

A Risk-constrained Two-stage Stochastic Model for Optimal Scheduling of Smart Autonomous Microgrids considering Demand Side Management

Mostafa Vahedipour-Dahraie¹, Homa Rashidizadeh-Kermani¹, Hamidreza Najafi¹

¹ Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract:

In this paper, a risk-constrained two-stage stochastic model is proposed for optimal scheduling of autonomous microgrids considering the participation of end-use customers in demand response programs. The goal of the proposed scheme is to maximize the profit of the microgrid operator in different conditions of the user's risk taking, so that customers pay the lowest cost for their energy consumption. Based on the proposed model, customers are able to provide part of the system's reserve capacity to deal with uncertainties by using smart and response loads capability. The uncertainties of the problem are due to the predicted error of renewable resources, energy prices and demand loads, modeled on scenario-based methods. In the proposed model, in order to deal with the effects of undesirable scenarios, an index for assessing the value of risk is employed to estimate the level of undesirable profits. In addition, in order to more accurately analyze the frequency and voltage limitations, an AC load flow is used in the problem-solving process that achieves more realistic result to the microgrid operation. Finally, the proposed model is implemented in a typical microgrid and the results are investigated in different cases.

Keywords: : Renewable Energies, Stochastic Scheduling, Demand Response, Autonomous Microgrid, Reserve Capacity.

ارائه مدل احتمالاتی دومرحله‌ای مقید به ریسک برای برنامه‌ریزی ریزشبکه‌های هوشمند

مستقل با در نظر گرفتن مشارکت سمت تقاضا

مصطفی واحدی‌پور دهرائی^۱، هما رشیدی‌زاده کرمانی^۲، حمیدرضا نجفی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران

vahedipour_m@birjand.ac.ir

۲- دکتری برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران

rashidi_homa@birjand.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران

h.r.najafi@birjand.ac.ir

چکیده: در این مقاله، مدل احتمالاتی دومرحله‌ای مقید به ریسک برای برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره یک ریزشبکه هوشمند مستقل با در نظر گرفتن مشارکت مشترکین در برنامه‌های بی بار ارائه شده است. هدف برنامه پیشنهادی، بیشینه‌کردن سود مورد انتظار بهره‌بردار در شرایط مختلف ریسک‌پذیری است؛ به طوری که مشترکین نیز کمترین هزینه را برای تأمین انرژی خود پرداخت کنند. براساس این مدل، مشترکین با استفاده از قابلیت بارهای خود، ضمن شرکت در برنامه بار مبتنی بر قیمت‌گذاری زمان استفاده، بخشی از ظرفیت ذخیره ریزشبکه را نیز برای مواجهه با عدم قطعیت‌های آن تأمین می‌کنند. عدم قطعیت‌های مسئله ناشی از خطای پیش‌بینی تولیدات تجدیدپذیر، قیمت انرژی و تقاضا است که با روش‌های مبتنی بر سناریو مدل‌سازی شده‌اند. در مدل پیشنهادی برای تعدیل اثرات ناشی از سناریوهای نامطلوب، از شاخص مقدار شرطی در ریسک (CVaR) برای ارزیابی ارزش ریسک‌پذیری بهره‌بردار به‌منظور برآورد میزان سودهای نامطلوب استفاده شده است. همچنین، در این مطالعه تأثیر ریسک‌پذیری بهره‌بردار ریزشبکه روی میزان مشارکت بارهای در تخصیص ذخیره چرخان بررسی شده است که در مسئله بهره‌برداری مهم و کاربردی است. همچنین، برای ارزیابی دقیق‌تر محدودیت‌های فرکانس و ولتاژ ریزشبکه، از پخش بار بهینه (AC (AC-OPF) در فرایند حل مسئله استفاده شده است تا پاسخ‌های واقعی‌تری از عملکرد ریزشبکه به دست آید. درنهایت، برنامه پیشنهادی در یک ریزشبکه نمونه، اجرا و نتایج در حالت‌های مختلف تحلیل شده است.

واژه‌های کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی احتمالاتی، بی بار، ریزشبکه مستقل، ظرفیت ذخیره

۱- مقدمه

و پایه‌ای بسیار مفیدی در زمینه برنامه‌های پاسخگویی بار^۲ (DR) بود، پژوهش‌های بسیار زیادی در این زمینه، انجام و گزارش شدند که از جنبه‌های مختلف، تأثیرات اجرای برنامه‌های DR را بررسی کردند [۱-۲]. انتشار حجم بسیار وسیع مقالات در زمینه برنامه‌های مختلف DR در سال‌های اخیر، گویای این واقعیت است که صنعت برق به این زمینه تحقیقاتی بسیار نیاز دارد و پژوهشگران به آن بسیار توجه کردند. به‌طور کلی، پژوهش‌های گزارش‌شده در زمینه برنامه‌های DR، بیشتر مقوله‌هایی مانند منافع اقتصادی ناشی

پس از انتشار گزارش کمیته تنظیم انرژی آمریکا^۱ (FERC) در سال ۲۰۰۶ میلادی که شامل مباحث کاربردی

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۱

نام نویسنده مسئول: مصطفی واحدی‌پور دهرائی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند - دانشگاه بیرجند دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

از اجرای این برنامه‌ها، خدمات جانبی و تأثیرات برنامه‌های DR روی مشخصات و مسائل فنی شبکه، فناوری‌های لازم برای اجرای این برنامه‌ها و نیز نحوه مشارکت و انواع قراردادهای DR را مطالعه کرده‌اند.

مزایای اقتصادی برنامه‌های DR و توسعه روش‌های مختلف آن برای کاهش هزینه مشترکین در پژوهش‌های زیادی بررسی شده است [۷-۳]. بسیاری از این پژوهش‌ها روش‌های بهینه‌سازی برای بهره‌برداری اقتصادی از لوازم خانه‌های هوشمند با اجرای برنامه DR مبتنی بر قیمت را ارائه کرده‌اند. یکی دیگر از مزیت‌های مهم به‌کارگیری برنامه‌های DR، بهره‌مندی از خدمات جانبی آنهاست. با توجه به توسعه زیرساخت‌های ارتباطی هوشمند، برنامه‌های DR با ارائه خدمات جانبی مختلف، نقش به‌سزایی در بهبود کارایی شبکه‌های هوشمند آینده ایفا می‌کنند [۸]. همچنین، با توسعه روزافزون فناوری‌های منابع تولیدات تجدیدپذیر، پیش‌بینی می‌شود سطح نفوذ این منابع تولیدی در شبکه‌های برق آینده به مراتب بیش از امروز باشد. در چنین شرایطی که منابع دارای عدم قطعیت، حجم بالایی از تولید توان شبکه را برعهده می‌گیرند، بارهای پاسخگو نقش مهم‌تری در موازنه توان ایفا می‌کنند [۱]. این موضوع با توجه به محدودیت‌های ذخیره‌سازی انرژی و نیز بهره‌وری پایین و هزینه بالای ذخیره‌سازها اهمیت زیادی دارد؛ از این رو، پژوهش‌های زیادی درباره قابلیت بارهای پاسخگو به‌عنوان منابع ایجاد ظرفیت ذخیره سیستم انجام و گزارش شده‌اند [۹-۱۲]. در میان این پژوهش‌ها برخی نویسندگان تأثیر برنامه‌های DR در ارائه خدمات جانبی در ریزش‌بکه‌های مستقل را بررسی کرده‌اند که از منابع تجدیدپذیر مانند واحدهای بادی و خورشیدی برای تأمین توان بخش درخور توجهی از بار خود استفاده می‌کنند [۱۱-۱۲]. افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر به دلیل وجود خطا در پیش‌بینی توان تولیدی آنها، بر قابلیت اطمینان و بهره‌برداری ایمن ریزش‌بکه‌های مستقل به شدت تأثیر می‌گذارد [۱۲]. در این شرایط، اجرای برنامه‌های DR در برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره آنها نقش چشمگیری دارد؛ زیرا با مشارکت سمت تقاضا، بارهای پاسخگو در صورت کاهش (افزایش) تولید، مصرف خود را کاهش

(افزایش) می‌دهند؛ با این حال، تعیین دقیق میزان ذخیره چرخان و غیرچرخان لازم برای ایمنی ریزش‌بکه‌های مستقل در مواجهه با عدم قطعیت‌های ناشی از منابع تجدیدپذیر و بارهای پاسخگو اهمیت بسیار زیادی دارد [۱]. در مرجع [۱۳] یک سیستم مدیریت انرژی برای یک ریزش‌بکه در حالت جدا از شبکه پیشنهاد شده است که قادر به تخمین ذخیره چرخان سیستم تحت عدم قطعیت‌های ناشی از منابع تجدیدپذیر و تقاضای بارهاست؛ با این حال، در مدل ارائه‌شده تأثیر مشارکت بارهای پاسخگو در تخصیص ذخیره چرخان برای سیستم دیده نشده است. در [۱۴] نیز مدل احتمالاتی دیگری برای برنامه‌ریزی همزمان منابع انرژی و ذخیره یک ریزش‌بکه ارائه شده است. در این مرجع، عدم قطعیت‌های ناشی از تقاضای بار، توان تولیدی منابع تجدیدپذیر و نیز عدم قطعیت مربوط به قیمت بازار برق در نظر گرفته شده است؛ اما نقش مشارکت سمت تقاضا در تخصیص ذخیره چرخان سیستم نادیده گرفته شده است.

در سال‌های اخیر، بسیاری از نویسندگان به تأثیر برنامه‌های DR روی برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره در یک ریزش‌بکه تحت عدم قطعیت‌های منابع تولید تجدیدپذیر و بارها توجه کرده‌اند [۱۵-۱۸]. در [۱۵] یک مدل احتمالاتی برای برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره ریزش‌بکه با مشارکت DR مبتنی بر قیمت پیشنهاد شده است. براساس یافته‌های این مرجع، بارها با مشارکت در اختصاص ظرفیت ذخیره، عملکرد سیستم در مقابل عدم قطعیت‌ها را به طور رضایت‌بخشی بهبود می‌بخشند. در مدل این مرجع ریسک بهره‌برداری در مواجهه با عدم قطعیت‌ها که بر اختصاص ذخیره از منابع نقش مؤثری دارد، در نظر گرفته نشده است. در مرجع [۱۶] نیز اثر برنامه‌های DR در برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره یک ریزش‌بکه در بازار روز آینده بررسی شده است. در این مرجع نیز عدم قطعیت‌های بارها، منابع تجدیدپذیر و قیمت انرژی در یک مدل مبتنی بر سناریو در نظر گرفته شده است؛ اما ارزیابی ریسک روی برنامه‌ریزی منابع ذخیره سیستم انجام نشده است. نویسندگان نیز در کارهای قبلی خود مطالعاتی روی برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره یک ریزش‌بکه هوشمند

مسئله تعیین شده است که دقت بالایی برای ارزیابی محدودیت‌های سیستم دارد؛ بدین ترتیب، می‌توان نوآوری‌های این مقاله را به صورت زیر خلاصه کرد:

- ارائه مدلی برای برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره یک ریزشبه‌ک مستقر با در نظر گرفتن برنامه‌های DR مبتنی بر قیمت؛

- ارائه تحلیل حساسیت بر ذخیره چرخان و غیرچرخان اختصاص‌یافته با منابع مختلف ریزشبه‌ک مستقر تحت ریسک‌پذیری بهره‌بردار در دو حالت با و بدون مشارکت بارهای پاسخگو؛

- به‌کارگیری پخش بار بهینه AC برای ارزیابی دقیق‌تر میزان ظرفیت ذخیره مورد نیاز سیستم و نیز در نظر گرفتن CVaR برای مقابله با عدم قطعیت‌های سناریوهای مختلف بهره‌برداری سیستم.

ادامه مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش ۲، مسئله برنامه‌ریزی احتمالاتی پیشنهادی توضیح داده می‌شود. در بخش ۳، مسئله پیشنهادی فرمول بندی و در بخش ۴، روش حل مسئله بیان می‌شود. در بخش ۵، برنامه پیشنهادی در یک ریزشبه‌ک نمونه، اجرا و نتایج عددی به دست آمده تجزیه و تحلیل می‌شود. در نهایت، در بخش ۶ نتیجه‌گیری این مطالعه ارائه می‌شود.

۲- برنامه‌ریزی احتمالاتی دو مرحله‌ای

۲-۱- ظرفیت ذخیره در یک ریزشبه‌ک مستقل

بهره‌بردار ریزشبه‌ک مستقل همواره با عدم قطعیت‌های متعددی برای تولید توان و تأمین بار مشترکین در زمان واقعی مواجه است. توانایی سیستم در مواجهه با چنین عدم قطعیت‌هایی که پیشامدهای تصادفی نامیده می‌شوند، بدون از دست رفتن بار و با حفظ فرکانس و ولتاژ در محدوده مجاز، امنیت سیستم نامیده می‌شود [۱]. برای تضمین امنیت، ریزشبه‌ک باید به گونه‌ای برنامه‌ریزی شود تا در هر شرایطی تولید کافی وجود داشته باشد تا بتواند در مقابل پیشامدهای مختلف، عملکرد عادی خود را ادامه دهد. به قابلیت از سیستم قدرت که این امکان را فراهم می‌کند تا سیستم در مواجهه با یک رخداد بتواند در یک

در حالت مستقل از شبکه با مشارکت بارهای پاسخگو با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی احتمالاتی ارائه داده‌اند [۱۷-۱۸]. تمرکز اصلی دو مرجع اخیر روی بررسی امنیت و قابلیت اطمینان ریزشبه‌ک در مواجهه با عدم قطعیت‌های بهره‌برداری ناشی از پیش‌بینی میزان تولید و تقاضا بوده است؛ با این حال، در مراجع مذکور تأثیر برنامه‌های DR بر میزان ظرفیت ذخیره لازم سیستم در شرایط مختلف ریسک‌پذیری بهره‌بردار مطالعه نشده که با عدم قطعیت‌های شدیدی از ناحیه تولید و تقاضا مواجه است.

در این مقاله، برنامه احتمالاتی دو مرحله‌ای برای برنامه‌ریزی یک ریزشبه‌ک مستقل ارائه شده که هدف آن پیشینه‌کردن سود بهره‌بردار با برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره منابع تولیدی و بارهای پاسخگو در شرایط مختلف ریسک‌پذیری بهره‌بردار است. به بیان دیگر، در این مطالعه نشان داده می‌شود شرایط تصمیم‌گیری بهره‌بردار (یعنی تصمیم با ریسک‌پذیری و تصمیم بدون ریسک‌پذیری) به چه میزان روی برنامه‌ریزی واحدهای تولیدی برنامه‌ریزی شده و مشارکت آنها و بارهای پاسخگو در تأمین ظرفیت ذخیره ریزشبه‌ک تأثیرگذار است؛ بنابراین، علاوه بر در نظر گرفتن شاخصی برای تحلیل ریسک در مدل برنامه‌ریزی احتمالاتی پیشنهادی، در سناریوهای مختلف کاری ناشی از مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بهره‌بردار، از پخش بار بهینه AC استفاده شده است تا ارزیابی واقعی‌تری از عملکرد ریزشبه‌ک صورت گیرد. روش پیشنهادی این امکان را برای بهره‌بردار ریزشبه‌ک فراهم می‌کند تا ضمن کسب بیشترین منافع اقتصادی، از حاشیه امنیت ریزشبه‌ک تحت مدیریت خود تحت عدم قطعیت‌های مختلف بهره‌برداری اطمینان حاصل کنند. با به‌کارگیری شاخص CVaR در مدل پیشنهادی نیز امکان اتخاذ تصمیم مناسب از سوی بهره‌بردار برای اختصاص ظرفیت ذخیره بهینه در شرایط ریسک‌پذیری مختلف فراهم می‌شود. همچنین، با بررسی حالت با و بدون مشارکت بارهای پاسخگو، نقش مشارکت بارهای پاسخگو، به ویژه در تأمین ذخیره چرخان در شرایط مختلف ریسک‌پذیری بهره‌بردار ارزیابی شده است. میزان مشارکت منابع ذخیره سیستم نسبت به ضریب ریسک‌پذیری با به‌کارگیری روش AC-OPF در روند حل

تجدیدپذیر و بارهای پاسخگو سبب می‌شود مسئله برنامه‌ریزی به مسئله‌ای احتمالاتی با داده‌های غیرقطعی تبدیل شود. منابع با عدم قطعیت در این مقاله شامل منابع تولید تجدیدپذیر بادی و خورشیدی و نیز تقاضای بار مصرف‌کنندگان است. در مسئله پیشنهادی فرض شده است بهره‌بردار ریزش‌بکه فقط مسئول برنامه‌ریزی ریزش‌بکه باشد و مالک هیچ‌کدام از واحدهای تولیدی نباشد. همچنین، با توجه به اینکه دقت اطلاعات در مراحل و دوره‌های مختلف تصمیم‌گیری متفاوت است، برنامه‌ریزی در طی دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله نخست، تصمیمات قبل از فرایندهای احتمالاتی و براساس مقادیر پیش‌بینی‌شده منابع دارای عدم قطعیت اتخاذ می‌شود. اتخاذ چنین تصمیماتی به هیچ سناریو خاصی وابسته نیست و اصطلاحاً به صورت اینجا و اکنون^۵ (H&N) برنامه‌ریزی می‌شوند. متغیرهای این مرحله شامل میزان تولید واحدها، وضعیت در مدار بودن واحدها، میزان مصرف بارها و میزان ذخیره چرخان و غیرچرخان سیستم‌اند که یک روز قبل و براساس پیش‌بینی میزان تولید و مصرف برنامه‌ریزی می‌شوند. تصمیمات اتخاذشده در مرحله اول، وارد مرحله دوم می‌شوند که بهره‌برداری بلادرنگ ریزش‌بکه را نمایش می‌دهند. متغیرهای تصمیم مرحله دوم که عملکرد سیستم در سناریوهای کاری مختلف را نمایش می‌دهند به تصمیمات منتظرباش و ببین^۷ (W&S) موسوم‌اند. این متغیرها شامل میزان تولید توان هر واحد، وضعیت در مدار بودن هر واحد، میزان مصرف بارها و پاسخگویی آنها به برنامه‌های مختلف و نیز میزان ذخیره تأمین‌شده با واحدها یا مشارکت بارهای پاسخگو در هر کدام از سناریو هستند. در این مرحله برای تمام سناریوهای کاهش‌یافته مانند مرحله اول، ارزیابی‌های فنی و اقتصادی انجام می‌گیرد. گفتنی است در مدل پیشنهادی از روش پخش بار AC برای ارزیابی فنی و تعیین محدودیت‌های سیستم مانند شارش توان اکتیو و راکتیو در خطوط استفاده می‌شود تا خروجی برنامه دقت بیشتری داشته باشد.

بازه زمانی مشخصی حول نقطه کار خود پاسخ دهد، ذخیره گفته می‌شود [۱]. در سیستم‌های قدرت، ظرفیت ذخیره به دو صورت ذخیره چرخان و ذخیره غیرچرخان در نظر گرفته می‌شود. ذخیره چرخان به دو صورت ذخیره چرخان بالارونده^۳ و ذخیره چرخان پایین‌رونده^۴ است و مربوط به واحدهایی می‌شود که به صورت سنکرون با شبکه در حال کارند. همچنین، قطعی بار داوطلبانه را می‌توان نوعی ذخیره چرخان تلقی کرد؛ اما ذخیره غیرچرخان مربوط به واحدهای غیرسنکرون است که قادرند سریعاً وارد مدار شوند و قابلیت تأمین بار در یک دوره زمانی خاص را داشته باشند.

در یک ریزش‌بکه مستقل، واحدهای تولیدی قابل برنامه‌ریزی مانند میکروتوربین‌ها، دیزل ژنراتورها و ... قادرند ذخیره چرخان و غیرچرخان سیستم را تأمین کنند؛ اما بارهای پاسخگو فقط قادرند ذخیره چرخان اختصاص دهند. ذخیره چرخان بالارونده در واحدهای تولیدی از تفاضل ظرفیت نصب‌شده واحدهای تولیدی و توان برنامه‌ریزی‌شده به دست می‌آید؛ اما در بارهای پاسخگو تفاضل بار برنامه‌ریزی‌شده و کمترین باری که مشترک می‌تواند داشته باشد، میزان ذخیره بالارونده را تعیین می‌کند [۱]. به بیان دیگر، برای تأمین ذخیره بالارونده، واحدهای تولیدی باید قادر به افزایش تولید و بارهای پاسخگو باید قادر به کاهش مصرف خود باشند. درباره ذخیره پایین‌رونده نیز واحدهای تولیدی باید قادر به افزایش تولید و بارهای پاسخگو باید قادر به کاهش مصرف خود باشند [۱۷].

۲-۲- مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره یک روز آینده ریزش‌بکه مستقل با در نظر گرفتن مشارکت بارها در برنامه پاسخگویی بار مبتنی بر زمان استفاده (TOU) ارائه شده است. شماتیک ساده‌ای از مدل پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. در این مطالعه، ریزش‌بکه شامل چندین گروه بار، منابع تجدیدپذیر و واحدهای تولیدی قابل برنامه‌ریزی شامل میکروتوربین، پیل سوختی و ... است. وجود عدم قطعیت‌های منابع

با استفاده از بسط تیلور تابع درآمد مشترک تا مرتبه دوم به صورت زیر نوشته می شود:

$$B(D_{j,t}^{DR}) = B^{Int}(D_{j,t}^{DR}) + \frac{\partial B(D_{j,t}^{DR})}{\partial D_{j,t}^{DR}} \cdot \Delta D_{j,t}^{DR} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 B(D_{j,t}^{DR})}{(\partial D_{j,t}^{DR})^2} \cdot (\Delta D_{j,t}^{DR})^2 \quad (4)$$

در شرایط اولیه تابع سود مشترک برابر است با:

$$S^{Int}(D_{j,t}^{DR}) = B^{Int}(D_{j,t}^{DR}) - D_{j,t}^{DR} \cdot \rho_{j,t}^{Int} \quad (5)$$

که S^{Int} ، B^{Int} و $\rho_{j,t}^{Int}$ به ترتیب بیان کننده سود مشترک، درآمد مشترک و قیمت برق قبل از اجرای برنامه DR هستند. با مشتق گیری از رابطه (۵)، سود بیشینه مشترک به صورت زیر به دست می آید [۱]:

$$\frac{\partial S_0(D_{j,t}^{DR})}{\partial D_{j,t}^{DR}} = 0 \Rightarrow \frac{\partial B(D_{j,t}^{DR})}{\partial D_{j,t}^{DR}} = \rho_{j,t}^0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 B(D_{j,t}^{DR})}{(\partial D_{j,t}^{DR})^2} = \frac{\partial \rho_{j,t}}{\partial D_{j,t}^{DR}} = \frac{1}{E_{t,t}^j \cdot D_{j,t}} \rho_{j,t}^0 \quad (7)$$

پس از جایگذاری و ساده سازی روابط بالا رابطه زیر به دست می آید:

$$B(D_{j,t}^{DR}) = B_{j,t}^{Int} + \rho_{j,t}^{Int} [D_{j,t}^{DR} - D_{j,t}] \times \left[1 + \frac{D_{j,t}^{DR} - D_{j,t}}{2E_{t,t}^j \cdot D_{j,t}} \right] \quad (8)$$

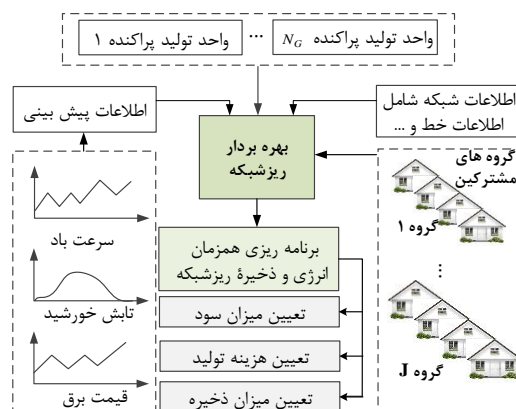
در نهایت، با مشتق گیری از تابع درآمد رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{\partial B(D_{j,t}^{CDR})}{\partial D_{j,t}^{CDR}} = \rho_{j,t}^0 \cdot \left[1 + \frac{D_{j,t}^{CDR} - D_{j,t}}{E_{t,t}^j \cdot D_{j,t}} \right] \quad (9)$$

با جایگذاری سمت راست رابطه بالا از رابطه (۳) به دست می آید:

$$\rho_{j,t} = \rho_{j,t}^0 \cdot \left[1 + \frac{D_{j,t}^{CDR} - D_{j,t}}{E_{t,t}^j \cdot D_{j,t}} \right] \quad (10)$$

علاوه بر بارهای قطع پذیر، بارهای شیفیت پذیر نیز در برنامه پاسخگویی بار مشارکت می کنند که تقاضای آنها از رابطه (۱۱) به دست می آید [۱].



شکل (۱): شماتیک کلی مدل مورد مطالعه [۱]

۳- فرمول بندی مسئله پیشنهادی

۳-۱- مدل بارهای پاسخگو

با مشارکت در برنامه DR، میزان بار مشترکین گروه j در زمان t به دلیل تغییر قیمت برق از $D_{j,t}$ به $D_{j,t}^{DR}$ تغییر می کند؛ به طوری که می توان نوشت [۱]:

$$D_{j,t}^{DR} = D_{j,t} + \Delta D_{j,t}^{DR} \quad (1)$$

که $\Delta D_{j,t}^{DR}$ میزان تغییر الگوی مصرف مشترک نسبت به حالت بدون DR است. به دلیل تغییر الگوی مصرف، سودی عاید مشترک می شود که از دید مشترک باید بیشینه شود. گفتنی است مشترکین با دو گزینه قطع بار و شیفت بار در برنامه پاسخگویی بار شرکت می کنند که برای مدل سازی آنها در این مقاله به ترتیب از مدل تک دوره ای و چند دوره ای و مفاهیم کشش تقاضای خودی و متقابل استفاده شده است [۱]. براساس این، میزان سود مشترک در ازای تنها مشارکت بارهای قطع پذیر در برنامه DR برابر است با [۱]:

$$S(D_{j,t}^{DR}) = B(D_{j,t}^{DR}) - D_{j,t}^{DR} \cdot \rho_{j,t} \quad (2)$$

$S(D_{j,t}^{DR})$ سود مشترک، $B(D_{j,t}^{DR})$ ارزش برق از دید مشترک و $D_{j,t}^{DR} \cdot \rho_{j,t}$ (توان مصرفی بارهای قطع پذیر ضرب در قیمت لحظه ای) هزینه برق مشترک است. برای بیشینه شدن سود مشتری باید مشتق تابع سود نسبت به بار برابر صفر شود؛ بنابراین، می توان نوشت:

$$\frac{\partial S(D_{j,t}^{DR})}{\partial D_{j,t}^{DR}} = 0 \Rightarrow \frac{\partial B(D_{j,t}^{DR})}{\partial D_{j,t}^{DR}} = \rho_{j,t} \quad (3)$$

ارائه مدل احتمالاتی دو مرحله‌ای مقید به ریسک برای برنامه‌ریزی ریزشکه‌های هوشمند مستقل با ...

که v_r ، v_{in} و v_{out} به ترتیب سرعت نامی، سرعت حد پایین و سرعت حد بالای توربین بادی‌اند. P_w^r نیز توان نامی توربین بادی است. پارامترهای a و b نیز از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شوند.

$$a = \frac{v_{in}^3}{v_{in}^3 - v_r^3}; \quad b = \frac{1}{v_r^3 - v_{in}^3} \quad (16)$$

با استفاده از توزیع‌های ارائه‌شده برای هر پارامتر تصادفی و با استفاده از روش مونت کارلو، ۱۰۰۰ سناریو برای هر کدام از پارامترها تولید شده و سپس باهم به صورت درخت سناریو ترکیب شده‌اند؛ مانند آنچه در مرجع [۱] شرح داده شده است؛ در نتیجه، 10^{12} سناریو تولید شده که پردازش این حجم سناریو عملاً بسیار زمان بر است و برای برنامه‌ریزی مناسب نیست. از این رو، با استفاده از روش کاهش سناریو به ۱۰۰ سناریو کاهش داده شده است تا حجم محاسباتی برنامه به‌طور درخور قبولی کاهش یابد.

۳-۳-۳ تابع هدف

تابع هدف شامل بیشینه‌کردن سود بهره بردار ریزشکه جزیره‌ای شامل سود در مرحله اینجا و اکنون ($P^{H\&N}$)، سود مورد انتظار در مرحله منتظرمان و بیسن ($EP^{W\&S}$) و نیز مؤلفه $CVaR^A$ به‌عنوان ابزار سنجش مقدار شرطی در ریسک است که به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Max[P^{H\&N} + EP^{W\&S} + \beta CVaR] \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، $P^{H\&N} = \psi_1 - \psi_2 - \psi_3$ ، بیان‌کننده سود بهره‌بردار در مرحله اول برنامه‌ریزی است که در آن توابع ψ_1 تا ψ_3 از روابط (۱۸) تا (۲۰) به دست می‌آیند.

$$\psi_1 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_j} \rho_{j,t} \cdot D_{j,t} \quad (18)$$

$$\psi_2 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} \left[\begin{aligned} & (A_i u_{i,t} + B_i P_{i,t}) \\ & + SUC_i \cdot y_{i,t} + SDC_i \cdot z_{i,t} \\ & + C_{i,t}^{R^D} \cdot R_{i,t}^D + C_{i,t}^{R^U} \cdot R_{i,t}^U + C_{i,t}^{R^{NS}} \cdot R_{i,t}^{NS} \end{aligned} \right] \quad (19)$$

$$\psi_3 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_j} (C_{j,t}^{R^D} \cdot R_{j,t}^D + C_{j,t}^{R^U} \cdot R_{j,t}^U) \quad (20)$$

$$D_{j,t}^{DR} = D_{j,t} \cdot \left[1 + \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq h}}^{N_T} E_{t,h}^j \cdot \frac{\rho_{j,h} - \rho_{j,h}^0}{\rho_{j,h}^0} \right] \quad (11)$$

اگر بارها با هر دوی قطع و شیفت بار در برنامه پاسخگویی بار شرکت کنند و میزان مشارکت مشترکین گروه Z در برنامه DR با η_j نمایش داده شود، می‌توان نوشت [۱]:

$$D_{j,t}^{DR} = (1 - \eta_j) D_{j,t} + \eta_j D_{j,t} \cdot \left[1 + \sum_{t=1}^{N_T} E_{t,h}^j \cdot \frac{\rho_{j,h} - \rho_{j,h}^0}{\rho_{j,h}^0} \right] \quad (12)$$

۳-۲-۲ مدل منابع عدم قطعیت

قیمت انرژی الکتریکی و میزان تقاضای بار همواره با عدم قطعیت و خطا در پیش‌بینی مواجه‌اند. همچنین، تولید توان بادی و خورشیدی که به ترتیب تابعی از سرعت باد و تابش خورشیدند، به دلیل تغییرات جوی عدم قطعیت دارند. در این مقاله، برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار، قیمت و توان خورشیدی از تابع توزیع نرمال استفاده شده است [۱]:

برای مثال، برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های تقاضای بار از تابع توزیع نرمال (۱۳) استفاده شده است [۱].

$$F_N(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-(D-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (13)$$

که D ، μ و σ به ترتیب بیان‌کننده میزان تقاضا، میانگین و انحراف معیار بارند. مقادیر این پارامترها با داده‌های آماری و اطلاعات پیش‌بینی بار مشترکین ریزشکه به دست می‌آیند [۱]. همچنین، برای مدل‌کردن ماهیت تصادفی باد و در نتیجه تولید توان بادی از تابع چگالی احتمال وایبل^۷ استفاده شده است؛ براساس این، تابع سرعت باد به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود [۱۹]:

$$PDF(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (14)$$

که c و k به ترتیب سرعت باد، ضریب شکل و ضریب مقیاس‌اند. توان خروجی توربین نیز از رابطه (۱۵) به دست می‌آید [۱۳]:

$$P_w(v) = P_w^r \cdot \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{in} \quad \text{and} \quad v \geq v_{out} \\ a + bv^3 & v_{in} \leq v \leq v_r \\ 1 & v_r \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (15)$$

۳-۴- محدودیت‌های تصمیمات H&N

محدودیت‌های بخش H&N شامل قیدهای اعمال‌شده در مرحله اول برنامه‌ریزی است که در آن سناریوهای سیستم در نظر گرفته نمی‌شوند. این محدودیت‌ها شامل موارد زیر است: روابط پخش توان اکتیو و راکتیو: در هر زمان میزان توان اکتیو و راکتیو تولیدی باید با مقدار توان اکتیو و راکتیو مصرفی برابر باشد؛ بنابراین، روابط حاکم بر توان اکتیو و راکتیو در شین b به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$P_{i,t}^b + P_{w,t}^b + P_{v,t}^b - D_{j,t}^b = \sum_{r:(b,r) \in \Lambda(t)} f_{n,r,t}^p \quad (25)$$

$$Q_{i,t}^b + Q_{w,t}^b + Q_{v,t}^b - Q_{j,t}^b = \sum_{r:(b,r) \in \Lambda(t)} f_{n,r,t}^q \quad (26)$$

که $f_{n,r,t}^p$ و $f_{n,r,t}^q$ به ترتیب بیان‌کننده شارش توان اکتیو و راکتیو از شین b به شین r در زمان t هستند و از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$f_{n,r,t}^p = G_{n,r}[V_{n,t}^2 - V_{r,t}V_{r,t} \cos(\delta_{n,t} - \delta_{r,t})] - B_{n,r}V_{n,t}V_{r,t} \sin(\delta_{n,t} - \delta_{r,t}) \quad (27)$$

$$f_{n,r,t}^q = -B_{n,r}[V_{n,t}^2 - V_{n,t}V_{r,t} \cos(\delta_{n,t} - \delta_{r,t})] - G_{n,r}V_{n,t}V_{r,t} \sin(\delta_{n,t} - \delta_{r,t}) \quad (28)$$

محدودیت‌های توان تولیدی واحدها: توان تولیدی هر واحد نباید از بیشینه توان آن واحد منهای ذخیره بالارونده اختصاص داده شده از آن واحد بیشتر باشد. همچنین، این توان نباید از مجموع کمینه توان تولیدی واحد و ذخیره پایین‌رونده کمتر باشد؛ در نتیجه می‌توان نوشت:

$$P_{i,t} \leq (P_i^{\max} u_{i,t} - R_{i,t}^U) \quad (29)$$

$$P_{i,t} \geq (P_i^{\min} u_{i,t} + R_{i,t}^D) \quad (30)$$

محدودیت‌های مربوط به ظرفیت ذخیره چرخان و غیرچرخان برنامه‌ریزی‌شده واحدهای تولیدی قابل برنامه‌ریزی: در صورتی که واحد روشن باشد، به آن ظرفیت ذخیره چرخان اختصاص داده می‌شود و اگر خاموش باشد برای تأمین ذخیره غیرچرخان برنامه‌ریزی می‌شود. در روابط زیر محدودیت‌های ذخیره واحدها بیان شده است که در آنها $u_{i,t} = 1$ نشان می‌دهد واحد i در زمان t روشن است.

در روابط بالا، ψ_1 بیان‌کننده درآمد ناشی از مصرف برق مشترکین، ψ_2 بیان‌کننده هزینه تولید واحدهای برنامه‌ریزی‌شده، هزینه روشن و خاموش شدن آنها، هزینه ظرفیت ذخیره اختصاص داده شده از آنها و بارهای پاسخگو و ψ_3 نشان دهنده هزینه ظرفیت ذخیره اختصاص داده شده بارهای پاسخگو است. همچنین، $EP^{W\&S}$ بیان‌کننده سود مورد انتظار بهره‌بردار در سناریوهای کاری سیستم است که از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود:

$$EP^{W\&S} = \sum_{s=1}^{N_s} \rho_s (-F_{S,1} - F_{S,2}) \quad (21)$$

که در آن:

$$F_{S,1} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} \rho_{i,t}^{Dep} \cdot (r_{i,t,s}^U + r_{i,t,s}^{NS} - r_{i,t,s}^D) + \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_J} \rho_{j,t}^{Dep} \cdot (r_{j,t,s}^U - r_{j,t,s}^D) \quad (22)$$

$$F_{S,2} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_J} VOLL_{j,t,s} \quad (23)$$

در روابط بالا، $F_{S,1}$ بیان‌کننده هزینه ذخیره تأمین شده با واحدهای تولیدی و بارهای پاسخگو است. $F_{S,2}$ نیز هزینه متناظر با انرژی مورد انتظار تأمین نشده بارهای غیرپاسخگو است. در مدل پیشنهادی، برای تأمین امنیت ریزش‌بکه، بهره‌بردار می‌تواند مقداری از بارهای غیربحرانی را قطعی اجباری دهد که البته هزینه زیادی باید برای این نوع قطعی پرداخت کند که با ارزش بار از دست رفته^۹ (VOLL) موسوم است. همچنین، $LS_{j,t,s}$ قطع بار اجباری گروه مشترکین زدر دوره t و سناریوی s است که مقدار آن در برنامه بهینه‌سازی به دست می‌آید. مؤلفه CVaR نیز که برای برقراری مصالحه بین سود بهره‌بردار و ریسک تصمیم‌گیری او به رابطه (۱۷) افزوده می‌شود، از رابطه (۲۴) به دست می‌آید:

$$CVaR = (\xi - \frac{1}{1-\alpha} \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s \eta_s) \quad (24)$$

۳-۵- محدودیت‌های تصمیمات W&S

محدودیت‌های تصمیمات W&S شامل قیدهای سیستم در شرایط بهره برداری در زمان واقعی اند که باید در تمام سناریوهای کاری سیستم برقرار باشند. محدودیت‌های تعادل توان اکتیو و راکتیو در هر سناریو به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$P_{i,t,s}^b + P_{w,t,s}^b + P_{v,t,s}^b - D_{j,t,s}^b + LS_{j,t,s}^b = \sum_{r:(b,r) \in \Lambda(t)} f_{n,r,t,s}^p \quad (۴۲)$$

$$Q_{i,t,s}^b + Q_{w,t,s}^b + Q_{v,t,s}^b - Q_{j,t,s}^b - QS_{j,t,s}^b = \sum_{r:(b,r) \in \Lambda(t)} f_{n,r,t,s}^q \quad (۴۳)$$

که $f_{n,r,t,s}^p$ و $f_{n,r,t,s}^q$ به ترتیب شارش توان اکتیو و راکتیو از شین b به شین r در زمان t و سناریو s هستند که مشابه روابط (۲۷) و (۲۸) برای هر سناریو محاسبه می‌شوند.

برای تحقق محدودیت توان راکتیو، علاوه بر قید اندازه ولتاژ، محدودیت شارش توان در خطوط باید برآورده شود. محدودیت تولید توان راکتیو واحدهای مختلف نیز باید در نظر گرفته شود؛ بنابراین، برای تحقق این سه محدودیت، قیدهای زیر به مسئله اعمال می‌شوند:

$$V_n^{\min} \leq V_{n,t,s} \leq V_n^{\max} \quad (۴۴)$$

$$\sqrt{(f_{n,r,t,s}^p)^2 + (f_{n,r,t,s}^q)^2} \leq f_{n,r}^{\max} \quad (۴۵)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_{i,t,s} \leq Q_i^{\max} \quad (۴۶)$$

برای مدل سازی واقعی تر در این مقاله، بارهای اکتیو و راکتیو وابسته به فرکانس و ولتاژ در نظر گرفته شده اند؛ زیرا در عمل انحراف ولتاژ و فرکانس از مقدار نامی باعث تغییر توان اکتیو و راکتیو می‌شود. روابط (۴۷) و (۴۸) به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو مشترکین گروه z در دوره t و سناریو s را با تغییرات ولتاژ و فرکانس نشان می‌دهند [۱].

$$D_{j,t,s} = \bar{D}_{j,t} \cdot (1 + k_{pj} \Delta f_{t,s}) \cdot [p_{pj} + p_{ej} \left(\frac{V_n}{V_n^*}\right) + p_{zj} \left(\frac{V_n}{V_n^*}\right)^2] \quad (۴۷)$$

$$Q_{j,t,s} = \bar{Q}_{j,t} \cdot (1 + k_{qj} \Delta f_{t,s}) \cdot [q_{pj} + q_{ej} \left(\frac{V_n}{V_n^*}\right) + q_{zj} \left(\frac{V_n}{V_n^*}\right)^2] \quad (۴۸)$$

$$\Delta f_{t,s} = f_{t,s} - f^{ref} \quad (۴۹)$$

$$0 \leq R_{i,t}^U \leq R_{i,t}^{U,\max} u_{i,t} \quad (۳۱)$$

$$0 \leq R_{i,t}^D \leq R_{i,t}^{D,\max} u_{i,t} \quad (۳۲)$$

$$0 \leq R_{i,t}^{NS} \leq R_{i,t}^{NS,\max} (1 - u_{i,t}) \quad (۳۳)$$

ظرفیت ذخیره بالارونده و پایین‌رونده بارهای پاسخگو نیز با روابط زیر محدود می‌شود:

$$0 \leq R_{j,t}^U \leq (D_{j,t} - D_{j,t}^{\min}) \quad (۳۴)$$

$$0 \leq R_{j,t}^D \leq (D_{j,t}^{\max} - D_{j,t}) \quad (۳۵)$$

محدودیت‌های مربوط به روشن و خاموش شدن واحدهای تولیدی قابل برنامه ریزی: یک واحد تولیدی در یک ساعت، همزمان روشن و خاموش نمی‌شود. روابط (۳۶) و (۳۷) این محدودیت‌ها را اعمال می‌کنند.

$$y_{i,t} - z_{i,t} = u_{i,t} - u_{i,t-1} \quad (۳۶)$$

$$y_{i,t} + z_{i,t} - 1 \leq 0 \quad (۳۷)$$

قیدهای مربوط به هزینه راه‌اندازی واحدها: هزینه راه‌اندازی فقط در هر دوره که واحد روشن می‌شود، به آن تعلق می‌گیرد و به واحدهای تولیدی غیرتجدیدپذیر مربوط است (برای واحدهای تجدیدپذیر هزینه راه‌اندازی در نظر گرفته نشده است). روابط (۳۸) و (۳۹) قیدهای مربوط به هزینه راه‌اندازی هر واحد را نشان می‌دهند.

$$SUC_{i,t} \geq \lambda_{i,t}^{SU} (u_{i,t} - u_{i,t-1}) \quad (۳۸)$$

$$SUC_{i,t} \geq 0 \quad (۳۹)$$

محدودیت‌های تولید توان تجدیدپذیر: واحدهای تجدیدپذیر بادی و خورشیدی نیز در محدوده معینی قادر به تأمین توان اند. در واقع، میزان تولید واحدهای بادی و خورشیدی از بیشینه توانی که از نظر فنی از آنها به‌دست‌آوردنی است، بیشتر نیستند.

$$0 \leq P_{w,t} \leq P_w^{\max} \quad (۴۰)$$

$$0 \leq P_{v,t} \leq P_v^{\max} \quad (۴۱)$$

$$P_{i,t,s} \leq P_i^{\max} u_{j,t,s} - R_{i,t}^U \quad (53)$$

$$0 \leq r_{i,t,s}^U \leq R_{i,t}^U \quad (54)$$

$$0 \leq r_{i,t,s}^D \leq R_{i,t}^D \quad (55)$$

$$0 \leq r_{i,t,s}^{NS} \leq R_{i,t}^{NS} \quad (56)$$

درنهایت، میزان ذخیره چرخان تأمین بالارونده و پایین‌رونده بارهای پاسنگو نیز در هر سناریو با محدودیت‌های زیر مواجه‌اند:

$$0 \leq r_{j,t,s}^U \leq R_{j,t}^U \quad (57)$$

$$0 \leq r_{j,t,s}^D \leq R_{j,t}^D \quad (58)$$

گفتنی است برای تأمین ذخیره بالارونده، لازم است مشترکین مصرف خود را کاهش دهند و برعکس، برای تأمین ذخیره پایین‌رونده باید مصرف خود را افزایش دهند.

۳-۶- خطی‌سازی روابط برای به کارگیری در مدل MILP

از آنجایی که برخی از روابط و محدودیت‌های پخش توان بهینه AC - که در بخش‌های قبل بیان شد - غیرخطی‌اند، لازم است به‌طور مناسبی برای به کارگیری در مدل MILP خطی‌سازی شوند. در بسیاری از مطالعات، برای خطی‌سازی روابط غیرخطی از تقریب‌های ارائه‌شده در جدول (۱) استفاده شده است [۱] و [۱۹].

جدول (۱): تقریب‌های خطی‌سازی برخی از عوامل غیرخطی و میزان خطای تقریب آنها [۱] و [۱۹].

عامل غیرخطی	تقریب خطی	بیشینه خطای تقریب
V_n^2	$2V_n - 1$	۰/۰۰۲۵
$V_n \cdot V_r \cdot \cos \theta_{n,r}$	$V_n + V_r + \cos \theta_{n,r} - 2$	۰/۰۲۵۳
$V_n \cdot V_r \cdot \sin \theta_{n,r}$	$\sin \theta_{n,r}$	۰/۰۶۵۹
$\cos \theta_{n,r}$	$\theta_{n,r}$	۰/۲۳۴۰
$\sin \theta_{n,r}$	۱	۰/۰۵۵۳

مشاهده می‌شود، خطای ایجادشده از تقریب $\theta_{n,r}$ به عنوان

که $\bar{Q}_{j,t}$ و $\bar{D}_{j,t}$ به ترتیب بیان‌کننده توان‌های اکتیو و راکتیو مشترکین در حالتی است که فرکانس و ولتاژ مقدار نامی خود را دارند.

چنانچه پیش‌تر اشاره شد، ممکن است در برخی از سناریوها بهره‌بردار ناگزیر به قطع بار اجباری مشترکین شود. در چنین شرایطی، میزان بار اکتیو و راکتیوی که به اجبار، قطع و از مدار خارج می‌شود، باید از محدودیت‌های زیر پیروی کند.

$$0 \leq LS_{j,t,s} \leq D_{j,t} \quad (50)$$

$$QS_{j,t,s} = \cos \theta \cdot LS_{j,t,s} \quad (51)$$

رابطه (۵۰) بیان می‌کند قطع بار اجباری در هر دوره و هر سناریو بیشتر از بار مشترکین در آن دوره نیست. بدترین شرایط، کل بار مشترکین می‌تواند قطع شود؛ اما با توجه به هزینه زیادی که قطع بار اجباری تحمیل می‌کند، این مقدار همواره در حالت بهینه‌ای قرار خواهد داشت. همچنین، رابطه (۵۱) بیان می‌کند با قطع بار اجباری (قطع توان اکتیو بار)، بخش توان راکتیو آن بار نیز عملاً از مدار خارج می‌شود.

همچنین، میزان توان اکتیو تولیدی واحد‌های قابل برنامه‌ریزی و نیز میزان ذخیره تأمین شده آنها (شامل ذخیره تأمین شده بالارونده، پایین‌رونده و غیرچرخان) در هر سناریو از محدودیت‌های زیر پیروی می‌کنند.

$$P_{i,t,s} \geq P_i^{\min} u_{j,t,s} + R_{i,t}^D \quad (52)$$

در تقریب‌های جدول (۱)، ولتاژها بر حسب پریونیت در نظر گرفته شده‌اند. عملکرد سیستم نیز در حالتی است که

$|V| < 1/05$ و $0/95 < \theta_{n,r} < 0/05$ باشد. همان‌طور که

روی آن انجام می‌شود. اگر در زیرمسئله پاسخ عملی و پذیرفتنی حاصل نشود (برای مثال یک یا چند قید محقق نشود)، مجدداً حل‌کننده به مسئله اصلی بازمی‌گردد و به اصطلاح یک برش به مسئله اصلی داده می‌شود. در چنین شرایطی مسئله اصلی برای تحقق پاسخ فیزیکی و پذیرفتنی در زیرمسئله‌ها مجدداً حل می‌شود. تصمیمات اتخاذ شده در مرحله اول وارد مرحله دوم می‌شوند که بهره‌برداری ریزشک را نمایش می‌دهند. متغیرهای تصمیم مرحله دوم که عملکرد سیستم در سناریوهای کاری مختلف را نمایش می‌دهند، شامل میزان تولید توان واقعی هر واحد، وضعیت در مدار بودن واحدها، میزان مصرف بارها و پاسخگویی آنها به برنامه‌های مختلف و نیز میزان ذخیره تأمین شده با واحدها یا مشارکت بارهای پاسخگو در هر کدام از سناریو هستند. در این مرحله نیز همان طور که مشاهده می‌شود، برای تمام سناریوهای کاهش یافته مانند مرحله اول، ارزیابی‌های فنی و اقتصادی انجام می‌گیرد.

جایگزین $\cos \theta_{n,r}$ ، بسیار زیاد است. در این مطالعه برای دقت بیشتر ترم $\cos(\delta_{n,t,s} - \delta_{r,t,s})$ به صورت رابطه زیر تقریب زده شده است که خطای بسیار کمتری دارد [۱].

$$\omega_{n,r,t,s} = d_{n,r,t,s,m} \cdot (\delta_{n,t,s} - \delta_{r,t,s}) + e_{n,r,t,s,m} \quad (59)$$

در رابطه بالا $\omega_{n,r,t,s}$ بیان‌کننده تقریب خطی $\cos(\delta_{n,t,s} - \delta_{r,t,s})$ است. همچنین، $d_{n,r,t,s,m}$ و $e_{n,r,t,s,m}$ ثابت‌هایی اند که با استفاده از نقاط تلاقی $\omega_{n,r,t,s}$ و $\cos(\delta_{n,t,s} - \delta_{r,t,s})$ انتخاب می‌شوند. با استفاده از تقریب‌های جدول (۱) و رابطه (۵۹)، روابط غیرخطی، خطی‌سازی و با استفاده از روش‌های خطی MILP حل می‌شوند؛ برای نمونه، با استفاده از تقریب‌های مذکور، توان اکتیو و راکتیو شارش‌یافته از شین n به شین r در زمان t و سناریوی s به صورت زیر خطی می‌شوند.

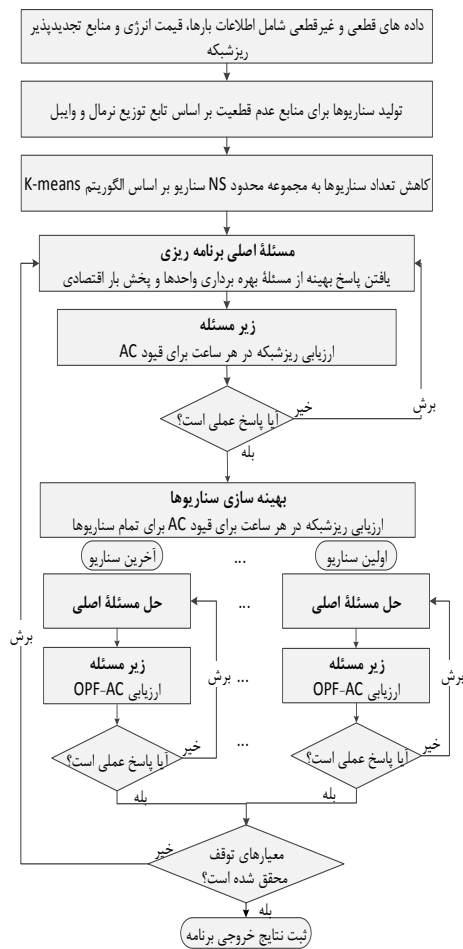
$$f_{n,r,t,s}^P = G_{n,r} (V_{n,t,s} - V_{r,t,s} - \omega_{n,r,t,s} + 1) - B_{n,r} (\delta_{n,t,s} - \delta_{r,t,s}) \quad (60)$$

$$f_{n,r,t,s}^Q = -B_{n,r} (V_{n,t,s} - V_{r,t,s} + \omega_{n,r,t,s} + 1) - G_{n,r} (\delta_{n,t,s} - \delta_{r,t,s}) \quad (61)$$

۴- روش حل مسئله پیشنهادی

چنانچه قبلاً اشاره شد، ساختار کلی برنامه پیشنهادی شامل دو مرحله است که روش حل آن در شکل (۲) نشان داده شده است. در مرحله اول برنامه، انرژی و ذخیره به طور همزمان برای برقراری تعادل توان در سیستم برنامه ریزی می‌شوند. متغیرهای این مرحله که به هیچ سناریوی خاصی وابسته نیستند، شامل میزان تولید واحدها، وضعیت در مدار بودن واحدها، میزان مصرف بارها و میزان ذخیره چرخان و غیرچرخان سیستم اند که یک روز قبل و براساس پیش‌بینی میزان تولید و مصرف برنامه‌ریزی می‌شوند.

همان طور که از فلوچارت روش حل مسئله مشاهده می‌شود، برنامه مرحله اول شامل یک مسئله پیش‌رو و یک زیرمسئله است. در مسئله پیش‌رو نحوه به مدار آمدن واحدهای قابل برنامه‌ریزی (مانند میکروتوربین‌ها) و بهره‌برداری اقتصادی سیستم مطرح است. در زیرمسئله نیز با استفاده از AC-OPF ارزیابی فنی برای تحقق قیدهای شبکه



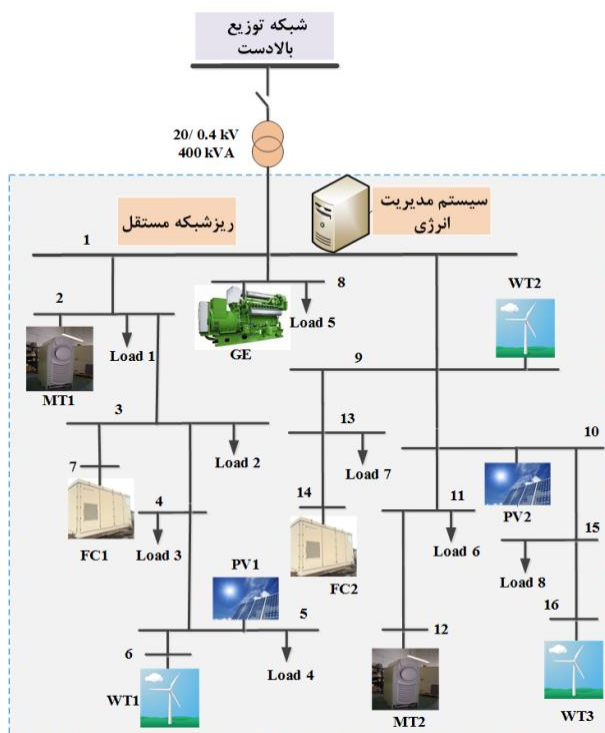
شکل (۲): ساختار کلی روش حل برنامه پیشنهادی

۵- سیستم مورد مطالعه و نتایج شبیه‌سازی

۵-۱- سیستم مورد مطالعه

افق برنامه‌ریزی ۲۴ ساعت یک شبانه‌روز با دوره‌های یک ساعته در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مربوط به منابع تجدیدپذیر و بارهای پاسخگو، ابتدا با به کارگیری تابع چگالی احتمال واپس برای سرعت باد و تابع چگالی احتمال نرمال برای تابش خورشید، قیمت برق و تقاضای بار برای هر پارامتر ۱۰۰۰ سناریو تولید شده است. سپس برای کاهش تعداد سناریوها به تعداد محدودی سناریو که بتوانند به طور مؤثری عدم قطعیت‌ها را مدل کنند، از الگوریتم K-means استفاده شده است. گفتنی است در روش K-means که ساختار آن در [۲۰] بیان شده است، سناریوهای مشابه ترکیب و سناریوهای با احتمال کم حذف می‌شوند و در نتیجه، زمان اجرای برنامه کم می‌شود. سناریوهای کاهش یافته در یک برنامه ریزی خطی مختلط پیشنهادی مبتنی بر بهینه‌سازی برای بیشینه‌کردن همزمان سود بهره‌بردار ریزشبه‌ک و کمینه‌کردن هزینه انرژی مشترکین استفاده شده است. مسئله بهینه‌سازی به دست آمده با استفاده از حل‌کننده تجاری CPLEX از نرم‌افزار GAMS حل شده است [۲۱].

برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، برنامه ارائه شده روی ریزشبه‌ک شکل (۳) اجرا شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این ریزشبه‌ک پنج واحد تولیدی قابل برنامه‌ریزی، سه واحد توربین بادی و دو واحد فتوولتائیک دارد. واحدهای قابل برنامه‌ریزی سیستم شامل دو میکروتوربین (MT_1 و MT_2)، دو سیستم پیل سوختی (FC_1 و FC_2) و یک واحد موتور گازی (GE) است که اطلاعات آنها در جدول (۲) داده شده است [۱]. ظرفیت تولیدی هر واحد بادی و فتوولتائیک نیز به ترتیب ۸۰ و ۷۰ کیلووات فرض شده که توان ساعتی پیش‌بینی شده آنها در دوره برنامه‌ریزی در جدول (۳) آورده شده است [۱]. همچنین، نمودار بار ساعتی تجمیع شده کل همرا با قیمت انرژی در برنامه مبتنی بر زمان استفاده در شکل (۴) نمایش داده شده است. برای مدل‌سازی رفتار مشترکین در پاسخ به قیمت‌های متغیر برق از الاستیسیته قیمتی تقاضای بار استفاده شده که از مرجع [۸] استخراج شده است. همچنین، مقدار VOLL در این مطالعه $5\$/kWh$ در نظر گرفته شده است [۱] و [۸].

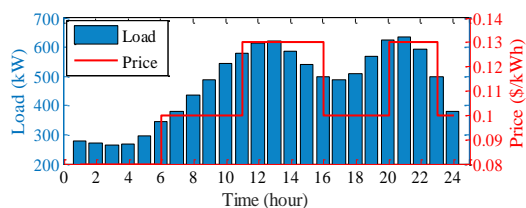


شکل (۳): نمودار تک‌خطی ریزشبه‌ک مورد مطالعه [۱]

جدول (۲): اطلاعات فنی و اقتصادی واحدهای تولیدی قابل برنامه‌ریزی [۱]

واحد تولیدی	P^{\min} (kW)	P^{\max} (kW)	A (سنت/kWh)	B (سنت)	SUC (سنت)	SDC (سنت)	C^{RU} (سنت)	C^{RD} (سنت)	C^{RS} (سنت)
MT ₁	۲۵	۱۵۰	۱۸۵/۰۶	۴/۴۷	۹	۸	۲/۱	۲/۱	۲/۱
MT ₂	۲۵	۱۵۰	۱۸۵/۰۶	۱۲/۵۷	۹	۸	۲/۱	۲/۱	۲/۱
FC ₁	۲۰	۱۰۰	۳۵۵/۱۸	۴/۱۴	۱۶	۹	۱/۵	۱/۵	۱/۵
FC ₂	۲۰	۱۰۰	۳۵۵/۱۸	۱۴/۲۴	۱۶	۹	۱/۵	۱/۵	۱/۵
GE	۳۵	۱۵۰	۳۱۲	۷/۴۲	۱۲	۸	۱/۷	۱/۷	۱/۷

بهره‌بردار، کاهش و میزان CVaR افزایش می‌یابد؛ زیرا در این صورت، بهره‌بردار با خرید بیشتر ظرفیت ذخیره تلاش می‌کند اثر عدم قطعیت‌ها را تا حدی جبران کند. در $\beta = 2$ مقدار سود و CVaR به ترتیب به ۲۷۹۲۷ و ۱۶۵۸۰ سنت می‌رسند. به بیان دیگر، در حالت بدون مشارکت مشترکین در برنامه DR، با تغییر β از صفر تا ۲، میزان سود بهره‌بردار ۲/۱٪، کاهش و میزان CVaR، ۵۷/۷٪ افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند با کاهش اندکی در سود، امنیت ریزشکه به‌طور چشمگیری بهبود می‌یابد.



شکل (۴): مقدار پیش‌بینی شده بار و قیمت انرژی با تعرفه زمان

استفاده (TOU) در افق برنامه‌ریزی [۱].

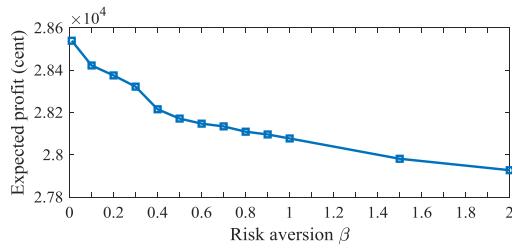
۵-۲- تحلیل نتایج عددی

برای بررسی تأثیر DR، نتایج شبیه‌سازی در دو حالت با و بدون اجرای برنامه DR ارائه شده است. همچنین، برای تحلیل تأثیر ضریب ریسک β روی تصمیم‌گیری بهره‌بردار، این پارامتر از مقدار صفر تا ۲ با اعداد مختلفی افزایش داده شده است. وقتی $\beta = 0$ است، یعنی اپراتور ریزشکه ریسک بالایی را پذیرفته است، محتاطانه عمل نمی‌کند و ذخیره کمتری خریداری می‌کند؛ اما وقتی ضریب ریسک β افزایش می‌یابد، به منزله ریسک کمتر و خرید ذخیره بیشتر برای بهبود امنیت ریزشکه بهره‌بردار است. در این شبیه‌سازی، مقدار پارامتر α برابر ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است. تغییرات سود مورد انتظار و CVaR بر حسب پارامتر β بدون مشارکت مشترکین در برنامه DR در شکل (۵) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در $\beta = 0$ سود بهره‌بردار بیشترین مقدار (۲۸۵۳۹ سنت) و CVaR کمترین مقدار خود (۱۰۵۱۲ سنت) را دارند. با افزایش β سود

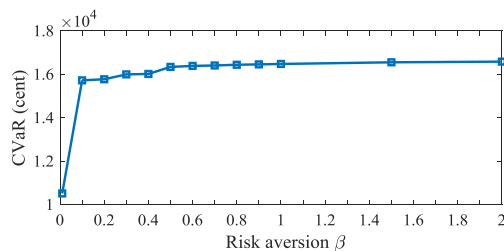
جدول (۳): توان ساعتی پیش‌بینی شده توربین بادی و واحد خورشیدی در دوره برنامه‌ریزی [۱]

ساعت	توان تولیدی توربین بادی به ظرفیت نصب‌شده	توان تولیدی فتوولتائیک به ظرفیت نصب‌شده	ساعت	توان تولیدی توربین بادی به ظرفیت نصب‌شده	توان تولیدی فتوولتائیک به ظرفیت نصب‌شده
۱	۰/۳۶۴	۰	۱۳	۰/۴۹۴	۰/۳۱۸
۲	۰/۲۶۷	۰	۱۴	۰/۳۵۵	۰/۳۴۳
۳	۰/۲۶۷	۰	۱۵	۰/۴۳۳	۰/۳۷
۴	۰/۲۳۴	۰	۱۶	۰/۳۲۱	۰/۴۰۳
۵	۰/۳۱۲	۰	۱۷	۰/۳۲۹	۰/۳۳۰
۶	۰/۳۲۹	۰	۱۸	۰/۳۰۳	۰/۲۳۸
۷	۰/۴۷۶	۰/۰۰۲	۱۹	۰/۳۶۴	۰/۱۳۳
۸	۰/۴۷۷	۰/۰۰۸	۲۰	۰/۳۷۳	۰/۰۴۳
۹	۰/۴۲۴	۰/۰۳۵	۲۱	۰/۲۶۰	۰/۰۰۳
۱۰	۰/۳۸۱	۰/۱	۲۲	۰/۳۳۸	۰
۱۱	۰/۴۵۹	۰/۲۳	۲۳	۰/۳۱۲	۰
۱۲	۰/۳۹۰	۰/۲۳۳	۲۴	۰/۳۴۶	۰

سیستم، مبادرت و با صرف همان هزینه قبلی، ذخیره بیشتری را خریداری می‌کند.

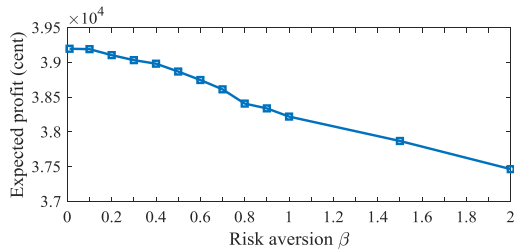


(الف)

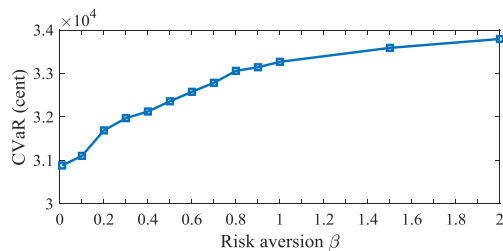


(ب)

شکل (۵): تأثیر پارامتر β بر حل بهینه مسئله بدون مشارکت DR، (الف) سود مورد انتظار و (ب) CVaR.



(الف)



(ب)

شکل (۶): تأثیر پارامتر β بر حل بهینه مسئله با مشارکت DR، (الف) سود مورد انتظار و (ب) CVaR.

برای بررسی بیشتر، مشارکت واحدهای تولیدی و بارهای پاسخگو در اختصاص انواع ذخیره شامل ذخیره چرخان بالارونده، پایین‌رونده و ذخیره غیرچرخان در طول

برای بررسی نقش برنامه DR در سود مورد انتظار و CVaR، تغییرات این دو شاخص بر حسب پارامتر β در شکل (۶) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سود بهره‌بردار از مقدار ۳۹۱۹۷ سنت در $\beta = 0$ به ۳۷۴۶۵ سنت در $\beta = 2$ رسیده است. در واقع در این حالت، با تغییر β از صفر تا ۲، میزان سود ۴/۴٪، کاهش و CVaR نیز ۸/۷٪ افزایش یافته است؛ بنابراین، با اجرای برنامه DR، حساسیت سود نسبت به β ، بیشتر و حساسیت CVaR نسبت به آن کمتر شده است. علت این است که با حضور بارهای پاسخگو، بهره‌بردار ریزش‌بکه با عدم قطعیت‌های بیشتری مواجه شده و ماهیت عدم قطعیت مسئله را افزایش داده است. به بیان دیگر، در این حالت وجود سناریوهای با سود کم، بیشتر شده است. گفتنی است با اجرای برنامه DR، سود ریزش‌بکه به‌طور چشمگیری افزایش یافته است که این موضوع از مقایسه شکل‌های ۵-الف و ۶-الف به وضوح مشاهده می‌شود؛ اما مسئله مدنظر در این قسمت، تغییرات سود نسبت به تغییرات پارامتر β است که با حضور بارهای پاسخگو میزان کاهش سود نسبت به حالت بدون DR به ازای تغییرات ضریب β از صفر تا ۲ تقریباً دو برابر شده است. در جدول (۴) نیز میزان ظرفیت ذخیره اختصاص داده شده از واحدهای تولیدی قابل برنامه‌ریزی و بارهای پاسخگو در دو حالت با و بدون اجرای DR در ضرایب ریسک مختلف آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با مشارکت مشترکین بخشی از ظرفیت ذخیره سیستم با بارهای پاسخگو تأمین می‌شود و در نتیجه، میزان ظرفیت اختصاص داده شده از واحدهای تولیدی با اجرای DR کاهش یافته است. همچنین، با افزایش β ، مجموع ظرفیت ذخیره سیستم افزایش یافته است؛ به این علت که بهره‌بردار در این شرایط تلاش کرده است با خرید بیشتر ظرفیت ذخیره اثر سناریوهای نامطلوب (که سود منفی یا کم ایجاد می‌کنند) را تا حدی جبران کند. گفتنی است در حالت با DR که بارهای پاسخگو در تأمین ذخیره مشارکت می‌کنند، بهره‌بردار در یک بازار رقابتی‌تر به تأمین ذخیره

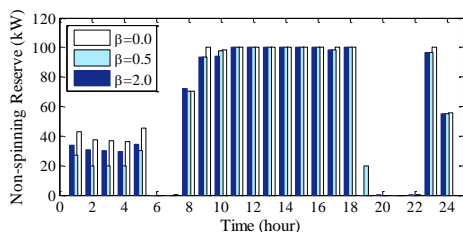
است. در این حالت، بخشی از ظرفیت ذخیره چرخان با بارهای پاسخگو در شرایطی کاملاً رقابتی با واحدهای تولیدی تأمین می‌شود؛ بدین دلیل، میزان مشارکت واحدهای تولیدی در تأمین ظرفیت چرخان کاهش یافته است. با این حال، میزان ظرفیت ذخیره غیرچرخان واحدها بیشتر شده که به دلیل افزایش عدم قطعیت‌های سیستم است؛ زیرا بارهای پاسخگو عدم قطعیت بیشتری به سیستم تحمیل می‌کنند و خود نیز قادر به تأمین ظرفیت ذخیره غیرچرخان نیستند.

زمان برنامه ریزی تجزیه و تحلیل می‌شود. در شکل (۷) مشارکت واحدهای تولیدی در تأمین انواع ذخیره در حالت بدون مشارکت DR در ضرایب ریسک مختلف نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش ضریب ریسک، مقابله با عدم قطعیت‌های سیستم در بیشتر ساعات افزایش می‌یابد که باعث از دست رفتن سود بیشتر بهره‌بردار به دلیل قطع بار اجباری در این ساعات می‌شود.

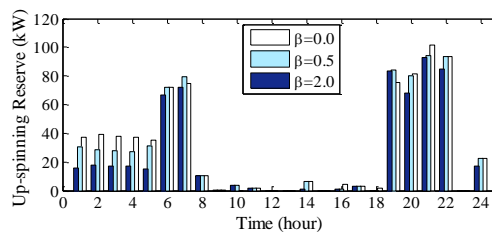
همچنین، در شکل (۸) مشارکت واحدهای تولیدی در تأمین انواع ذخیره در حالت با مشارکت DR نشان داده شده

جدول (۴): میزان ظرفیت ذخیره واحدهای تولیدی و بارهای پاسخگو در ضرایب ریسک مختلف (بر حسب کیلووات)

حالت	β	R_{DGs}^U	R_{DGs}^D	R_{DGs}^N	R_{DR}^U	R_{DR}^D	مجموع
بدون DR	۰	۸۲۳	۲۴۱۱	۱۰۷۵	۰	۰	۴۳۰۹
	۰/۵	۸۹۲	۲۴۰۹	۱۲۷۵	۰	۰	۴۵۷۶
	۲	۸۲۵	۲۴۰۹	۱۳۵۱	۰	۰	۴۵۸۵
با DR	۰	۵۹۰	۱۴۱۰	۱۴۲۲	۱۴۹	۱۱۳۶	۴۷۰۷
	۰/۵	۶۹۶	۱۳۴۸	۱۳۶۹	۱۴۵	۱۴۰۸	۴۹۶۶
	۲	۷۳۵	۱۳۲۴	۱۳۴۹	۱۶۲	۱۷۲۹	۵۲۹۹



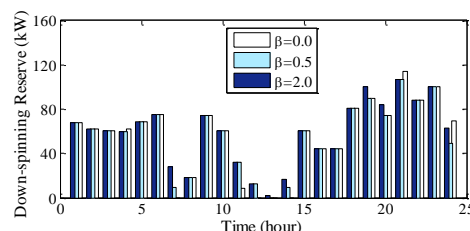
(ج)



(الف)

شکل (۷): مشارکت واحدهای تولیدی در تأمین انواع ظرفیت ذخیره در حالت بدون اجرای DR، الف) ذخیره چرخان بالارونده، ب) ذخیره چرخان پایین‌رونده و ج) ذخیره غیرچرخان.

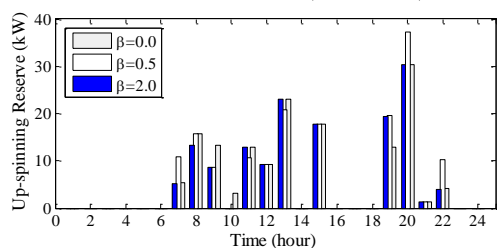
در شکل (۹) نیز مشارکت بارهای پاسخگو در تأمین ذخیره چرخان بالارونده و پایین رونده نمایش داده شده است. بارها بیشتر تمایل دارند در تأمین ذخیره چرخان پایین رونده شرکت کنند. در واقع، مشترکین با اختصاص بیشتر این نوع ظرفیت تمایل دارند در شرایطی که تولید بیشتر از مصرف



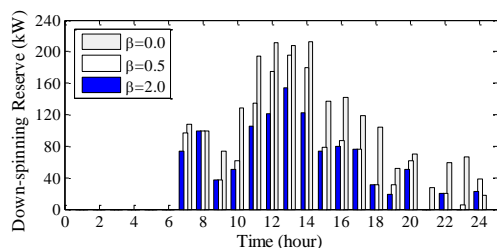
(ب)

مشارکت می‌کنند، با صرف هزینه کمتر، ذخیره بیشتری را می‌تواند خریداری کند. به عبارت دیگر، در این حالت، وقتی ضریب β افزایش می‌یابد، بهره بردار با کمی هزینه اضافی، ظرفیت ذخیره نسبتاً بیشتری خریداری می‌کند و در نتیجه، تغییر این پارامتر تأثیر بیشتری بر حاشیه امنیت سیستم دارد.

گفتنی است در دوره‌های غیرپیک و به‌ویژه در دوره کم‌باری یا دره سهم بارها در تأمین ذخیره ناچیز است و بارها در این دوره‌ها تمایل کمتری به اختصاص ظرفیت ذخیره دارند؛ زیرا در این ساعات، واحدهای تولیدی به تنهایی قادرند ظرفیت ذخیره لازم ریزش‌بکه را با قیمت پایین‌تری تأمین کنند. به عبارت دیگر، وقتی تقاضای بار پایین است، واحدهای تولیدی بیشتری (حتی واحدهای تولیدی ارزان‌تر) ظرفیت آزاد لازم را دارند و با هزینه کمتری تمام ذخیره لازم را تأمین می‌کنند.



(الف)



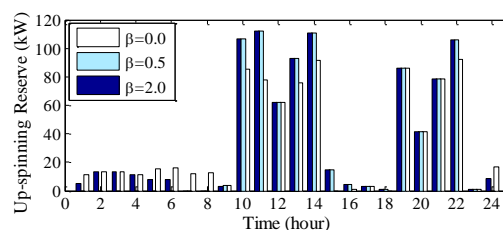
(ب)

شکل (۹): مشارکت بارهای پاسخگو در تأمین انواع ظرفیت ذخیره، (الف) ذخیره چرخان بالارونده و (ب) ذخیره چرخان پایین‌رونده.

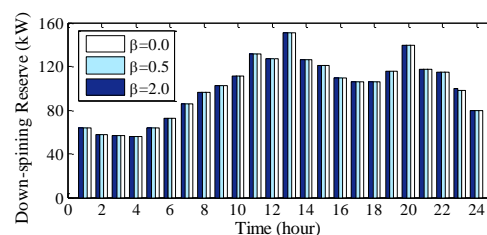
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل احتمالاتی دومرحله‌ای برای برنامه‌ریزی یک ریزش‌بکه مستقل با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار و با هدف بیشینه‌کردن سود مورد انتظار

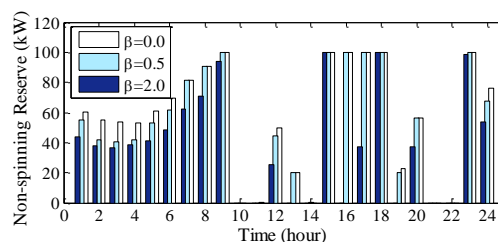
است، با افزایش مصرف خود ضمن بهره مندی از انرژی به منافع اقتصادی بیشتری نیز دست یابد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۸): مشارکت واحدهای تولیدی در تأمین انواع ظرفیت ذخیره در حالت با اجرای DR، (الف) ذخیره چرخان بالارونده، (ب) ذخیره چرخان پایین‌رونده و (ج) ذخیره غیرچرخان.

به بیان دیگر، بارها باید در ذخیره بالارونده مصرف خود را کاهش دهند که نسبت به این امر تمایل کمتری وجود دارد؛ زیرا وقتی مشترکین در برنامه پاسخگویی بار شرکت می‌کنند، بیشتر سعی می‌کنند با کاهش بار به سود برسند، نه با اختصاص ظرفیت ذخیره بالارونده و همچنین، وقتی بارهای پاسخگو در برنامه DR شرکت می‌کنند، بهره بردار با بازار رقابتی‌تری مواجه می‌شود. اگر خرید ظرفیت ذخیره از واحدهای تولیدی برای او مقرون به صرفه نباشد (که در ساعات پیک چنین حالتی است)، از بارها ظرفیت ذخیره خریداری می‌کند (شکل ۹ را ببینید). در واقع، بهره بردار در حالتی که بارها در تأمین ذخیره

۰/۰۰۸۷۵	۰/۰۳۳۱۲۵	N۸	N۱	۷
۰/۰۰۵	۰/۰۰۷۵	N۹	N۱	۸
۰/۰۱۰۶۲۵	۰/۰۱۵	N۱۰	N۹	۹
۰/۰۰۵۶۲۵	۰/۰۲۱۲۵	N۱۱	N۱۰	۱۰
۰/۰۰۵۶۲۵	۰/۰۲۱۲۵	N۱۳	N۹	۱۱
۰/۰۰۵۶۲۵	۰/۰۲۱۲۵	N۱۴	N۱۳	۱۲
۰/۰۰۶۲۵	۰/۰۲۳۱۲۵	N۱۵	N۱۰	۱۳
۰/۰۰۶۲۵	۰/۰۲۳۱۲۵	N۱۶	N۱۵	۱۴

علائم و نشانه‌ها

اندیس واحدهای تولیدی قابل برنامه‌ریزی (از ۱ تا N_G)	i
اندیس گروه‌های بارهای از (۱ تا N_J)	j
اندیس دوره زمانی برنامه‌ریزی (از ۱ تا N_T)	t
اندیس سناریوها (از ۱ تا N_S)	s
اندیس واحدهای تولید بادی (از ۱ تا N_W)	w
اندیس واحدهای خورشیدی (از ۱ تا N_V)	v
اندیس‌های شین‌های سیستم	b, n, r
سود مشترک در زمان t	$B(t)$
قیمت انرژی پیشنهادی از واحد توربین بادی w (فتولتائیک v در زمان t)	$(C_{v,t}) C_{w,t}$
ذخیره چرخان پایین‌رونده (بالارونده)	$(C_{i,t}^{RD})$
اختصاص یافته با واحد i در زمان t	$(C_{i,t}^{RU})$
ذخیره غیرچرخان اختصاص یافته با واحد i در زمان t	$(C_{i,t}^{NS})$
ذخیره چرخان پایین‌رونده (بالارونده) اختصاص داده شده با گروه بار j در زمان t	$(C_{j,t}^{RD})$
تقاضای بار j قبل از اجرای برنامه‌ی بار در زمان t	$D_{j,t}$
تقاضای بار j پس از اجرای برنامه‌ی بار در زمان t	$D_{j,t}^{DR}$
قیمت انرژی الکتریکی گروه بار j در زمان t	$\rho_{j,t}$
الاستیسیته خودی (متقابل) گروه بار j	$(E_{t,h}^j) E_{t,t}^j$
شارش توان اکتیو از گره n به گره r در زمان t	$(f_{n,r,t}^P)$
(و سناریوی s)	$f_{n,r,t,s}^P$
شارش توان راکتیو از گره n به گره r در زمان t	$(f_{n,r,t}^Q)$
(و سناریوی s)	$f_{n,r,t,s}^Q$
هزینه خاموشی واحد i در زمان t	$SDC_{i,t}$
هزینه روشن شدن واحد i در زمان t	$SUC_{i,t}$
قیمت انرژی برای مشترکین j در زمان t	$\rho_{j,t}$

بهره‌بردار ارائه شد. با به کارگیری معیار از ریسک در مدل پیشنهادی، این امکان برای بهره‌بردار فراهم شد تا مصالحه‌ای بین حداکثر سود مورد انتظار خود و حاشیه امنیت ریزشکته برقرار کند. با استفاده از مدل پیشنهادی، اثرات مشارکت بارهای پاسخگو در برنامه DR در سطوح مختلف ریسک‌پذیری بهره‌بردار بررسی شد. نتایج نشان دادند مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه DR تأثیر زیادی بر میزان سود مورد انتظار بهره‌بردار و نیز شاخص CVaR دارد. همچنین، نتایج نشان دادند با افزایش ضریب ریسک β سود بهره‌بردار، کاهش و CVaR افزایش می‌یابد. میزان کاهش سود بهره‌بردار در حالت بدون DR برابر ۲/۱٪ و در حالت با DR برابر ۴/۴٪ است. میزان افزایش CVaR نیز در حالت بدون DR و با DR به ترتیب برابر ۵۷/۷٪ و ۸/۷٪ است. همچنین، نتایج نشان دادند با افزایش ضریب ریسک، میزان ظرفیت ذخیره ریزشکته برای مقابله با سناریوهای نامطلوب کمی افزایش می‌یابد. با مشارکت بارهای پاسخگو نیز میزان کل ذخیره اختصاص داده شده، بیشتر از حالت بدون DR است. درنهایت، با به کارگیری مدل پیشنهادی، بهره‌بردار ریزشکته به راحتی قادر خواهد بود با تنظیم ضریب ریسک مطلوب براساس شرایط مسئله، بین سود مورد انتظار خود و میزان ظرفیت ذخیره لازم ریزشکته که به امنیت بیشتر آن منجر می‌شود، نقطه مطلوبی را برگزیند.

۷- پیوست

ریزشکته مطالعه‌شده، ۱۶ شین و ۱۴ خط دارد که امیدانس خطوط مختلف آن در جدول الف نشان داده شده است [۲۲].

جدول (الف-۱): مقادیر امیدانس خطوط ریزشکته

شماره خط	از شین	به شین	مقاومت (اهم)	اندوکتانس (اهم)
۱	N۱	N۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
۲	N۲	N۳	۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۳۷۵
۳	N۳	N۴	۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۳۷۵
۴	N۴	N۵	۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۳۷۵
۵	N۵	N۶	۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۳۷۵
۶	N۳	N۷	۰/۰۲۱۷۸۵	۰/۰۰۸۷۵

- Robust Energy Management for Microgrids", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 9, No. 2, pp. 1301 - 1309, Mar. 2018.
- [3] A. Gholami, T. Shekari, and S. Grijalva, "Proactive Management of Microgrids for Resiliency Enhancement: An Adaptive Robust Approach", IEEE Trans. on Sustainable Energy, Vol: 10, No: 1, pp. 470-480, Jan. 2019.
- [4] H. Rashidzadeh-Kermani, M. Vahedipour-Dahraie, M. Shafie-khah, J.P.S. Catalão, "A Bi-level risk-constrained offering strategy of a wind power producer considering demand side resources", Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 104, pp. 562-574, 2019.
- [5] M. Vahedipour-Dahraie, H. Rashidzadeh-Kermani, H.R. Najafi, A. Anvari-Moghaddam, J.M. Guerrero, "Coordination of EVs Participation for Load Frequency Control in Isolated Microgrids", Appl. Sci., Vol. 7, No. 6, pp. 1-16, 2017.
- [6] A. Alavi-Ashkefiqi, A. Qiyasian, A. Rabiee " Smart Charge and Discharge Scheduling of Electric Vehicle (EV) to maximize the profit of EV owner", Journal of Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 75-82, 2017.
- [7] S Pirouzi, J Aghaei, "Active and Reactive Power Management of Smart Distribution Network Using Electric Vehicles as Mixed Integer Linear Programming Problem", Journal of Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 1-12, 2018.
- [8] M. Vahedipour-Dahraie, H.R. Najafi, A. Anvari-Moghaddam, J.M. Guerrero, "Study of the Effect of Time-Based Rate Demand Response Programs on Stochastic Day-Ahead Energy and Reserve Scheduling in Islanded Residential Microgrids", Appl. Sci., Vol. 7, No. 4, pp. 1-19, 2017.
- [9] R. Lahon, G.C. Gupta, "Risk-based coalition of cooperative microgrids in electricity market environment", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 12, pp. 3230-3241, 2018.
- [10] H.T. Haider, O.H. See, W. Elmenreich, "A review of residential demand response of smart grid", Renew Sustain Energy Rev., Vol. 59, pp.166-178, 2016.
- [11] M. Vahedipour-Dahraie, H.R. Najafi, A. Anvari-Moghaddam, J.M. Guerrero, "Security-constrained unit commitment in AC microgrids considering stochastic price - based demand response and renewable generation", Int. Trans. on Elec. Energy Syst., 2018, doi.org/10.1002/etep.
- [12] 2596.
- [13] M. Vahedipour-Dahraie, H.R. Najafi, A. Anvari-Moghaddam, J.M. Guerrero, "Optimal scheduling of distributed energy resources and responsive loads in islanded microgrids considering voltage and frequency security constraints", Journal of Rene. and Sus.Energy, 2018, Vol. 10, doi.org/10.1063/1.5027416.
- [14] H. Lee, G. Byeon, J. Jeon, A.Hussain, H. Kim, A. Oulis Rousis, G.Strbac, "An Energy Management System With Optimum Reserve Power Procurement Function for Microgrid

قیمت خرید / فروش توان در بازار تعادل از / به	$(\rho_{j,t}^{Dep})$
گروه بار j (واحد x) در زمان t	$\rho_{x,t}^{Dep}$
توان برنامه‌ریزی‌شده واحد i در زمان t و سناریوی s	$(P_{i,t,s}) P_{i,t}$
توان تولیدی واحد توربین بادی w در زمان t و سناریوی s	$(P_{w,t}) P_{w,t,s}$
توان تولیدی واحد فتوولتائیک v در زمان t و سناریوی s	$(P_{v,t,s}) P_{v,t}$
بیشینه (کمینه) ظرفیت تولیدی واحد x	$(P_x^{\max}) P_x^{\min}$
ذخیره چرخان بالارونده برنامه‌ریزی‌شده با واحد i (بار j) در زمان t	$(R_{j,t}^U) R_{i,t}^U$
ذخیره چرخان پایین‌رونده برنامه‌ریزی‌شده با واحد i (بار j) در زمان t	$(R_{j,t}^D) R_{i,t}^D$
ذخیره غیرچرخان برنامه‌ریزی‌شده با واحد i در زمان t	$R_{i,t}^{NS}$
ذخیره چرخان بالارونده تأمین‌شده با واحد i (بار j) در زمان t و سناریوی s	$(r_{j,t,s}^U) r_{i,t,s}^U$
ذخیره چرخان پایین‌رونده تأمین‌شده با واحد i (بار j) در زمان t و سناریوی s	$(r_{j,t,s}^D) r_{i,t,s}^D$
ذخیره غیرچرخان تأمین‌شده با واحد i در زمان t و سناریوی s	$r_{i,t,s}^{NS}$
درآمد مشترک ناشی از اجرای برنامه‌ی بار در دوره زمانی t	$S(t)$
زاویه ولتاژ گره n در زمان t و سناریوی s	$(\delta_{n,t,s}) \delta_{n,t}$
اندازه ولتاژ (مقدار RMS) در گره n در زمان t و سناریوی s	$(V_{n,t,s}) V_{n,t}$
متغیر باینری، در حالت در مدار بودن واحد برابر ۱ وگرنه برابر ۰ است	$(u_{i,t,s}) u_{i,t}$
متغیر باینری، در حالت روشن‌بودن واحد برابر ۱ وگرنه برابر ۰ است	$(y_{i,t,s}) y_{i,t}$
متغیر باینری، در حالت خاموش‌بودن واحد برابر ۱ وگرنه برابر ۰ است	$(z_{i,t,s}) z_{i,t}$
احتمال رخداد سناریوی s	π_s

مراجع

- [1] M. Vahedipour-Dahraie, "Scheduling of demand response in an autonomous microgrid considering system security", Ph.D. Thesis, Birjand University, pp. 38-97, 1396.
- [2] G. Yuanxiong, Z. Chaoyue, "Islanding-Aware

- Generation, Vol. 11, No. 14, pp. 1812-1821, 2017.
- [19] M. Vahedipour-Dahraie, A. Anvari-Moghaddam, J.M. Guerrero, "Evaluation of Reliability in Risk-Constrained Scheduling of Autonomous Microgrids with Demand Response and Renewable Resources", *IET Renew. Power Gener.*, Vol 12, No. 6, pp. 657-667, 2018.
- [20] P. A. Trodden, W. A. Bukhsh, A. Grothe, K. I. McKinnon, "Optimization-based islanding of power networks using piecewise linear ac power flow," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 29, No. 3, pp. 1212-1220, 2014.
- [21] D. Arthur, S. Vassilvitskii, "K-means++: The advantages of careful seeding", in *Proc. 18th Annu. ACM-SIAM Symp Discrete Algorithms (SODA '07)*, New Orleans, LA, USA, 2007, pp. 1027-1035
- [22] "The General Algebraic Modeling System (GAMS) Software", online available at: <http://www.gams.com>.
- [23] A.G. Tsikalakis, and N.D. Hatziargyriou, "Centralized control for optimizing microgrids operation," *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 23, No. 1, pp.241-248, 2008.
- Resilience Improvement", *IEEE Access*, Vol.7, pp. 42577 - 42585, 2019.
- [15] U. Damisa, N. Ikechi Nwulu, Y. Sun, "Microgrid energy and reserve management incorporating prosumer behind-the-meter resources", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 12, No. 8, pp. 910 – 919, 2018.
- [16] M. Vahedipour-Dahraie, H.R. Najafi, A. Anvari-Moghaddam, J.M. Guerrero, "Security-constrained unit commitment in AC microgrids considering stochastic price-based demand response and renewable generation", *Int. Trans. Elec. Energy Syst.*, Vol. 28, No. 9, pp. 1-26, 2018.
- [17] M. Vahedipour-Dahraie, H.R. Najafi, A. Anvari-Moghaddam, J.M. Guerrero, "Study of the Effect of Time-Based Rate Demand Response Programs on Stochastic DA Energy and Reserve Scheduling in Islanded Residential Microgrids", *Appl. Sci.*, Vol. 7, No. 4, pp. 1-19, 2017.
- [18] M. Vahedipour-Dahraie, H., Rashidzadeh-Kermani, H.R. Najafi, A. Anvari-Moghaddam, J.M. Guerrero, "Stochastic Security and Risk-Constrained Scheduling for an Autonomous Microgrid with Demand Response and Renewable Energy Resources", *IET Renewable Power*

¹ Federal energy regulatory commission (FERC)

² Demand response (DR)

³ Up-spinning reserve

⁴ Down-spinning reserve

⁵ Here and now (H&N)

⁶ Wait-and-see (W&S)

⁷ Weibull probability density function

⁸ Conditional value at risk (CVaR)

⁹ Value of loss load (VOLL)