

استراتژی پیشنهاددهی ریزشبکه‌ها در بازارهای انرژی و رزرو روز بعد با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تولید و مصرف بار الکتریکی

پری فضلعلی پور^۱، دانشجوی دکتری؛ بهنام محمدی ایواتلو^۲، دانشیار؛ مهدی احسان^۳، استاد

۱- گروه مهندسی برق - واحد علوم تحقیقات - دانشگاه آزاد اسلامی - تهران - ایران - p.fazlalipour@srbiau.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - bmohammadi@tabrizu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شریف - تهران - ایران - ehsan@sharif.ac.ir

چکیده: ریزشبکه‌ها مجموعه‌های ادغام‌شده از دستگاه‌های الکتریکی هستند که می‌توانند انواع تولیدکنندگان قابل‌پخش و غیرقابل‌پخش، مصرف‌کنندگان و ذخیره‌کننده‌های انرژی را شامل شوند. از طرفی دیگر مدیریت بهینه این دستگاه‌های یکپارچه با توجه به ذات تصادفی تولید تجدیدپذیر و همچنین عدم قطعیت در میزان بار مصرفی و قیمت‌های بازارهای الکتریکی مستلزم استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی است. در این مقاله یک مدل جامع برای استراتژی پیشنهاددهی ریزشبکه‌های تجدیدپذیر در بازار انرژی و رزرو روز بعد ارائه شده است که در آن عدم قطعیت در میزان تولید توان‌های بادی و خورشیدی و میزان بار مصرفی با به‌کارگیری روش برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای وارد مسئله می‌شود. از روش نمونه‌گیری مکعب لاتین برای تولید سناریوهای توان و مصرف و از روش کاهش سناریو ترکیبی روبه‌عقب و روبه‌جلو سریع برای کاهش سناریوهای تولیدشده استفاده شده است. مسئله بهینه‌سازی به‌دست آمده یک مسئله عدد صحیح-مختلط غیرخطی با متغیرهای دودویی فراوان است که با استفاده از ترکیب حل‌کننده‌های Lindiglobal و AlphaECP در گمز بیشینه شده و بهینه‌های جهانی آن به‌دست می‌آیند. معیار «ارزش راه‌حل تصادفی» کارآمدی روش برنامه‌ریزی تصادفی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: استراتژی پیشنهاددهی، ریزشبکه، بازارهای انرژی و رزرو، عدم قطعیت، تولید سناریو، کاهش سناریو.

Bidding Strategy of Micro-Grids in Day-Ahead Energy and Reserve Markets under Generation and Load Uncertainties

P. Fazlalipour¹, Ph.D Student; B. Mohammadi-ivatloo², Associate Professor; M. Ehsan³, Professor

1- Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: p.fazlalipour@srbiau.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: bmohammadi@tabrizu.ac.ir

3- Faculty of Electrical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, Email: ehsan@sharif.ac.ir

Abstract: Micro-grids are integrated electrical systems, which can include dispatchable and non-dispatchable resources, consumption and battery storages. However, optimal management of these integrated systems requires stochastic programming approaches to consider the random nature of renewable generation and consumption. In this paper, a comprehensive bidding strategy model has been provided for renewable micro-grids to participate in the day-ahead energy and reserve markets. The uncertainties in renewable generation and load consumption have been integrated to the problem by the use of stochastic programming approach. Furthermore, the Latin Hypercube Sampling and Fast Backward/forward scenario reduction approaches have been utilized to generate and reduce the scenarios. A large size mixed integer non-linear problem with a lot of binary variables is the outcome of the optimization problem, which is maximized via combination of AlphaECP and Lindoglobal solvers in GAMS to guarantee the global solutions. The “value of the stochastic solution” shows the efficiency of the stochastic programming approach.

Keywords: Bidding strategy, micro-grid, energy and reserve markets, uncertainty, scenario generation, scenario reduction.

تاریخ ارسال مقاله ۱۳۹۶/۸/۱۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۲/۳۱ و ۱۳۹۷/۴/۳۱ و ۱۳۹۷/۷/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۹/۲۴

نام نویسنده مسئول: مهدی احسان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه صنعتی شریف - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

وارد شدن متغیرهای باینری به مسئله، امکان وجود تعادل و یا رسیدن به آن دشوار می‌شود. علاوه بر آن، با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله و افزایش تعداد شرکت‌کنندگان، بار محاسباتی موردنیاز نیز به شدت افزایش می‌یابد. در منابع [۲۱-۱۸]، از مدل‌های تعادلی برای مدیریت بهینه ریزشکه و شرکت در بازارهای الکتریکی مختلف استفاده شده است. در [۲۲] مدیریت بهینه انرژی بر پایه روش تئوری بازی غیرهمکارانه در بازار خرده‌فروشی ارائه شده است که در آن عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر با استفاده از روش آزمون آرایه متعامد تاگوچی مدل‌سازی شده است. هرچند استفاده از روش‌های تعادلی به دلیل محدودیت‌هایی که بیان شد، بسیار محدود است؛ اما تا زمانی که لازم است واقعیت‌هایی نظیر قدرت بازار در محیط‌های دادوستد الکتریکی در نظر گرفته شود و اثرات مربوط به آن‌ها بررسی گردد، استفاده از مدل‌های تعادلی ناگزیر است [۱۷].

مدل‌های غیرتعادلی نیز به دفعات برای پیشنهاددهی در بازارهای الکتریکی به کار رفته‌اند. ترکیب‌های مختلفی از روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی و روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، در منابع [۲۷-۲۳]، برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده‌اند. به این منظور، ترکیبی از روش‌های عصبی-فازی و الگوریتم ژنتیک در [۲۳]، الگوریتم یادگیری-یاددهی در [۲۴]، الگوریتم جستجوی گرانشی در [۲۵]، الگوریتم اجتماع ذرات در [۲۶] و الگوریتم کرم شب‌تاب در [۲۷] استفاده شده‌اند. باین‌حال، این روش‌ها به شدت وابسته به نوع مسئله بوده و نیازمند داده‌های تاریخی و یا دانش تجربی خاص هستند. علاوه بر آن، گاهی به‌کندی به جواب مسئله همگرا شده و ممکن است در بهینه‌های محلی گیر کنند؛ بنابراین جواب‌های حاصل از این الگوریتم‌ها بهینه محلی بوده و تضمینی برای جهانی بودن آن‌ها وجود ندارد [۲۸، ۲۹].

مدل‌سازی جبری مسئله و حل معادلات ریاضی حاصل از آن، جزء روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی است که نیاز به اشراف کامل به مسئله بهینه‌سازی دارد. جواب حاصل از این روش‌ها، معمولاً نیازمند زمان و حجم محاسبات بیشتری است، اما بهینه جهانی را تضمین می‌کند [۲۹، ۳۰]. برای مثال، منبع [۳۱] از روش تقریب متوسط نمونه برای حل یک مسئله تصادفی دومرحله‌ای، با محدودیت متغیر برای استفاده از تولید تجدیدپذیر استفاده کرده است، معادلات به دست آمده از نوع معادلات عدد صحیح-مختلط خطی است که با استفاده از حل‌کننده سیمپلکس^۱ در گمز^۲ بهینه شده‌اند. منبع [۳۲] نیز، روش تحلیل ریاضی را برای بررسی تأثیر عدم قطعیت در نتایج بهینه‌سازی رزروگردان در ریزشکه به کار برده است و متذکر شده است که افزایش متغیرها باعث پیچیدگی در بهینه‌سازی مسئله می‌شود. در منبع [۳۳] از بهینه‌سازی مقاوم برای مدیریت انرژی یک نیروگاه مجازی در بستر ریزشکه هوشمند استفاده شده است که در آن عدم قطعیت در قیمت انرژی و تولید توان خورشیدی به صورت بازه‌های اطمینان در نظر گرفته شده است. مدل به دست آمده مدلی خطی است که توسط سیمپلکس در

ریزشکه‌ها در واقع دستگاه‌های یکپارچه الکتریکی کوچکی هستند که در سال‌های اخیر به دلیل منافع اقتصادی و زیست‌محیطی فراوان خود به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱، ۲]. امکان وجود تولید و مصرف انرژی الکتریکی به صورت هم‌زمان و در کنار هم، این امکان را به بهره‌برداران ریزشکه می‌دهد که در کنار تأمین بارهای درون شبکه، با شبکه اصلی نیز تبادل توان داشته باشند. آن‌ها قادرند در ساعاتی که کمبود توان برای تأمین بار داخل شبکه وجود دارد، از شبکه اصلی برق خریداری کنند و یا مازاد توان خود را به شبکه اصلی بفروشند. همچنین می‌توانند با استفاده از فناوری‌هایی نظیر تولید پراکنده، انرژی تجدیدپذیر، ذخیره‌کننده انرژی و بارهای داوطلب برای قطع، در انواع بازارهای الکتریکی شرکت نموده و سود اقتصادی خود را بیشینه نمایند [۲، ۳].

امروزه، ارائه استراتژی‌های پیشنهاددهی بهینه در بازارهای الکتریکی مختلف با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی مسئله، چالشی است که بهره‌برداران ریزشکه‌ها را به تکاپو واداشته است [۴]. علاوه بر آن، ورود انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر توربین‌های بادی و آرایه‌های خورشیدی، که میزان توان تولیدی آن‌ها به شدت وزش باد و تابش خورشید وابسته است، چالش‌های مدیریتی جدیدی را وارد مسئله کرده است [۵، ۶]. چراکه پیش‌بینی دقیق سرعت باد و میزان تابش خورشید همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه است که به ذات تصادفی این پدیده‌ها برمی‌گردد. علاوه بر تولید متغیر توربین‌های بادی و آرایه‌های خورشیدی، میزان بار الکتریکی مصرفی نیز همواره با عدم قطعیت همراه است [۵، ۶]. قیمت برق در بازارهای مختلف نیز، پیوسته در حال نوسان است [۷-۹]. همچنین، دسترس‌پذیری واحدهای تولیدی نیز می‌تواند عدم قطعیت داشته باشد [۱۰، ۱۱]. اگرچه استفاده از ذخیره‌کننده‌های انرژی یا قابلیت پاسخگویی بار، می‌تواند تا حدی این عدم قطعیت‌ها را هموار سازد، اما بازهم این شبکه‌های الکتریکی کوچک، نیازمند مدیریت انرژی مناسب هستند تا بتوانند سود اقتصادی خود را که ناشی از شرکت در بازارهای الکتریکی مختلف است، بیشینه نمایند [۱۲، ۱۳]. از طرفی ریزشکه‌ها معمولاً به دلیل کوچکی خود و عدم قرار گرفتن در موقعیت فیزیکی خاص، پذیرنده قیمت بوده و برنامه‌ریزی روز آینده خود را بر اساس قیمت‌های پیش‌بینی شده بازارها تنظیم می‌نمایند [۵، ۱۴، ۱۵].

تاکنون، مطالعات زیادی در زمینه استراتژی پیشنهاددهی نظام‌های یکپارچه کوچک، مانند ریزشکه‌ها، در بازارهای الکتریکی صورت گرفته است. منابع [۱۶، ۱۷] دو نوع مدل تعادلی و غیرتعادلی را برای شرکت در بازارهای برق معرفی کرده و مزایا و معایب استفاده از هر کدام را بیان نموده‌اند. بر اساس [۱۷]، در مدل‌های تعادلی اغلب نمی‌توان محدودیت‌های فنی مسئله را، از قبیل محدودیت‌های فنی واحدها، مینیمم زمان‌های خاموش و روشن‌شدن منابع، محدودیت‌های شیب و هزینه روشن و خاموش‌شدن ژنراتورها در نظر گرفت. چراکه با

قرار گرفته است. جمع بندی و نتایج به دست آمده نیز در بخش ۴ ارائه گردیده اند.

۲- حل مسئله با در نظر گرفتن عدم قطعیت

حل مسئله پیشنهاددهی نیز همانند تمامی مسائل دیگری که به بازارهای الکتریکی مربوط می شوند، با عدم قطعیت روبروست. این عدم قطعیت مربوط به ذات تصادفی پارامترهای موجود در حل مسائل بهینه سازی می شود. در اکثر مواقع، اپراتور شبکه مجبور می شود در حالی در بازارهای روز بعد شرکت کند که اطلاعات دقیقی نسبت به قیمت های بازار، میزان بار مصرفی، تولید توربین های بادی، تولید سلول های خورشیدی و یا حتی در دسترس بودن و یا نبودن واحدهایش در روز بعد ندارد [۳۵]. پیش بینی نادرست هر کدام از این پارامترها، علاوه بر اینکه برنامه ریزی اجزاء شبکه را در روز بعد تغییر می دهد، میزان بهینه سود حاصل از شرکت در بازار را نیز کاهش می دهد. برای جلوگیری از ضررهای احتمالی ناشی از اطلاعات ناقص، می توان از روش بهینه سازی تصادفی برای حل مسئله بهینه سازی استفاده نمود [۱۲-۵].

در این روش، به جای اینکه پارامترهای ورودی با مقادیر متوسط متناظر خود جایگزین شوند، میزان خطای پیش بینی آن ها، با توابع چگالی احتمال مناسب مدل می شوند. سپس، با نمونه برداری صحیح از توابع چگالی احتمال و ایجاد سناریوهای متعدد، مسئله بهینه سازی تصادفی با پارامترهای نامعین، به مجموعه ای از مسائل بهینه سازی قطعی با پارامترهای معین تبدیل می شود. به این ترتیب، جواب مسئله بهینه سازی، از وزن دهی جواب مسائل قطعی، با توجه به احتمال رخداد هر کدام از سناریوها، به دست می آید. جواب به دست آمده بهترین جواب برای همه سناریوها است اما ممکن است جواب بهینه برای هر کدام از سناریوها نباشد [۱۷، ۳۵]. در این مقاله فرض شده است که تولید توربین های بادی و سلول های خورشیدی و همچنین بار مصرفی روز بعد با عدم قطعیت روبرو هستند.

۲-۱- تولید سناریو

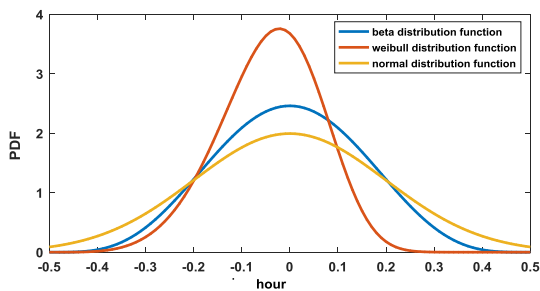
با استفاده از روش برنامه ریزی تصادفی برای نمونه گیری از پارامترهایی که دچار عدم قطعیت هستند، می توان با توجه به خصوصیات رفتاری هر کدام از آن ها، از توابع چگالی احتمال مختلف استفاده کرد. در مراجع [۱۰، ۱۱، ۲۱، ۲۴، ۲۹، ۳۶] از تابع چگالی احتمال نرمال F_L برای مدل کردن عدم قطعیت در خطای پیش بینی بار مصرفی استفاده شده است. تابع چگالی ویبال F_W نیز در مراجع [۱۱-۹، ۲۱، ۲۴، ۳۷] برای مدل سازی عدم قطعیت در شدت وزش باد، به کار رفته است. همچنین، مراجع [۱۱-۹، ۲۹] تابع چگالی احتمال بتا F_B را برای مدل سازی خروجی توان خورشیدی به کار گرفته اند. علاوه بر آن، در مرجع [۷]، از تابع چگالی احتمال نرمال برای مدل سازی هر سه پارامتر بار، سرعت باد و تابش خورشید استفاده شده است. روابط (۱) تا (۳) به ترتیب، توابع چگالی احتمال بتا، ویبال و نرمال را برای

گمز بهینه سازی می شود. هر چند روش های بهینه سازی مقاوم در عین سراسر بودن و دادن دیدی اجمالی از واقعیت های مسئله به بهره بردار ریزشکها جزئیات زیادی را به دست نمی دهند. [۳۴] مسئله بهینه سازی تصادفی منجر به معادلات عدد صحیح-مختلط غیر خطی شده است. این منبع، خاطر نشان کرده است که حل مستقیم این معادلات ریاضی بسیار پیچیده است؛ بنابراین مسئله مورد نظر را به یک مسئله اصلی برای برنامه ریزی انرژی و یک مسئله فرعی برای پخش بار تبدیل کرده است. مسئله اصلی با استفاده از سیمپلکس در گمز بدون در نظر گرفتن محدودیت های پخش بار بهینه می شود و مسئله فرعی با استفاده از Opends در ارزیابی می گردد. این دو مسئله، در یک حلقه تکرار قرار می گیرند تا جایی که نتایج به دست آمده، در هر دو مسئله صدق نمایند. در [۷] نیز، از روش برنامه ریزی دوسطحی برای حل مسئله بهینه سازی استفاده شده است. معادلات به دست آمده در آن، از نوع معادلات عدد صحیح-مختلط غیر خطی هستند. مسئله سطح بالا، با استفاده از حل کننده Dicopt در گمز و مسئله سطح پایین، در نرم افزار ریاضی مطلب بهینه شده اند. با این وجود الگوریتم های بهینه سازی به کار برده شده در منابع [۷، ۳۴] به شدت زمان بر بوده و حل کننده های به کار برده شده جواب های جهانی را تضمین نمی کنند.

در این مقاله از روش برنامه ریزی تصادفی دومرحله ای برای پیشنهاددهی ریزشکها تجدید پذیر در بازارهای هم زمان انرژی و رزرو استفاده شده است. عدم قطعیت در میزان بار مصرفی، سرعت باد و تابش خورشید در نظر گرفته شده و خطای پیش بینی آن ها توسط توابع چگالی احتمال مربوطه مدل گردیده است. سپس، با استفاده از روش نمونه گیری مکعب لاتین، سناریوهای مربوط به بار مصرفی، توان بادی و توان خورشیدی ایجاد شده و با استفاده از الگوریتم کاهش سناریوی ترکیبی روبرو عقب و روبرو سریع کاهش یافته اند. معادلات به دست آمده از نوع عدد صحیح-مختلط غیر خطی با سایز بزرگ و تعداد متغیرهای دودویی زیاد است که در نرم افزار گمز ۲۴۰۷ و با استفاده از ترکیب حل کننده های AlphaECP و Lindoglobal بهینه شده اند. AlphaECP زمان بهینه سازی را کاهش می دهد و Lindoglobal بهینه های جهانی را تضمین می کند. ارائه مدل پیشنهاددهی جامع در بازارهای انرژی و رزرو روز بعد برای ریزشکها تجدید پذیر به همراه بهینه سازی سراسر و دقیق که بهینه های جهانی را تضمین می کنند کاری است که در مقالات ذکر شده پیشین انجام نگرفته است. در ادامه بخش های اصلی مقاله آمده است:

روش برنامه ریزی تصادفی و کاربرد آن در حل مسئله پیشنهاددهی به همراه الگوریتم های تولید و کاهش سناریو، تابع هدف، مفهوم معیار ارزش حل تصادفی و الگوریتم بهینه سازی مسئله در بخش ۲ توضیح داده شده اند. یک ریزشکها نمونه با ۳ انشعاب مسکونی، تجاری و صنعتی در بخش ۳ به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده و استراتژی پیشنهاددهی آن در بازارهای انرژی و رزرو هم زمان مورد بحث

شکل (۱)، توزیع احتمالی خطاها را با استفاده از توابع چگالی احتمال نرمال، ویبال و بتا در بازه $(-0.5, 0.5)$ نشان می‌دهد.



شکل ۱: توابع چگالی احتمال بتا، ویبال و نرمال برای خطاهای پیش‌بینی تابش خورشید، سرعت باد و بار مصرفی

روش نمونه‌گیری مکعب‌لاتین یکی از روش‌های نمونه‌گیری شبیه‌سازی مونت‌کارلو است. در این روش تابع چگالی احتمال مربوطه به k قسمت، با احتمال‌های مساوی تقسیم می‌شود و از هر قسمت یک نمونه به‌صورت تصادفی انتخاب می‌گردد [۷، ۳۷، ۳۸]. مزیت استفاده از این روش نسبت به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، این است که بیشترین گستره تغییرات را بر روی پارامتر ورودی تصادفی پوشش می‌دهد و توزیع حاشیه‌ای را نیز شامل می‌شود. با استفاده از این روش، نمونه‌های انتخاب‌شده، شکل توابع چگالی احتمال مربوط به خود را انعکاس می‌دهند [۷، ۲۴]. این روش، در مراجع [۷، ۲۴، ۲۷، ۳۹]، برای تولید سناریوهای موردنیاز به‌کاررفته است. در این مقاله از هر کدام از توابع چگالی احتمال نرمال، ویبال و بتا، تعداد ۴۰۰۰ نمونه گرفته شده است. سپس، با استفاده از سناریوهای تولیدشده، میزان توان مصرفی و توان تولیدی بادی و خورشیدی برای هر کدام از سناریوها محاسبه گردیده است. تا میزان بار خالص که حاصل کم‌کردن توان‌های بادی و خورشیدی، به‌عنوان بار منفی از کل بار مصرفی است، به‌دست آید.

۲-۲- کاهش سناریو

به‌منظور کاهش حجم محاسبات بهینه‌سازی مسئله پیشنهادی، سناریوهای تولیدشده از طریق الگوریتم کاهش سناریو به سناریوهایی با کمترین شباهت از نظر معیار فاصله کانتروویچ^۳ تقلیل می‌یابند. وابسته به اینکه آیا زیرمجموعه $\Omega_s \subset \Omega$ از انتخاب یا حذف سناریوهای مجموعه اصلی Ω ایجاد می‌شود، دو الگوریتم متفاوت اکتشافی کاهش روبه‌عقب و کاهش روبه‌جلو برای کاهش سناریو وجود دارد. الگوریتم انتخاب روبه‌جلو، یک فرآیند تکرارشونده حریصانه است که با مجموعه خالی $\Omega_s = 0$ شروع می‌شود. در هر تکرار از مجموعه سناریوهای انتخاب‌نشده $(\Omega \setminus \Omega_s)$ ، سناریویی که فاصله کانتروویچ را بین مجموعه اصلی و مجموعه کاهش‌یافته کمینه می‌کند، انتخاب می‌شود. سپس، این سناریو در مجموعه کاهش‌یافته قرار می‌گیرد (Ω_s) . الگوریتم در صورتی متوقف می‌شود که تعداد مشخصی از سناریوها یا فاصله کانتروویچ معین به‌دست آید.

مدل‌سازی خطای تابش خورشید، سرعت وزش باد و میزان مصرف بار الکتریکی نشان می‌دهند.

$$F_s(\Delta I_s; \alpha, \beta) = \frac{\Delta I_s^{\alpha-1} (1 - \Delta I_s)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)} \quad (1)$$

$$F_w(\Delta \omega; \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{\Delta \omega}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(\Delta \omega/\lambda)^k} & \Delta \omega \geq 0 \\ 0 & \Delta \omega < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$F_L(\Delta P_L; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\Delta P_L - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

در روابط بالا B ، ΔI_s ، $\Delta \omega$ و ΔP_L به‌ترتیب تابع بتا و خطاهای پیش‌بینی تابش خورشید، سرعت باد و بار مصرفی هستند که در بازه 0 تا 1 تغییر می‌کنند. در ادامه، به‌منظور این که هر دو خطای پیش‌بینی مثبت و منفی در مسئله لحاظ شوند، توابع چگالی احتمال بتا، ویبال و نرمال، روی محورهای ΔI_s ، $\Delta \omega$ و ΔP_L به‌اندازه 0.5 به سمت چپ انتقال داده می‌شوند تا احتمال‌های خطای پیش‌بینی در محدوده -0.5 تا 0.5 توزیع گردند. پارامترهای شکل α و β ، در تابع بتا برابر 5 در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای شکل و مقیاس تابع ویبال، k و λ و مقادیر انحراف معیار و متوسط تابع نرمال μ و σ ، نیز به‌ترتیب 0.5 ، 5 ، 0.2 و 0.5 فرض شده‌اند. پارامترهای توابع چگالی احتمال نرمال، ویبال و بتا به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که میزان خطای آن‌ها با توزیع داده‌های تاریخی موجود کمترین اختلاف را داشته باشد.

بنابراین، میزان تابش خورشید I_s ، سرعت وزش باد ω و بار مصرفی P_L از روابط (۴) تا (۵) به‌دست می‌آیند.

$$I_s = I_{fs} + \Delta I_s \quad (4)$$

$$\omega = \omega_f + \Delta \omega \quad (5)$$

$$P_L = P_{fL} + \Delta P_L \quad (6)$$

در روابط بالا، I_{fs} ، ω_f و P_{fL} به‌ترتیب مقادیر پیش‌بینی‌شده برای تابش خورشید I_s ، سرعت باد ω و بار مصرفی P_L هستند. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده برای ω و I_s ، می‌توان به‌دست‌آمده از تابش خورشید P'_{PV} و انرژی باد P'_{wt} را از طریق روابط (۷) و (۸) به دست آورد. همچنین ω_{in}^c ، ω_{out}^c ، ω_{rated} و ω_{min}^c به‌ترتیب حداکثر و مقدار نامی سرعت‌های موردنیاز برای تولید توان توسط توربین‌های بادی و توان نامی توربین‌های بادی است. علاوه‌بر آن N_{PV} ، η_{PV_n} و S_{PV_n} به‌ترتیب تعداد، بازده و مساحت آرایه‌های خورشیدی هستند.

$$P'_{wt}(\omega) = \begin{cases} 0 & \omega \leq \omega_{min}^c \text{ or } \omega \geq \omega_{out}^c \\ \frac{\omega - \omega_{min}^c}{\omega_{rated} - \omega_{min}^c} P_r^w & \omega_{min}^c \leq \omega \leq \omega_{rated} \\ P_r^w & \omega_{rated} \leq \omega \leq \omega_{out}^c \end{cases} \quad (7)$$

$$P'_{PV} = \sum_{n=1}^{N_{PV}} \eta_{PV_n} S_{PV_n} I_s^t \quad (8)$$

الگوریتم کاهش سناریوی روبه‌عقب نیز شامل مراحل زیر است [۷]:

- مرحله ۱: مقدار اولیه سناریوهای کاهش یافته Ω_s با مجموعه اصلی Ω برابر است ($\Omega_s = \Omega$) و هرکدام از سناریوهای توان، دارای احتمال $\frac{1}{N_\Omega}$ می‌باشند. تعداد سناریوهای تولید شده است.

- مرحله ۲: محاسبه فاصله کانترویچ اولیه بین هر دو جفت سناریو $v^{ij}(\omega, \omega')$
- مرحله ۳: انتخاب سناریوی ω' که کمترین فاصله را با سناریوی ω داشته باشد و محاسبه $PV_{\omega, \omega'}^{ij}$ به‌ازای ω_r با تعریف زیر:

$$\omega_r = \arg \min \{v^{ij}(\omega, \omega')\}, \forall \omega, \omega' \in \Omega_s^{i-1}, \omega \neq \omega'$$

$$PV_{\omega, \omega'}^{ij} = v^{ij}(\omega, \omega_r) \cdot \pi_{\omega_r}$$
 (۱۴)

π_{ω_r} احتمال وقوع سناریوی ω_r است.

- مرحله ۳: تکرار مرحله ۲ برای هر سناریو و انتخاب و حذف سناریوی ω_d با تعریف زیر به‌ازای تعداد سناریوهای کاهش یافته N_{Ω_s} :

$$\omega_d = \arg \min (PV_{\omega, \omega'}^{ij}), \forall 1 \leq \omega \leq N_{\Omega_s}$$

قرار دادن: $\Omega_s^{ij} = \Omega_s^{i-1} \setminus \omega_d$
به‌روزرسانی i : $i = i + 1$

به‌روزرسانی π_r : $\pi_r = \pi_r + \pi_d$

π_r احتمال سناریوی ω_r و π_d احتمال سناریوی ω_d هستند.

- مرحله ۴: تکرار مراحل ۲ تا ۴ تا جایی که تعداد سناریوهای کاهش یافته به مقدار مطلوب برسند.

۳-۲- تابع هدف

تابع هدف پیشنهادی یک ریزشکه در بازارهای روز بعد انرژی و زرو را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \text{Max profit } MGd = & \sum_{t=1:24} (\rho'_E E'_{MGs} + \rho'_R R'_{MGs}) + \\ & \sum_{t=1:24} \sum_{s=1}^{N_s} (\pi_s * (\rho'_L P'_{loada,s} - \sum_{i \in S_{DG}} |C'_{i,s} (P'_{i,s}) S'_{i,s} + \\ & C'_{u,i} U'_{i,s} + C'_{d,i} d'_{i,s} | - C'_L (P'_{loadcurt,s}) \\ & - C'_{bes,s} (P'_{bes,s})) \end{aligned} \quad (15)$$

معادله (۱۵) درواقع بهینه‌سازی است که هر ریزشکه برای تعیین میزان مشارکت خود در بازارهای انرژی و زرو روز آینده انجام می‌دهد. ریزشکه میزان E'_{MGs} و R'_{MGs} را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند که سود حاصل از شرکت در بازارهای انرژی و زرو روز بعد بیشینه شود. درعین حال او مسئول تأمین بارهای داخلی خود است. او می‌تواند بارهای داخلی خود را از طریق منابع درون ریزشکه و یا با خرید انرژی از بازار روز بعد تأمین نماید. اولین عبارت، شامل درآمد حاصل از شرکت ریزشکه در بازارهای انرژی و زرو روز آینده است. ρ'_R ، ρ'_E

در الگوریتم کاهش روبه‌عقب نیز، در ابتدا تمامی سناریوها در مجموعه سناریوهای کاهش یافته قرار می‌گیرند ($\Omega_s = \Omega$). سپس سناریویی که با حذف آن کمترین فاصله بین مجموعه اصلی و مجموعه سناریوهای کاهش یافته ایجاد می‌شود حذف می‌گردد. این فرآیند، آن قدر تکرار می‌شود تا تعداد مجموعه سناریوهای کاهش یافته به مقدار مطلوب برسد [۴۰، ۴۱].

به‌طور کلی، عملکرد محاسباتی این روش‌ها، از نظر دقت و زمان محاسبات متفاوت است. برای درخت‌های سناریوی بزرگ، روش کاهش سناریوی روبه‌عقب، بهترین عملکرد قابل قبول را با توجه به بازه زمانی محدود ارائه می‌دهد؛ اما در بازه زمانی طولانی‌تر، عملکرد و دقت هر دو روش کاهش روبه‌عقب و روبه‌جلو، مشابه هستند. روش کاهش سناریوی روبه‌جلو، از نظر دقت، بهترین روش کاهش سناریو محسوب می‌شود به شرط این که تعداد سناریوهای کاهش یافته موردنظر محدود باشد. ترکیب این دو روش، در شرایطی که هر دو بتوانند در محدوده زمانی تعیین شده اجرا شوند می‌تواند عملکرد روش روبه‌جلو را بهبود ببخشد [۴۰-۴۲]. در ادامه، کاربردهای خاصی از روش‌های کاهش سناریو روبه‌جلو سریع و روبه‌عقب آورده شده است.

الگوریتم کاهش سناریوی روبه‌جلو سریع شامل مراحل زیر است [۳۵]:

- مرحله ۱: محاسبه فاصله کانترویچ $v_{\omega}(\omega, \omega')$ برای هر جفت سناریوی ω و ω' در مجموعه اصلی Ω .
- مرحله ۲: محاسبه PV_{ω} به‌ازای تعداد سناریوها N_Ω

$$PV_{\omega} = \sum_{\omega'=1}^{N_\Omega} \pi_{\omega'} V_{\omega, \omega'} \quad \forall \omega \in \Omega \quad (9)$$

- مرحله ۳: انتخاب و قراردادن اولین سناریو ω_1 :

$$\omega_1 \in \arg \min_{\omega \in \Omega} PV_{\omega}, \quad \Omega_j = \{1, \dots, N_\Omega\} \setminus \omega_1$$

- مرحله ۱: محاسبه فاصله کانترویچ:

$$v_{\omega}^{ij}(\omega, \omega') = \min \{v_{\omega}^{i-1}(\omega, \omega'), v_{\omega}^{i-1}(\omega, \omega_{i-1})\}, \quad (10)$$

$$\forall \omega, \omega' \in \Omega_j^{i-1}$$

$$PV_{\omega}^{ij} = \sum_{\omega' \in \Omega_j^{i-1} \setminus \{\omega\}} \pi_{\omega'} V_{\omega, \omega'}^i(\omega, \omega'), \quad \forall \omega \in \Omega_j^{i-1} \quad (11)$$

انتخاب: $\omega_i \in \arg \min_{\omega \in \Omega_j^{i-1}} PV_{\omega}^{ij}$

قراردادن: $\Omega_j^{ij} = \Omega_j^{i-1} \setminus \omega_i$

- مرحله $i+1$ به‌ازای N_{Ω_s} تعداد اعضای مجموعه Ω_s^* :

مجموعه سناریوهایی که کنار گذاشته می‌شوند: $\Omega_j^* = \Omega_j^{[N_{\Omega_s}^*]}$

مجموعه سناریوهایی که انتخاب می‌شوند: $\Omega_s^* = \Omega \setminus \Omega_j^*$

احتمال سناریوهایی که انتخاب می‌شوند π_{ω} به‌ازای $\omega \in \Omega_s^*$ ، از طریق روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌گردند:

$$\pi_{\omega}^* = \pi_{\omega} + \sum_{\omega \in j(\omega)} \pi_{\omega}, \quad \forall \omega \in \Omega_s^* \quad (12)$$

$$j(\omega) = \{\omega' \in \Omega_j^* | \omega = j(\omega')\}, \quad j(\omega) \in \arg \min_{\omega \in \Omega_j^*} v(\omega', \omega) \quad (13)$$

$$\sum_{i \in S_{DG}} P_{i,s}^t + P_{bes,s}^t + P_{wt}^t + P_{pv}^t = P_{loada,s}^t + E_{MG,s}^t \quad (20)$$

$$\forall t = 1:24$$

علاوه بر آن، به منظور عملکرد امن و قابل اطمینان سیستم، محدودیت توازن بار و تولید، محدودیت‌های فنی ژنراتورها و منابع ذخیره‌کننده انرژی و محدودیت‌های میزان بار قابل قطع، ظرفیت خط و کفایت ریزشکه به تابع هدف اضافه می‌شوند. منابع تولید قابل‌پخش، دارای محدودیت‌های فنی مانند محدودیت بیشینه و کمینه توان تولیدی، محدودیت حداقل زمان خاموش و روشن شدن و محدودیت‌های شیب رو به بالا و شیب رو به پایین می‌باشند. در کنار همه این محدودیت‌ها، رزرو چرخان ارائه شده نیز باید در محدودیت ظرفیت رو به بالا در زمان ۱۰ دقیقه صدق نماید. روابط (۲۱) تا (۲۸) این محدودیت‌ها را بیان می‌کنند. متغیرهای $P_{i,max}^t$ ، $P_{i,min}^t$ ، $R_{i,s}^t$ ، $M_{SR,i}$ ، $r_{d,i}$ ، $r_{u,i}$ ، $M_{DT,i}$ ، $M_{UT,i}$ منابع قابل‌پخش، کمینه و بیشینه توان تولیدی منابع قابل‌پخش، حداقل زمان روشن ماندن و حداقل زمان خاموش ماندن منابع، نرخ‌های شیب رو به بالا و رو به پایین و نرخ افزایش تولید در ۱ دقیقه می‌باشند.

$$P_{i,min}^t S_{i,s}^t \leq P_{i,s}^t + R_{i,s}^t \quad (21)$$

$$P_{i,s}^t + R_{i,s}^t \leq P_{i,max}^t S_{i,s}^t \quad (22)$$

$$\sum (S_{i,s}^t - U_{i,s}^t) = 0, 0 \leq t_e < t + M_{UT,i}, \quad (23)$$

$$\forall i \in S_{DG}, t = 1:24$$

$$\sum (1 - S_{i,s}^t - d_{i,s}^t) = 0, 0 \leq t \leq t + M_{DT,i}, \quad (24)$$

$$\forall i \in S_{DG}, t = 1:24$$

$$\sum S_{i,s}^t = 0, \forall t_e \leq 0 \quad (25)$$

$$P_{i,s}^{t+1} - P_{i,s}^t \leq r_{u,i} \quad \forall i \in S_{DG}, \forall t = 1:24 \quad (26)$$

$$P_{i,s}^t - P_{i,s}^{t+1} \leq r_{d,i} \quad \forall i \in S_{DG}, \forall t = 1:24 \quad (27)$$

$$R_{i,s}^t S_{i,s}^t \leq \min(10 * M_{SR,i}, P_{i,max} - P_{i,s}^t) \quad (28)$$

منابع ذخیره‌کننده انرژی نیز، باید در تمامی سناریوها در محدودیت‌های بیشینه توان شارژ $r_{ch,max}$ و دشارژ $r_{dis,max}$ (۲۹) و (۳۰) صدق نمایند. روابط (۳۱) و (۳۲) میزان سطح انرژی باتری ذخیره‌کننده $E_{bes,s}^t$ را در حالت‌های شارژ و دشارژ نشان می‌دهند. ثابت‌های η_{dis} و η_{ch} به ترتیب ضریب بازدهی باتری در حالت‌های شارژ و دشارژ هستند. بیشینه و کمینه انرژی ذخیره‌شده در باتری نیز باید در رابطه (۳۳) صدق نمایند. سطح ذخیره کمینه باتری با جلوگیری از دشارژ زیاد، باعث افزایش عمر باتری می‌شود. ضرایب بازدهی شارژ و دشارژ باتری نیز به دلیل تلفات همیشه کمتر از ۱ هستند.

$$P_{bes,s}^t \leq r_{dis,max} \quad \forall 0 \leq P_{bes,s}^t, t = 1:24 \quad (29)$$

$$P_{bes,s}^t \geq -r_{ch,max} \quad \forall P_{bes,s}^t \leq 0, t = 1:24 \quad (30)$$

$$E_{bes,s}^{t+1} = E_{bes,s}^t - \eta_{ch} P_{bes,s}^t dt \quad \forall P_{bes,s}^t \leq 0, t = 1:24 \quad (31)$$

R_{MG} ، به ترتیب، قیمت بازارهای انرژی و رزرو و مقادیر پیشنهادشده در این بازارها را نشان می‌دهند. عبارت ۲، شامل متوسط درآمد حاصل از فروش انرژی به صورت خرده‌فروشی به بارهای داخل ریزشکه، منهای کل هزینه‌های بهره‌برداری ریزشکه برای مشارکت در بازارهای انرژی و رزرو روز بعد و تأمین بارهای داخلی خود است.

هزینه‌های بهره‌برداری، هزینه تولید منابع قابل‌پخش، هزینه روشن و خاموش شدن ژنراتورها، هزینه قطع بار و هزینه ناشی از بهره‌برداری باتری ذخیره‌کننده انرژی را شامل می‌شود. هزینه بهره‌برداری باتری نیز، تابعی خطی از قدرمطلق ظرفیت شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌کننده انرژی است که برای نگهداری از باتری مورد استفاده قرار می‌گیرد. ρ_L^t قیمت بازار خرده‌فروشی و $P_{loada,s}^t$ مقدار بار تأمین‌شده داخلی را نشان می‌دهند. i و S شاخص‌های منابع قابل قطع و سناریوها و N_s و π_s به ترتیب تعداد سناریوها و احتمال مربوط به آن‌ها هستند. $C_{bes,s}^t$ ، C_L^t ، $C_{d,i}^t$ ، $C_{u,i}^t$ ، $C_{i,s}^t$ نیز، هزینه بهره‌برداری منابع قابل‌پخش و هزینه‌های روشن و خاموش کردن واحدها، قطع بار و بهره‌برداری باتری را نشان می‌دهند. همچنین $d_{i,s}^t$ ، $U_{i,s}^t$ و $S_{i,s}^t$ متغیرهای باینری نشان‌دهنده تصمیم‌گیری روشن و خاموش شدن منابع و وضعیت روشن یا خاموش آن‌ها و $P_{i,s}^t$ ، $P_{loada,s}^t$ و $P_{loadcurt,s}^t$ به ترتیب توان تجدیدپذیر، توان باتری‌ها و بار قطع شده هستند.

رابطه بین بار واقعی $P_{loada,s}^t$ ، بار تأمین‌شده $P_{loada,s}^t$ و بار تأمین‌نشده $P_{loadcurt,d}^t$ ، توسط رابطه (۱۶) بیان می‌شود. رابطه (۱۷) نیز، نشان‌دهنده هزینه تولید منابع قابل‌پخش است که به صورت تابع خطی از توان تولیدی $P_{i,s}^t$ بر اساس ضرایب α_i و β_i در نظر گرفته شده است. هزینه قطع بار با اعمال ضریب جریمه α_L در میزان بار قطع شده $P_{loadcurt,s}^t$ ، به صورت خطی و مطابق با رابطه (۱۸) و هزینه بهره‌برداری باتری ذخیره‌کننده، به صورت رابطه خطی با قدرمطلق توان ذخیره‌شده یا دشارژشده $P_{bes,s}^t$ ، بر اساس ضرایب α_{bes} و β_{bes} و مطابق رابطه (۱۹) محاسبه می‌شوند [۷، ۱۶]. همچنین، مطابق با رابطه (۲۰) جمع توان تولیدی منابع قابل‌پخش $P_{i,s}^t$ و منابع تجدیدپذیر بادی P_{wt}^t و خورشیدی P_{pv}^t ، همراه با توان ذخیره‌کننده باتری $P_{bes,s}^t$ ، در تمامی سناریوها باید با مجموع توان فروخته‌شده به شبکه $E_{MG,s}^t$ و بار تأمین‌شده $P_{loada,s}^t$ برابر باشند. توان فروخته‌شده و توان دشارژ باتری مثبت فرض شده‌اند.

$$P_{loada}^t = P_{loada,s}^t + P_{loadcurt,s}^t \quad (16)$$

$$C_{i,s}^t(P_{i,s}^t) = \alpha_i P_{i,s}^t + \beta_i \quad (17)$$

$$C_L^t(P_{loadcurt,s}^t) = \alpha_L \cdot P_{loadcurt,s}^t \quad (18)$$

$$C_{bes,s}^t(P_{bes,s}^t) = \alpha_{bes} |P_{bes,s}^t| + \beta_{bes} \quad (19)$$

هرکدام از آنها وجود داشته باشد. حالت اول زمانی رخ می‌دهد که مسئله فرعی جواب بهینه یا شدنی ندارد. در حالت دوم مسئله فرعی یک مسئله کانوکس^۶ است و می‌توان جواب‌های بهینه آن را محاسبه نمود. حالت سوم زمانی است که مسئله فرعی کانوکس نیست ولی به چندین مسئله فرعی دیگر قابل تبدیل است. با توجه به دقت موردنظر و بعد از تکرارهای زیاد جواب‌های جهانی به دست می‌آیند.

روش بهینه‌سازی برش صفحه تعمیم‌یافته^۷ نیز ادامه روش برش صفحه کلی^۸ است که برای حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه شده است و برای مسائل شبه‌کانوکس بهینه‌های جهانی را تضمین می‌کند. این روش در هر تکرار تنها نیازمند جواب مسئله عدد صحیح مختلط است. برای هر مسئله فرعی سه حالت وجود دارد: یا مسئله دارای بهینه است یا شدنی است و یا جواب‌های آزاد شده را در تعداد تکرارهای متوسط ارائه می‌دهد. در واقع این الگوریتم روش موردنظر را به روشی آسان و کارآمد تبدیل می‌کند.

از آنجایی که مدل ارائه شده در این مقاله یک مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط غیرکانوکس است استفاده از روش شاخه و برش می‌تواند بهینه‌های جهانی را به دست آورد. اما این روش دارای الگوریتمی بسیار زمان‌بر است. برای کاهش زمان محاسبات می‌توان از ترکیب روش‌های شاخه و برش و برش صفحه تعمیم‌یافته استفاده نمود. روش برش صفحه تعمیم‌یافته زمان محاسبات را کاهش داده و بهینه‌های محلی را به دست می‌دهد و روش شاخه و برش با استفاده از بهینه‌های محلی ارائه شده توسط روش برش صفحه تعمیم‌یافته بهینه‌های جهانی را تضمین می‌کند. حل‌کننده‌های Lindoglobal و AlphaECP در گمز به ترتیب از روش‌های شاخه و برش و برش صفحه تعمیم‌یافته استفاده می‌کنند.

۳- مطالعه موردی

در این مقاله، هدف ارائه استراتژی پیشنهاددهی مناسب برای ریزشکه‌ای است که قصد دارد به‌طور هم‌زمان در بازارهای انرژی و رزرو روز بعد شرکت نماید. این ریزشکه، رزرو پیشنهادی خود را به صورت رزرو گردان ارائه می‌دهد و دارای ۳ انشعاب مسکونی، صنعتی و تجاری است که بر روی هم ۲ میکرو توربین، ۲ سلول سوختی، ۳ توربین بادی، ۲ آرایه خورشیدی و ۱ ذخیره‌کننده انرژی به آنها متصل شده‌اند. کنترل مورد استفاده در ریزشکه، با توجه به سرعت و توانایی شرکت در بازار انرژی و رزرو به صورت هم‌زمان، کنترل مرکزی است تا بتواند بیشترین سود را نصیب مالکان و بهره‌برداران ریزشکه نماید. همچنین، فرض می‌شود که ریزشکه موردنظر پذیرنده قیمت بوده و به خاطر کوچکی ابعاد و قرارنگرفتن در موقعیت فیزیکی خاص نمی‌تواند قیمت‌های بازار را تحت تأثیر قرار دهد. بلکه پیشنهادهای بهینه خود را بر اساس قیمت‌های پیش‌بینی شده بازار ارائه می‌دهد.

اطلاعات فنی منابع تولید پراکنده از مرجع [۷] استخراج شده‌اند. فرض بر این است که قیمت‌های بازار انرژی و رزرو روز بعد به‌طور دقیق پیش‌بینی شده‌اند، اما در میزان بار مصرفی و وزش باد و تابش خورشید

$$E_{bes,s}^{t+1} = E_{bes,s}^t - \frac{P_{bes,s}^t dt}{\eta_{dis}} \quad \forall P_{bes,s}^t \geq 0, t = 1:24 \quad (32)$$

$$E_{bes,min} \leq E_{bes,s}^t \leq E_{bes,max} \quad (33)$$

مطابق با (۳۴) و (۳۵) بار قابل قطع $R_{L,s}^t$ می‌تواند در بازار رزرو شرکت نماید. این مقدار قابل قطع همواره از درصدی از ماکزیمم بار $L_{curt,max}$ کمتر است.

$$R_{MG,s}^t = \sum_{i \in S_{PG}} R_{i,s}^t + R_{L,s}^t \quad \forall t = 1:24 \quad (34)$$

$$0 \leq P_{loadcurt,s}^t + R_{L,s}^t \leq L_{curt,max} \quad \forall t = 1:24 \quad (35)$$

علاوه بر آن انرژی تبادل شده با شبکه اصلی همواره باید کمتر از حد مجاز خط $E_{Grid,max}$ باشد؛ بنابراین در میزان انرژی و رزرو پیشنهادی این محدودیت (۳۶) باید لحاظ شود.

$$E_{MG,s}^t + R_{MG,s}^t \leq E_{Grid,max} \quad \forall t = 1:24 \quad (36)$$

همیشه باید مقداری حاشیه رزرو در شبکه وجود داشته باشد تا در هنگام از دسترس خارج شدن غیرمنتظره واحدها و یا افزایش ناگهانی بار، فقدان توان در شبکه جبران شود. این اطمینان از طریق رابطه (۳۷) حاصل می‌شود.

$$\sum_{i \in S_{PG}} (P_{i,max} - P_{i,s}^t - R_{i,s}^t) \cdot S_{i,s}^t + \eta_{dis} \min(E_{bes,s}^t / dt, r_{dis,max}) + (L_{curt,max} - P_{loadcurt,s}^t - R_{L,s}^t) + (E_{Grid,max} - |E_{MG,s}^t + R_{MG,s}^t|) \geq AR_{MG}, \quad \forall t = 1:24 \quad (37)$$

۴-۲- ارزش حل تصادفی

ارزش حل تصادفی^۹ معیاری است که با استفاده از آن می‌توان مزیت استفاده از راه‌حل تصادفی را نسبت به راه‌حل قطعی ارزیابی نمود. در راه‌حل قطعی، ابتدا مسئله پیشنهاددهی، با جایگزین‌سازی پارامترهای تصادفی با مقادیر مورد انتظار متناظر خود، بهینه می‌شود. سپس، مقادیر بهینه به دست آمده برای متغیرهای مرحله ۱ در مسئله بهینه‌سازی تصادفی قرار می‌گیرند. مقدار تابع هدف بهینه برای حل مسئله بهینه‌سازی تصادفی با متغیرهای مرحله ۱ جایگذاری شده را می‌توان با Z^D نشان داد. Z^S نیز مقدار تابع هدف به دست آمده از حل مسئله تصادفی اصلی است. مقدار ارزش حل تصادفی VSS از رابطه (۳۸) به دست می‌آید [۳۵، ۳۹].

$$VSS = Z^D - Z^S \quad (38)$$

۵-۲- الگوریتم بهینه‌سازی مسئله

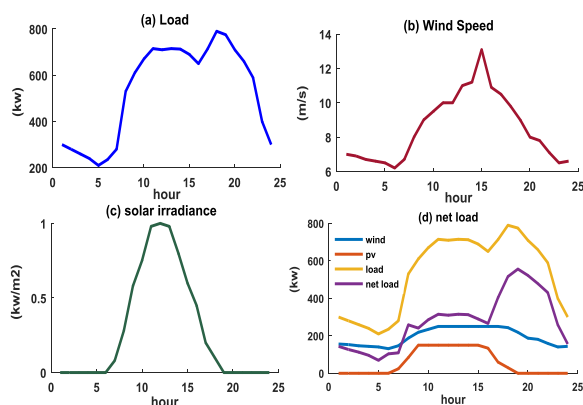
روش شاخه و برش^۵ روشی است که برای حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از این روش می‌تواند یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی اصلی را به چندین مسئله بهینه‌سازی فرعی تبدیل نمود. با تحلیل مسئله‌های فرعی سه حالت می‌تواند برای

ضریب جریمه برای بار قطع شده مطابق با مرجع [۷] برابر ۳۰ سنت در نظر گرفته شده است. ضریب بازدهی باتری نیز برابر ۰/۹ است و همواره باید حداقل ۲۰ درصد انرژی ذخیره شده در باتری باقی بماند. ماکزیمم بار قابل قطع برابر ۱۰۰ Kw، محدودیت ظرفیت خط بین ریزشکه و شبکه اصلی ۱۰۰۰۰ Kw و حاشیه رزرو در داخل ریزشکه ۱۰۰Kw در نظر گرفته شده است که بیشتر از ۱۰ درصد بزرگ‌ترین مصرف موجود در ریزشکه است. علاوه بر آن، پارامترهای مربوط به توربین‌های بادی V_{in} ، V_{out} ، V_{rate} و پارامترهای مربوط به سلول‌های خورشیدی η_{pv} ، S_{pv} ، N_{pv} به ترتیب ۲، ۱۵، ۱۰، ۱۵٪، ۱۰۰۰ و ۲ هستند. توان نامی توربین‌ها P_r^w نیز به ترتیب ۱۰۰، ۱۵۰ می‌باشند. باتری در ساعت ۱ در ۵۰ درصد ظرفیت خود قرار دارد و امکان شرکت در بازار رزرو را ندارد.

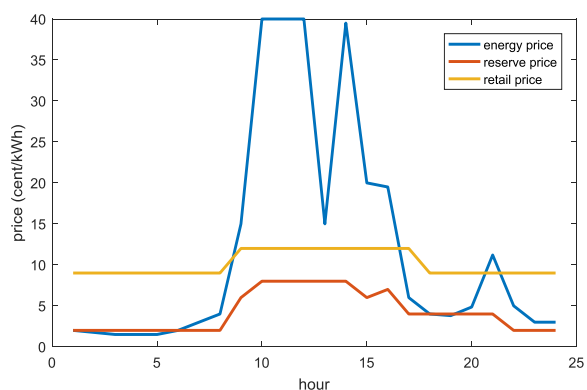
بنابراین ابتدا، با استفاده از روش نمونه‌گیری مکعب‌لاتین به‌عنوان یکی از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو، ۴۰۰۰ سناریو از هرکدام از توابع چگالی احتمال نرمال، ویبال و بتا ایجاد شدند. سپس ۴۰۰۰ سناریوی ایجاد شده برای بار خالص، توسط روش کاهش سناریو به ۷ سناریوی اصلی تقلیل یافتند و تابع هدف مسئله با ۷ سناریوی کاهش یافته با احتمال‌های متناظر بیشینه شد. روش کاهش سناریوی مورداستفاده، روش ترکیبی روبه‌جلو سریع و روبه‌عقب با استفاده از نرم‌افزار کاهش سناریو در گمز بود. بهینه‌سازی مدل توسط نرم‌افزار ریاضی گمز ۲۴۰۷ و با ترکیبی از حل‌کننده‌های AlphaECP و Lindoglobal انجام شد و مقدار بهینه ۱۶۳۲۴۰۰۷۳ با میزان خطای ۰۰۰۷۷ درصد برای تابع هدف سود حاصل از شرکت در بازارهای انرژی و رزرو روز بعد به دست آمد. شکل ۵ پیشنهادهای به‌دست آمده برای ریزشکه در بازارهای انرژی و رزرو را نشان می‌دهد. کلیات نتایج به‌دست آمده مشابه نتایج حاصل از مرجع [۷] هستند اما الگوریتم پیشنهادی در این مقاله سود بیشتری را متوجه اپراتور ریزشکه می‌نماید.

در طول ساعت‌های ۱ تا ۶، قیمت‌های بازار انرژی بیشتر از قیمت‌های بازار خرده‌فروشی، اما کمتر از قیمت‌های بازار رزرو است؛ بنابراین ریزشکه به جای فروش توان به شبکه اصلی تصمیم می‌گیرد مقدار توان موردنیاز خود برای تأمین بارهای داخلی را از شبکه اصلی خریداری نماید. در این ساعت‌ها، با توجه به قیمت‌های بازار رزرو، منابع ۱ و ۲ رزرو ارائه می‌دهند؛ اما منابع ۳ و ۴ به دلیل هزینه بهره‌برداری بالا خاموش باقی می‌مانند. در ساعات ۷ و ۸، باینکه قیمت بازار انرژی بیشتر از قیمت بازار رزرو است، اما شرکت در بازار انرژی هزینه بهره‌برداری منابع را تأمین نمی‌کند؛ بنابراین منابع ۱ و ۲ همچنان رزرو ارائه داده و منابع ۳ و ۴ خاموش باقی می‌مانند.

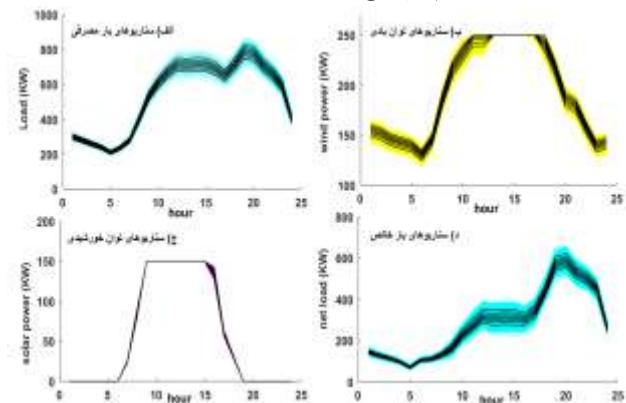
در ۲۴ ساعت آینده عدم قطعیت وجود دارد. برای مدل کردن خطای عدم قطعیت در پیش‌بینی میزان بار مصرفی، وزش باد و تابش خورشید به ترتیب از توابع چگالی احتمال نرمال، ویبال و بتا استفاده شده است. مقادیر پیش‌بینی شده برای سرعت باد، تابش خورشید، بار مصرفی و بار خالص در شکل ۲ (الف-د) ارائه شده‌اند. شکل ۳ نیز مقادیر پیش‌بینی شده برای قیمت‌های انرژی و رزرو را نشان می‌دهد. همچنین کل سناریوهای ایجاد شده برای توان‌های بادی، خورشیدی، بار مصرفی و بار خالص و سناریوهای کاهش یافته حاصل متناظر با هرکدام در شکل ۴ (الف-د) نشان داده شده‌اند.



شکل ۲: بار مصرفی، سرعت باد، تابش خورشید و بار خالص پیش‌بینی شده برای روز بعد



شکل ۳: قیمت‌های بازار انرژی، رزرو و خرده‌فروشی پیش‌بینی شده برای روز بعد



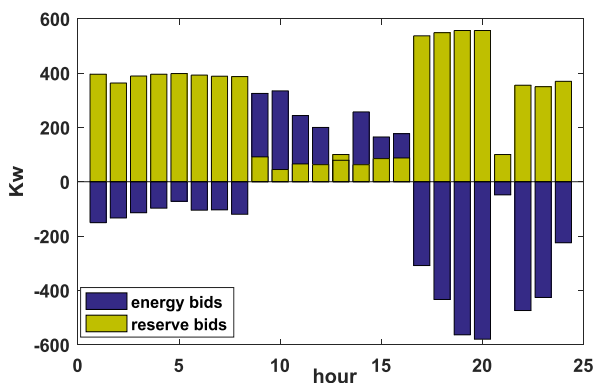
شکل ۴: کل سناریوهای تولید شده و سناریوهای کاهش یافته بار مصرفی، توان بادی، توان خورشیدی و بار خالص

می‌دهند بنابراین منابع ۱ و ۲ در بازار رزرو شرکت کرده و منابع ۳ و ۴ خاموش باقی می‌مانند. شکل ۶ میزان ارائه انرژی و رزرو را برای منابع ۱ تا ۴ نشان می‌دهد. توان و انرژی ذخیره شده در باتری نیز در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. مقادیر به دست آمده برای پیشنهاددهی به بازارهای انرژی و رزرو با توجه به همه سناریوها هستند و ممکن است برای تک تک سناریوها بهینه نباشند.

در ساعات ۹ تا ۱۶ به دلیل قیمت بالای بازار انرژی تمامی منابع در مدار هستند و کمبود توان با قطع اجباری بار جبران می‌شود. این قطعی در سناریوهای ۴ تا ۷ به دلیل افزایش مقادیر بار نسبت به تولید تجدیدپذیر بیشتر اتفاق می‌افتد. در بقیه ساعات و سناریوها به دلیل ضریب جریمه بالا، باری قطع نمی‌شود. شکل ۸ قطعی اجباری بار را در ساعات مختلف شبانه روز نشان می‌دهد.

متوسط هزینه این قطعی‌ها معادل ۱۶۲۹۰۵۳ سنت برای روز بعد برآورد می‌شود. بار داوطلب نیز با توجه به حداکثر مجاز خود و پیشنهاد ارائه شده در بازار رزرو، رزرو ارائه می‌دهد. این مقدار حداکثر، به دلیل محدودیت حداکثر بار قابل قطع در ساعت‌هایی که بار قطع نمی‌شود ۱۰۰ Kw و در بقیه ساعت‌ها برابر با حاصل کسر بار قطع شده از حداکثر قابل قطع بار است. شکل ۹ پروفایل پیشنهاددهی بار داوطلب را در بازار رزرو نشان می‌دهد.

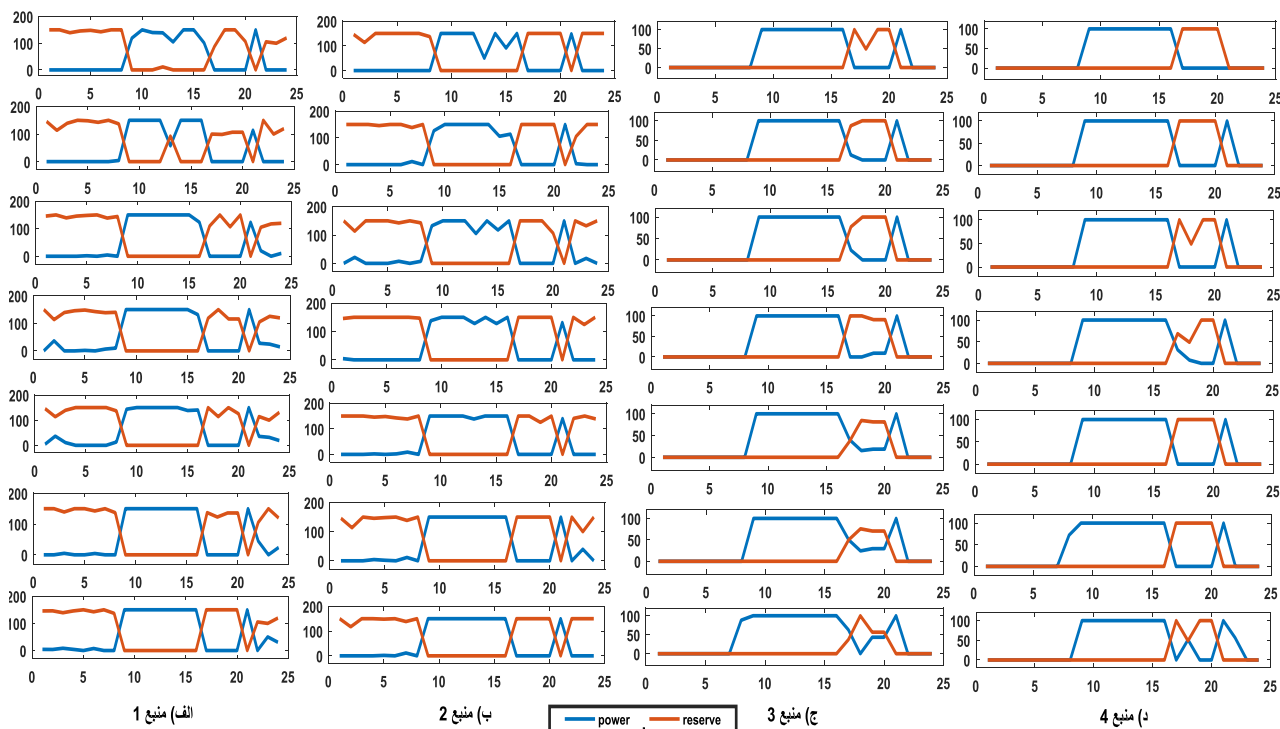
مقدار ارزش حل تصادفی به دست آمده برای مسئله تصادفی نیز با استفاده از رابطه (۳۸) برابر با ۴۶۱۰/۳ سنت به دست می‌آید. مقدار به دست آمده برای ارزش حل تصادفی، لزوم استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی را نشان می‌دهد.



شکل ۵: پیشنهاددهی ریزشکدها در بازارهای انرژی و رزرو روز بعد

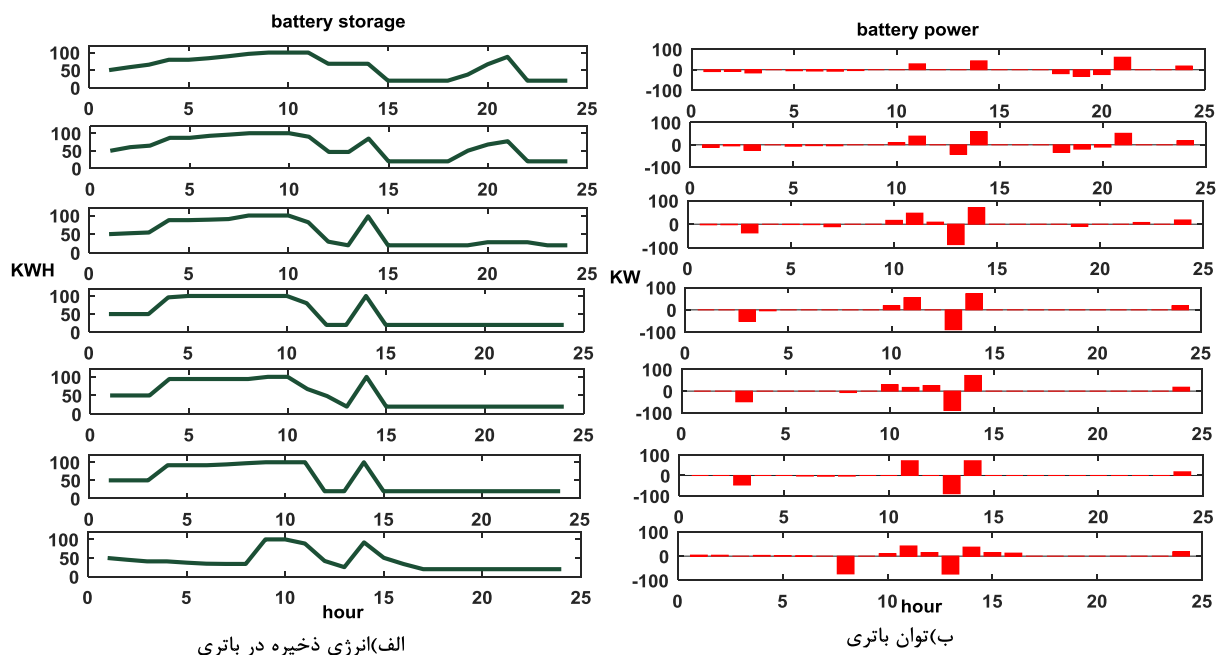
در ساعات ۹ تا ۱۶ با توجه به افزایش زیاد قیمت‌های بازار انرژی، تمامی منابع علاوه بر تأمین بارهای داخلی ریزشکده در کنار تولید تجدیدپذیر، توان مازاد خود را در بازار انرژی به فروش می‌رسانند. در ساعات ۱۷ تا ۲۰، قیمت‌های بازار انرژی کاهش می‌یابند و ریزشکده دوباره توان موردنیاز خود برای تأمین بارهای داخلی را خریداری می‌نمایند؛ اما با توجه به قیمت‌های بازار رزرو، تمامی منابع رزرو ارائه می‌دهند. در ساعت ۲۱، با افزایش مصرف بار الکتریکی، قیمت بازار انرژی به شدت افزایش می‌یابد و بنابراین، تمامی منابع جهت تأمین بار داخلی ریزشکده توان تولید می‌کنند. در این ساعت، تولید داخلی برای تأمین بار درون ریزشکده کافی نیست و ریزشکده مجبور می‌شود مازاد نیاز خود را از شبکه اصلی خریداری نماید.

در ساعات ۲۲ تا ۲۴ قیمت بازار انرژی کاهش می‌یابد و منابع داخلی توجیه اقتصادی مطلوب را برای شرکت در بازار انرژی از دست



شکل ۶: (الف) توان و رزرو ارائه شده توسط منبع ۱، (ب) منبع ۲، (ج) منبع ۳ و (د) منبع ۴ بر حسب KW

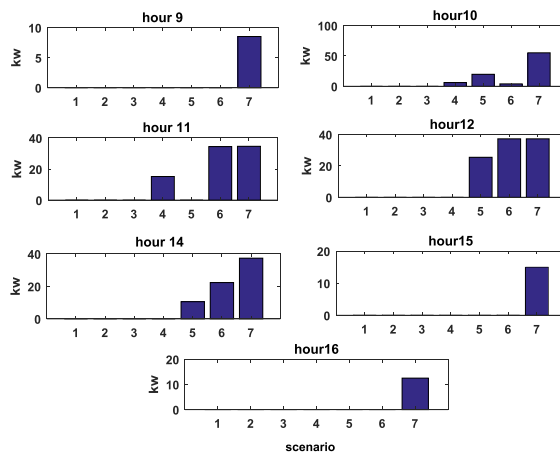
در ۷ سناریوی کاهش یافته در بازارها روز بعد انرژی و رزرو



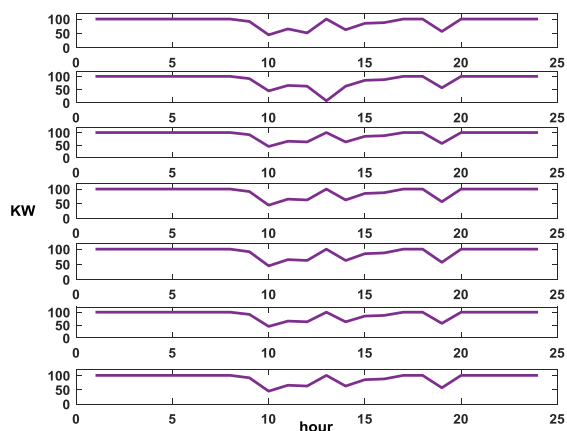
شکل ۷ توان و انرژی ذخیره‌شده در باتری

۴- نتیجه

در این مقاله، استراتژی پیشنهادی یک ریزشکه تجدیدپذیر در بازارهای انرژی و زرو هم‌زمان، با در نظر گرفتن عدم قطعیت در میزان بار مصرفی و تولید تجدیدپذیر مورد بررسی قرار گرفت. ریزشکه مورد نظر دارای ۳ انشعاب مسکونی، صنعتی و تجاری بود که بر روی هم ۲ میکرو توربین، ۲ سلول سوختی، ۳ توربین بادی، ۲ آرایه خورشیدی و یک ذخیره‌کننده انرژی را شامل می‌شد. ۴۰۰۰ سناریوی بار مصرفی، سرعت باد و تابش خورشید، با استفاده از روش نمونه‌گیری مکعب لاتین، مقادیر پیش‌بینی‌شده و توابع چگالی احتمالی خطای نرمال، و بیال و بتا تولید شد و با استفاده از روش کاهش سناریوی ترکیبی در گمز به ۷ سناریوی بار مصرفی، سرعت باد و تابش خورشید تقلیل یافت. مدل ریاضی به‌دست‌آمده برای بهینه‌سازی مسئله یک مدل سایز بزرگ از نوع معادلات عدد صحیح-مختلط غیرخطی با تعداد متغیرهای دودویی فراوان بود. سپس تابع هدف مسئله، با استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای در نرم‌افزار گمز ۲۴۰۷ و با ترکیب حل‌کننده‌های Alphacep و Lindoglobal بیشینه گردید که این مقدار بیشینه با در نظر گرفتن خطای نسبی ۰۰۰۷۷ به‌دست آمد. استفاده از حل‌کننده Alphacep زمان بهینه‌سازی را کاهش داد و با به‌کارگیری حل‌کننده Lindoglobal جواب‌های جهانی به‌دست‌آمده تضمین شدند. همچنین، استفاده از معیار «ارزش حل تصادفی»، کارایی روش برنامه‌ریزی تصادفی مورد استفاده را نسبت به روش برنامه‌ریزی قطعی تأیید نمود.



شکل ۸: پروفایل بار قطع‌شده در ساعات شبانه‌روز



شکل ۹: پروفایل زرو ارائه‌شده توسط بار داوطلب

مراجع

- [16] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets—Part I: Problem formulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 949-956, 2011.
- [17] T. Li, M. Shahidehpour and Z. Li, "Risk-constrained bidding strategy with stochastic unit commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 449-458, 2007.
- [18] T. Chung, S. Zhang, K. Wong, C. Yu and C. Chung, "Strategic forward contracting in electricity markets: modelling and analysis by equilibrium method," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 151, no. 2, pp. 141-149, 2004.
- [19] E. J. Anderson and A. B. Philpott, "Using supply functions for offering generation into an electricity market," *Operations Research*, vol. 50, no. 3, pp. 477-489, 2002.
- [20] F. Bolle, "Supply function equilibria and the danger of tacit collusion: the case of spot markets for electricity," *Energy economics*, vol. 14, no. 2, pp. 94-101, 1992.
- [21] T. Li and M. Shahidehpour, "Strategic bidding of transmission-constrained GENCOs with incomplete information," *IEEE Transactions on power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 437-447, 2005.
- [۲۲] معصومه جوتدی، سید مازیار میرحسینی مقدم و موسی مرزبند، «مدیریت بهینه انرژی ریز شبکه‌ها در بازار خرده‌فروشی بر پایه روش تئوری بازی غیرهمکارانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحات ۶۴-۷۴، ۱۳۹۵.
- [23] I. Narimani, S. R. Goldani and I. Birjand, "The Stochastic Bidding Strategy of Micro grid for Participation in Energy and Ancillary Services," *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, vol. 85, pp. 123-139, 2016.
- [24] T. Niknam, R. Azizipanah-Abarghooee and M. R. Narimani, "An efficient scenario-based stochastic programming framework for multi-objective optimal micro-grid operation," *Applied Energy*, vol. 99, pp. 455-470, 2012.
- [25] T. Niknam, F. Golestaneh and A. Malekpour, "Probabilistic energy and operation management of a microgrid containing wind/photovoltaic/fuel cell generation and energy storage devices based on point estimate method and self-adaptive gravitational search algorithm," *Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 427-437, 2012.
- [26] A. Baziar and A. Kavousi-Fard, "Considering uncertainty in the optimal energy management of renewable micro-grids including storage devices," *Renewable Energy*, vol. 59, pp. 158-166, 2013.
- [27] S. Mohammadi, S. Soleymani and B. Mozafari, "Scenario-based stochastic operation management of microgrid including wind, photovoltaic, micro-turbine, fuel cell and energy storage devices," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 54, pp. 525-535, 2014.
- [28] C. A. C. Coello, G. B. Lamont and D. A. Van Veldhuizen, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Springer, 2007.
- [29] D. G. Maringer, *Portfolio management with heuristic optimization*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [1] N. Hatziaargyriou, H. Asano, R. Iravani and C. Marnay, "Microgrids," *IEEE power and energy magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 78-94, 2007.
- [2] D. Pudjianto, G. Strbac, F. Van Oberbeeke, A. Androutsos, Z. Larrabe and J. T. Saraiva, "Investigation of regulatory, commercial, economic and environmental issues in microgrids in Future Power Systems," 2005 International Conference on IEEE, pp. 6-pp, 2005.
- [3] Q. Jiang, M. Xue and G. Geng, "Energy management of microgrid in grid-connected and stand-alone modes," *IEEE transactions on power systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3380-3389, 2013.
- [4] M. Stadler *et al.*, "Value streams in microgrids: A literature review," *Applied Energy*, vol. 162, pp. 980-989, 2016.
- [5] D. T. Nguyen and L. B. Le, "Optimal bidding strategy for microgrids considering renewable energy and building thermal dynamics," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1608-1620, 2014.
- [6] G. Ferruzzi, G. Cervone, L. Delle Monache, G. Graditi and F. Jacobone, "Optimal bidding in a Day-Ahead energy market for Micro Grid under uncertainty in renewable energy production," *Energy*, vol. 106, pp. 194-202, 2016.
- [7] L. Shi, Y. Luo and G. Tu, "Bidding strategy of microgrid with consideration of uncertainty for participating in power market," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 59, pp. 1-13, 2014.
- [8] S. Nojavan, B. Mohammadi-Ivatloo and K. Zare, "Robust optimization based price-taker retailer bidding strategy under pool market price uncertainty," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 955-963, 2015.
- [9] L. Fan, J. Wang, R. Jiang and Y. Guan, "Min-max regret bidding strategy for thermal generator considering price uncertainty," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 5, pp. 2169-2179, 2014.
- [10] B. Vatani, S. Mohajeryami, S. Dehghan and N. Amjadi, "Self-scheduling of generation companies via stochastic optimization considering uncertainty of units," in 2016 Power and Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1-5, IEEE, 2016.
- [11] B. Vatani, N. Amjadi and H. Zareipour, "Stochastic self-scheduling of generation companies in day-ahead multi-auction electricity markets considering uncertainty of units and electricity market prices," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 7, pp. 735-744, 2013.
- [12] N. Yu and B. Foggo, "Stochastic valuation of energy storage in wholesale power markets," *Energy Economics*, vol. 64, pp. 177-185, 2017.
- [13] I. Gomes, H. Pousinho, R. Melício and V. Mendes, "Stochastic coordination of joint wind and photovoltaic systems with energy storage in day-ahead market," *Energy*, vol. 124, pp. 310-320, 2017.
- [14] G. Liu, Y. Xu and K. Tomsovic, "Bidding strategy for microgrid in day-ahead market based on hybrid stochastic/robust optimization," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 227-237, 2016.
- [15] J. Wang *et al.*, "Optimal bidding strategy for microgrids in joint energy and ancillary service markets considering flexible ramping products," *Applied Energy*, vol. 205, pp. 294-303, 2017.

- operation including wind turbines, photovoltaic cells, energy storages and responsive loads,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 12, pp. 1498-1509, 2015.
- [37] J. C. Helton and F. J. Davis, “Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 81, no. 1, pp. 23-69, 2003.
- [38] R. L. Iman, *Latin hypercube sampling*. Wiley Online Library, 2008.
- [39] M. Alipour, B. Mohammadi-Ivatloo and K. Zare, “Stochastic scheduling of renewable and CHP-based microgrids,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, no. 5, pp. 1049-1058, 2015.
- [40] B. McCarl *et al.*, “McCarl GAMS User Guide 24.6,” *GAMS Development Corporation: Washington, DC, USA*, 2015.
- [41] B. Ji, X. Yuan, Z. Chen and H. Tian, “Improved gravitational search algorithm for unit commitment considering uncertainty of wind power,” *Energy*, vol. 67, pp. 52-62, 2014.
- [42] H. Wu, M. Shahidehpour, A. Alabdulwahab and A. Abusorrah, “Thermal generation flexibility with ramping costs and hourly demand response in stochastic security-constrained scheduling of variable energy sources,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 6, pp. 2955-2964, 2015.
- [30] M.-H. Lin, J.-F. Tsai and C.-S. Yu, “A review of deterministic optimization methods in engineering and management,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, 2012.
- [31] H. T. Nguyen and L. B. Le, “Optimal energy management for building microgrid with constrained renewable energy utilization,” in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2014 IEEE International Conference on*, pp. 133-138, IEEE, 2016.
- [32] M. Wang and H. Gooi, “Effect of uncertainty on optimization of microgrids,” in *IPEC, 2010 Conference Proceedings*, pp. 711-716, IEEE, 2010.
- [۳۳] سهیل کعبه پهنه کلانی و مرتضی رحیمیان، «مدیریت انرژی نیروگاه مجازی بر پایه بهینه‌سازی مقاوم با پایش پیشامدهای ریز شبکه: مطالعه موردی خروج تکی خط.» *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحات ۲۵۰-۲۶۱، ۱۳۹۶.
- [34] W. Su, J. Wang and J. Roh, “Stochastic energy scheduling in microgrids with intermittent renewable energy resources,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1876-1883, 2014.
- [35] A. J. Conejo, M. Carrión and J. M. Morales, *Decision making under uncertainty in electricity markets*. Springer, 2010.
- [36] S. Talari, M. Yazdanejad and M.-R. Haghifam, “Stochastic-based scheduling of the microgrid

زیرنویس‌ها

-
- ¹ CPLEX
² GAMS
³ Kantorovich distances
⁴ Value of the Stochastic Solution
⁵ Branch and Cut
⁶ Convex
⁷ Extended Cutting Plane
⁸ Kellye