{ICPP}\right) + \underline{P}_c^{CPP} \quad (۲۰)$$

$$E_{b,t,s,s'}^{B} - E_{b,t-1,s,s'}^{B} - P_{b,t,s,s'}^{B,C} \eta_b^{B,C} + \frac{P_{b,t,s,s'}^{B,D}}{\eta_b^{B,D}} \le 0 \quad (۲۱)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]

$$-E^{B}_{b,t,s,s'} + E^{B}_{b,t-1,s,s'} + P^{B,C}_{b,t,s,s'}\eta^{B,C}_{b} - \frac{P^{B,D}_{b,t,s,s'}}{\eta^{B,D}_{b}} \leq 0 \quad (۲۲)$$

لازم به ذکر است با توجه به اینکه مرحله زمان‌واقعی آخرین مرحله از برنامه‌ریزی چند مرحله‌ای مسئله است، لذا با صورت بندی تابع هدف مسئله زمان‌واقعی در قالب معادله بلمن، تابع φ_3، تابع سود آینده مرحله زمان‌واقعی، برابر با صفر بوده و لذا در معادلات فوق لحاظ نشده است.

در فرایند الگوریتم SDDP برای تولید برش‌های بندرز نیاز به حل دوگان مسائل مرحله دوم و سوم است. دوگان مسئله زمان‌واقعی به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\min \sum_{t,s,s'} \Bigg\{ u^{BAL}_{t,s,s'} \Bigg[\sum_{c} \underline{P}^{CPP}_{c} I^{CPP}_{c,t} - P^{DA}_{t} - \sum_{w} \left(P^{Wind}_{w,t,s}\right) + \sum_{a} P^{DR}_{a,t,s} + k^{Dep-}_{t,s,s'} P^{Res-}_{t} - k^{De-}_{t,s,s'} P^{Res+}_{t} \Bigg] + \sum_{c,m} u^{CUL}_{c,m,t,s,s'} \left(I^{CPP}_{c,t} \bar{P}^{CPP}_{c,m}\right) + \sum_{c,m} u^{CURR}_{c,m,t,s,s'} \left[\mathrm{UR}^{c}\left(1 - y^{CPP}_{c,t}\right) + \underline{P}^{CPP}_{c} y^{CPP}_{c,t}\right] + \sum_{c,m} u^{CDRR}_{c,m,t,s,s'} \left[\mathrm{DR}^{c}\left(1 - z^{CPP}_{c,t}\right) + \underline{P}^{c} z^{CPP}_{c,t}\right] + \sum_{b} \left(u^{BCR}_{b,t,s,s'} \bar{P}^{B,C}_{b} + u^{BDR}_{b,t,s,s'} \bar{P}^{B,D}_{b} + u^{BEU}_{b,t,s,s'} \bar{E}^{B}_{b} - u^{BEL}_{b,t,s,s'} \underline{E}^{B}_{b}\right) \Bigg\} \quad (۲۳)$$

$$-u^{BAL}_{t,s,s'} \geq -\pi_s \pi_{s'} \lambda^{P}_{t,s,s'} \; ; \quad \forall t, s, s' \quad (۲۴)$$

$$-u^{BAL}_{t,s,s'} + u^{CUL}_{c,m,t,s,s'} + u^{CURR}_{c,t,s,s'} - u^{CURR}_{c,t+1,s,s'} - u^{CDRR}_{c,m,t,s,s'} + u^{CDRR}_{c,m,t+1,s,s'} \geq -\pi_s \pi_{s'} \lambda^{CPP}_{c,m} \; ; \quad \forall c, m, t, s, s' \quad (۲۵)$$

$$u^{EB^1}_{b,t,s,s'} - u^{EB^1}_{b,t+1,s,s'} - u^{EB^2}_{b,t,s,s'} + u^{EB^2}_{b,t+1,s,s'} + u^{BEU}_{b,t,s,s'} - u^{BEL}_{b,t,s,s'} \geq 0 \; ; \quad \forall s, s' ; \; t \in \{1, \dots, 23\} \quad (۲۶)$$

$$u^{EB^1}_{b,t,s,s'} - u^{EB^1}_{b,t+1,s,s'} - u^{EB^2}_{b,t,s,s'} + u^{EB^2}_{b,t+1,s,s'} + u^{BEU}_{b,t,s,s'} - u^{BEL}_{b,t,s,s'} \geq \pi_s \pi_{s'} \lambda^{DA}_{24,s} \; ; \quad \forall s, s' ; \; t = 24 \quad (۲۷)$$

$$-u^{BAL}_{t,s,s'} + u^{BDR}_{b,t,s,s'} + \frac{u^{EB^1}_{b,t,s,s'}}{\eta^{B,C}_{b}} - \frac{u^{EB^1}_{b,t,s,s'}}{\eta^{B,C}_{b}} \geq 0 \; ; \quad \forall b, t, s, s' \quad (۲۸)$$

$$u^{BAL}_{t,s,s'} + u^{BCR}_{b,t,s,s'} - \eta^{B,C}_{b} u^{EB^1}_{b,t,s,s'} + \eta^{B,C}_{b} u^{EB^2}_{b,t,s,s'} \geq 0 \; ; \quad \forall b, t, s, s \quad (۲۹)$$

که در آن $u^{BAL}_{t,s,s'}$، $u^{CUL}_{c,m,t,s,s'}$، $u^{CURR}_{c,t,s,s'}$، $u^{CDRR}_{c,m,t,s,s'}$، $u^{BCR}_{b,t,s,s'}$، $u^{BDR}_{b,t,s,s'}$، $u^{EB^1}_{b,t+1,s,s'}$، $u^{EB^2}_{b,t,s,s'}$، $u^{BEU}_{b,t,s,s'}$ و $u^{BEL}_{b,t,s,s'}$ متغیرهای دوگان هستند.

دوگان مسئله میان‌روزی نیز بایست همانند مسئله زمان‌واقعی به دست آید. با این حال وجود متغیرهای باینری حاصل از روش M سبب خواهد شد که میان مسئله اصلی و دوگان شرایط دوگان ضعیف، و نه قوی، برقرار باشد. به عبارت دیگر مقدار پاسخ مسئله دوگان نه برابر با مسئله اصلی بلکه تنها یک حد بالا برای آن است. وجود متغیرهای گسسته در زیرمسئله‌های روش SDDP یک چالش بسیار جدی برای به بکارگیری این روش در حل مسائل برنامه‌ریزی چند مرحله‌ای است. در این مقاله روشی ابتکاری برای حل مسئله فراروی این پژوهش پیاده‌سازی شده است. در این روش متغیرهای باینری مسئله اصلی میان‌روزی با متغیرهای پیوسته بین صفر و یک آزاد می‌شوند و سپس از مسئله آزاد شده دوگان گرفته می‌شود. از دوگان مسئله آزاد شده در روند پسروی الگوریتم تکرار SDDP برای ایجاد برش‌های بندرز استفاده می‌شود. با این حال، در روند پیشرو، برای تعیین متغیرهای آزمایشی، از مسئله اصلی آزادسازی‌نشده استفاده می‌شود. با اعمال این روش نیاز به اصلاح شرط همگرایی نیز وجود دارد زیرا تابع سود آینده نه مسئله اصلی با متغیرهای گسسته، بلکه مسئله آزاد شده را تقریب می‌زند. با این حال از دو منظر پاسخ به دست آمده از این روش قابل قبول است. اول اینکه پاسخ نهایی مسئله آزادسازی شده و مسئله اصلی تفاوت بسیاری اندکی را با هم نشان می‌دهند. دوم اینکه متغیرهایی مرحله روز بعد که مقدار بهینه آن ها هدف اصلی حل مدل است، تغییرات بسیار کمتری نسبت به متغیرهای میان‌روزی به سبب آزادسازی از خود نشان می‌دهند.

دو مدل فوق برای برنامه‌ریزی ۹ ساعت ابتدای شبانه روز، به‌جای ۲۴ ساعت، مورد ا ستفاده قرار گرفته‌اند تا از این طریق، با کوچکتر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]

نمودن مسئله و کاهش تعداد متغیرها و قیود، امکان حل و مقایسه آن‌ها آن بدون استفاده از روش‌های تجزیه میسر باشد.

میزان اختلاف مقدار بهینه‌ی تابع هدف دو مسئله اصلی و آزاد شده به ترتیب ۸۹۷.۱۳ و ۸۹۹.۹۸ دلار به دست آمد که نشان دهنده اختلاف ناچیز در حدود ۰/۳۲٪ است.

٤- روش پیاده‌سازی الگوریتم SDDP

الگوریتم SDDP برای حل مسئله‌ی پیشنهادی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

ورودی‌ها:

- داده‌های پایه سیستم و پارامترهای مسأله
- تعداد مراحل تصمیم‌گیری *(T)*
- تعداد سناریوهای تصادفی *(M)*
- شرایط اولیه و متغیرهای تصمیم (شامل متغیرهای پیوسته و دودویی)

خروجی‌ها:

- مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم برای تمامی مراحل و سناریوها
- برآورد کران بالا و پایین تابع هدف

مراحل الگوریتم:

گام ۱: مقداردهی اولیه

1. تعیین مقادیر اولیه برای شمارنده تکرار $k = 1$
2. کران بالا $\bar{z}_{up_0} = inf$، کران پایین $\bar{z}_{low_0} = -inf$ و $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_2 = 0$.

گام ۲: تکرار تا رسیدن به شرط توقف

الف) آغاز روند پیشرو

۱. تا زمانی که شرط توقف محقق نشده ادامه بده:
۲. M سناریو را به صورت تصادفی انتخاب کن
۳. /آغاز روند پیشرو/
۴. برای $m = 1, \dots, M$ تکرار کن
۵. مسئله روز بعد را حل کن و متغیرهای آزمایشی روز بعد را به روز کن
۶. مسئله میان‌روزی را حل کن و متغیرهای آزمایشی میان‌روزی را به روز کن
۷. مسئله زمان‌واقعی را حل کن
۸. مقدار تابع هدف مسئله سه مرحله‌ای z_m را برای سناریوی m به دست بیاور
۹. پایان حلقه تکرار
۱۰. به‌روزرسانی کران پایین

$$\bar{z}_{low_k} = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} z_m$$

و

$$\sigma = \frac{1}{M-1}\left[\sum_{m=1}^{M}\left(z_m - \bar{z}_{low_k}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

ب) آغاز روند پسرو

۱. برای $m = 1, \dots, M$ تکرار کن
۲. برای $i = 1, \dots, N_s N_s$، تکرار کن
۳. دوگان مسئله زمان‌واقعی رابطه (۲۳) را به ازای متغیرهای آزمایشی حل کن
۴. پایان حلقه تکرار
۵. برش‌های بندرز را به دست آور
۶. پایان حلقه تکرار
۷. برای $m = 1, \dots, M$ تکرار کن
۸. برای $i = 1, \dots, N_s$ تکرار کن
۹. دوگان **مسئله میان‌روزی آزاد شده** (۲۳) را به ازای متغیرهای آزمایشی حل کن
۱۰. پایان حلقه تکرار
۱۱. برش‌های بندرز را به دست آور و به مسئله روز بعد (۱) اضافه کن.
۱۲. پایان حلقه تکرار
۱۳. مسئله (۱) را حل و کران بالا را با جایگذاری مقدار تابع هدف بدست آمده به‌روز کن.

ج) بررسی معیار توقف:

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]

۱. اگر اختلاف بین کران بالا و پایین از یک آستانه مشخص کمتر باشد، یا تعداد تکرار به حد مشخص رسیده باشد، الگوریتم متوقف می‌شود.

۲. در غیر این صورت، شمارنده تکرار kkافزایش یافته و الگوریتم تکرار می‌شود.

مدیریت متغیرهای دودویی:

در هر مرحله، متغیرهای دودویی به صورت صریح در فرمولاسیون مدل حضور دارند و هر زیربخش با رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح (MIP) حل می‌شود.

راهبرد مدیریت و حل آن‌ها مشابه سایر متغیرها و در روند تکرار اعمال می‌گردد.

۵- تحلیل نتایج عددی

نیروگاه مجازی مورد مطالعه یک نیروگاه تجاری شامل یک واحد بادی، دو واحد حرارتی، یک ذخیره‌ساز و بارهای پاسخگو است. پیش‌بینی میزان تولید واحد بادی، و همچنین، قیمت بازار روزبعد از بازار نورد پول[۹] Nord Pool (2021) استخراج شده و در شکل ۲ نشان داده شده است. مقدار قیمت خرید و فروش انرژی در بازار زمان‌واقعی نیز به ترتیب برابر ۱/۱ و ۰/۹ برابر قیمت بازار روز بعد فرض شده است. اطلاعات فنی مربوط به واحدهای حرارتی ذخیره‌ساز در جداول ۱ و ۲ آمده است. همچنین اطلاعات مربوط به بارهای پاسخگو ازرساله دکتری **نوکندی، ا. (۱۴۰۲)** استخراج شده است.

همچنین، 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، به هفت بازه، هر یک با طول $\frac{3}{4}\sigma$ است تقسیم شده‌اند (نوکندی، ا. ۱۴۰۲). 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 که در برنامه‌ی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۳ مقایسه ای بین سرعت و دقت حل مدل برای تعداد مختلف سناریوها بدون در نظر گرفتن CvaR و با فرض در دسترس بودن ۱۰۰٪ ظرفیت DR را نشان می دهد. برای حل مسئله نیز از حلگر CPLEX v. 12.6 استفاده شده است (GAMS Development Corporation; 2021). همچنین در جدول ۴ زمان مورد نیاز برای حل مدل پیشنهادی با مدل‌های ارائه شده در مراجع موجود مقایسه شده است.

جدول ۱: مشخصات فنی واحدهای حرارتی

واحد حرارتی	$\bar{P}^c$ (MW)	$\underline{P}^c$ (MW)	a_c ($)	b_c ($/MW)	c_c ($/MW^2)	UR^c (MW)	DR^c (MW)	SU^c ($)	SD^c ($)	UT_c (h)	DT_c (h)
واحد ۱	1.5	0.5	15	35	5	0.25	0.25	20	8	3	2
واحد ۲	1	0.2	6	46	1.25	0.125	0.125	14	4	2	1

جدول ۱: مشخصات فنی واحد ذخیره ساز

	حداکثر ظرفیت (MWh)	حداقل ظرفیت (MWh)	حداکثر میزان دشارژ (MWh)	حداکثر میزان شارژ (MWh)	راندمان شارژ	راندمان دشارژ
ذخیره‌ساز	۱/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۹۵	۰/۹۵

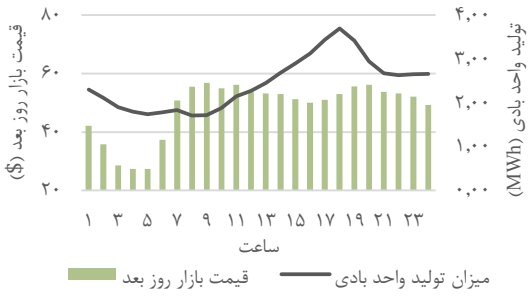
جدول ۲: عملکرد مدل به ازای تعداد سناریوهای مختلف

تعداد سناریو	۹×۵	۱۱×۷	۱۵×۷	۲۱×۹
زمان حل (s)	۹۴	۱۶۶	۳۸۲	۱۵۰۰
تعداد تکرار	۱۱	۱۷	۳۱	۲۱۶
همگرایی	همگرا	همگرا	همگرا	کران بالا در بازه ۹۳٪ اطمینان کران پایین
کران بالای تابع هدف	۶۳۰۷	۶۰۸۲	۶۱۶۴	۶۱۵۵

جدول ۳: مقایسه زمان مورد نیز برای حل مدل پیشنهادی با مدل‌های موجود

مرجع	[14]	[15]	[17]	[21]	مدل پیشنهادی
CPU time (s)	۲۴۵-۳۳	<۱۵۰۰	<۴۵۰۰	-۱۴۲ ۱۷۰	-۱۲۰ ۴۲۰

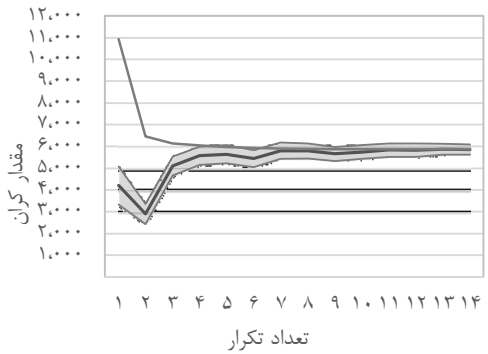
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]



شکل ۲: میزان تولید واحد بادی و قیمت بازار روز بعد.

بعلاوه، روند همگرایی برای ۲ حالت، در حالت اول DR ارائه شده در بازار برابر صفر و در حالت دوم ۱۰۰٪ ظرفیت تجمیعگران، در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این شکل کران بالا، امید ریاضی کران پایین و بازه‌ی اطمینان کران پایین قابل مشاهده است. چنانکه مشخص است، همگرایی کران بالا و پایین در مورد وضعیتی که مبادله‌ای در بازار IDRX وجود ندارد به سرعت به‌طور کامل برقرار شده‌است. این مسئله به این دلیل رخ داده است که عملا مبادلات میان‌روزی در این شرایط حذف شده و در نتیجه تقریب ناشی از آزادسازی متغیرهای گسسته مرحله‌ی میان‌روزی نیز منتفی شده‌است.

هدف از شبیه‌سازی انجام شده در این بخش بررسی تاثیر میزان ریسک‌پذیری بهره‌بردار نیروگاه مجازی در تصمیمات اتخاذ شده و نتایج خروجی با مشارکت در بازار میان‌روزی است. در این بخش، تلاش شده است رفتار بهینه نیروگاه مجازی در نحوه پیشنهاددهی در بازار و همچنین بهره‌برداری از واحدهای زیرمجموعه خود به ازای مقادیر β، به ازای شاخص میزان ریسک‌پذیری و همچنین میزان بار پاسخگو قابل مبادله در بازار میان‌روزی مطالعه شود. همچنین، میزان تغییرات ریسک فراروی بهره‌بردار نیروگاه مجازی به ازای میزان خدمات پاسخگویی بار در دسترس نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است.



(الف)

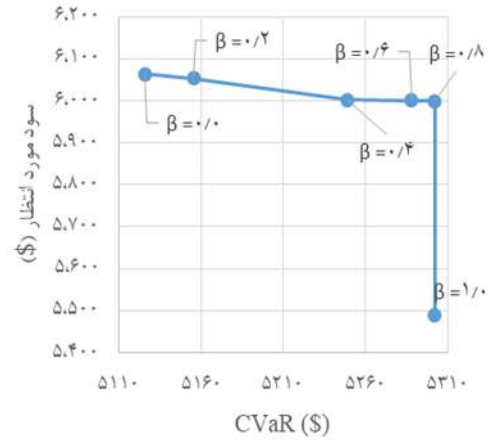
(ب)

شکل ۳: روند همگرایی کران‌های بالا و پایین در الگوریتم SDDP برای دو حالت مختلف از میزان مشارکت تجمیعگران در بازار IDRX. الف) بدون امکان مبادله‌ی DR. ب) مقدار DR ارائه شده در بازار ۱۰۰٪ ظرفیت.

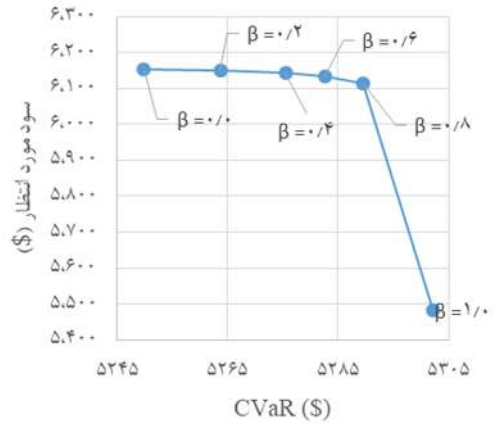
در شکل ۴ تغییرات میزان سود مورد انتظار نیروگاه مجازی به ازای شاخص CVaR برای شش مقدار مختلف β نمایش داده شده است. یادآوری می‌شود که در اینجا شاخص CVaR سود مورد انتظار نیروگاه مجازی به ازای ۵٪ بدترین حالت‌های ممکن است. چنانکه مشاهده می‌شود، با ایجاد امکان مبادله بازار میان‌روزی، سود بیشتری برای نیروگاه مجازی مورد انتظار است. همچنین، شاخص CVaR نیز در حضور بازار میان‌روزی مقادیر بالاتری را اختیار کرده است. در شرایطی که بهره‌بردار نیروگاه مجازی تمایل به اخذ تصمیمات با ریسک بالا داشته باشد ($\beta = 0$)، بدون امکان خرید خدمات پاسخگویی بار، شاخص CVaR مقدار ۵۱۲۵ دلار را اختیار کرده است. این مقدار برای زمانی که حداکثر میزان پاسخگویی بار برای مبادله در بازار میان‌روزی در دسترس باشد به مقدار ۵۲۵۰ دلار رسیده است که افزایش ۲/۵٪ را نشان می‌دهد.

از سوی دیگر، با ریسک‌گریز شدن نیروگاه مجازی، تاثیر حضور در بازار میان‌روزی بر روی شاخص CVaR کمتر و سود مورد انتظار نیز کاهش می‌یابد. به طوری که در تصمیمات محافظه‌کارانه (یعنی $\beta = 1$)، مقدار سود مورد انتظار و شاخص CVaR در صورت عدم امکان مشارکت در بازار میان‌روزی به ترتیب ۵۴۸۹ و ۵۳۰۱ دلار به دست آمده است. این مقادیر در حالتی که بیشینه مقدار قابل مبادله خدمات پاسخگویی بار در بازار در دسترس باشد به ترتیب برابر با ۵۴۸۲ و ۵۳۰۳ دلار محاسبه شده است که تغییر ۰/۱۳-٪ و ۰/۰۴٪ را نشان می‌دهد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]



(الف)

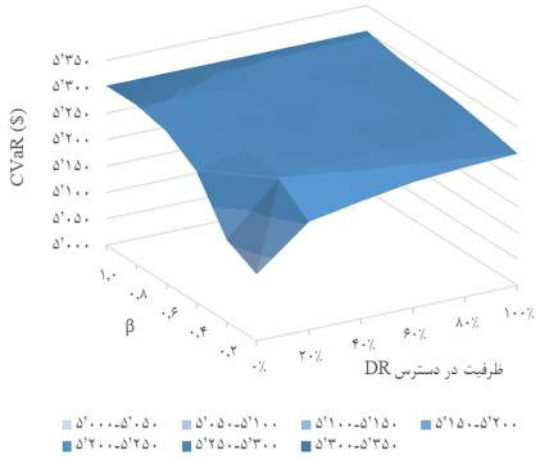


(ب)

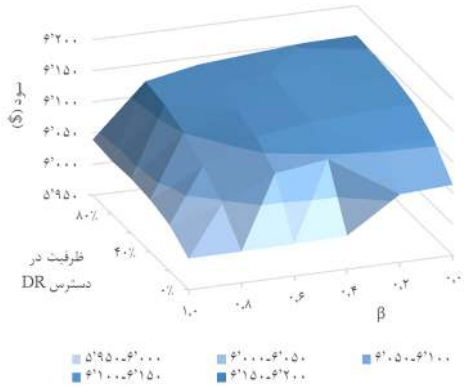
شکل ۴: میزان تغییرات سود مورد انتظار نیروگاه و شاخص CVaR به ازای مقادیر مختلف β الف) بدون امکان مبادله در بازار میان‌روزی، ب) مقدار خدمات پاسخگویی بار ارائه شده در بازار ۱۰۰٪ ظرفیت.

کاهش تاثیر امکان مبادله خدمات پاسخگویی بار در میزان سود مورد انتظار و شاخص CVaR از این رو است که تمایل نیروگاه مجازی با افزایش میزان محافظه‌کاری در اتخاذ تصمیمات به خرید خدمات پاسخگویی بار کاهش می‌یابد. همچنین، تأثیر تغییرات β و همچنین میزان خدمات پاسخگویی بار قابل مبادله در بازار میان‌روزی بر روی میزان سود مورد انتظار و شاخص CVaR در شکل ۴ به صورت سه بعدی نمایش داده شده است نتایج بیان شده در آن قابل مشاهده است.

مجموع خروجی واحد حرارتی به ازای تغییرات مقدار β و میزان خدمات پاسخگویی بار در دسترس در بازار میان‌روزی در شکل (۵) نمایش داده شده است. بالاترین میزان مجموع تولید واحد حرارتی به ازای $\beta = 0$ و عرضه حداکثر میزان خدمات پاسخگویی بار ممکن در بازار میان‌روزی رخ داده و برابر با ۲۴/۴۲ MWh به دست آمده است. این مقدار به ازای $\beta = 1$ و عدم امکان مشارکت در بازار میان‌روزی برابر ۲۳/۴۸ MWh محاسبه شده که کاهش ۴ درصدی را نشان می‌دهد.

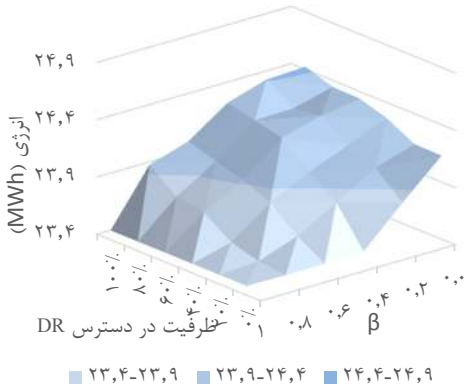


(الف)



(ب)

شکل ۵: تغییرات سود و شاخص CVaR به ازای تغییرات β و میزان خدمات پاسخگویی بار عرضه شده در بازار میان‌روزی. الف) تغییرات CVaR. ب) تغییرات سود.



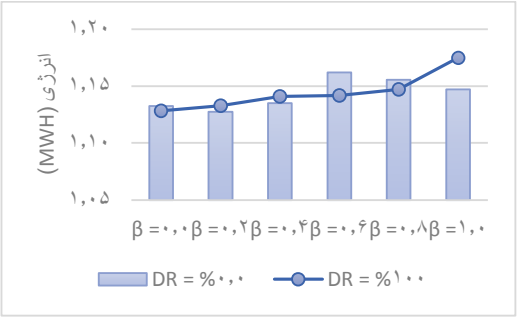
شکل ۶: تغییرات مجموع خروجی واحد حرارتی به ازای تغییرات β و میزان خدمات بارهای پاسخگوی در دسترس در بازار میان‌روزی.

در شکل (۶) میانگین انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز به ازای مقادیر مختلف β برای دو حالت عدم مشارکت بارهای پاسخگو و

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]

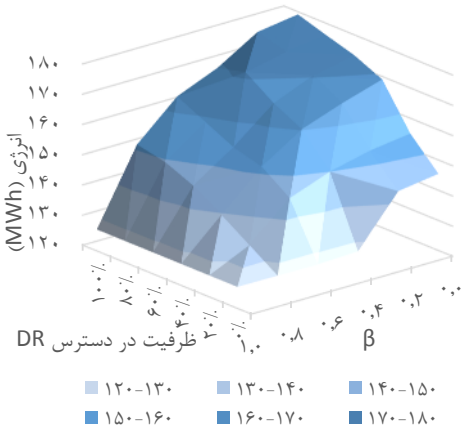
مشارکت حداکثری آنها در بازار میان‌روزی نمایش داده شده است. افزایش میزان ذخیره انرژی سبب می‌شود تا بتوان کاهش تولید تجدیدپذیر را از طریق دشارژ ذخیره‌ساز جبران نمود. لذا با افزایش میزان انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز، نیروگاه مجازی ریسک برنامه‌ریزی را کاهش می‌دهد.

مجموع میزان فروش انرژی در بازار روز بعد به ازای مقادیر مختلف β و ظرفیت بارهای پاسخگو در دسترس در شکل (۷) نمایش داده شده است. میزان انرژی فروخته شده در بازار روز بعد به شدت وابسته به میزان تغییر β است. به‌طوری‌که در زمانی که حداکثر ظرفیت بارهای پاسخگو در بازار میان‌روزی در دسترس است میزان فروش انرژی در بازار روز بعد توسط نیروگاه مجازی با ۳۰٪ کاهش از ۱۷۹/۵۴ MWh به ۱۲۵/۱۳ MWh کاهش یافته است. این میزان کاهش برای حالتی که امکان مراوده خدمات بارهای پاسخگو در بازار میان‌روزی وجود نداشته کمتر بوده، به طوری که با ۱۸٪ کاهش، از ۱۴۵/۴۴ MWh به ۱۲۷/۱۳ رسیده است. کاهش میزان فروش در بازار روز بعد به معنای کاهش تعهد نیروگاه مجازی به تأمین انرژی بوده و اگر چه میزان سود مورد انتظار را کاهش می‌دهد، با این حال خطر مواجهه با جریمه ناشی از عدم تأمین انرژی متعهد شده را نیز کاهش داده و ریسک پیش روی برنامه‌ریزی را کم می‌کند.



شکل ۷: مقایسه میانگین انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز به ازای مقادیر مختلف β برای دو حالت عدم عرضه و عرضه حداکثر خدمات بارهای پاسخگو در بازار میان‌روزی.

میزان مجموع مبادلات نیروگاه مجازی در بازار زمان‌واقعی نیز به ازای مقادیر مختلف خدمات بارهای پاسخگو در دسترس و همچنین β در شکل (۸) نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود و در نتایج مربوط به مدل اول نیز دیده شد، تغییر میزان خدمات بارهای پاسخگو در دسترس در میزان مبادلات زمان‌واقعی نیروگاه مجازی، به خصوص میزان انرژی خریداری شده، تاثیرگذار است.

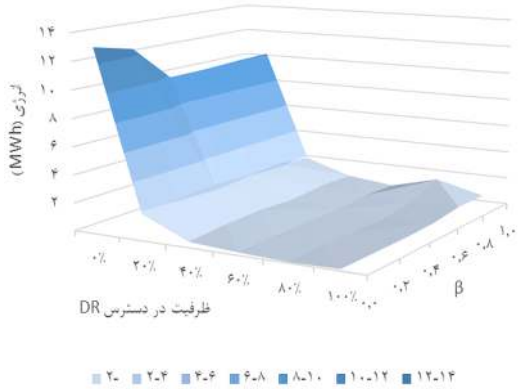


شکل ۸: مجموع میزان فروش انرژی در بازار روز بعد به ازای تغییرات β و میزان پاسخگویی بار در دسترس در بازار میان‌روزی.

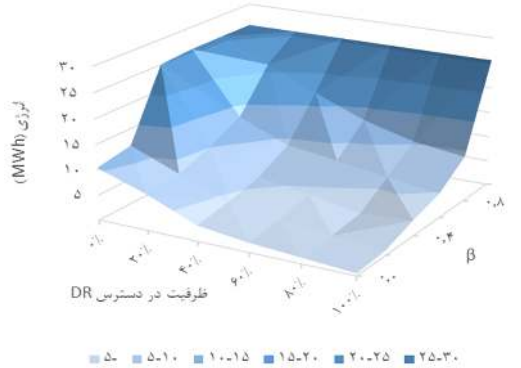
تغییرات میزان ریسک‌پذیری نیروگاه مجازی اگرچه بر میزان فروش انرژی در بازار زمان‌واقعی تأثیر گذار بوده است، با این حال، تأثیر چندانی بر میزان خرید انرژی نداشته است. نیروگاه مجازی ریسک‌گریز، چنانکه بیان شد، تعهد کمتری برای تحویل انرژی در بازار روزبعد متقبل می‌شود. در نتیجه مجبور خواهد بود میزان بیشتری از انرژی تولیدی خود را در بازار زمان‌واقعی به فروش برساند. در مورد خرید انرژی در بازار زمان‌واقعی، در حالت عدم وجود امکان مبادله خدمات بارهای پاسخگو، افزایش ریسک‌گریزی نیروگاه مجازی موجب مقداری کاهش در میزان خرید انرژی شده، به طوری که مقدار آن از ۱۳/۰۶ MWh به ۱۰/۱۲ کاهش یافته است. با این حال با دسترس شدن مبادله خدمات بارهای پاسخگو، میزان خرید انرژی در بازار زمان‌واقعی به صفر نزدیک شده و کاملا بر تاثیر تغییر β غلبه کرده است.

در نهایت، مجموع میزان مبادلات خدمات بارهای پاسخگو در شکل (۹) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، رفتار محافظه‌کارانه نیروگاه مجازی موجب کاهش مشارکت آن در بازار میان-روزی شده است. این مسئله به دلیل وجود عدم قطعیت مشارکت در این بازار ناشی از نحوه رفتار طرف عرضه، یعنی تجمیعگران است. این میزان کاهش مشارکت، در زمانی که بیشترین مقدار خدمات بارهای پاسخگو در بازار در دسترس است حدود ۷۵٪ است، به طوری که، از ۳۶/۷ MWh به ۹/۸ MWh کاهش یافته است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]

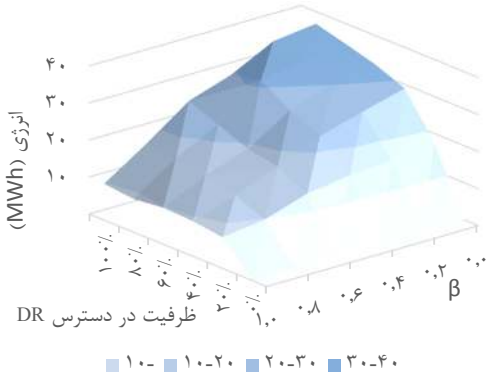


(الف)



(ب)

شکل ۹: میزان مجموع خرید و فروش انرژی در بازار زمان‌واقعی به ازای تغییرات β و خدمات بارهای پاسخگو در دسترس در بازار میان‌روزی. الف) خرید. ب) فروش.



شکل ۱۰: مجموع میزان خدمات خدمات بارهای پاسخگو خریداری شده از بازار میان‌روزی به ازای تغییرات مقدار β و میزان خدمات بارهای پاسخگوی در دسترس.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل سه‌مرحله‌ای برای برنامه‌ریزی و پیشنهاددهی نیروگاه مجازی با امکان مشارکت در بازار میان‌روزی معرفی شد. به منظور پیاده‌سازی روش SDDP برای حل مسئله مورد مطالعه، سازوکاری ابتکاری برای فائق آمدن به مشکل وجود متغیرهای باینری در مرحله میان‌روزی ارائه شد و همچنین برخی قیود کمکی برای انتقال متغیرهای حالت از مرحله اول به مرحله سوم پیشنهاد و در مسئله مرحله‌ی میان‌روزی اضافه گردید.

برنامه پیشنهادی روی یک نیروگاه مجازی پیاده‌سازی و نتایج زیر حاصل شده است:

- که مشارکت در بازار میان‌روزی سود مورد انتظار نیروگاه مجازی را حدود ۲/۵٪ افزایش داده است. البته این میزان تغییر سود می‌تواند وابسته به قیمت خدمات پاسخگویی بار، میزان عدم قطعیت‌ها و میزان در دسترس بودن واحدهای انعطاف‌پذیر باشد.
- میزان انرژی فروخته شده توسط نیروگاه مجازی در بازار روز بعد ۲۱٪ افزایش داشته است. میزان مراودات نیروگاه مجازی در بازار زمان‌واقعی به طرز قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته، به طوری‌که میزان خرید انرژی تقریبا به صفر رسیده و میزان فروش انرژی نیز ۹۷٪ کاهش داشته است.
- حضور در بازار میان‌روزی عاملی برای کاهش ریسک مسئله است. در $\beta = 0$، امکان مشارکت در بازار میان‌روزی توانسته مقدار شاخص ریسک CVaR را تا ۲/۷۱٪ بهبود بخشیده است.

به عنوان گام‌های بعدی بایسته است موارد زیر مورد توجه قرار گیرد:

- نظر به این که مقادیر و اعداد مفروض دانسته شده در این پژوهش می‌توانند بر میزان سود نیروگاه مجازی و حتی بر رفتار بازیگران مورد مطالعه مؤثر باشند، انجام آنالیز حساسیت بر روی این مقادیر، دید روشن‌تری را از امکانات و محدودیت‌های بازار میان‌روزی پاسخگویی بار فراهم خواهد آورد.
- نیروگاه مجازی، خود به عنوان یک تجمیعگر، می‌تواند به عنوان میانجی بین مصرف‌کنندگان و واحدهای تولید پراکنده از یک سو و از سوی دیگر شبکه‌های توزیع و حتی انتقال عمل کند. لذا عملکرد نیروگاه مجازی در تامین نیازهای شبکه از جمله انعطاف پذیری و ظرفیت ذخیره از جمله موضوعات مهمی هستند که می‌توانند مورد توجه قرار گیرند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]

مراجع

Xie, M., Zhang, K., & Wang, Y. (2025). Discriminative pricing for adjustable capabilities of virtual power plants in uncertain environments. IEEE Transactions on Power Systems, 40(4), 987–999.

Zhao, B., Li, C., & Sun, Y. (2025). Multi-objective optimization and demand response management in virtual power plants: Case studies and real-market evidence. Applied Energy, 352, 121894.

Li, J., Zhang, Y., Wang, H., & Chen, S. (2025). Day-ahead economic dispatch of a virtual power plant considering distributed energy resources and uncertainties. *IEEE Transactions on Power Systems*, 40(7), 2245–2257.

Zhao, B., Li, C., & Sun, Y. (2024). Robust optimization and bidding strategies for virtual power plants participating in electricity markets under uncertainty. Applied Energy, 345, 120987.

Vahedipour-Dahraie, M., Rashidizadeh-Kermani, H., & Anvari-Moghaddam, A. (2020). Risk-averse probabilistic framework for scheduling of virtual power plants considering demand response and uncertainties. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 121, 106126.

Nokandi, E., Vahedipour-Dahraie, M., Goldani, S. R., & Siano, P. (2023). A three-stage bi-level model for joint energy and reserve scheduling of VPP considering local intraday demand response exchange market. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 33, 100964.

Lv, Y., Liu, X., Liu, F., & Liu, P. (2025). Operation mode and economic analysis of virtual power plants considering demand response and distributed energy resources. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 16(3), 2610–2620.

محبوبی‌مقدم، ا.، نیکوبخت، ا.، و زارع، م. (۱۴۰۱). بهبود عملکرد تأمین‌کنندگان سرویس انرژی با استفاده از قابلیت‌های پاسخگویی بار در شبکه‌های توزیع هوشمند. *مجله کیفیت و بهره‌وری در صنعت برق*، 11(4)، 28–38.

نجفی، ا.، فلقی، ح.، و رمضانی، م. (۱۳۹۴). بهره‌برداری میان‌مدت از هاب انرژی با در نظر گرفتن ریسک ناشی از عدم قطعیت‌های قیمت بازار و تقاضای انرژی الکتریکی. *مجله کیفیت و بهره‌وری در صنعت برق*، 4(8)، 74–82.

Vahedipour-Dahraie, M., Rashidizadeh-Kermani, H., Anvari-Moghaddam, A., & Siano, P. (2021). Risk-averse optimal energy and reserve scheduling for virtual power plants incorporating demand response programs. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(5), 4269–4280.

Ghorbankhani, E., & Badri, A. (2018). A bi-level stochastic framework for VPP decision making in a joint market considering a novel demand response scheme. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 28(1), e2473.

Freire-Lizcano, M., Baringo, L., & Garcia-Bertrand, R. (2019). Offering strategy of a price-maker virtual power plant. In *SEST 2019 – 2nd International Conference on Smart Energy Systems and Technologies* (pp. 1–6).

Cui, K., Jin, Q., & Kong, D. (2019). Bi-level multi-time scale scheduling method based on bidding for multi-operator virtual power plant. *Applied Energy*, 249, 178–189.

Shafiekhani, M., Badri, A., Shafie-khah, M., & Catalão, J. P. S. (2019). Strategic bidding of virtual power plant in energy markets: A bi-level multi-objective approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 113, 208–219.

Goodarzi, J., Tolou Askari, M., Amirahmadi, M., & Babaeinik, M. (2024). The three-stage strategy of bi-level optimal energy management in the distribution-home network based on golf optimization algorithm. *IEEE Access*, 12, 183973–183990.

Seyedi, A., Tajeddini, M., & Li, F. (2025). A bilevel multistage stochastic self-scheduling model with demand response for virtual power plants. *European Journal of Operational Research*, 309(3), 1025–1041.

Fatouros, P., Konstantelos, I., Papadaskalopoulos, D., & Strbac, G. (2019). Stochastic dual dynamic programming for operation of DER aggregators under multi-dimensional uncertainty. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10(1), 459–469.

Li, Y., Lin, H., Bin, L., & Yang, Y. (2025). A multi-stage DRO-SDDP approach for planning multi-type energy storage systems in power grids. IEEE Transactions on Power Systems, 40(6), 2732–2742.

Ma, W., Zhang, C., & Xu, W. (2024). A stochastic bi-level optimization model for self-scheduling of virtual power plants considering demand response and market uncertainties. Applied Energy, 347, 121034.

Nord Pool. (2021). *Nord Pool market data*. Retrieved September 24, 2021, from **https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/#/nordic/table**

نوکندی، ا. (۱۴۰۲). ارائه‌ی یک ساختار احتمالاتی دوسطحی برای برنامه‌ریزی بهینه‌ی نیروگاه‌های مجازی با در نظر گرفتن بازار مبادلات میان‌روزی پاسخگویی بار (رساله دکتری). دانشگاه بیرجند.

GAMS Development Corporation. (2021). *SCENRED2*. **www.** Retrieved September 21, 2021, from **https://gams.com/33/docs/T_SCENRED2.html**

زیرنویس‌ها

1- Karush–Kuhn–Tucker conditions
2- Mixed-Integer Nonlinear Programming
3- Dual Theory
4- Mixed-Integer Linear Programming
5- Stochastic Dual Dynamic Programming
6- Unit-Commitment Problem
7- Conditional Value at Risk
8- Bellman Equation
9- Nord Pool Market

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-16]