

## **Optimal Scheduling of Smart Microgrid for Stable and Economic Islanding using Demand as the Spinning Reserve**

**Ali Sefidgar-Dezfouli<sup>1</sup>, Mahmood Joorabian<sup>2</sup>, Elahe Mashhour<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> PhD Candidate, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

### **Abstract:**

Microgrid can operate in both grid-connected and islanded modes. Islanding can be scheduled or unscheduled. In the event of unscheduled islanding, the microgrid should be able to maintain its sustainability. Therefore, it is necessary to determine and supply the amount of required spinning reserve for stable islanding. In this paper, a two-stage strategy for optimal scheduling of the microgrid is proposed while uncertainties of renewable generations and demand are considered. In the first stage, co-optimization of power and reserve is carried out with the presence of distributed generations and batteries. Therefore, in the second stage, the demand is also used as reserve to provide required reserve for stable islanding. In order to determine the optimal amount of reserve of demand, a novel objective function is proposed. The objective function minimizes the sum of the standby reserve cost, expected cost of called reserve, and expected cost of emergency curtailment. One of the salient features of the proposed model is its modularity. That is, it can be added easily to any scheduling model in which the demand is not considered as reserve. Mathematical analysis and numerical simulations show the accuracy and efficiency of the proposed method.

**Keywords:** Microgrid, Spinning Reserve, Islanding, Demand.

## برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه هوشمند با قابلیت جزیره‌ای شدن پایدار و اقتصادی با

### استفاده از مشارکت بهینه بار به عنوان ذخیره چرخان

علی سفیدگر دزفولی<sup>۱</sup>، محمود جورابیان<sup>۲</sup>، الهه مشهور<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری برق قدرت - دانشگاه شهید چمران - اهواز - ایران

ali.sefidgar@gmail.com

۲- استاد، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید چمران - اهواز - ایران

mjoorabian@scu.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید چمران - اهواز - ایران

e.mashhour@scu.ac.ir

**چکیده:** ریزشبکه در دو مد متصل به شبکه و جزیره‌ای بهره‌برداری می‌شود. جزیره‌ای شدن به صورت برنامه‌ریزی شده یا ناخواسته است. در صورت جزیره‌ای شدن ناخواسته، ریزشبکه باید بتواند پایداری خود را حفظ کند؛ بنابراین، تعیین و تأمین مقدار ذخیره چرخان لازم ریزشبکه برای جزیره‌ای شدن پایدار ضروری است. در این مقاله برای تأمین ذخیره لازم ریزشبکه با در نظر گرفتن جزیره‌ای شدن ناخواسته، عدم قطعیت بار و منابع تجدیدپذیر، یک استراتژی برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای پیشنهاد شده است. در مرحله نخست، برنامه‌ریزی توان و ذخیره با حضور منابع تولید پراکنده و باتری‌ها انجام می‌شود. در مرحله دوم، برای جبران کمبود منابع تولید پراکنده و باتری‌ها در تأمین ذخیره لازم، از بار به عنوان ذخیره استفاده می‌شود. برای تعیین مقدار بهینه ذخیره بار، یک تابع هدف جدید پیشنهاد شده است؛ به طوری که مجموع هزینه‌های آمادگی رزرو، هزینه مورد انتظار فراخوانی رزرو بار و هزینه مورد انتظار قطع اضطراری بار کمینه شود. یکی از ویژگی‌های بارز مدل پیشنهادی، قابلیت سازگاری آن است؛ یعنی به راحتی می‌تواند به هر مدل برنامه‌ریزی دیگری اضافه شود که بار را ذخیره چرخان در نظر نگرفته است. تحلیل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های عددی بیان‌کننده صحت و کارآمد بودن روش پیشنهادی‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** ریز شبکه، ذخیره چرخان، جزیره‌شدن، بار

### ۱- مقدمه

کنترل‌پذیر و ادوات ذخیره‌کننده است و در هر دو مد متصل به شبکه و جزیره‌ای بهره‌برداری می‌شود [۱-۳]. یکی از موضوعات درخور توجه در زمینه بهره‌برداری ریزشبکه‌ها، برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت توان در ریزشبکه است [۴-۶]. مسئله برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت توان در ریزشبکه، به دلیل ویژگی‌های ذاتی ریزشبکه، با مسئله برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت توان در سیستم قدرت به هم پیوسته تفاوت‌هایی دارد که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره شده است. (۱) **قابلیت حفظ پایداری خود در صورت جزیره‌ای شدن ناخواسته:** در حالت متصل به شبکه، شبکه بالادستی، یک باس بی‌نهایت فرض می‌شود

ریزشبکه به صورت یک شبکه توزیع ولتاژ ضعیف / متوسط تعریف می‌شود که شامل منابع تولید پراکنده، بارهای

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۱۶

نام نویسنده مسئول: محمود جورابیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اهواز - دانشگاه شهید چمران -

دانشکده فنی و مهندسی

که فرکانس و ولتاژ ریزشبهه را تنظیم می‌کند. وقتی به‌طور ناگهانی جزیره‌ای شدن رخ دهد و توان مبادله‌شده بین شبکه و ریزشبهه به‌صورت ناگهانی صفر شود، تعادل توان در ریزشبهه به هم می‌خورد و در نتیجه، فرکانس ریزشبهه به سرعت کاهش یا افزایش می‌یابد. برای جلوگیری از فروپاشی کامل ریزشبهه و برقراری مجدد و فوری تعادل توان بین تولید و مصرف، لازم است قبل از وقوع جزیره‌ای ناخواسته، مقدار مناسبی ذخیره چرخان در نظر گرفته شود [۷، ۸]. ۲) **عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر:** مقدار توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، مانند بادی و خورشیدی، عدم قطعیت دارد و به همین دلیل، منابع برنامه‌ریزی‌ناپذیر شناخته می‌شوند [۹-۱۱].

برنامه‌ریزی ریزشبهه با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر، شایان توجه پژوهش‌های زیادی بوده است [۱۲-۱۴]؛ اما به‌تازگی به برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن جزیره‌ای شدن ناخواسته، توجه و پژوهش‌های محدودی انجام شده است [۷، ۱۵، ۱۶]. در [۱۵] یک مدل برنامه‌ریزی بهینه ریزشبهه به‌منظور کمینه‌کردن هزینه بهره‌برداری در مد متصل به شبکه با در نظر گرفتن قیود جزیره‌ای شدن چند دوره‌ای پیشنهاد شده است. در صورت جزیره‌ای شدن ناخواسته، این مدل کفایت تولید ریزشبهه را در مد جزیره‌ای برای مدت معینی تضمین می‌کند؛ با این حال، عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته نشده است. در [۱۶] و [۷] برنامه‌ریزی ریزشبهه با هدف کمینه‌کردن هزینه بهره‌برداری ریزشبهه با در نظر گرفتن قیود ذخیره چرخان لازم برای پایدارماندن ریزشبهه در زمان وقوع جزیره‌ای شدن ناخواسته مدل شده است. در [۱۶] تولید منابع تجدیدپذیر و بار به‌صورت نامعین مدل شده‌اند؛ اما فرض شده است که منابع تولید ریزشبهه قطعاً می‌توانند همه ذخیره لازم برای جزیره‌ای شدن پایدار را تأمین کنند. همچنین، از منابع ذخیره‌کننده انرژی استفاده نشده است. در [۷] قیود رزرو چرخان برای جزیره‌ای شدن پایدار به‌صورت احتمالاتی مدل شده‌اند و یک شاخص جدید به نام  $PSI^1$  معرفی و مدل‌سازی شده است. این شاخص، احتمال جزیره‌ای شدن موفق یا به عبارتی احتمال کافی‌بودن ذخیره موجود در ریزشبهه در زمان جزیره‌شدن ناخواسته را بیان می‌کند؛

به‌طوری‌که ذخیره موجود بتواند علاوه بر جبران مقدار توان مبادلاتی با شبکه بالادستی، خطای پیش‌بینی بار و منابع تجدیدپذیر در آن لحظه را پوشش دهد. در [۷] ابتدا برنامه‌ریزی قطعی (با فرض  $PSI=1$ ) انجام می‌شود. در صورتی که منابع تولید پراکنده و باتری‌ها نتوانند ذخیره چرخان لازم را تأمین کنند و مسئله بهینه‌سازی بدون جواب شود، مقدار پذیرفتنی برای  $PSI$ ، آنقدر کاهش داده می‌شود تا مسئله جواب‌دار شود. در [۱۶] و [۷]، از قابلیت‌ها و پتانسیل بار به‌منظور افزایش توانایی ریزشبهه برای جزیره‌ای شدن ناخواسته استفاده نشده است. در این شرایط، وقتی جزیره‌ای ناخواسته تشکیل شود و ذخیره فراهم‌شده با منابع تولید پراکنده و باتری‌ها کافی نباشد، بهره‌بردار ریزشبهه برای حفظ پایداری ریزشبهه اقدام به حذف اضطراری بار می‌کند که تحمیل هزینه زیاد به ریزشبهه را سبب می‌شود. امروزه، امکان بهره‌برداری منعطف و اقتصادی از بار در ریزشبهه‌های هوشمند بیشتر شده است. به این ترتیب، با توجه به قابلیت انعطاف بار، احتمال جزیره‌ای شدن موفق با هزینه کمتر افزایش داده می‌شود.

در این مقاله، چهارچوب پژوهش [۷] به‌طوری توسعه داده شده است که به‌منظور جبران کمبود منابع تولید پراکنده و باتری‌ها برای تأمین ذخیره لازم ریزشبهه، از بار نیز به‌عنوان تأمین‌کننده ذخیره استفاده شود. از دو نوع برنامه پاسخگویی بار به شرح زیر استفاده شده است. ۱) برنامه خدمات جانبی: در این برنامه، مشتری‌ها برای قطع بار به‌عنوان ظرفیت رزرو، قیمت پیشنهاد می‌دهند. اگر پیشنهاد آنها پذیرفته شود، هزینه آمادگی رزرو به آنها پرداخت می‌شود. در صورتی که به قطع بار نیاز شود، با بهره‌بردار ریزشبهه فراخوانی می‌شوند و هزینه فراخوانی بار، متناسب با بار قطع شده پرداخت می‌شود. ۲) برنامه اضطراری: در شرایط اضطراری، مقداری از بار مشتری بدون هماهنگی قبلی حذف می‌شود و مبلغی متناسب با مقدار بار حذف‌شده به مشتری پرداخت می‌شود [۱۷]. اطلاعات بیشتر درباره برنامه‌های پاسخگویی بار در [۱۸] موجود است.

استراتژی پیشنهادی، دو مرحله‌ای است؛ در مرحله نخست، برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر و بار انجام می‌شود. برنامه‌ریزی در این

بخش دوم بیان‌کننده هزینه استهلاک باتری است. بخش‌های سه و چهار به ترتیب بیان‌کننده هزینه ذخیره چرخان باتری‌ها و منابع تولید پراکنده‌اند. در بخش پنجم هزینه / درآمد ناشی از تبادل توان با شبکه بالادستی آورده شده است. در روابط (۲ تا ۲۵)، قیود متداول بهره‌برداری آورده شده‌اند که عبارت‌اند از تعادل توان (۲ و ۳)، هزینه بهره‌برداری منابع تولید پراکنده (۴ تا ۶)، قیود بهره‌برداری باتری‌ها (۷ تا ۱۳)، قیود تبادل توان با شبکه (۱۴ تا ۱۷)، قیود تأمین رزرو چرخان بالا و پایین توسط منابع تولید پراکنده (۱۸ تا ۲۱)، قیود تأمین رزرو چرخان توسط باتری‌ها (۲۱ تا ۲۴). نماد ~ بالای برخی پارامترها بیان می‌کند آن پارامتر خطای پیش‌بینی دارد.

$$\sum_{t=1}^{N_t} \sum_{g=1}^{N_g} \left[ \sum_{m=1}^{N_m} C_{gt}(m) P_{gt}(m) + A_g u_{gt} + SU_{gt}(u_{gt}, u_{g,t-1}) \right] + \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{b=1}^{N_b} C_{bt}(P_{bt}^C + P_{bt}^D) + \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{g=1}^{N_g} (Q_{gt}^U R_{gt}^U + Q_{gt}^D R_{gt}^D) + \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{b=1}^{N_b} (Q_{bt}^U R_{bt}^U + Q_{bt}^D R_{bt}^D) + \sum_{t=1}^{N_t} (C_{mt}^B P_{mt}^B - C_{mt}^S P_{mt}^S) \quad (1)$$

محدودیت‌های مسئله به شرح ذیل‌اند:

$$P_{mt} + \sum_{g=1}^{N_g} P_{gt} + \sum_{b=1}^{N_b} (P_{bt}^D - P_{bt}^C) = \widetilde{N}_t^D \quad (2)$$

$$\widetilde{N}_t^D = \sum_{d=1}^{N_d} \widetilde{F}_{dt} - \widetilde{P}_{Wt} - \widetilde{P}_{Pvt} \quad (3)$$

$$P_{gt} = \sum_{m=1}^{N_m} P_{gt}(m) + u_{gt} P_g^{\min} \quad \forall g, \forall t \quad (4)$$

$$0 \leq P_{gt}(m) \leq P_{gt}^{\max}(m) \quad \forall g, \forall t \quad (5)$$

$$P_{gt}^{\min} u_{gt} \leq P_{gt} \leq P_{gt}^{\max} u_{gt} \quad \forall g, \forall t \quad (6)$$

مرحله در هر چهارچوب دلخواهی می‌تواند انجام شود؛ اما در اینجا از مدل ویرایش‌شده پژوهش [۷] استفاده شده است. در مرحله دوم، برخی خروجی‌های مرحله نخست (شامل ۱- توان مبادله‌شده با شبکه بالادستی در هر ساعت و ۲- میزان رزرو موجود در ریزشبه در هر پریود که با منابع تولید پراکنده و باتری‌ها فراهم شده است) و دیگر پارامترهای لازم (شامل ۱- مشخصات تابع توزیع خطای پیش‌بینی بار و منابع تجدیدپذیر در هر ساعت، ۲- احتمال وقوع جزیره‌ای ناخواسته در هر ساعت و ۳- قیمت‌های مربوط به مشارکت بار) به‌عنوان ورودی دریافت می‌شوند. در مرحله دوم، ابتدا با توجه به مقادیر رزرو تعیین‌شده در مرحله نخست، PSI محاسبه می‌شود و سپس برای مشارکت بار در تأمین رزرو از ترکیب بهینه برنامه‌های پاسخگویی بار یادشده استفاده شده است و به‌منظور تعیین مقدار بهینه رزرو بار، یک تابع معیار جدید، پیشنهاد و به‌صورت مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شده است؛ به‌طوری‌که مجموع هزینه‌های مشارکت بار (۱- آمادگی رزرو بار؛ ۲- هزینه مورد انتظار فراخوانی رزرو بار و ۳- هزینه مورد انتظار قطع اضطراری بار) کمینه شود. بعد از تعیین مقدار بهینه رزرو بار شاخص PSI جدید محاسبه می‌شود.

یکی از ویژگی‌های مدل پیشنهادی، قابلیت سازگاری است. مرحله دوم به‌گونه‌ای مدل شده است که به‌صورت واحد مستقل عمل می‌کند و به‌راحتی به‌عنوان مرحله دوم به هر مدل برنامه‌ریزی دیگری افزوده می‌شود که مشارکت بار را در نظر نگرفته است.

## ۲- مرحله یک: برنامه‌ریزی ریزشبه بدون

### مشارکت بار

در مرحله یک، برنامه‌ریزی ریزشبه با در نظر گرفتن قابلیت جزیره‌ای شدن انجام می‌شود. اجزای ریزشبه عبارت‌اند از منابع تولید پراکنده مانند پیل سوختی، میکرو توربین و دیزل ژنراتور، باتری‌ها و منابع تجدیدپذیر مانند نیروگاه فتوولتائیک و نیروگاه بادی. تابع هدف به‌منظور کمینه‌کردن هزینه بهره‌برداری در رابطه (۱) نشان داده شده است. ترم اول آن بیان‌کننده تابع هزینه منابع تولید پراکنده و

برنامه‌ریزی بهینه ریزش شبکه هوشمند با قابلیت جزیره‌ای شدن پایدار و اقتصادی با استفاده از ...

خالص نیز یک توزیع احتمالی نرمال خواهد داشت (رابطه ۲۸). پارامترهای  $\mu_t$ ،  $\delta_t$  به ترتیب بیان‌کننده انحراف معیار و مقدار متوسط تابع توزیع احتمالی خطای پیش‌بینی بار خالص اند. به جای رابطه (۲۷)، دو رابطه (۲۹) و (۳۰) را می‌توان نوشت:

$$\Delta N_t^D = -\Delta P_{WTt} - \Delta P_{PVt} + \sum_{d=1}^{N_d} \Delta P_{dt} \quad \forall t \quad (26)$$

$$-\left( \sum_{g=1}^{N_g} R_{gt}^D + \sum_{b=1}^{N_b} R_{bt}^D \right) \leq P_{mt} + \Delta N_t^D \leq \sum_{g=1}^{N_g} R_{gt}^U + \sum_{b=1}^{N_b} R_{bt}^U \quad \forall t \quad (27)$$

$$\Delta N_t^D \sim N(\mu_t, \delta_t^2) \quad (28)$$

$$P_{mt} + \mu_t + 3\delta_t \leq \sum_{g=1}^{N_g} R_{gt}^U + \sum_{b=1}^{N_b} R_{bt}^U \quad \forall t \quad (29)$$

$$-\left( \sum_{g=1}^{N_g} R_{gt}^D + \sum_{b=1}^{N_b} R_{bt}^D \right) \leq P_{mt} + \mu_t - 3\delta_t \quad (30)$$

در مواردی ممکن است منابع تولید پراکنده و باتری‌ها نتوانند رزرو لازم را تأمین کنند و مسئله بدون جواب باشد. به این منظور، دو پارامتر UP و DOWN تعریف شده‌اند (می‌توانند بین صفر تا ۱ باشند) و روابط (۲۹) و (۳۰) به صورت (۳۱) و (۳۲) بازنویسی شده‌اند. اگر  $UP=DOWN=1$  باشد و قیود (۳۱) و (۳۲) ارضا شوند، طبق قانون سه سیگما، جزیره‌ای شدن احتمال  $99.7\%$  تضمین می‌شود؛ اما اگر منابع تولید پراکنده و باتری‌ها این قیود را ارضا نکنند و مسئله جواب‌دار نباشد، مقادیر UP و DOWN آنقدر کاهش داده می‌شوند تا برای مسئله جواب پیدا شود. این کار به معنای کاهش احتمال جزیره‌ای شدن موفق است. ذخیره لازم برای جزیره‌ای شدن موفق به صورت

$$0 \leq P_{bt}^C \leq P_b^{C,max} u_{bt}^C \quad \forall b, \forall t \quad (7)$$

$$0 \leq P_{bt}^D \leq P_b^{D,max} u_{bt}^D \quad \forall b, \forall t \quad (8)$$

$$u_{bt}^D + u_{bt}^C \leq 1 \quad \forall b, \forall t \quad (9)$$

$$SOC_{bt} = SOC_{b,t-1} + P_{bt}^C \cdot \eta_b^C \cdot \Delta t - P_{bt}^D \cdot \eta_b^D \cdot \Delta t \quad \forall b, \forall t \quad (10)$$

$$SOC_b^{min} \leq SOC_{bt} \leq SOC_b^{max} \quad \forall b, \forall t \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^{N_t} P_{bt}^D = \sum_{t=1}^{N_t} P_{bt}^C \quad \forall b \quad (12)$$

$$P_{bt} = P_{bt}^D - P_{bt}^C \quad \forall b, \forall t \quad (13)$$

$$0 \leq P_{mt}^B \leq P_m^{max} \cdot u_{mt}^B \quad \forall t \quad (14)$$

$$0 \leq P_{mt}^S \leq P_m^{max} \cdot u_{mt}^S \quad \forall t \quad (15)$$

$$u_{mt}^B + u_{mt}^S \leq 1 \quad \forall t \quad (16)$$

$$P_{mt} = P_{mt}^B - P_{mt}^S \quad \forall t \quad (17)$$

$$R_{gt}^U \leq P_g^{max} u_{gt} - P_{gt} \quad \forall g, \forall t \quad (18)$$

$$R_{gt}^U \leq R_g^{U,max,\tau} u_{gt} \quad \forall g, \forall t \quad (19)$$

$$R_{gt}^D \leq P_{gt} - P_g^{min} u_{gt} \quad \forall g, \forall t \quad (20)$$

$$R_{gt}^D \leq R_g^{D,max,\tau} u_{gt} \quad \forall g, \forall t \quad (21)$$

$$R_{bt}^U \leq P_b^{D,max} u_{bt} - P_{bt} \quad \forall b, \forall t \quad (22)$$

$$R_{bt}^U \leq \eta_b^D \cdot (SOC_{bt} - SOC_{bt}^{min}) / \tau \quad \forall b, \forall t \quad (23)$$

$$R_{bt}^D \leq P_b^{C,max} u_{bt} + P_{bt} \quad \forall b, \forall t \quad (24)$$

$$R_{bt}^U \leq (1/\eta_b^D) \cdot (SOC_{bt}^{max} - SOC_{bt}) / \tau \quad \forall b, \forall t \quad (25)$$

قیود رزرو چرخان لازم برای جزیره‌ای شدن موفق: در

رابطه (۲۶)،  $\Delta N_t^D$  خطای پیش‌بینی بار خالص را بیان می‌کند که برابر با مجموع خطای پیش‌بینی بار و منابع تجدیدپذیر است. ذخیره موردنیاز جزیره‌ای شدن موفق برابر  $P_{mt} + \Delta N_t^D$  است؛ بنابراین، قید (۲۷) باید برقرار باشد. فرض شده است خطای پیش‌بینی توان منابع تجدیدپذیر (باد و فتوولتاییک) به صورت متغیرهای مستقل با توزیع احتمالی نرمال می‌توانند مدل شوند؛ بنابراین، خطای پیش‌بینی بار

موجود در ریزشکبه، ذخیره لازم برای جزیره‌ای شدن موفق را نتوانند تأمین کنند، سه روش کلی وجود دارد:

(۱) از مشارکت بار به عنوان رزرو استفاده نشود

( $R_t^{Dres} = 0$ ):  $R_t^{Dres}$  بیان‌کننده مقدار ذخیره بار در پرید  $t$  است. در این حالت باید به  $PSI$  مرحله نخست قانع شد. این روش در [۷] و [۱۵] بررسی شده است. در این حالت، هزینه‌ای برای رزرو بار پرداخت نمی‌شود؛ اما اگر در زمان جزیره‌ای شدن، مقدار رزرو لازم در محدوده بین  $R_t^{DG+BT}$  تا  $R_t^{max}$  باشد (باتوجه به شکل (۲))،  $R_t^{DG+BT}$  بیان‌کننده مقدار ذخیره‌ای است که با منابع تولید پراکنده و باتری‌ها تأمین شده است، مثلاً نقطه  $C$ ، آنگاه برای حفظ پایداری ریزشکبه باید به اجبار از قطع اضطراری بار استفاده شود (به اندازه  $C - R_t^{DG+BT}$ ). شایان ذکر است در عمل، قیمت قطع اضطراری بار بسیار بیشتر از مجموع قیمت آمادگی و فراخوانی ذخیره بار است.

(۲) آنقدر ذخیره بار در نظر گرفته شود تا همه ذخیره لازم برای جزیره‌ای شدن موفق تأمین شود: در این روش، هزینه ذخیره بار به هزینه بهره‌برداری اضافه می‌شود و اگر در زمان جزیره‌ای شدن نیز مقدار رزرو لازم در محدوده  $R_t^{DG+BT}$  تا  $R_t^{max}$  باشد، مثلاً نقطه  $C$ ، آنگاه برای حفظ پایداری ریزشکبه باید رزرو بار فراخوانی شود (به اندازه  $C - R_t^{DG+BT}$ ) و هزینه فراخوانی باید پرداخت شود؛ اما در این روش هرگز به قطع اضطراری بار نیاز نخواهد شد.

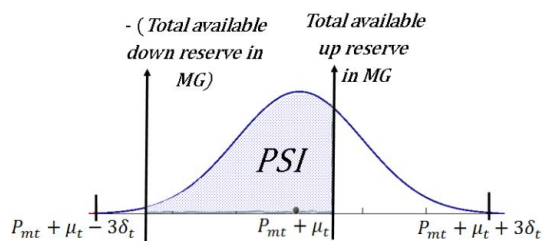
(۳) انتخاب مقدار بهینه  $R_t^{Dres}$ : بخشی از محدوده بین  $R_t^{DG+BT}$  تا  $R_t^{max}$  رزرو بار در نظر گرفته شود. در این روش، هزینه رزرو بار (متناسب با  $R_t^{Dres}$ ) به هزینه بهره‌برداری اضافه می‌شود. اگر در زمان جزیره‌ای شدن، مقدار رزرو لازم در محدوده  $R_t^{DG+BT}$  تا  $R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres}$  باشد، مثلاً نقطه  $B$ ، آنگاه برای حفظ پایداری ریزشکبه باید به اندازه  $B - R_t^{DG+BT}$  رزرو بار فراخوانی شود؛ درحالی‌که اگر در زمان جزیره‌ای شدن، مقدار رزرو لازم در محدوده بین  $R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres}$  تا  $R_t^{max}$  باشد، مثلاً نقطه  $C$ ، آنگاه برای حفظ پایداری ریزشکبه باید همه رزرو بار ( $R_t^{Dres}$ )، فراخوانی و به اندازه  $C - (R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres})$  نیز قطع بار اضطراری انجام شود.

رابطه (۳۳) بیان می‌شود. در شکل (۱)،  $R_t^{Req}$  (تابع توزیع نرمال رزرو لازم) نمایش داده شده است. بخشی از مساحت که متناظر با مجموع رزرو تأمین‌شده با منابع تولید پراکنده و باتری‌هاست (بخش آبی رنگ)، برابر با احتمال جزیره‌ای شدن موفق است. اطلاعات بیشتر درباره  $PSI$  در [۷] موجود است.

$$UP * (P_{mt} + \mu_t + 3 * \delta_t) \leq \sum_{g=1}^{N_g} R_{gt}^U + \sum_{b=1}^{N_b} R_{bt}^U \forall t \quad (31)$$

$$- \left( \sum_{g=1}^{N_g} R_{gt}^D + \sum_{b=1}^{N_b} R_{bt}^D \right) \leq DOWN * (P_{mt} + \mu_t - 3 * \delta_t) \forall t \quad (32)$$

$$R_t^{Req}(r) = N((P_{mt} + \mu_t), \delta_t^2) \quad (33)$$



شکل (۱): تابع توزیع نرمال ذخیره لازم و مفهوم  $PSI$

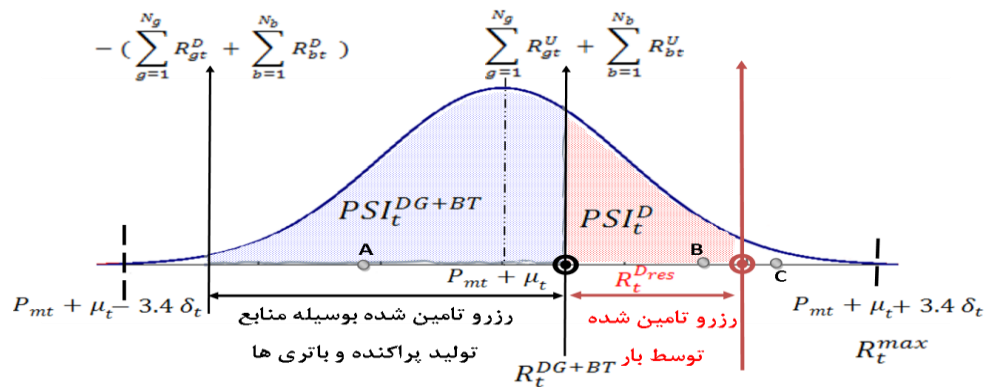
۳- مرحله دو: مشارکت بار و تعیین مقدار بهینه رزرو بار

### ۳-۱- تعریف مسئله

در این بخش، مشارکت بار در تأمین رزرو موردنیاز جزیره‌ای شدن موفق مدل‌سازی شده است. به این منظور، از ترکیب دو برنامه پاسخگویی بار استفاده شده است که توضیحات آنها در مقدمه بیان شدند. در مرحله نخست، از منابع تولید پراکنده و باتری‌ها برای تأمین رزرو استفاده شد. در مرحله دوم، ابتدا شاخص  $PSI$  متناظر با رزرو تأمین‌شده در مرحله نخست محاسبه می‌شود که در شکل (۲) با  $PSI_t^{DG+BT}$  نشان داده شده است. این شاخص بخشی از احتمال جزیره‌ای شدن موفق را بیان می‌کند که به کمک منابع تولید پراکنده و باتری‌ها به دست آمده است. اگر مشابه شکل ۲، در مرحله نخست، منابع تولید پراکنده و باتری‌های

همان‌طور که قبلاً گفته شد، هزینه آمادگی رزرو باید به ازای هر پریود پرداخت شود؛ اما هزینه فراخوانی رزرو و قطع اضطراری بار فقط در صورت جزیره‌ای شدن ناخواسته و با توجه به مقدار لازم به فراخوانی و قطع اضطراری پرداخت می‌شوند. هدف اصلی این مقاله، تعیین مقدار بهینه رزرو بار ( $R_t^{Dres}$ ) است؛ به طوری که مجموع هزینه‌های آمادگی رزرو، هزینه مورد انتظار فراخوانی بار و هزینه مورد

انتظار قطع اضطراری بار کمینه شود. هر مقدار از  $R_t^{Dres}$  متناظر با یک مقدار از  $PSI_t^D$  است؛ بنابراین، متناظر با مقدار بهینه  $R_t^{Dres}$ ، مقدار بهینه  $PSI_t^D$  نیز مشخص می‌شود.  $PSI_t^D$  بیان‌کننده بخشی از احتمال جزیره‌ای شدن موفق است که به کمک ذخیره بار به دست آمده است.



شکل (۲): توزیع نرمال رزرو مورد نیاز جزیره‌ای شدن موفق

از  $EC_t^{TOT,D}$  بیان‌کننده کل هزینه مورد انتظار است که باید در هر پریود زمانی صرف برنامه‌های پاسخگویی بار شود. در ادامه، هریک از اجزای رابطه (۳۴) به‌طور جداگانه فرمول‌بندی شده‌اند.

جدول (۱): هزینه‌های رزرو بار در هر حالت

حالات	هزینه قطع		
	هزینه اضطراری بار	هزینه فراخوانی بار	هزینه آمادگی بار
1	-	-	√
2	-	-	√
3	-	√	√
4	√	√	√

### ۳-۲-۱- هزینه آمادگی رزرو بار

هزینه آمادگی رزرو بار در هر حالت باید پرداخت شود و همچنین، باید تابعی از مقدار رزرو بار باشد؛ بنابراین، می‌توان آن را به صورت رابطه ۳۵ نوشت. تابع  $F1$  بیان‌کننده تابع هزینه آمادگی رزرو بار است.

$$\text{Min } EC_t^{TOT,D} = C_t^{Dres} + EC_t^{Dcal} + EC_t^{emg} \quad (34)$$

$$C_t^{Dres} = 100\% * F1(R_t^{Dres}) \quad \forall t \quad (35)$$

### ۳-۲- فرمول‌بندی مسئله

در هر پریود قطعاً یکی از چهار حالت زیر اتفاق می‌افتد: (۱) جزیره‌ای تشکیل نشود و ریزشبه در حالت متصل به شبکه باقی بماند. (۲) جزیره‌ای تشکیل بشود و ذخیره چرخان تأمین‌شده با تولید پراکنده‌ها و باتری‌ها برای حفظ پایداری ریزشبه کافی باشد. (۳) جزیره‌ای رخ بدهد و مجموع رزرو چرخان تولید پراکنده‌ها و باتری‌ها کافی نباشد و نیاز به فراخوانی رزرو بار باشد. (۴) جزیره‌ای تشکیل بشود، مجموع رزرو تأمین‌شده با تولید پراکنده‌ها، باتری‌ها و بار کافی نباشد و نیاز به قطع اضطراری بار شود. در جدول (۱)، هزینه‌هایی آمده است که باید به‌ازای مشارکت بار در هر حالت پرداخت شود. در مرحله نخست، مقدار رزرو تولیدات پراکنده و باتری‌ها تعیین شده است و از طرفی در مرحله دوم هدف اصلی، تعیین مقدار بهینه رزرو بار ( $R_t^{Dres}$ ) است؛ به طوری که مجموع هزینه‌های آمادگی رزرو ( $C_t^{Dres}$ )، هزینه مورد انتظار فراخوانی بار ( $EC_t^{Dcal}$ ) و هزینه مورد انتظار قطع اضطراری بار ( $EC_t^{emg}$ ) کمینه شود. بنابراین، تابع هدف به صورت رابطه (۳۴) بیان می‌شود.

### ۳-۲-۲- هزینه مورد انتظار فراخوانی رزرو بار

با توجه به شکل (۲)، اگر در زمان جزیره‌ای شدن، رزرو لازم در ناحیه  $R_t^{DG+BT}$  تا  $R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres}$  باشد، مثلاً نقطه B، آنگاه برای حفظ پایداری ریزشکه مقدار ذخیره‌ای که باید فراخوانی شود (یعنی  $R_t^{Dcal}$ )، برابر با  $R_t^{DG+BT} - B$  باشد؛ درحالی‌که اگر در زمان جزیره‌ای شدن، مقدار رزرو لازم در محدوده  $R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres}$  تا  $R_t^{max}$  باشد، مثلاً نقطه C، آنگاه مقدار  $R_t^{Dcal}$  باید برابر با  $R_t^{Dres}$  باشد. درواقع مقدار  $R_t^{Dcal}$  عدم قطعیت دارد و ممکن است در لحظه وقوع جزیره‌ای ناخواسته در هر جای بازه زیر باشد.

$$0 \leq R_t^{Dcal} \leq R_t^{Dres} \forall t \quad (36)$$

بنابراین، برای تعیین هزینه مورد انتظار فراخوانی رزرو بار، سناریوهای مختلفی در نظر گرفته شده است. تابع  $\psi(z)$  که در رابطه (۳۷) آمده است، مساحت زیر منحنی  $R_t^{Req}$  در بازه منفی بی‌نهایت تا یک نقطه معین را محاسبه می‌کند. در شکل (۳) بخشی از شکل (۲) (تابع  $R_t^{Req}$ ) در محدوده  $R_t^{DG+BT}$  تا  $R_t^{max}$  نشان داده شده است. طبق مفهوم تابع توزیع هر نقطه روی محور افقی شکل (۲)، یک سناریو و محور افقی شکل (۲) نیز احتمال وقوع آن است و طبق مفهوم مسئله، سناریوهایی به فراخوانی رزرو نیاز دارند که در ناحیه  $R_t^{DG+BT}$  تا  $R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres}$  وجود دارند و در این مقاله به آنها سناریوهای دسته اول می‌گوییم. همچنین، سناریوهایی که در ناحیه  $(R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres})$  تا  $R_t^{max}$  قرار دارند، به قطع اضطراری بار نیاز دارند. در این مقاله به اینها سناریوهای دسته دوم می‌گوییم. سناریوهای دسته اول به تعداد  $N_s$  سناریو تقسیم شده و مطابق شکل (۳)، احتمال هر سناریو ( $w_s$ ) برابر با مساحت ناحیه همان سناریو است که طبق رابطه (۳۸) محاسبه می‌شود. سناریوهای دسته دوم به تعداد  $N_{ss}$  سناریو تقسیم شده که احتمال هر سناریو ( $v_{ss}$ ) برابر با مساحت ناحیه همان سناریو است که طبق رابطه (۳۹) محاسبه می‌شود. گفتنی است برای جلوگیری از پیچیده شدن روابط، دو دسته سناریو در نظر گرفته شده است.  $R_{s,t}^{Dcal}$  بیان‌کننده مقدار رزرو فراخوانی‌شده در سناریوی sام است که در

سناریوهای دسته اول با رابطه (۴۰) تعیین شده و به‌ازای تمام سناریوهای دسته دوم، برابر  $R_t^{Dres}$  است.  $R_{ss,t}^{emg}$  نیز بیان‌کننده مقدار لازم برای قطع اضطراری بار در سناریوی sام است. درنهایت، هزینه مورد انتظار فراخوانی رزرو بار به‌صورت رابطه (۴۱) نوشته می‌شود. بخش نخست بیان‌کننده هزینه توان فراخوانی‌شده برای سناریوهای دسته اول و بخش دوم بیان‌کننده هزینه توان فراخوانی‌شده برای سناریوهای دسته دوم است. F2 بیان‌کننده تابع هزینه فراخوانی رزرو بار است.

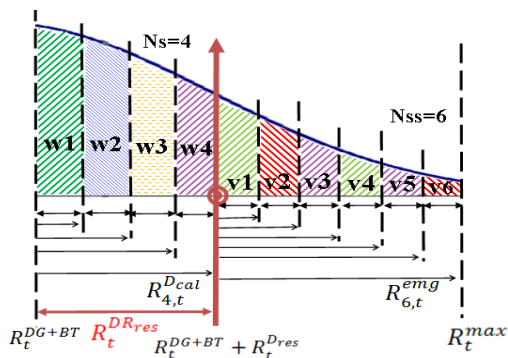
$$\psi(z) = \int_{-\infty}^z R_t^{Req}(r)(dr) \quad (37)$$

$$w_s = \psi(R_t^{DG+BT} + R_{s,t}^{Dcal}) - \psi(R_t^{DG+BT} + R_{s-1,t}^{Dcal}), s = 1, 2, \dots, N_s \forall t \quad (38)$$

$$v_{ss} = \psi(R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres} + R_{ss,t}^{emg}) - \psi(R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres} + R_{ss-1,t}^{emg}), s = 1, 2, \dots, N_{ss} \forall t \quad (39)$$

$$R_{s,t}^{Dcal} = s * \frac{R_t^{Dres}}{N_s}, s = 1, 2, \dots, N_s, R_{0,t}^{Dcal} = 0 \quad (40)$$

$$EC_t^{Dcal} = PI_t * \left( \sum_{s=1}^{N_s} (w_s * F2(R_{s,t}^{Dcal})) \right) + PI_t * \left( \sum_{ss=1}^{N_{ss}} (v_{ss} * F2(R_t^{Dres})) \right) \forall t \quad (41)$$



شکل (۳): سناریوهای فراخوانی رزرو و قطع اضطراری بار



$$\begin{aligned}
 EC_t^{TOT.D} &= F1(R_t^{Dres}) + PI_t \\
 &* \left( \sum_{s=1}^{N_s} \left( w_s * F2 \left( s * \frac{R_t^{Dres}}{N_s} \right) \right) \right) \\
 &+ PI_t * \left( \sum_{ss=1}^{N_{ss}} (v_{ss}) \right) * F2(R_t^{Dres}) \\
 &+ PI_t \\
 &* \left( \sum_{ss=1}^{N_{ss}} (v_{ss}) \right) \\
 &* F3 \left( SS \right. \\
 &\left. * \frac{R_t^{max} - (R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres})}{N_{ss}} \right) \Bigg) \quad (45)
 \end{aligned}$$

#### ۴- استراتژی دو مرحله‌ای پیشنهادی

در شکل (۴)، استراتژی دو مرحله‌ای پیشنهادی آمده است. در مدل‌سازی مرحله نخست از مدل اصلاح‌شده [۷] استفاده شده است؛ اما می‌توان در مرحله اول هر روش برنامه‌ریزی دلخواهی را جایگزین کرد. در مرحله دوم، برخی خروجی‌های مرحله نخست (۱- توان مبادله‌شده با شبکه در هر ساعت و ۲- میزان رزرو چرخان فراهم‌شده با باتری‌ها و تولید پراکنده‌ها در ریزش‌بکه در هر پریود) و دیگر پارامترهای لازم (۳- مشخصات تابع توزیع خطای پیش‌بینی بار و منابع تجدیدپذیر، ۴- احتمال وقوع جزیره‌ای ناخواسته در هر پریود و ۵- قیمت‌های مربوط به مشارکت بار) به‌عنوان ورودی دریافت می‌شوند. براساس خروجی‌های مرحله نخست،  $PSI_t^{DG+BT}$  طبق رابطه (۴۶) محاسبه می‌شود. تابع هدف پیشنهادی (۴۵)، با در نظر گرفتن قیود (۳۶) تا (۴۰)، (۴۲) و (۴۳) حل می‌شود تا مقدار بهینه  $R_t^{Dres}$  به دست آید. همان‌طور که گفته شد، مرحله دوم، مستقل از مرحله یک است و تابع هدف و قیود خاص خودش را دارد؛ اما باید توجه شود هزینه رزرو بار که بعد از اتمام مرحله دوم و طبق رابطه (۳۵) به دست می‌آید، به هزینه بهره‌برداری به‌دست‌آمده از مرحله یک افزوده شود تا هزینه کل بهره‌برداری به دست آید.  $PSI_t^D$  نیز طبق رابطه (۴۷) محاسبه می‌شود. شایان ذکر است افزودن مشارکت بار در مرحله دوم، در اصل بهینه‌بودن مسئله اختلالی ایجاد

#### ۳-۲-۳- هزینه مورد انتظار قطع اضطراری بار

طبق شکل (۲)، اگر در زمان جزیره‌ای شدن، مقدار رزرو لازم در محدوده  $R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres}$  تا  $R_t^{max}$  باشد، مثلاً نقطه C، آنگاه مقدار لازم برای قطع اضطراری بار ( $R_t^{emg}$ ) برابر با  $C - (R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres})$  است. مقدار  $R_t^{emg}$  ممکن است در لحظه جزیره‌ای شدن ناخواسته در هر جای بازه زیر باشد:

$$0 < R_t^{emg} < (R_t^{max} - (R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres})) \quad (42)$$

مقدار قطع اضطراری بار برای سناریوهای مختلف ( $R_{ss,t}^{emg}$ ) طبق رابطه (۴۳) تعیین می‌شود.  $R_{6,t}^{emg}$  بیان‌کننده مقدار باری است که باید در پریود t و در سناریوی ششم به صورت اضطراری قطع شود. تابع هزینه مورد انتظار قطع اضطراری بار نیز به صورت رابطه (۴۴) نوشته می‌شود.  $F3$  بیان‌کننده تابع هزینه قطع اضطراری بار است.

$$\begin{aligned}
 R_{ss,t}^{emg} &= SS * \frac{R_t^{max} - (R_t^{DG+BT} + R_t^{Dres})}{N_{ss}}, SS \\
 &= 1, 2, \dots, N_{ss}, R_{0,t}^{emg} = 0 \quad (43)
 \end{aligned}$$

$$EC_t^{emg} = PI_t * \left( \sum_{ss=1}^{N_{ss}} (v_{ss} * F3(R_{ss,t}^{emg})) \right) \quad (44)$$

#### ۳-۲-۳- کل هزینه مورد انتظار (تابع معیار)

با جایگذاری روابط (۳۵)، (۴۱) و (۴۴) در رابطه (۳۴) و با در نظر گرفتن روابط (۴۳) و (۴۰)، رابطه (۳۴) به صورت رابطه (۴۵) برحسب  $R_t^{Dres}$  مرتب می‌شود. با توجه به اینکه هدف اصلی مرحله دوم، یافتن مقداری از  $R_t^{Dres}$  است که به‌ازای آن، مقدار  $EC_t^{TOT.D}$  کمینه شود، تابع هدف مسئله در مرحله دوم، کمینه‌کردن رابطه (۴۵) است. گفتنی است تنها پارامتر احتمالاتی که علاوه بر تابع توزیع خطای بار خالص نیاز داریم، احتمال جزیره‌شدن در هر ساعت است و بقیه احتمالات از محاسبه به دست می‌آیند.

۳۰ ثانیه به جواب بهینه همگرا شده است. ورودی‌های لازم برای مرحله دوم عبارت‌اند از ۱- مقدار توان تبادل‌شده با شبکه بالادستی در هر پریود ( $P_{mt}$ ) (خروجی از مرحله نخست). ۲- مقدار کل رزرو بالا و پایین تأمین‌شده با تولید پراکنده‌ها و باتری‌ها (خروجی از مرحله نخست). ۳- مشخصات تابع توزیع خطای بار خالص: می‌توان از هر نوع تابع توزیع دلخواهی برای  $\Delta N_t^D$  استفاده کرد؛ اما در اینجا مانند [۷] از تابع توزیع نرمال استفاده شده است. ۴- احتمال جزیره‌ای شدن (PI): با توجه به شرایط ریزشبکه، اطلاعات تاریخی و تجربیات موجود درباره سیستم، احتمال وقوع جزیره‌ای شدن در هر پریود مشخص می‌شود [۲۰]. این مقدار از نظر تئوری می‌تواند بین صفر تا یک باشد. در اینجا طیف گسترده‌ای از احتمالات مختلف در نظر گرفته شده و در ادامه، آنالیز حساسیت نسبت به مقادیر مختلف PI انجام شده است. ۵- قیمت‌های مشارکت بار: توابع F1, F2, F3 به ترتیب بیان‌کننده توابع هزینه آمادگی رزرو، فراخوانی رزرو و هزینه قطع اضطراری بارند که با توجه به ماهیت مصرف‌کنندگان ریزشبکه و نوع قرارداد بین بهره‌بردار ریزشبکه و مصرف‌کنندگان تعیین می‌شوند. در این مقاله برای جلوگیری از پیچیدگی غیرضروری مسئله، این توابع به صورت خطی در نظر گرفته شده‌اند (روابط ۴۸ تا ۵۰). با توجه به نوع ریزشبکه و مصرف‌کنندگان آن، مقادیر Q1, Q2, Q3 می‌توانند متفاوت باشند. برای اطلاعات بیشتر به [۲۱] می‌توان مراجعه کرد. همچنین در همه بررسی‌ها  $N_{ss} = N_s = 100$  در نظر گرفته شده است. گفتنی است هرچه مقادیر Ns و Nss بیشتر باشند، یعنی تعداد سناریوها بیشتر باشد، دقت نتایج شبیه‌سازی بیشتر خواهد بود؛ اما تعداد محاسبات بالا می‌رود و در نتیجه، سرعت فرایند حل مسئله کاهش می‌یابد. با شبیه‌سازی‌های متعدد با مقادیر مختلف Ns و Nss مشخص شد به‌ازای مقادیر بالای ۱۰۰، عملاً تغییری در نتایج ایجاد نمی‌شود و دقت نتایج بالاتر نمی‌رود؛ بنابراین، در شبیه‌سازی‌ها مقدار ۱۰۰ در نظر گرفته شد.

$$F1(R_t^{Dres}) = Q1 * R_t^{Dres} \quad (48)$$

$$F2(R_t^{Dcat}) = Q2 * R_t^{Dcat} \quad (49)$$

$$F3(R_t^{emg}) = Q3 * R_t^{emg} \quad (50)$$

نمی‌کند؛ زیرا بار جنبه رفاهی و اقتصادی دارد و در عمل ذخیره بار گران‌تر از ذخیره DG و باتری است. بنابراین، استفاده از بار به‌عنوان ذخیره در اولویت آخر قرار دارد [۱۵]. گفتنی است مدل ارائه‌شده جامعیت دارد و کاملاً مستقل از نوع تابع توزیع است و هر تابع توزیع دلخواهی را می‌توان جایگزین کرد. در این مقاله همان‌طور که در مقدمه گفته شد، مرجع [۷] توسعه داده شده است؛ به همین دلیل، در این مقاله از تابع توزیع [۷] استفاده شده است.

$$PSI_t^{DG+BT} = \psi \left( \sum_{g=1}^{N_g} R_{gt}^U + \sum_{b=1}^{N_b} R_{bt}^U \right) - \psi \left( - \left( \sum_{g=1}^{N_g} R_{gt}^D + \sum_{b=1}^{N_b} R_{bt}^D \right) \right) \quad \forall t \quad (46)$$

$$PSI_t^D = \psi \left( \sum_{g=1}^{N_g} R_{gt}^U + \sum_{b=1}^{N_b} R_{bt}^U + R_t^{Dres} \right) - \psi \left( \sum_{g=1}^{N_g} R_{gt}^U + \sum_{b=1}^{N_b} R_{bt}^U \right) \quad \forall t \quad (47)$$

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

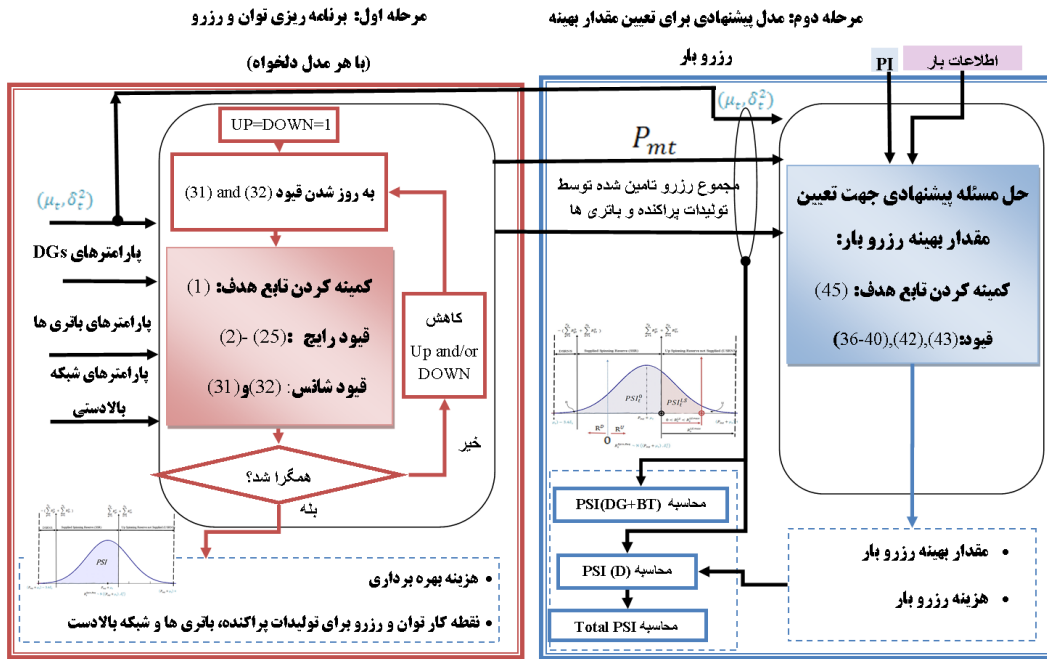
### ۵-۱- اطلاعات شبکه مورد مطالعه

شبکه نمونه و همه اطلاعات لازم برای مرحله نخست از [۷] گرفته شده‌اند. پارامتر  $PSI^{req}$  برابر ۹۹٪ در نظر گرفته شده است.  $PSI^{req}$  بیان‌کننده مقدار لازم احتمال جزیره‌ای شدن موفق است. در شکل (۵)، ریزشبکه مورد مطالعه و مشخصات اجزای آن نشان داده شده است. کلیه شبیه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار GAMS، کد و با استفاده از حل‌کننده MILP CPLEX<sup>۲</sup> حل شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها روی کامپیوتر COREi5 مبتنی بر ویندوز و ۲/۶۶ گیگاهرتز با ۴ گیگابایت RAM انجام شده‌اند و مسئله در مدت حدود

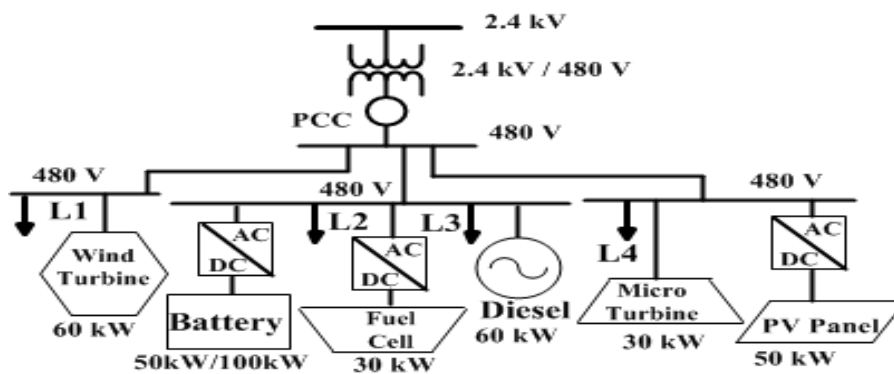
۱-۵- خروجی‌های مرحله نخست

بسیاری از ساعات، مقدار  $PSI^{TOT}$  بسیار کم و حتی نزدیک به صفر بوده است؛ مثلاً در ساعت ۲۰، ۹۵ کیلووات توان از شبکه بالادستی دریافت شده، درحالی‌که  $PSI^{DG+BT}$  در این ساعت برابر با صفر است.

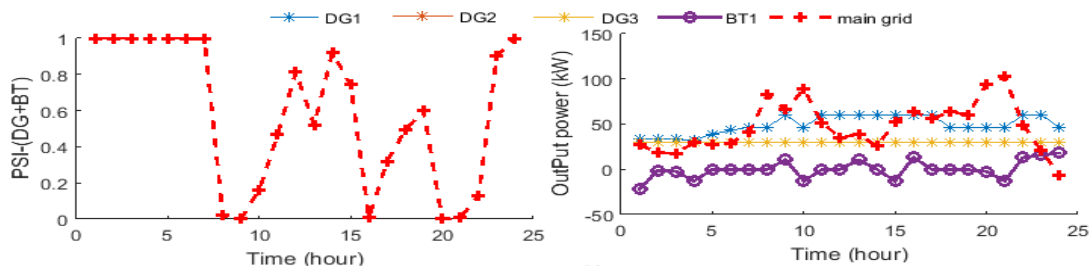
خروجی‌های مرحله نخست در شکل (۶) آمده‌اند. در حالت کلی  $PSI^{TOT}$  برابر با مجموع  $PSI^{DG+BT}$  و  $PSI^D$  است. در مرحله نخست، رزرو بار لحاظ نمی‌شود؛ بنابراین، در مرحله نخست،  $PSI^{TOT}$  برابر با  $PSI^{DG+BT}$  است.



شکل (۴): استراتژی دو مرحله‌ای پیشنهادی



شکل (۵): ریزشبهه مورد مطالعه



شکل (۶): خروجی‌های مرحله نخست

## ۵-۲- آنالیز تابع معیار پیشنهادی

در شکل (۷)، هزینه‌های مربوط به رزرو بار، فراخوانی بار، قطع اضطراری بار و مجموع کل هزینه مورد انتظار ناشی از مشارکت بار، برای ساعت ۲۰، به‌ازای مقادیر مختلف رزرو بار نشان داده شده و در ادامه، از نظر ریاضی تحلیل شده‌اند.

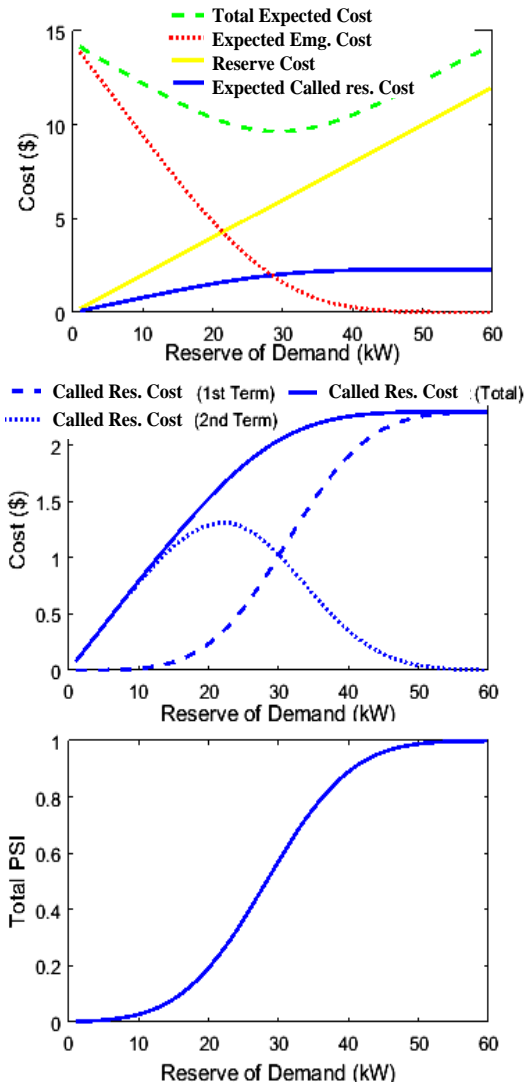
**هزینه آمادگی رزرو:** با توجه به شکل (۷)، هزینه آمادگی رزرو، به‌صورت خطی و متناسب با مقدار رزرو است. با توجه به روابط (۳۵) و (۴۸) توجیه‌پذیر است.

**هزینه مورد انتظار فراخوانی رزرو:** طبق رابطه (۴۱) دو بخش دارد. بخش نخست: طبق شکل (۷) (خط چین)، یک منحنی افزایشی است که شیب افزایش آن رو به کاهش است. طبق بخش نخست رابطه (۴۱)، هرچه مقدار  $R_t^{Dres}$  بیشتر باشد، اندازه ضریب‌های احتمالاتی آن ( $w_s$ ) افزایش می‌یابد؛ اما شیب این افزایش، متناسب با مساحت تابع توزیع نرمال است (که قبل از میانه، افزایشی و بعد از آن کاهش‌ی است)؛ اما در کل فقط افزایشی است. **ترم دوم** (نقطه‌چین): طبق بخش دوم رابطه (۴۱)، هرچه مقدار  $R_t^{Dres}$  بیشتر باشد، ضریب‌های احتمالاتی آن، کاهش و از طرفی مقدار انرژی فراخوانی شده و هزینه آن افزایش می‌یابد. **مجموع هر دو بخش:** از جمع دو منحنی بخش اول و دوم به دست می‌آید و طبق شکل (۷)، یک منحنی افزایشی است که به اشباع می‌رود.

**هزینه مورد انتظار قطع اضطراری بار** (نقطه‌چین): طبق شکل (۷)، همان‌طور که انتظار می‌رود، یک منحنی کاهش‌ی است؛ زیرا طبق رابطه (۴۴) با افزایش  $R_t^{Dres}$ ، مقدار  $R_t^{emg}$  و ضریب احتمالی آن کاهش می‌یابد.

**کل هزینه مورد انتظار** (خط‌چین): از جمع سه هزینه بالا به دست می‌آید و طبق شکل (۷)، یک منحنی است که یک نقطه کمینه دارد. مقدار بهینه رزرو بار ( $R_t^{Dres}$ ) همان نقطه متناظر با نقطه کمینه خواهد بود و هدف مسئله نیز یافتن همین نقطه است. این مقدار بهینه به پارامترهای مختلف، مانند احتمال جزیره‌ای شدن ناخواسته ( $PI_t$ )، قیمت آمادگی رزرو بار، قیمت فراخوانی رزرو بار و قیمت قطع

اضطراری بار بستگی دارد؛ بنابراین در ادامه، آنالیز حساسیت نسبت به مقادیر مختلف این پارامترها انجام شده است.



شکل (۷): هزینه‌های مشارکت بار و مقدار  $PSI^{TOT}$

## ۵-۳- آنالیز حساسیت نسبت به قیمت‌های مشارکت بار (Q1, Q2, Q3)

در شکل (۸)، مقدار بهینه رزرو بار و  $PSI^{TOT}$  متناظر با آن، به‌ازای مقادیر مختلف قیمت‌های رزرو بار ( $Q1$  و  $Q2$ ) نشان داده شده‌اند. مطابق انتظار، هرچه مقدار قیمت آمادگی رزرو ( $Q1$ ) نسبت به قیمت فراخوانی رزرو ( $Q2$ ) بیشتر شود، مقدار بهینه رزرو بار، کمتر و طبیعتاً مقدار  $PSI^{TOT}$  متناظر با آن نیز کمتر شده است. به بیان دیگر، زمانی که قیمت آمادگی رزرو بیشتر باشد، مدل ترجیح می‌دهد مقدار رزرو کمتری خریداری کند و این کاملاً منطقی است.

جدول (۲) هزینه یکساله مشارکت بار برای روش‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به جدول، در روش ۱، هزینه یکساله برای رزرو و فراخوانی بار برابر صفر است؛ درحالی‌که در روش ۲، هزینه یکساله برای قطع اضطراری بار برابر صفر است. در روش ۳، هیچ هزینه‌ای برابر صفر نیست؛ اما کمترین مقدار هزینه یکساله برای مجموع هزینه رزرو، فراخوانی و قطع اضطراری بار حاصل شده است. بنابراین، با استفاده از روش پیشنهادی، کمترین مجموع هزینه رزرو بار و قطع اضطراری بار حاصل می‌شود.

جدول (۲): هزینه یکساله مشارکت بار برای هر روش

(دلار)

هزینه‌ها / روش‌ها	روش ۱ (مرجع [۷])	روش ۲ (روش پیشنهادی)	روش ۳ (روش پیشنهادی)
هزینه رزرو بار	۰	۳۶۵۰	۱۷۴۰
هزینه فراخوانی رزرو	۰	۳۰۰۷	۱۵۲۸
هزینه قطع اضطراری بار	۵۹۳۲	۰	۱۹۷۳
مجموع	۵۹۳۲	۶۶۵۷	۵۲۴۱

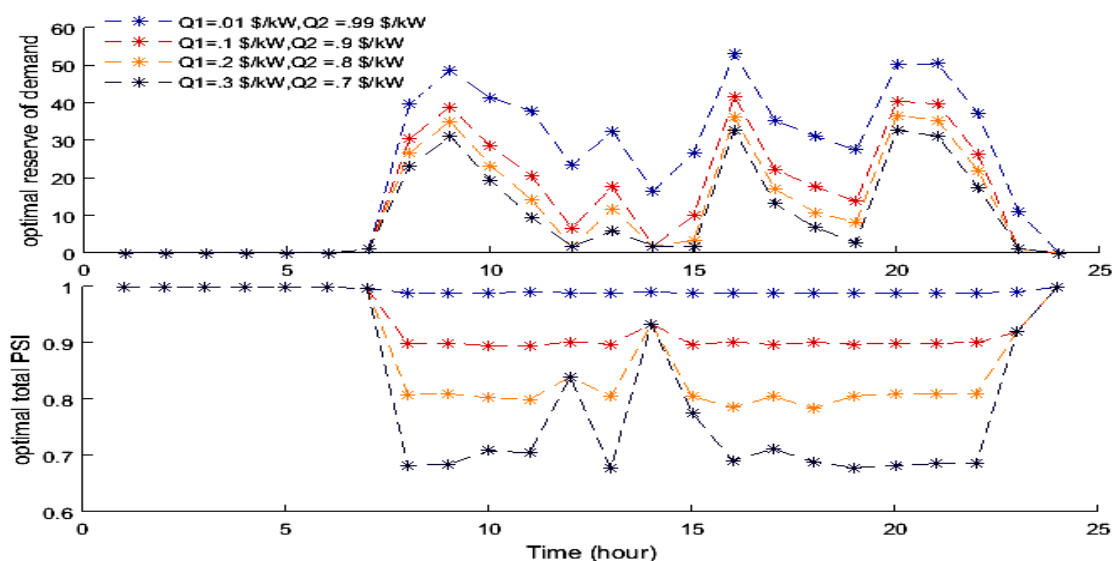
در شکل (۹)، مقدار بهینه رزرو بار، به‌ازای مقادیر مختلف قیمت قطع اضطراری بار (Q3) نشان داده شده است. مطابق انتظار، هرچه مقدار قیمت قطع اضطراری بار (Q3) بیشتر شود، مقدار بهینه رزرو بار بیشتر شده است. به بیان دیگر، زمانی که قیمت قطع اضطراری بار بیشتر باشد، مدل ترجیح می‌دهد مقدار رزرو بیشتری خریداری کند تا احتمال قطع اضطراری بار کمتر شود و این کاملاً منطقی است.

### ۳-۵- آنالیز حساسیت نسبت به احتمال جزیره‌ای شدن (PI)

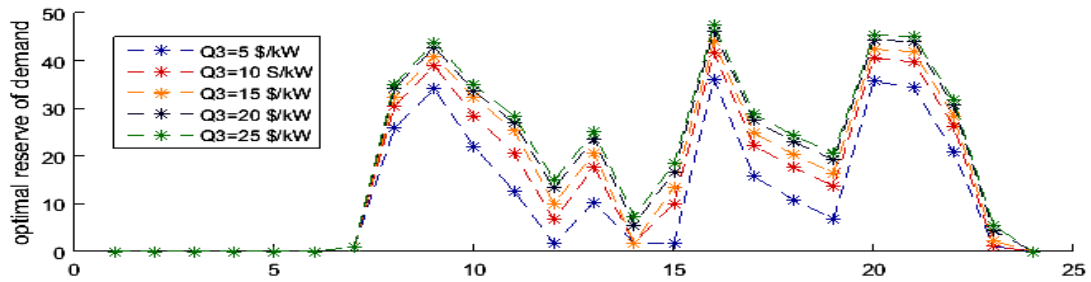
در شکل (۱۰)، مقدار بهینه ذخیره بار به‌ازای مقادیر مختلف PI آمده است. در این شکل مشخص است هرچه مقدار احتمال جزیره‌ای شدن (PI) بیشتر شود، مقدار بهینه رزرو بار بیشتر شده است. درواقع، مدل ترجیح می‌دهد مقدار رزرو بیشتری خریداری کند تا احتمال قطع اضطراری بار کمتر شود.

### ۴-۵- مقایسه روش‌های مختلف

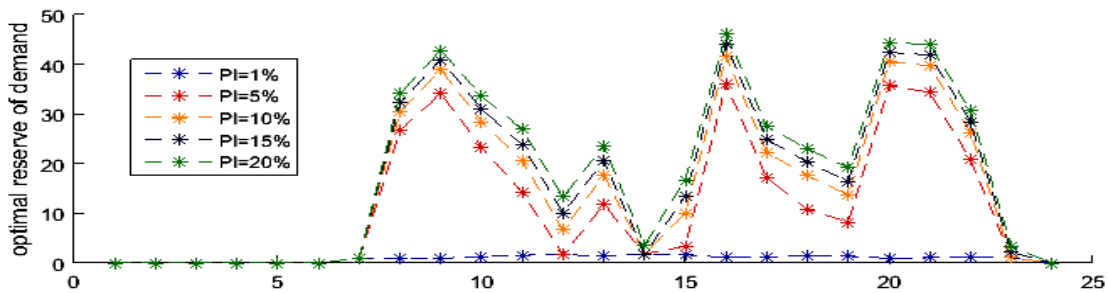
در بخش ۳-۱ (بخش تعریف مسئله)، سه روش برای مشارکت بار توضیح داده شد. در این بخش، کارایی این سه روش، مقایسه و به‌طور ویژه، روش مرجع [۷] (روش ۱) با روش پیشنهادی این مقاله (روش ۳) مقایسه شده است.



شکل (۸): مقدار بهینه ذخیره بار و  $PSI^{TOT}$  متناظر با آن به‌ازای مقادیر مختلف قیمت‌های آمادگی و فراخوانی رزرو



شکل (۹): مقدار بهینه ذخیره بار به ازای مقادیر مختلف قیمت قطع بار



شکل (۱۰): مقدار بهینه ذخیره بار به ازای مقادیر مختلف PI

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، مشارکت بار در تأمین رزرو ریزش شبکه مدل سازی شده است و یک استراتژی دو مرحله ای برای برنامه ریزی ریزش شبکه با در نظر گرفتن جزیره ای شدن ناخواسته و عدم قطعیت های منابع تجدید پذیر و بار ارائه شد. در مرحله نخست، برنامه ریزی هم زمان توان و رزرو، انجام و سهم تولیدات پراکنده و باتری در تأمین توان و رزرو مشخص می شود. در مرحله دوم برای جبران کمبود تولید پراکنده ها و باتری ها در تأمین رزرو لازم برای جزیره ای شدن موفق، از مشارکت بار استفاده شده است. همچنین، برای تعیین مقدار بهینه رزرو بار، یک تابع معیار جدید ارائه شد؛ به طوری که کل هزینه مورد انتظار مربوط به مشارکت بار کمینه شود. مشارکت بار در مرحله دوم به گونه ای مدل سازی شده که این مرحله به صورت یک واحد مستقل است و به هر روش برنامه ریزی دلخواهی افزوده می شود که مشارکت بار را در نظر نگرفته است. مطالعات عددی متعددی انجام شد و نتایج به دست آمده بیان کننده صحت و کارآمدی مدل پیشنهادی اند. همچنین، آنالیز حساسیت نسبت به پارامترهای موثر بر تعیین مقدار

رزرو بار، مانند قیمت های مشارکت بار و احتمال جزیره ای شدن انجام شد.

## علائم اختصاری

$g$  اندیس واحدهای تولید پراکنده، مقدار آن از ۱ تا  $N_g$  است.

$d$  اندیس بارها (مصرف کنندگان)، مقدار آن از ۱ تا  $N_d$  است.

$b$  اندیس باتری ها، مقدار آن از ۱ تا  $N_b$  است.

$t$  اندیس بازه های زمانی، مقدار آن از ۱ تا  $N_t$  است.

$m$  اندیس بلوک های انرژی ارائه شده با واحدها، مقدار آن از ۱ تا  $N_m$  است.

$s, ss$  اندیس سناریوهای دسته اول / دسته دوم که مقدار آنها از ۱ تا  $N_s/N_{ss}$  است.

$N_g$  تعداد واحدهای تولید پراکنده

$N_d$  تعداد مصرف کنندگان

$N_b$  تعداد باتری ها

$N_t$  تعداد بازه های زمانی

$N_m$  تعداد بلوک های انرژی

- $N_s$  تعداد سناریوهای دسته اول  
 $N_{ss}$  تعداد سناریوهای دسته دوم  
 $u_{gt}$  اگر واحد  $g$  طی بازه  $t$  روشن باشد، برابر با ۱ است؛ در غیر این صورت برابر با ۰ است.  
 $u_{bt}^C$  اگر باتری  $b$  طی بازه  $t$  شارژ شود، برابر با ۱ است؛ در غیر این صورت برابر با ۰ است.  
 $u_{bt}^D$  اگر باتری  $b$  طی بازه  $t$  دشارژ شود، برابر با ۱ است؛ در غیر این صورت برابر با ۰ است.  
 $u_{bt}^B$  اگر ریزشبکه برای خرید توان از شبکه بالادستی برنامه‌ریزی شده است، برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است.  
 $u_{mt}^S$  اگر ریزشبکه برای فروش توان به شبکه بالادستی برنامه‌ریزی شده است، برابر با ۱ و در غیر این صورت ۰ است.  
 $p_{gt}(m)$  توان خروجی برنامه‌ریزی شده از  $m$  امین بلوک انرژی ارائه شده با واحد  $g$  طی بازه  $t$ . مقدار آن به  $p_{gt}^{max}(m)$  محدود است.  
 $p_{gt}$  توان خروجی برنامه‌ریزی شده از واحد  $g$  در بازه  $t$ .  
 $p_{mt}$  توان مبادله شده با شبکه بالادستی در بازه  $t$ .  
 $p_{mt}^B, p_{mt}^S$  توان خریداری شده / فروخته شده از / به شبکه بالادستی طی بازه  $t$ .  
 $p_{bt}^C, p_{bt}^D$  توان شارژ / دشارژ باتری  $b$  در بازه  $t$ .  
 $p_b^{C,max}, p_b^{D,max}$  بیشینه توان شارژ / دشارژ باتری  $b$ .  
 $p_{bt}$  توان خروجی باتری  $b$  در بازه  $t$ .  
 $SU_{gt}$  هزینه راه‌اندازی واحد  $g$  در بازه  $t$ .  
 $SOC_{bt}$  وضعیت شارژ باتری  $b$  در بازه  $t$ .  
 $SOC_{bt}^{min}, SOC_{bt}^{max}$  بیشینه / کمینه وضعیت شارژ باتری  $b$  در بازه  $t$ .  
 $SOC_b^{C,max}, SOC_b^{D,max}$  بیشینه شارژ / دشارژ باتری  $b$ .  
 $R_{gt}^U, R_{gt}^D$  رزرو چرخان بالا و پایین واحد  $g$  در بازه  $t$ .  
 $R_g^{U,max}, R_g^{D,max}$  بیشینه رزرو چرخان بالا و پایین که واحد  $g$  می‌تواند در زمان مناسب تأمین کند.  
 $R_{bt}^U, R_{bt}^D$  رزرو چرخان باتری  $b$  در بازه  $t$ .  
 $PI_t$  احتمال جزیره‌ای شدن در بازه  $t$ .  
 $PSI_t^{TOT}$  احتمال جزیره‌ای شدن موفق در بازه  $t$ .
- احتمال جزیره‌ای شدن موفق مربوط به مشارکت بار در بازه  $t$ .  
 $PSI_t^{DG+BT}$  احتمال جزیره‌ای شدن موفق مربوط به واحدهای تولید پراکنده و باتری‌ها در بازه  $t$ .  
 $C_{gt}(m)$  قیمت بلوک  $m$  انرژی ارائه شده با واحد  $g$  در بازه  $t$ .  
 $C_{bt}$  هزینه استهلاک باتری  $b$  در بازه  $t$ .  
 $C_{mt}^B, C_{mt}^S$  قیمت خرید / فروش انرژی از / به شبکه بالادستی در بازه  $t$ .  
 $A_g$  هزینه بهره‌برداری واحد  $g$  در نقطه  $P_g^{min}$ .  
 $Q_{gt}^U, Q_{gt}^D$  هزینه رزرو چرخان بالا و پایین واحد  $g$  در بازه  $t$ .  
 $Q_{bt}^U, Q_{bt}^D$  هزینه رزرو چرخان بالا و پایین باتری  $b$  در بازه  $t$ .  
 $p_g^{max}, p_g^{min}$  بیشینه / کمینه خروجی واحد  $g$  ام.  
 $\bar{P}_{WTt}, \bar{P}_{PVt}$  توان خروجی توربین بادی / فتوولتاییک در بازه  $t$ .  
 $P_{dt}$  توان مصرفی برنامه‌ریزی شده برای دیمانند  $j$  در بازه  $t$ .  
 $\Delta P_{WTt}, \Delta P_{PVt}$  خطای پیش‌بینی توان خروجی منبع بادی / فتوولتاییک در بازه زمانی  $t$ .  
 $\bar{N}_t^D$  بار خالص ریزشبکه در بازه  $t$ .  
 $\Delta N_t^D$  خطای پیش‌بینی بار خالص ریزشبکه در بازه  $t$ .  
 $\eta_b^C, \eta_b^D$  ضریب بازدهی شارژ / دشارژ باتری  $b$ .  
 $\Delta t$  مدت هر بازه زمانی.

## مراجع

- [1] G. Cardoso, M. Stadler, A. Siddiqui, C. Marnay, N. DeForest, A. Barbosa-Póvoa, *et al.*, "Microgrid reliability modeling and battery scheduling using stochastic linear programming," *Electric Power Systems Research*, Vol. 103, 2013.
- [2] K. Prakash Kumar and B. Saravanan, "Day ahead scheduling of generation and storage in a microgrid considering demand Side management," *Journal of Energy Storage*, Vol. 21, 2019.
- [3] Narges Parhizi, Moosa Marzband, Seyyed Maziar Mir Hosseini Moghaddam, Fateme Azari Nejadian, and Behnam Mohammadi Evatloo, "Implementation of Optimal System of Microgrids Energy Management " *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, vol. 6, 2015.
- [4] Mohammad Reza Ebrahimi and Nima Amjady, "Adaptive robust optimization framework for day-ahead microgrid scheduling," *International Journal*

- [13] Alireza Zakariazadeh, Shahram Jadid, and Pierluigi Siano, "Stochastic operational scheduling of smart distribution system considering wind generation and demand response programs," *Int J Electr Power Energy Syst*, 2014.
- [14] Surender Reddy Salkuti, "Day-ahead thermal and renewable power generation scheduling considering uncertainty," *Renewable Energy*, Vol. 131, 2019.
- [15] Amin Khodaei, "Microgrid optimal scheduling with multi-period islanding constraints," *IEEE Trans. power syst.*, Vol. 29, 2014.
- [16] Seon-Ju Ahn, Soon-Ryul Nam, Joon-Ho Choi, and Seung-II Moon, "Power scheduling of distributed generators for economic and stable operation of a microgrid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, 2013.
- [17] Paras Mandal Farshid Shariatzadeh, Anurag K. Srivastava, "Demand response for sustainable energy systems: A review, application and implementation strategy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015.
- [18] "Assessment of demand response and advanced metering," *FERC. Staff report August 7; 2006*.
- [19] Vito Calderaro, "Generation Rescheduling and Load Shedding in Distribution Systems Under Imprecise Information," *IEEE systems Journal*, 2016.
- [20] Si Young Lee, Young Gyu Jin, and Yong Tae Yoon, "Determining the Optimal Reserve Capacity in aMicrogrid With Islanded Operation," *IEEE Trans Power Sys.*, Vol. 31, 2016.
- [21] Alireza Zakariazadeh, Shahram Jadid, and Pierluigi Siano, "Smart microgrid energy and reserve scheduling with demand response using stochastic optimization," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 63, 2014.
- of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 107, 2019.
- [5] Farag K. Abo-Elyousr and A. M. Sharaf, "Optimal Scheduling of Interconnected AC/DC Combined Heat and Power System Microgrids with Multiple Fuel Options," *Energy Procedia*, Vol. 162, 2019.
- [6] Farid Hashemi, Mohamma Mohammadi, and Mehdi Allah bakhshi, "Design and setting of online controller for inverter based DGs in islanded microgrid " *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, vol. 9, 2018.
- [7] G Liu, M Starke, B Xiao, X Zhang, and K Tomsovic, "Microgrid optimal scheduling with chance-constrained islanding capability," *Electric Power Systems Research*, Vol. 145, 2017.
- [8] Ali Sefidgar-Dezfouli, Mahmood Joorabian, and Elaheh Mashhour, "A multiple chance-constrained model for optimal scheduling of microgrids considering normal and emergency operation," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 112, 2019.
- [9] Robin Broder Hytowitz and Kory W. Hedman, "Managing solar uncertainty in microgrid systems with stochastic unit commitment," *Electric Power Systems Research*, Vol. 119, 2015.
- [10] Özge Okur, Nina Voulis, Petra Heijnen, and Zofia Lukszo, "Aggregator-mediated demand response: Minimizing imbalances caused by uncertainty of solar generation," *Applied Energy*, Vol. 247, 2019/08/01/ 2019.
- [11] Chengsi Yong, Xiangyu Kong, Ying Chen, Quan Xu, and Li Yu, "An optimization method of active distribution network considering uncertainties of renewable DGs," *Energy Procedia*, Vol. 158, 2019.
- [12] M Ortega-Vazquez and D Kirschen, "Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 24, 2009.

---

<sup>1</sup> probability of successful islanding

<sup>2</sup> Solver



