

Demand Response Programs Modeling in Multiple Energy and Structure Management in Microgrids Equipped by Combined Heat and Power Generation**Majid Zare, Ph.D. Student, Seyed Amin Saeed, Assistant Professor, Hamidreza Akbari, Assistant Professor**Department of Electrical Engineering- Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran
majidzare@iauyazd.ac.ir, saied@iauyazd.ac.ir, h.akbari@iauyazd.ac.ir**Abstract**

Energy management in microgrids is done with different goals such as reducing operation costs. In this approach, the microgrid operator tries to manage energy in order to supply the energy required by consumers at the lowest possible cost, by determining the amount of energy generation by each of the available energy sources. These resources can generate electrical, thermal or combined energy. In this paper, energy and structure management in microgrids have been done with objectives such as reducing operation costs, reducing environmental pollution and improving technical indices such as reducing real power losses. For this purpose, it has been used from options such as demand response programs, storage devices, distributed generation resources such as combined heat and power generators, renewable sources such as wind and photovoltaic units and feeder reconfiguration. In this paper, the genetic algorithm, which is one of the most valid meta-heuristic algorithms, is used to solve the optimization problem. Numerical results show the efficiency of the proposed model.

Keywords: demand response program, energy and structure management, microgrid, reducing costs**Received:** 16 October 2021**Revised:** 9 January 2021**Accepted:** 7 February 2022**Corresponding Author:** Dr. Seyed Amin Saeed**Citation:** M. Zare, S.A. Saeed, H.R. Akbari, "Demand response programs modeling in multiple energy and structure management in microgrids equipped by combined heat and power generation", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 53, pp. 99-120, June 2023 (in Persian).

مدل‌سازی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در مدیریت چندگانه انرژی و ساختار در ریزشبکه‌های مجهز به تولیدکننده همزمان برق و حرارت

مجید زارع، دانشجوی دکتری، سید امین سعید، استادیار، حمیدرضا اکبری، استادیار

گروه مهندسی برق - واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران
majidzare@iauyazd.ac.ir, saied@iauyazd.ac.ir, h.akbari@iauyazd.ac.ir

چکیده: مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها با اهداف متفاوتی نظیر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری انجام می‌شود. در این رویکرد، بهره‌بردار ریزشبکه با تعیین میزان تولید انرژی توسط هر یک از منابع انرژی در دسترس، سعی در مدیریت انرژی به‌منظور تامین انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان با حداقل هزینه ممکن دارد. این منابع می‌توانند تولیدکننده انرژی الکتریکی، حرارتی یا ترکیبی باشند. در این مقاله مدیریت انرژی و ساختار در ریزشبکه با اهدافی نظیر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و بهبود شاخص‌های فنی نظیر کاهش تلفات توان حقیقی صورت گرفته است. به این منظور از ابزارهایی مانند برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، ذخیره‌سازها، منابع تولید پراکنده مانند تولیدکننده‌های همزمان برق و حرارت، منابع تجدیدپذیر مانند واحدهای بادی و فتوولتائیک و بازآرایی فیدرهای ریزشبکه بهره گرفته شده است. از الگوریتم ژنتیک که از معتبرترین الگوریتم‌های فراابتکاری است برای حل مسئله بهینه‌سازی مدنظر استفاده شده است. نتایج عددی کارایی مدل ارائه شده را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: برنامه پاسخ‌گویی بار، ریزشبکه، کاهش هزینه‌ها، مدیریت انرژی و ساختار

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۷/۲۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید امین سعید

نشانی نویسنده‌ی مسئول: یزد - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر به‌کارگیری منابع تجدیدپذیر در سراسر دنیا افزایش یافته و موافقت‌های بین‌المللی در زمینه توسعه نفوذ آنها در شبکه‌های برق وجود دارد که هدف آن افزایش سهم منابع تجدیدپذیر^۱ مانند توربین‌های بادی^۲ و پنل‌های فتوولتائیک^۳ در تولید انرژی الکتریکی و تبدیل آنها به بزرگ‌ترین تولیدکننده‌های انرژی الکتریکی در دنیا است [۱]. علی‌رغم مزایای بسیار منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی پاک و نامحدود، چالش عمده این منابع عدم قطعیت‌های آنها در تولید انرژی الکتریکی است که باعث توسعه فناوری‌های جدید و روش‌های مدیریت انرژی به‌منظور مواجهه با این چالش شده است. به‌منظور پوشش این عدم قطعیت‌ها، ابزارهایی مانند ذخیره‌سازها^۴، منابع پاسخ‌گویی بار^۵ و منابع پشتیبان و رزرو در مطالعات مختلف به‌کارگرفته شده است. مفهوم ریزشبکه^۶ نیز زاینده ترکیب چنین ابزارهایی به‌منظور پوشش عدم قطعیت‌های منابع تجدیدپذیر است [۲]. از مزایای توسعه ریزشبکه‌ها و مدیریت انرژی در آنها می‌توان به بهبود کنترل و پایداری شبکه‌های توزیع برق اشاره کرد [۳]. ریزشبکه‌ها از بارهای قابل کنترل، منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازها و منابع تجدیدپذیر تشکیل شده‌اند که با هدف کاهش هزینه‌ها، به مدیریت انرژی و تبادل توان با شبکه بالادست می‌پردازند [۴]. مروری جامع بر آخرین مطالعات در زمینه مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها در مرجع [۵] ارائه شده است. این مقاله به دست‌بندی مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها در دو رویکرد پرداخته است. رویکرد اول به‌صورت کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از ریزشبکه با کمینه‌سازی هزینه‌های تولید منابع و خرید ارزان از بازار خرده‌فروشی معرفی شده است [۶،۷]. رویکرد دوم نیز یکپارچه‌سازی ریزشبکه‌ها تحت مدیریت واحد و بهره‌برداری از آنها به‌صورت شبکه شده است [۸،۹]. علاوه بر مدیریت انرژی، برخی مطالعات نیز به بازآرایی^۷ فیدرها به‌همراه مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها پرداخته‌اند. در مرجع [۱۰] بهینه‌سازی همزمان و چندهدفه مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها به‌همراه بازآرایی فیدرها ارائه شده است. در این مرجع بازآرایی شبکه با هدف بهبود شاخص‌های فنی نظیر کاهش تلفات توان و بهبود بارپذیری انجام شده است. در مرجع [۱۱] نیز به بهینه‌سازی چندهدفه تلفات توان، پایداری استاتیکی ولتاژ، هزینه‌های بهره‌برداری و زیست‌محیطی در ریزشبکه‌ها پرداخته شده که در آن عدم قطعیت‌های بار و منابع تجدیدپذیر نیز لحاظ شده‌اند. در مرجع‌های [۱۲] و [۱۳] به بازآرایی شبکه و پخش بار روزانه اقتصادی منابع تولید انرژی به‌منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبکه‌ها پرداخته شده است. در مدل تصادفی ارائه‌شده در این مرجع‌ها، عدم قطعیت‌های منابع بادی و بار با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو مدل شده است. بازآرایی شبکه و مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها در مرجع [۱۴] نیز با در نظر گرفتن واحدهای فتوولتائیک مطالعه شده است. هدف از این مطالعه کاهش هزینه‌های بهره‌برداری سالانه، تلفات توان و آلودگی‌های زیست‌محیطی است. در این مطالعه عدم قطعیت‌های واحدهای فتوولتائیک، بادی و بار در نظر گرفته شده‌اند. از بازآرایی و مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها به‌منظور بهبود سایر مشخصات فنی ریزشبکه نیز استفاده شده است. در مرجع [۱۵] با استفاده از مدیریت انرژی و بازآرایی در ریزشبکه‌ها به بهبود قابلیت‌اطمینان و تاب‌آوری و همچنین کمینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری در ریزشبکه‌ها پرداخته است. همچنین در مرجع [۱۶] با استفاده از بازآرایی و مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها به کاهش تلفات توان و نامتعادلی در فازها و همچنین بهبود پروفیل ولتاژ پرداخته شده است. در مرجع [۱۷] نیز مسئله پایداری ولتاژ در ریزشبکه‌ها با استفاده از این دو ابزار بهبود یافته است. در مرجع [۱۸] مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها با استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار تشویق‌محور و بازآرایی شبکه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های منابع تجدیدپذیر انجام شده است. در برخی مرجع‌ها نیز بازآرایی و مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها با بکارگیری خازن‌ها همراه شده است. در مرجع [۱۹] با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری به توسعه بهینه خازن‌ها در کنار بازآرایی و مدیریت انرژی اشاره شده است که در آن به کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ پرداخته شده است. در مرجع [۲۰] با استفاده از روش فازی به تخصیص بهینه خازن و منابع تولید پراکنده همراه با بازآرایی بهینه شبکه پرداخته شده است. الگوریتم ژنتیک چندهدفه بر مبنای جبهه پارتو نیز در مرجع [۲۱] به‌منظور تخصیص بهینه منابع تجدیدپذیر و خازن‌ها همراه با بازآرایی بهینه شبکه، با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و برنامه‌ریزی، کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی و بهبود پایداری استاتیکی ولتاژ به‌کار رفته است. در مرجع [۲۲] به مدیریت بهینه انرژی و ساختار برای ریزشبکه‌ها با حضور ذخیره‌سازها و منابع تولید همزمان برق و گرما پرداخته شده است. مرجع [۲۳] نیز با استفاده از تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی به بهره‌برداری بهینه کوتاه‌مدت از ریزشبکه‌های دارای بارهای الکتریکی و

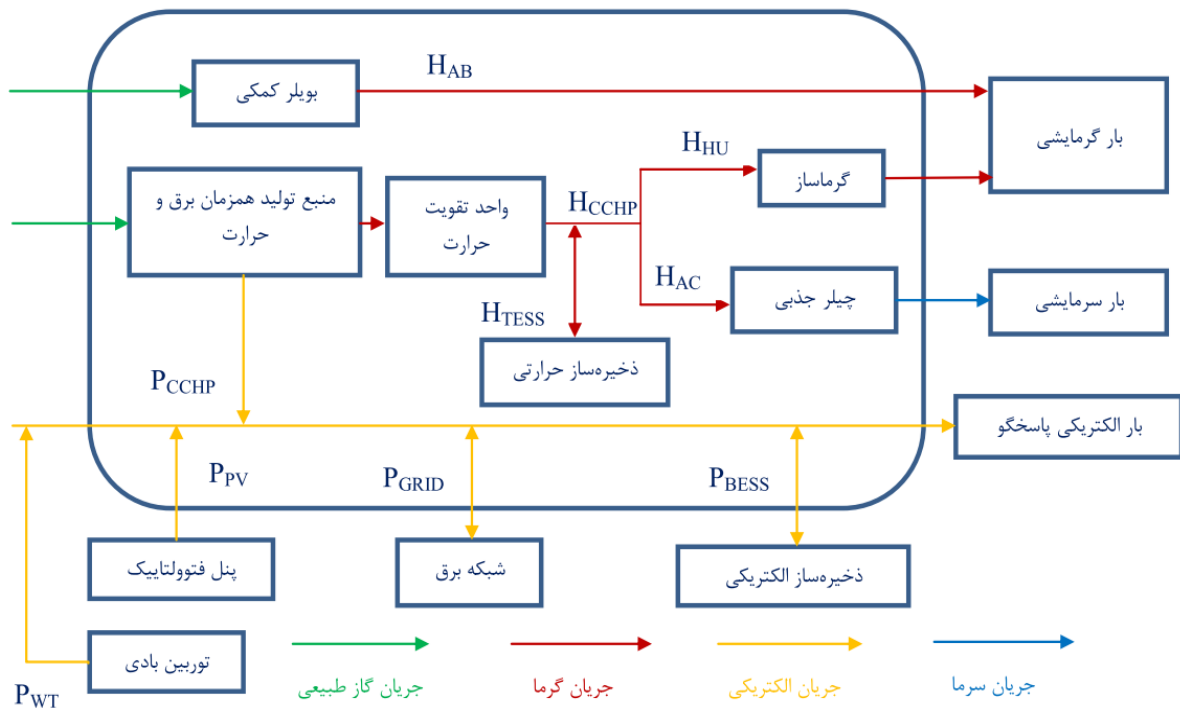
حرارتی پرداخته است. مطالعات انجام شده در زمینه مدیریت چندگانه انرژی و ساختار در ریزشکبه‌ها را می‌توان در انواع مختلفی دسته‌بندی نمود. این دسته‌بندی‌ها شامل چهار دسته با توجه به نوع مسئله مورد مطالعه از نظر داده‌های مسئله شامل داده‌های تصادفی و قطعی، اهداف مسئله شامل اهداف فنی و اقتصادی، نوع ابزارها و منابع مورد استفاده شامل واحدهای تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر، ذخیره‌سازها، منابع مدیریت مصرف، بازآرایی شبکه و خازن‌ها و همچنین نوع روش مورد استفاده برای حل مسائل بهینه‌سازی است.

نخستین خلا پژوهشی مقالات پیشین عدم استفاده از تنوع گسترده‌ای از منابع تولیدی به‌صورت همزمان در مدیریت چندگانه انرژی و ساختار است. نمونه‌ای از کامل‌ترین این مطالعات مرجع [۲۲] است که مقاله پایه پژوهش حاضر بوده و در آن از منابع پاسخ‌گویی بار استفاده نشده است. در سایر مراجع‌های مرور شده نیز کاستی‌هایی در این زمینه وجود دارد که در مقاله حاضر سعی شده است تا این خلا پژوهشی با در نظر گرفتن تنوع بیشتری از منابع پوشش داده شود. چالش دوم پژوهش‌های پیشین در این حوزه بهبود توابع هدف مد نظر به‌صورت فنی و اقتصادی منجر به پاسخ‌های با دقت بالا نخواهد شد و در نهایت با در نظر گرفتن مصالحه‌ای میان توابع هدف، پاسخ بهینه نهایی تعیین خواهد شد، در این مقاله به‌منظور حل دقیق مسئله توابع هدف فنی نیز به‌صورت اقتصادی در نظر گرفته شده‌اند تا پاسخ نهایی مسئله با دقت بسیار بالایی محاسبه شود. از این‌رو در این مقاله سعی شده است تا چالش‌های مطرح رفع و مدل‌سازی مسئله به‌صورت کامل‌تر و دقیق‌تر ارائه شود. در این مقاله به‌عنوان نوآوری اول، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در کنار منبع تولید پراکنده غیرتجدیدپذیر با قابلیت تولید برق و حرارت^۸، منابع تجدیدپذیر بادی و فتوولتاییک، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و حرارتی^۹ و بویلر کمکی^{۱۰}، در مدیریت چندگانه روزانه انرژی و ساختار در ریزشکبه‌های مجهز به سیستم‌های انرژی ترکیبی و بانک‌های خازنی مدل‌سازی شده‌اند. نوآوری دوم مقاله نیز حل مسئله مدنظر به‌صورت کاملاً اقتصادی است. در این مقاله تابع هدف تلفات و زیست‌محیطی نیز با در نظر گرفتن قیمت‌های مربوطه به صورت اقتصادی مدل شده‌اند. سیستم انرژی ترکیبی مدنظر این مقاله شامل منابع پاسخ‌گویی بار، یک منبع تولید پراکنده غیرتجدیدپذیر با قابلیت تولید برق و حرارت، دو منبع تجدیدپذیر بادی و فتوولتاییک، دو سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و حرارتی و یک بویلر کمکی است. مسئله مدنظر این مقاله یک مسئله بهینه‌سازی است که به بهره‌برداری از ریزشکبه با تعیین مقادیر تولید منابع تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر، منابع پاسخ‌گویی بار، شارژ و تخلیه ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی و تولید بویلر کمکی، تولید خازن و همچنین بازآرایی فیدرهای ریزشکبه در هر ساعت می‌پردازد. اهداف مدنظر این مقاله شامل کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از ریزشکبه، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و کاهش تلفات توان هستند. عدم قطعیت‌های واحدهای فتوولتاییک و بادی و بار ریزشکبه نیز در این مطالعه در نظر گرفته شده است. همچنین از الگوریتم ژنتیک [۲۴] برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است.

ساختار مقاله به این شرح است. پس از بیان مسئله و اهمیت موضوع، بخش دوم به مدل‌سازی مسئله پرداخته است. این بخش شامل مدل‌های ارائه‌شده برای تجهیزات ریزشکبه، توابع هدف و قیود است. روش حل مسئله در بخش سوم ارائه شده است. در این بخش با رسم روندنمای حل مسئله، به‌طور کامل و به‌صورت گام به گام، روش حل مسئله تشریح شده است. مطالعه موردی شامل داده‌های مسئله و نتایج عددی نیز در بخش چهارم مقاله نمایش داده و تحلیل شده‌اند. در نهایت در بخش پنجم، نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی مسئله

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، ریزشکبه مدنظر مقاله دارای سیستم انرژی ترکیبی است که شامل منابع پاسخ‌گویی بار یا بارهای الکتریکی پاسخ‌گو، واحدهای فتوولتاییک و بادی، منبع تولید همزمان برق و حرارت، بویلر کمکی و ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی است. نمایی از این سیستم انرژی ترکیبی در شکل (۱) ارائه شده است. در ادامه تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی مدنظر مقاله ارائه شده است.



شکل (۱): سیستم انرژی ترکیبی مورد مطالعه
Figure (1): Hybrid energy system under study

۱-۲- توابع هدف

در این بخش به معرفی توابع هدف مدنظر مقاله پرداخته شده است. همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد، سه هدف مدنظر مقاله است که به ترتیب در ادامه ارائه شده‌اند.

۱-۱-۲- کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری

هزینه بهره‌برداری کل ریزشبه شامل هزینه پرداختی به بارهای پاسخگو، هزینه تبادل توان با شبکه بالادست، هزینه بهره‌برداری از ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی، هزینه تولید توان توسط منابع تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر (منبع تولید همزمان برق و حرارت) و هزینه تولید توان راکتیو توسط خازن است که در (۱) به‌زای هر ساعت و هر سناریو بیان شده است.

$$f_1(t, s) = C_{DR}(t, s) + C_{Grid}(t, s) + \sum_{i=1}^{N_{WT}} C_{WT}(i, t, s) + \sum_{i=1}^{N_{PV}} C_{PV}(i, t, s) + \sum_{i=1}^{N_{CCHP}} C_{CCHP}(i, t, s) + \sum_{i=1}^{N_{CB}} C_{CB}(i, t, s) + \sum_{i=1}^{N_{TESS}} C_{TESS}(i, t, s) + \sum_{i=1}^{N_{BESS}} C_{BESS}(i, t, s) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad (1)$$

هزینه پرداختی به بارهای پاسخگو برای هر ساعت و هر سناریو در رابطه (۲) و هزینه تبادل توان با شبکه بالادست در رابطه (۳) بیان شده است. همچنین هزینه بهره‌برداری از منابع بادی، فتوولتائیک و منبع غیرتجدیدپذیر تولید همزمان برق و حرارت نیز به ترتیب در رابطه‌های (۴) تا (۶) ارائه شده‌اند. همچنین رابطه‌های (۷) و (۸) نیز ضریب‌های معرفی شده در رابطه‌های (۴) تا (۶) را بیان کرده‌اند. هزینه تولید توان راکتیو توسط بانک خازنی و ضریب‌های آن به ترتیب در رابطه‌های (۹) تا (۱۱) ارائه شده‌اند. هزینه ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی نیز به ترتیب در رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) معرفی شده‌اند. ضریب‌های مربوط به این رابطه‌ها نیز در رابطه‌های (۱۴) تا (۱۷) آورده شده‌اند.

$$C_{DR}(t, s) = P_{DR}(t, s) \times \rho_{DR}(t) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad (2)$$

$$C_{Grid}(t, s) = P_{Grid}(t, s) \times \rho_{Grid}(t) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad (3)$$

$$C_{WT}(i, t, s) = a_{WT}(i) + b_{WT}(i) \times P_{WT}(i, t, s) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{WT} \quad (۴)$$

$$C_{PV}(i, t, s) = a_{PV}(i) + b_{PV}(i) \times P_{PV}(i, t, s) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{PV} \quad (۵)$$

$$C_{CCHP}(i, t, s) = a_{CCHP}(i) + b_{CCHP}(i) \times \left(\frac{P_{CCHP}(i, t, s)}{\eta_{ele}} + \frac{H_{ab}(i, t, s)}{\eta_{the}} \right) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{CCHP} \quad (۶)$$

$$a_{CCHP}(i) = a_{WT}(i) = a_{PV}(i) = \frac{\text{Cost}_{Capital}^{CCHP} \times P_{Capacity}^{CCHP} \times Gr}{T_{Life} \times 365 \times 24 \times CF_{CCHP}(i)} \quad \forall i \in N_{CCHP} \quad (۷)$$

$$b_{CCHP}(i) = \text{Cost}_{CCHP}^{O\&M} + \text{Cost}_{CCHP}^{Fuel} = \text{Cost}_{CCHP}^{O\&M} + \beta_{gas} \times \rho_{gas} \quad \forall i \in N_{CCHP}$$

$$b_{WT}(i) = \text{Cost}_{WT}^{O\&M} \quad \forall i \in N_{WT} \quad (۸)$$

$$b_{PV}(i) = \text{Cost}_{PV}^{O\&M} \quad \forall i \in N_{PV}$$

$$C_{CB}(l, t, s) = a_{CB}(l) + b_{CB}(l) \times Q_{CB}(l, t, s) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall l \in N_{CB} \quad (۹)$$

$$a_{CB}(l) = \frac{\text{Cost}_{Capital}^{CB} \times P_{Capacity}^{CB} \times Gr}{T_{Life} \times 365 \times 24 \times CF_{CB}(l)} \quad \forall l \in N_{CB} \quad (۱۰)$$

$$b_{CB}(l) = \text{Cost}_{CB}^{O\&M} \quad \forall l \in N_{CB} \quad (۱۱)$$

$$C_{BESS}(i, t, s) = a_{BESS}(i) + b_{BESS}(i) \times |P_{BESS}(i, t, s)| + \rho_{Grid}(t) \times P_{BESS}(i, t, s) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{BESS} \quad (۱۲)$$

$$C_{TESS}(i, t, s) = a_{TESS}(i) + b_{TESS}(i) \times |H_{TESS}(i, t, s)| + \rho_{gas}(t) \times H_{TESS}(i, t, s) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{TESS} \quad (۱۳)$$

$$a_{BESS}(i) = \frac{\text{Cost}_{Capital}^{BESS} \times P_{Capacity}^{BESS} \times Gr}{T_{Life} \times 365 \times 24 \times CF_{BESS}(i)} \quad \forall i \in N_{BESS} \quad (۱۴)$$

$$a_{TESS}(i) = \frac{\text{Cost}_{Capital}^{TESS} \times P_{Capacity}^{TESS} \times Gr}{T_{Life} \times 365 \times 24 \times CF_{TESS}(i)} \quad \forall i \in N_{TESS} \quad (۱۵)$$

$$b_{BESS}(i) = \text{Cost}_{BESS}^{O\&M} \quad \forall i \in N_{BESS} \quad (۱۶)$$

$$b_{TESS}(i) = \text{Cost}_{TESS}^{O\&M} \quad \forall i \in N_{TESS} \quad (۱۷)$$

۲-۱-۲- کمینه‌سازی آلودگی‌های زیست‌محیطی

میزان کل آلودگی‌های زیست‌محیطی ایجادشده توسط شبکه بالادست و منبع تولید همزمان برق و حرارت برای هر ساعت و هر سناریو در رابطه (۱۸) بیان شده است [۲۲].

$$f_2(t, s) = P_{Grid}(t, s) \times ER_{Grid} + \left[\sum_{i=1}^{N_{CCHP}} \left(\frac{P_{CCHP}(i, t, s)}{\eta_{ele}} + \frac{H_{ab}(i, t, s)}{\eta_{the}} \right) \right] \times CF_{CCHP}(i) \times ER(i) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad (۱۸)$$

۲-۱-۳- کمینه‌سازی تلفات توان حقیقی

تلفات توان حقیقی نیز برای هر ساعت و هر سناریو توسط رابطه (۱۹) معرفی شده است [۲۲].

$$f_3(t, s) = P_{loss} = \sum_{k=1}^{N_{BR}} \left(R(k) \times |I(k, t, s)|^2 \right) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad (۱۹)$$

۲-۲- تابع هدف نهایی

به‌منظور ارزیابی نهایی توابع هدف، تابع هدفی متشکل از سه تابع هدف مذکور در نظر گرفته شده است. تابع هدف نهایی از جمع موزون سه تابع هدف معرفی‌شده حاصل شده است. در تابع هدف مذکور ارزش اقتصادی هر یک از توابع هدف در مقدار آنها

ضرب شده و سه تابع هدف موزون به‌دست‌آمده با یکدیگر جمع شده‌اند. تابع هدف نهایی ارائه شده در رابطه (۲۰)، برای هر ساعت و با در نظر گرفتن سناریوهای محتمل و احتمال رخداد آنها بیان شده است.

$$f_T(t) = \sum_{s=1}^S \pi_s (f_1(t,s) + \rho_2 \times f_2(t,s) + \rho_3 \times f_3(t,s)) \quad \forall t \in T \quad (20)$$

۲-۳-۲- قیود مسئله

قیود مسئله شامل قیود شبکه و منابع تولیدکننده انرژی در ادامه ارائه شده‌اند.

۲-۳-۲-۱- قیود میزان بکارگیری برنامه پاسخگویی بار

از آنجا که مشترکین به دنبال استفاده از انرژی الکتریکی به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر هستند، نمی‌توان از آنها توقع داشت که درصد بالایی از مصرف خود را به برنامه پاسخگویی بار اختصاص دهند. معمولاً می‌توان انتظار داشت که تا ۱۰ درصد میزان انرژی الکتریکی مصرفی به منظور مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار در نظر گرفته شود. قید مربوط به برنامه‌های پاسخگویی بار برای بارهای اکتیو و راکتیو در رابطه‌های (۲۱) و (۲۲) ارائه شده است.

$$0 \leq P_{DR}(z, t, s) \leq 0.1 \times PD(z, t, s) \quad (21)$$

$$0 \leq Q_{DR}(z, t, s) \leq 0.1 \times QD(z, t, s) \quad (22)$$

۲-۳-۲-۲- قیود پخش بار

در تمامی شین‌های ریز شبکه، توان تولیدی باید با توان مصرفی در آن شین، به علاوه توان انتقالی از آن شین به سایر شین‌ها برابر باشد. این قیود با عنوان قیود تعادل توان اکتیو و راکتیو در شین‌ها در رابطه‌های (۲۳) و (۲۴) ارائه شده‌اند.

$$PG(z, t, s) + P_{DR}(z, t, s) - PD(z, t, s) = \sum_{r=1}^{N_{Bus}} \left(|V(z, t, s)| \times |V(r, t, s)| \times |Y(z, j)| \times \cos \left(\begin{matrix} \delta(z, t, s) - \delta(r, t, s) \\ -\varphi(z, r, t, s) \end{matrix} \right) \right) \quad (23)$$

$$\forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall z \in N_{Bus} \quad \text{for } z \neq r$$

$$QG(z, t, s) + Q_{DR}(z, t, s) - QD(z, t, s) = \sum_{r=1}^{N_{Bus}} \left(|V(z, t, s)| \times |V(r, t, s)| \times |Y(z, j)| \times \sin \left(\begin{matrix} \delta(z, t, s) - \delta(r, t, s) \\ -\varphi(z, r, t, s) \end{matrix} \right) \right) \quad (24)$$

$$\forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall z \in N_{Bus} \quad \text{for } z \neq r$$

۲-۳-۲-۳- قید شعاعی بودن و اتصال شبکه

یکی از مهمترین قیود در بازآرایی شبکه‌ها نظیر ریز شبکه حاضر، در نظر گرفتن ساختار شعاعی شبکه و اتصال کامل شین‌های شبکه به یکدیگر است. در تمامی حالت‌هایی که بازآرایی شبکه انجام می‌شود این دو قید باید در نظر گرفته شوند تا شبکه همواره یکپارچه بوده و ساختار شعاعی داشته باشد [۲۲].

۲-۳-۲-۴- قید حد جریان خطوط

قید رابطه (۲۵) حد جریان عبوری از خطوط شبکه را نشان داده است. بر مبنای این قید، جریان عبوری از خطوط شبکه همواره باید کمتر از بیشینه مقدار جریان مجاز عبوری از خطوط باشد [۲۲].

$$|I(k, t, s)| \leq I_k^{\max} \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall k \in N_{BR} \quad (25)$$

۲-۳-۲-۵- قید حد ولتاژ شین‌ها

اندازه ولتاژ شین‌ها نیز همان‌طور که در رابطه (۲۶) بیان شده، باید در محدوده مجاز و بین مقادیر کمینه و بیشینه باشد [۲۲].

$$V_{\min} \leq |V(z, t, s)| \leq V_{\max} \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall z \in N_{\text{Bus}} \quad (26)$$

۲-۳-۶- قید حد تولید ژنراتورهای تولید همزمان برق و حرارت

میزان توان الکتریکی و حرارت تولیدی توسط ژنراتورهای تولید همزمان برق و حرارت نیز باید مطابق رابطه‌های (۲۷) و (۲۸) در محدوده مجاز باشند [۲۲].

$$P_{\text{CCHP}}^{\min}(i) \leq |P_{\text{CCHP}}(i, t, s)| \leq P_{\text{CCHP}}^{\max}(i) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{\text{CCHP}} \quad (27)$$

$$H_{\text{CCHP}}^{\min}(i) \leq |H_{\text{CCHP}}(i, t, s)| \leq H_{\text{CCHP}}^{\max}(i) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{\text{CCHP}} \quad (28)$$

۲-۳-۷- قید حد بهره‌برداری بویلر کمکی

توان حرارتی تولیدی توسط بویلر کمکی نیز بر اساس رابطه (۲۹) می‌بایست در محدوده مجاز باشد [۲۲].

$$H_{\text{AB}}^{\min}(i) \leq |H_{\text{AB}}(i, t, s)| \leq H_{\text{AB}}^{\max}(i) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{\text{AB}} \quad (29)$$

۲-۳-۸- قید حد توان راکتیو تولیدی توسط بانک خازنی

قید توان راکتیو تولیدی توسط بانک خازنی نیز در رابطه (۳۰) ارائه شده است [۲۲].

$$Q_{\text{CB}}^{\min}(l) \leq |Q_{\text{CB}}(l, t, s)| \leq Q_{\text{CB}}^{\max}(l) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall l \in N_{\text{CB}} \quad (30)$$

۲-۳-۹- قید ذخیره‌ساز الکتریکی

قیود مربوط به ذخیره‌ساز الکتریکی در رابطه‌های (۳۱) تا (۳۵) ارائه شده‌اند [۲۲].

$$0 \leq |P_{\text{BESS}}^{\text{ch}}(i, t, s)| \leq P_{\text{BESS}}^{\text{ch-max}}(i) \times U_{\text{BESS}}^{\text{ch}}(i, t, s) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{\text{BESS}} \quad (31)$$

$$0 \leq |P_{\text{BESS}}^{\text{dis}}(i, t, s)| \leq P_{\text{BESS}}^{\text{dis-max}}(i) \times U_{\text{BESS}}^{\text{dis}}(i, t, s) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{\text{BESS}} \quad (32)$$

$$U_{\text{BESS}}^{\text{dis}}(i, t, s) + U_{\text{BESS}}^{\text{ch}}(i, t, s) \leq 1 \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{\text{BESS}} \quad (33)$$

$$E_{\text{BESS}}(i, t, s) = E_{\text{BESS}}(i, t-1, s) - P_{\text{BESS}}^{\text{dis}}(i, t, s) \times \eta_{\text{BESS}}^{\text{dis}} + \left(\frac{P_{\text{BESS}}^{\text{ch}}(i, t, s)}{\eta_{\text{BESS}}^{\text{ch}}} \right) \quad \forall t \in T \quad t > 1 \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{\text{BESS}} \quad (34)$$

$$E_{\text{BESS}}^{\min}(i) \leq E_{\text{BESS}}(i, t, s) \leq E_{\text{BESS}}^{\max}(i) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{\text{BESS}} \quad (35)$$

۲-۳-۱۰- قید ذخیره‌ساز حرارتی

قیود مربوط به ذخیره‌ساز حرارتی نیز در رابطه‌های (۳۶) تا (۴۰) ارائه شده‌اند [۲۲].

$$0 \leq H_{\text{TESS}}^{\text{ch}}(i, t, s) \leq H_{\text{TESS}}^{\text{ch-max}}(i) \times U_{\text{TESS}}^{\text{ch}}(i, t, s) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{\text{TESS}} \quad (36)$$

$$0 \leq H_{\text{TESS}}^{\text{dis}}(i, t, s) \leq H_{\text{TESS}}^{\text{dis-max}}(i) \times U_{\text{TESS}}^{\text{dis}}(i, t, s) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{\text{TESS}} \quad (37)$$

$$U_{\text{TESS}}^{\text{dis}}(i, t, s) + U_{\text{TESS}}^{\text{ch}}(i, t, s) \leq 1 \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{\text{TESS}} \quad (38)$$

$$E_{\text{TESS}}(i, t, s) = E_{\text{TESS}}(i, t-1, s) - H_{\text{TESS}}^{\text{dis}}(i, t, s) \times \eta_{\text{TESS}}^{\text{dis}} + \left(\frac{H_{\text{TESS}}^{\text{ch}}(i, t, s)}{\eta_{\text{TESS}}^{\text{ch}}} \right) \quad \forall t \in T \quad t > 1 \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{\text{TESS}} \quad (39)$$

$$E_{\text{TESS}}^{\min}(i) \leq E_{\text{TESS}}(i, t, s) \leq E_{\text{TESS}}^{\max}(i) \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{\text{TESS}} \quad (40)$$

۲-۳-۱۱- قیود بارهای حرارتی و برودتی

بارهای حرارتی و برودتی توسط انرژی تولیدی منبع تولید همزمان برق و حرارت، بویلرهای کمکی و ذخیره‌سازهای حرارتی تامین می‌شوند. قیود مربوط به بارهای حرارتی و برودتی در رابطه‌های (۴۱) و (۴۲) ارائه شده‌اند [۲۲].

$$H_{CCHP}(i, t, s) = \frac{P_{CCHP}(i, t, s)}{\eta_{EH}} \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{CCHP} \quad (41)$$

$$H_{CCHP}(i, t, s) + H_{AB}(i, t, s) + H_{TESS}^{dis}(i, t, s) - H_{TESS}^{ch}(i, t, s) = D^{heating}(t, s) + D^{cooling}(t, s) \quad (42)$$

$$\forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{CCHP}$$

۲-۴- مدل‌سازی توان تولیدی توسط واحدهای بادی و فتوولتاییک

در این بخش به ترتیب در رابطه‌های (۴۳) و (۴۴)، توان تولیدی توسط واحد بادی و پنل فتوولتاییک ارائه شده است [۲۲].

$$P_w(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ct} \\ P_{rated} \times \frac{(v^2 - v_{ct}^2)}{(v_r^2 - v_{ct}^2)} & v_{ct} \leq v \leq v_r \\ P_{rated} & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v \end{cases} \quad (43)$$

$$P_{PV}(si) = \eta^{PV} \times S^{PV} \times si \quad \forall t \in T \quad \forall s \in S \quad \forall i \in N_{CCHP} \quad (44)$$

۳- روش حل مسئله

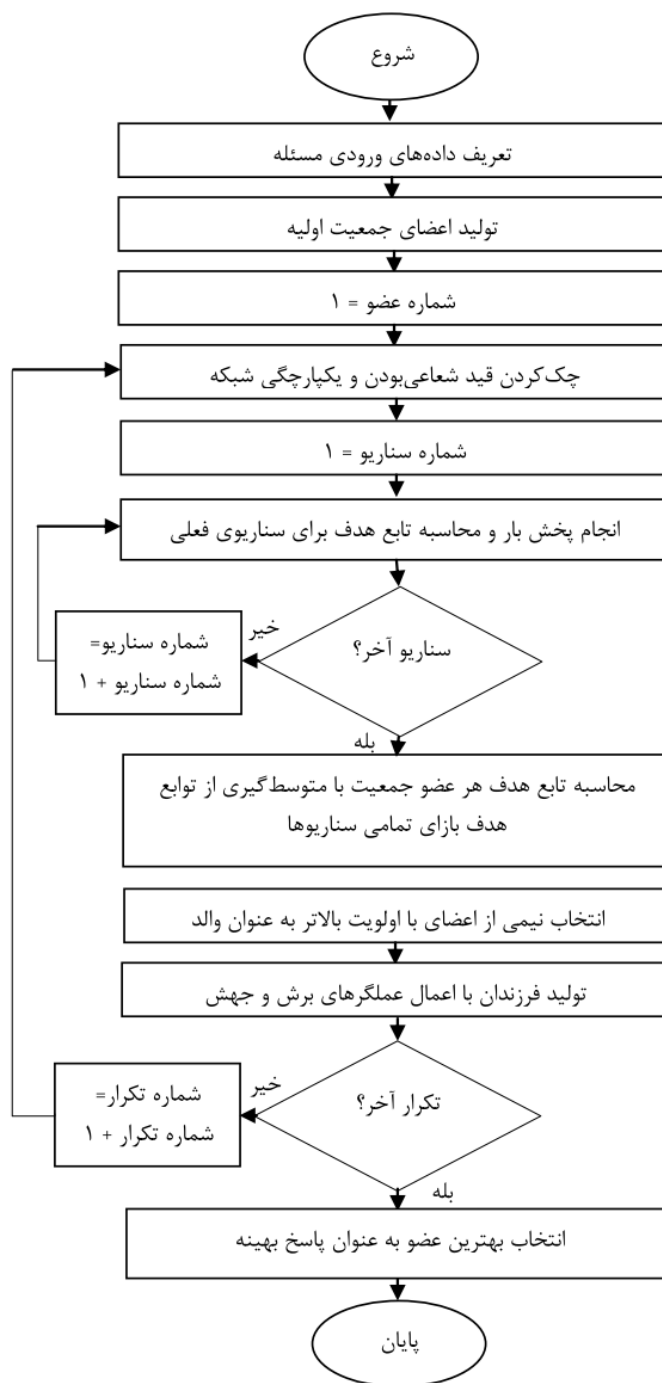
مدل ارائه‌شده در این مقاله، مدل برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در مدیریت چندگانه انرژی و ساختار در ریزشکته‌های مجهز به تولیدکننده همزمان برق و حرارت است. ریزشکته مورد مطالعه دارای سیستم انرژی ترکیبی شامل منابع پاسخ‌گویی بار، واحدهای فتوولتاییک و بادی، منبع تولید همزمان برق و حرارت، بویلر کمکی و ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی است. مدل توسعه‌داده‌شده در مقاله از دیدگاه بهره‌بردار ریزشکته با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری، آلودگی‌های زیست‌محیطی و کاهش تلفات تعریف شده است.

۳-۱- سناریو بندی

برای مدل‌سازی عدم قطعیت برخی متغیرهای مسئله از روش نمونه‌برداری از توابع توزیع مدنظر برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها استفاده شده است. اولین متغیری که عدم قطعیت آن با استفاده از این روش مدل شده، میزان تولید واحد بادی است که برای مدل‌سازی آن از تابع توزیع ویبال [۲۲، ۲۵] استفاده شده است. دو متغیر دیگر میزان تولید واحد فتوولتاییک و بار ریزشکته هستند که برای مدل‌سازی آنها از تابع توزیع نرمال [۲۲، ۲۶] استفاده شده است.

۳-۲- روندنمای حل مسئله

در این مقاله به منظور انتخاب بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری با هدف کمینه‌سازی تابع هدف، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. متغیرهای تصمیم شامل وضعیت ساعتی کلیدهای باز در هر حلقه، میزان توان ارائه‌شده توسط منابع پاسخ‌گویی بار، میزان توان الکتریکی و حرارتی خروجی منبع غیرتجدیدپذیر، توان حرارتی خروجی بویلر کمکی، میزان تبادل توان الکتریکی با شبکه بالادست، میزان تبادل توان با ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی و میزان تولید توان راکتیو توسط خازن است. به منظور انتخاب بهینه متغیرهای تصمیم، می‌بایست تابع هدف بیان‌شده در رابطه (۲۰) با در نظر گرفتن قیود رابطه‌های (۲۱) تا (۴۲) از دیدگاه بهره‌بردار ریزشکته کمینه گردد. روندنمای حل مسئله در شکل (۲) ارائه شده است. فرایند بهینه‌سازی در این مقاله در گام‌های زیر توصیف شده است:



شکل (۲): روندنمای حل مسئله
Figure (2): Problem-solving flowchart

گام اول: تعریف داده‌های ورودی مسئله شامل داده‌های مربوط به پیکربندی شبکه، اطلاعات شین‌ها و خطوط و سویچ‌ها، منابع و مصارف ریزشبکه و قیمت‌ها و همچنین داده‌های الگوریتم بهینه‌سازی شامل تعداد اعضای جمعیت اولیه و تعداد تکرارها و همچنین احتمال رخداد عملگرهای برش و جهش.
گام دوم: تولید اعضای جمعیت اولیه؛ در این گام اعضای جمعیت اولیه به تعدادی که در گام اول مشخص شده است، به صورت تصادفی تولید می‌شوند.

گام سوم: چک کردن قیود شعاعی بودن و یکپارچگی شبکه برای هر عضو؛ از آنجا که یکی از متغیرهای تصمیم الگوریتم، وضعیت سویچ‌های به صورت پیشفرض باز، موجود در شبکه است، در هر تکرار و برای هر عضو جمعیت، ارزیابی می‌شود که وضعیت سویچ‌ها شعاعی بودن و یکپارچگی شبکه را نقض نکرده باشند.

گام چهارم: در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها بر مبنای تعریف سناریوها و انجام پخش بار در شبکه با استفاده از جاروب پسر- پیشرو [۲۷] و محاسبه تابع هدف برای هر سناریو؛ در این گام تمامی سناریوهای محتمل با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تولید واحد بادی و فتوولتاییک و بار لحاظ می‌شوند. در ادامه به ازای هر یک از سناریوها، پخش بار انجام شده و تابع هدف محاسبه می‌شود. گام پنجم: محاسبه مقدار میانگین تابع هدف برای هر عضو جمعیت؛ همانطور که بیان شد، به ازای هر یک از اعضای جمعیت، تعدادی سناریو در نظر گرفته شده است. بنابراین برای محاسبه تابع هدف مربوط به هر یک از اعضا، می‌بایست از تمامی توابع هدف سناریوهای در نظر گرفته شده متوسط‌گیری شود.

گام ششم: اولویت‌بندی اعضای جمعیت بر اساس تابع هدف و انتخاب نیمی از اعضای با تابع هدف کمتر به عنوان والد؛ گام هفتم: اعمال عملگرهای برش و جهش بر والدین و تولید فرزندان جهت تکمیل نسل؛ از آنجا که نیمی از اعضای جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک به دلیل شایسته‌گزینی حذف شده‌اند، برای تکمیل اعضای جمعیت می‌بایست به تعداد والدین، فرزند تولید شود. این فرایند تولید فرزند با استفاده از عملگرهای برش و جهش صورت می‌گیرد. گام هشتم: تکرار گام‌های سوم تا هفتم تا رسیدن به معیار توقف (تعداد تکرارهای مشخص)؛ گام نهم: انتخاب کمترین میزان تابع هدف به عنوان مقدار بهینه و عضو مربوطه در جمعیت به عنوان متغیرهای تصمیم بهینه.

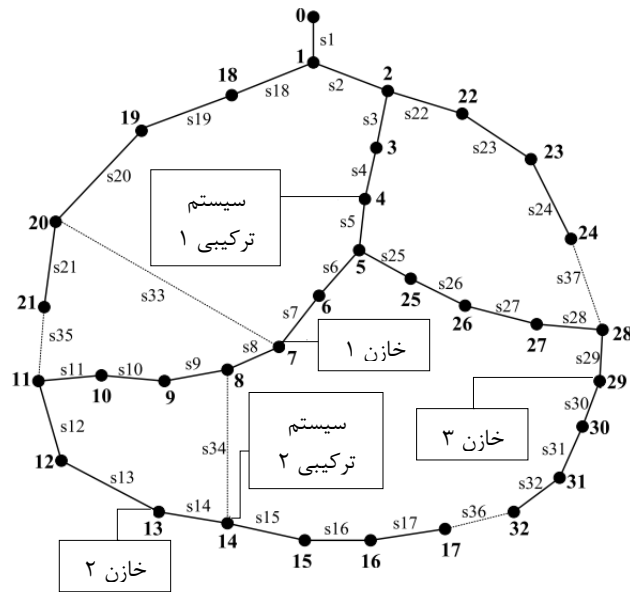
۴- مطالعه موردی

مدل ارائه شده در این مقاله، مدل برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در مدیریت انرژی و ساختار در ریزشبکه‌های مجهز به تولیدکننده همزمان برق و حرارت است. ریزشبکه مدنظر دارای سیستم انرژی ترکیبی شامل منابع پاسخ‌گویی بار، واحدهای فتوولتاییک و بادی، منبع تولید همزمان برق و حرارت، بویلر کمکی و ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی است. مدل توسعه داده شده در مقاله از دیدگاه بهره‌بردار ریزشبکه با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری، آلودگی‌های زیست‌محیطی و تلفات تعریف شده است.

۴-۱- اطلاعات مسئله

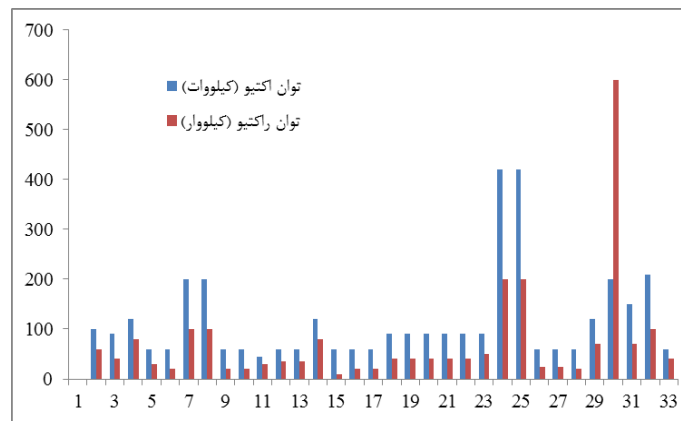
برای مدل‌سازی عدم قطعیت برخی متغیرهای مسئله از روش سناریوپردازی استفاده شده است. اولین متغیری که عدم قطعیت آن با استفاده از این روش مدل شده، میزان تولید واحد بادی است که برای مدل‌سازی آن از تابع توزیع وینال استفاده شده است. دو متغیر دیگر میزان تولید واحد فتوولتاییک و بار ریزشبکه هستند که برای مدل‌سازی آنها از تابع توزیع نرمال استفاده شده است. ریزشبکه مورد مطالعه در این مقاله دارای ۳۳ شین است (شکل (۳)). میزان ولتاژ نامی ریزشبکه ۱۲/۶۶ کیلوولت و توان اکتیو و راکتیو آن به ترتیب برابر با ۳۷۱۵ کیلووات و ۲۳۰۰ کیلووار است. همچنین در این شبکه تعداد سویچ‌های به صورت پیشفرض بار ۵ عدد و سویچ‌های به صورت پیشفرض بسته ۳۲ عدد است. دو سیستم انرژی ترکیبی در شین‌های ۴ و ۱۴ و سه بانک خازنی در شین‌های ۷، ۱۳ و ۲۹ نصب شده‌اند.

میزان بار الکتریکی شین‌های شبکه در ساعت پیک در شکل (۴) و درصد بار ساعات شبانه‌روز نسبت به بار پیک در شکل (۵) ارائه شده است. لازم به ذکر است که بار الکتریکی شبکه دارای عدم قطعیت بوده و با تابع توزیع نرمال مدل شده است. مقدار بارهای حرارتی و برودتی شین‌های ۴ و ۱۴ و همچنین قیمت برق در بازار انرژی روزانه نیز به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) ارائه شده است. ضریب تلفات توان و آلودگی‌های زیست‌محیطی در تابع هدف اصلی به ترتیب برابر با ۱/۵ دلار بر کیلووات و ۱۰ دلار بر کیلوگرم در نظر گرفته شده است. مشخصات تجهیزات سیستم‌های انرژی ترکیبی مورد مطالعه و بانک‌های خازنی و همچنین پارامترهای اولیه الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در مقاله به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است. امکان استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار یا بارهای پاسخ‌گو نیز تا ۱۰ درصد بار شین‌ها در نظر گرفته شده است. قیمت مشارکت بارهای پاسخ‌گو نیز ۰/۱۵ دلار بر کیلووات‌ساعت در نظر گرفته شده است.



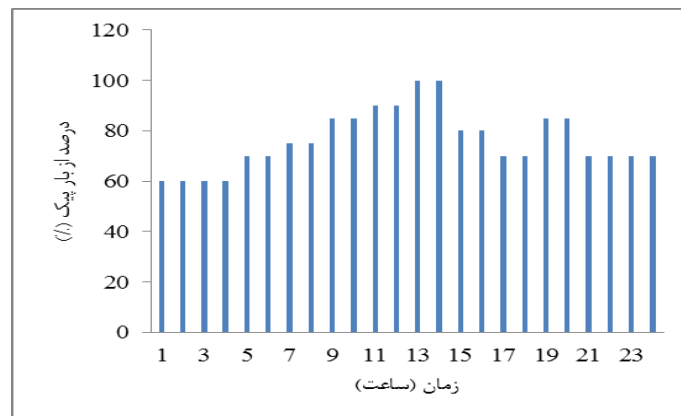
شکل (۳): ریزشبکه مورد مطالعه [۲۲]

Figure (3): Microgrid under study [22]



شکل (۴): میزان بار الکتریکی شین‌های شبکه در ساعت پیک

Figure (4): Electrical load of network buses at peak hour

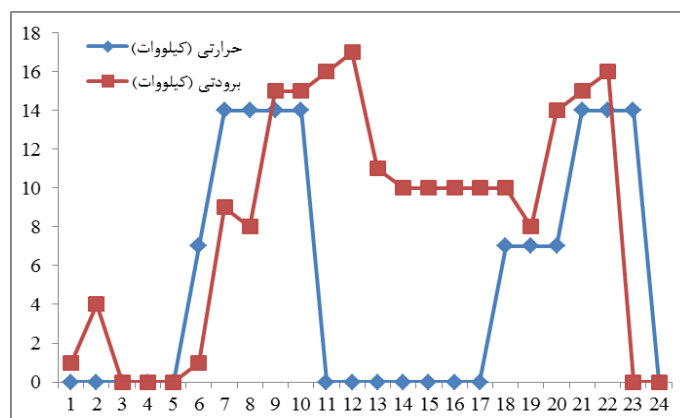


شکل (۵): درصد بار الکتریکی در ساعات شبانه‌روز نسبت به ساعت پیک

Figure (5): Percent of each hour load in comparison with peak hour

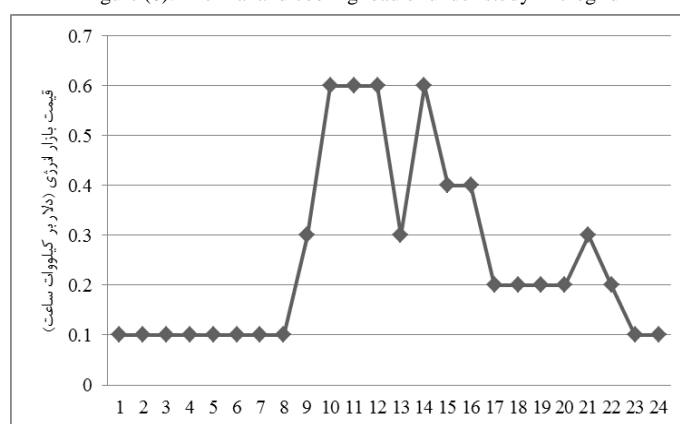
Table (1): Equipment specification of under-study hybrid energy systems and capacitors
 جدول (۱): مشخصات تجهیزات سیستم‌های انرژی ترکیبی مورد مطالعه و خازن‌ها

توربین بادی		بوئیر کمکی		منبع تولید همزمان برق و حرارت	
اندازه	پارامتر	اندازه	پارامتر	اندازه	پارامتر
۱۵۰۰	$\text{Cost}_{\text{Capital}}^{\text{WT}}$	۰	$H_{\text{AB}}^{\text{min}}$	۰	$P_{\text{CCHP}}^{\text{min}}$
۴۰۰	$P_{\text{Capacity}}^{\text{WT}}$	۳۵۰	$H_{\text{AB}}^{\text{max}}$	۶۳۳	$P_{\text{CCHP}}^{\text{max}}$
۰/۱۳	Gr	۰/۸	η_{the}	۰	$H_{\text{CCHP}}^{\text{min}}$
۰/۲	Cost_{WT}	ذخیره‌ساز الکتریکی		۷۰۰	$H_{\text{CCHP}}^{\text{max}}$
۲۰	T_{Life}	اندازه	پارامتر	۰/۰۹	β_{gas}
۰/۰۵	$\text{Cost}_{\text{WT}}^{\text{O\&M}}$	۱۷۷۵	$\text{Cost}_{\text{Capital}}^{\text{BESS}}$	۰/۱۵	ρ_{gas}
۴۰۰	P_{rated}	۱۲۰۰	$P_{\text{Capacity}}^{\text{BESS}}$	۰/۳	η_{ele}
۱۲	v_r	۲۰۰	$P_{\text{BESS}}^{\text{ch-max}}$	۳۶۷۴	$\text{Cost}_{\text{Capital}}^{\text{CCHP}}$
۲۵	v_{co}	۲۰۰	$P_{\text{BESS}}^{\text{dis-max}}$	۶۳۳	$P_{\text{Capacity}}^{\text{CCHP}}$
۳/۵	v_{ct}	۰/۲۵	CF_{BESS}	۰/۱۳	Gr
پنل فتوولتائیک		۱۲۰	$E_{\text{BESS}}^{\text{min}}$	۰/۲	CF_{CCHP}
اندازه	پارامتر	۱۲۰۰	$E_{\text{BESS}}^{\text{max}}$	۱۰	T_{Life}
۶۶۷۵	$\text{Cost}_{\text{Capital}}^{\text{PV}}$	۰/۸۵	$\eta_{\text{BESS}}^{\text{ch}}$	۰/۰۰۳۹	$\text{Cost}_{\text{CCHP}}^{\text{Fuel}}$
۴۰۰	$P_{\text{Capacity}}^{\text{PV}}$	۰/۹۵	$\eta_{\text{BESS}}^{\text{dis}}$	۰/۹	η_{EH}
۰/۱۳	Gr	۲۵	T_{Life}	۱۴/۴۵	ER
۰/۲۵	CF_{PV}	۰/۱۳	Gr	۰/۲	ρ_{DR}
۲۰	T_{Life}	۰/۰۵	$\text{Cost}_{\text{BESS}}^{\text{O\&M}}$	ذخیره‌ساز حرارتی	
۰/۰۵	$\text{Cost}_{\text{PV}}^{\text{O\&M}}$	بانک خازنی		اندازه	پارامتر
۱۸/۶	η^{PV}	اندازه	پارامتر	۱۸۰۰	$\text{Cost}_{\text{Capital}}^{\text{TESS}}$
۴۰	S^{PV}	۹	$\text{Cost}_{\text{Capital}}^{\text{CB}}$	۱۲۰۰	$P_{\text{Capacity}}^{\text{TESS}}$
شبکه		۴۰۰	$P_{\text{Capacity}}^{\text{CB}}$	۰/۹۵	$\eta_{\text{TESS}}^{\text{ch}}$
اندازه	پارامتر	۰/۱۳	Gr	۰/۹۵	$\eta_{\text{TESS}}^{\text{dis}}$
۰/۹۵	V_{min}	۰/۲	CF_{CB}	۱۲۰	$E_{\text{TESS}}^{\text{min}}$
۱/۰۵	V_{max}	۲۵	T_{Life}	۱۲۰۰	$E_{\text{TESS}}^{\text{max}}$
۵/۴۶	ER_{Grid}	۰/۰۵	$\text{Cost}_{\text{CB}}^{\text{O\&M}}$	۰/۲۵	CF_{TESS}
				۲۰۰	$H_{\text{TESS}}^{\text{ch-max}}$
				۲۰۰	$H_{\text{TESS}}^{\text{dis-max}}$
				۲۵	T_{Life}
				۰/۰۵	$\text{Cost}_{\text{TESS}}^{\text{O\&M}}$
				۰/۱۳	Gr



شکل (۶): بارهای حرارتی و برودتی ریزشبه مورد مطالعه

Figure (6): Thermal and cooling load of under-study microgrid



شکل (۷): قیمت برق در بازار روزانه انرژی

Figure (7): Electricity price in day-ahead energy market

Table (2): Initial parameters of genetic algorithm

جدول (۲): پارامترهای اولیه الگوریتم ژنتیک مورد استفاده

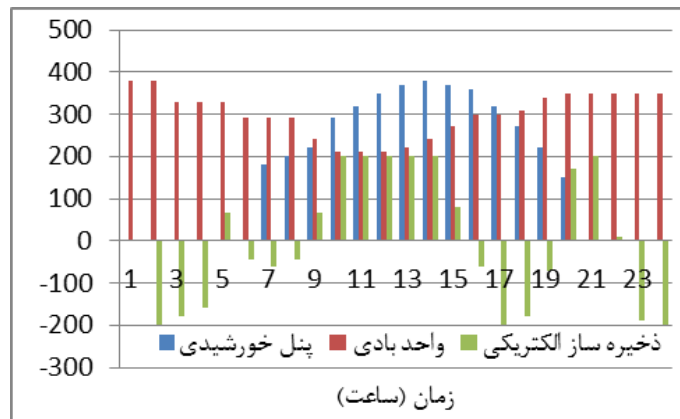
اندازه	پارامتر	اندازه	پارامتر
۱	احتمال برش	۶۰	تعداد اعضای جمعیت
۰/۰۴	احتمال جهش	۱۰۰	تعداد تکرارها

۲-۴- نتایج عددی

در این مقاله دو مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده است. در مورد اول تاثیر بکارگیری بانک‌های خازنی و بازآرایی بر ریزشبه ارزیابی شده است. در ادامه در مورد دوم امکان استفاده از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به ریزشبه اضافه شده است. نتایج این دو مورد مطالعاتی با مورد پایه که شامل ریزشبه دارای دو سیستم انرژی ترکیبی بدون امکان استفاده از بانک‌های خازنی، بازآرایی و پاسخ‌گویی بار است، مقایسه شده است.

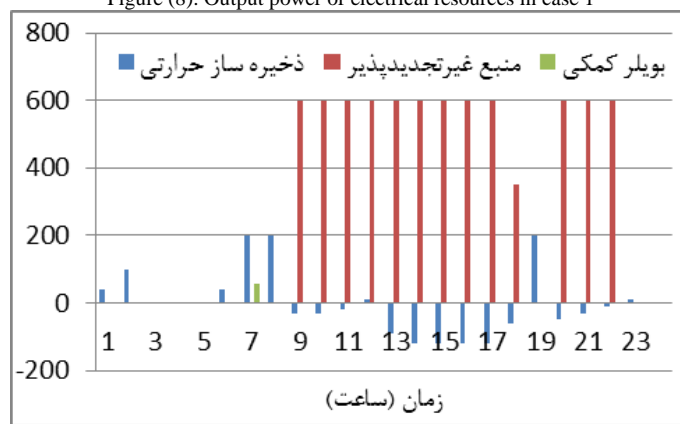
۲-۴-۱- مورد اول: مدیریت انرژی و ساختار در ریزشبه با در نظر گرفتن بانک‌های خازنی و قابلیت بازآرایی

در این بخش قابلیت بازآرایی، تولید توان راکتیو توسط خازن‌ها و تمامی منابع سیستم‌های ترکیبی انرژی بجز بارهای پاسخ‌گو در نظر گرفته شده است. جدول شماره (۳) خروجی‌های شبیه‌سازی‌های این بخش را نمایش داده است. میزان تولید توان راکتیو سه بانک خازنی، وضعیت اتصال کلیدهای ریزشبه و مقادیر توابع هدف در این جدول ارائه شده است. همچنین میزان خروجی‌های منابع الکتریکی و حرارتی در شکل‌های (۸) و (۹) قابل مشاهده است. باقی انرژی مورد نیاز ریزشبه از شبکه بالادست تامین شده است.



شکل (۸): توان خروجی منابع الکتریکی در مورد اول (کیلووات)

Figure (8): Output power of electrical resources in case 1



شکل (۹): توان خروجی منابع حرارتی در مورد اول (کیلووات)

Figure (9): Output power of thermal resources in case 1

Table (3): Simulations output in case 1

جدول (۳): خروجی شبیه‌سازی‌ها در مورد اول

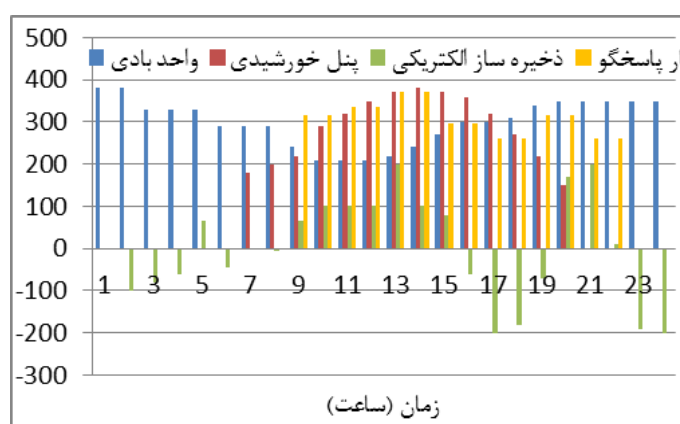
مقادیر متوسط متغیرها				ساعت	مقادیر متوسط متغیرها				ساعت
تابع هدف (دلار)	تلفات (کیلووات)	آلودگی (کیلوگرم)	هزینه بهره‌برداری (دلار)		تابع هدف (دلار)	تلفات (کیلووات)	آلودگی (کیلوگرم)	هزینه بهره‌برداری (دلار)	
۵۵۵/۴۶	۶۶/۸۹	۳/۲۳	۴۲۲/۸۳	۱۳	۲۰۵/۱۱	۲۲/۴۶	۱/۹۳	۱۵۲/۱۲	۱
۵۴۸/۸۴	۶۶/۷۹	۳/۱۹	۴۱۶/۷۶	۱۴	۲۱۰/۲۱	۲۳/۱۲	۱/۸۹	۱۵۶/۶۳	۲
۳۵۲/۵۴	۳۹/۹۴	۲/۴۷	۲۶۷/۹۳	۱۵	۱۹۷/۵۱	۲۲/۱۲	۱/۸۹	۱۴۵/۴۳	۳
۳۵۲/۵۴	۳۹/۹۴	۲/۴۷	۲۶۷/۹۳	۱۶	۱۹۷/۵۱	۲۲/۱۲	۱/۸۹	۱۴۵/۴۳	۴
۲۵۳/۷۲	۳۰/۱۰	۲/۱۲	۱۸۷/۳۷	۱۷	۲۲۹/۵۱	۲۹/۶۳	۲/۰۵	۱۶۴/۵۷	۵
۲۵۸/۷۳	۳۰/۴۳	۲/۱۶	۱۹۱/۴۹	۱۸	۲۴۳/۸۴	۲۹/۸۷	۲/۰۷	۱۷۸/۳۴	۶
۳۷۰/۷۴	۴۵/۱۱	۲/۶۶	۲۷۶/۴۸	۱۹	۲۹۱/۴۳	۳۴/۹۹	۲/۴۳	۲۱۴/۶۵	۷
۳۷۹/۰۷	۴۵/۱۹	۲/۶۸	۲۸۴/۴۹	۲۰	۲۸۶/۰۳	۳۴/۸۴	۲/۳۹	۲۰۹/۸۷	۸
۲۵۹/۱۷	۳۱/۱۲	۲/۲۵	۱۸۹/۹۹	۲۱	۳۸۵/۲۷	۴۵/۳۷	۲/۷۵	۲۸۹/۷۲	۹
۲۶۶/۷۶	۳۳/۸۷	۲/۳۶	۱۹۲/۳۶	۲۲	۳۸۵/۲۷	۴۵/۳۷	۲/۷۵	۲۸۹/۷۲	۱۰
۲۴۸/۳۸	۳۰/۶۳	۲/۱۸	۱۸۰/۶۴	۲۳	۴۲۳/۴۳	۵۲/۱۲	۲/۹۵	۳۱۵/۷۵	۱۱
۲۲۹/۱۱	۲۹/۶۳	۲/۰۱	۱۶۴/۵۷	۲۴	۴۲۸/۷۹	۵۲/۶۵	۲/۹۷	۳۲۰/۱۲	۱۲
کلیدهای ۰.۷، ۱۳، ۲۷، ۳۲ و ۳۵				کلیدهای باز	۳۰۰ - ۱۵۰ - ۲۲۰			ظرفیت خازن‌ها (کیلووات)	

۴-۲-۲- مورد دوم: مدیریت انرژی و ساختار در ریزشبکه با در نظر گرفتن بانک‌های خازنی، قابلیت بازآرایی و بارهای پاسخ‌گو

در این بخش مشارکت بارهای پاسخ‌گو در تامین انرژی مورد نیاز ریزشبکه نیز در نظر گرفته شده است. همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد، بارها تا میزان ۱۰ درصد امکان مشارکت در پاسخ‌گویی بار را دارند. با توجه به هزینه مشارکت بارهای پاسخ‌گو، مالک ریزشبکه می‌تواند از این منابع بهره‌گیرد. جدول شماره (۴) خروجی‌های شبیه‌سازی‌های این بخش را نمایش داده است. میزان تولید توان راکتیو سه بانک خازنی، وضعیت اتصال کلیدهای ریزشبکه و مقادیر توابع هدف در این جدول ارائه شده است. همچنین میزان خروجی‌های منابع الکتریکی نیز در شکل (۱۰) و منابع حرارتی در شکل (۱۱) قابل مشاهده است.

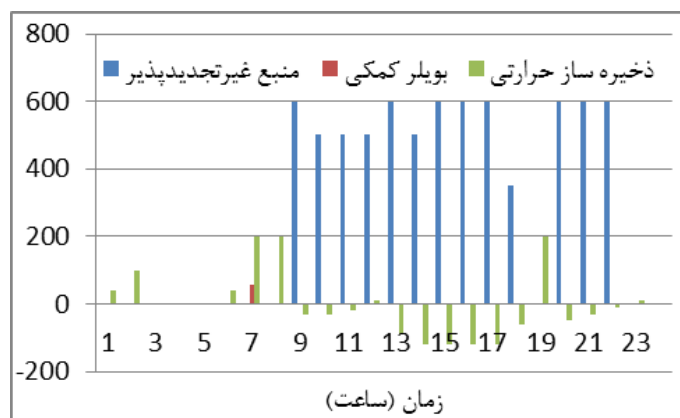
۴-۲-۳- تحلیل نتایج

با توجه به جدول‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شود که در هر دو مورد مطالعاتی هر چه به سمت ساعت‌های پربارتر می‌رویم مقدار هر سه تابع هدف بزرگ‌تر می‌شوند. به عبارت دیگر از آنجا که مقدار بار ریزشبکه افزایش می‌یابد، هزینه‌های بهره‌برداری، تلفات توان و آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز افزایش می‌یابند. همچنین با توجه به شکل‌های (۸) و (۱۰)، ذخیره‌ساز الکتریکی در ساعت‌های ارزان‌تر ذخیره و در ساعت‌های گران‌تر تخلیه می‌شود. منابع بادی و فتوولتائیک نیز در ساعات وجود انرژی‌های بادی و خورشیدی به تولید انرژی پرداخته‌اند. از شکل‌های (۹) و (۱۱) نیز مشخص است که بویلر کمکی تنها در ساعت ۷ صبح به تولید انرژی حرارتی پرداخته است.



شکل (۱۰): توان خروجی منابع الکتریکی در مورد دوم (کیلووات)

Figure (10): Output power of electrical resources in case 2

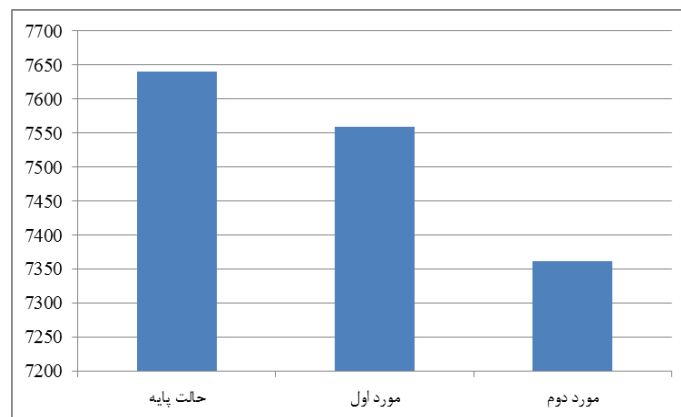


شکل (۱۱): توان خروجی منابع حرارتی در مورد دوم (کیلووات)

Figure (11): Output power of thermal resources in case 2

Table (4): Simulations output in case 2
جدول (۴): خروجی شبیه‌سازی‌ها در مورد دوم

مقادیر متوسط متغیرها				ساعت	مقادیر متوسط متغیرها				ساعت
تابع هدف (دلار)	تلفات (کیلووات)	آلودگی (کیلوگرم)	هزینه بهره‌برداری (دلار)		تابع هدف (دلار)	تلفات (کیلووات)	آلودگی (کیلوگرم)	هزینه بهره‌برداری (دلار)	
۵۳۰/۶۶	۶۴/۸۸	۳/۱۶	۴۰۱/۶۸	۱۳	۲۰۵/۱۱	۲۲/۴۶	۱/۹۳	۱۵۲/۱۲	۱
۵۲۴/۳۶	۶۴/۷۹	۳/۱۲	۳۹۵/۹۲	۱۴	۲۱۰/۲۱	۲۳/۱۲	۱/۸۹	۱۵۶/۶۳	۲
۳۳۶/۸۵	۳۸/۷۴	۲/۴۲	۲۵۴/۵۳	۱۵	۱۹۷/۵۱	۲۲/۱۲	۱/۸۹	۱۴۵/۴۳	۳
۳۳۶/۸۵	۳۸/۷۴	۲/۴۲	۲۵۴/۵۳	۱۶	۱۹۷/۵۱	۲۲/۱۲	۱/۸۹	۱۴۵/۴۳	۴
۲۴۲/۵۷	۲۹/۱۹	۲/۰۷	۱۷۸/۱۲	۱۷	۲۲۹/۵۱	۲۹/۶۳	۲/۰۵	۱۶۴/۵۷	۵
۲۴۷/۳۵	۲۹/۵۱	۲/۱۱	۱۸۱/۹۱	۱۸	۲۴۳/۸۴	۲۹/۸۷	۲/۰۷	۱۷۸/۳۴	۶
۲۵۴/۳۵	۴۳/۷۵	۲/۶۰	۲۶۲/۶۵	۱۹	۲۹۱/۴۳	۳۴/۹۹	۲/۴۳	۲۱۴/۶۵	۷
۳۶۲/۲۸	۴۳/۸۳	۲/۶۲	۲۷۰/۲۶	۲۰	۲۸۶/۰۳	۳۴/۸۴	۲/۳۹	۲۰۹/۸۷	۸
۲۴۷/۸۲	۳۰/۱۸	۲/۲۰	۱۸۰/۴۹	۲۱	۳۶۸/۱۹	۴۴/۰۳	۲/۶۹	۲۷۵/۲۳	۹
۲۵۵/۱۵	۳۲/۸۷	۲/۳۱	۱۸۲/۷۴	۲۲	۳۶۸/۱۹	۴۴/۰۳	۲/۶۹	۲۷۵/۲۳	۱۰
۲۴۸/۳۸	۳۰/۶۳	۲/۱۸	۱۸۰/۶۴	۲۳	۴۰۴/۷۰	۵۰/۵۵	۲/۸۹	۲۹۹/۹۶	۱۱
۲۲۹/۱۱	۲۹/۶۳	۲/۰۱	۱۶۴/۵۷	۲۴	۴۰۹/۸۲	۵۱/۱۰	۲/۹۱	۳۰۴/۱۱	۱۲
کلیدهای ۰.۷، ۱.۳، ۲.۷، ۳.۲ و ۳.۵				کلیدهای باز		۲۰۵ - ۱۳۰ - ۲۶۸		ظرفیت خازن‌ها (کیلووار)	



شکل (۱۱): تابع هدف نهایی در سه مورد مطالعاتی (کیلووات)

Figure (11): Final objective function in three case studies

ذخیره‌ساز حرارتی به‌منظور کاهش هزینه‌ها در ساعت‌های کم‌هزینه‌تر انرژی حرارتی ذخیره و در ساعت‌های گران‌تر تخلیه کرده است. منبع غیرتجدیدپذیر نیز به تولید انرژی الکتریکی و حرارتی به‌طور هم‌زمان پرداخته است. نکته قابل ذکر این است که مجموع انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی توسط منبع غیرتجدیدپذیر در شکل‌های (۹) و (۱۱) به نمایش درآمده است. با مقایسه نتایج موارد اول و دوم، تاثیر مدل‌سازی بارهای پاسخ‌گو در ریزشکبه مشخص شده است. با مقایسه نتایج جدول‌های (۳) و (۴) در می‌یابیم که میزان هزینه‌های بهره‌برداری به‌طور متوسط ۳/۴۱ درصد، آلودگی‌های زیست‌محیطی به‌طور متوسط ۱/۱۸ درصد، تلفات توان به‌طور متوسط ۲/۰۳ درصد و در نهایت تابع هدف کل به‌طور متوسط به اندازه ۲/۶۱ درصد کاهش یافته‌اند. این کاهش در هزینه‌ها با کاهش میزان خرید از شبکه بالادست و کاهش تولید واحد غیرتجدیدپذیر در ساعت‌هایی که هزینه بارهای پاسخ‌گو کمتر از این دو منبع است حاصل شده است. طبیعتاً با کاهش میزان خرید از شبکه بالادست و کاهش تولید واحد غیرتجدیدپذیر، میزان به‌کارگیری ذخیره‌ساز الکتریکی نیز کاهش یافته است. میزان تغییرات تابع هدف نهایی در

موارد اول و دوم نسبت به حالت پایه در شکل (۱۲) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان تابع هدف در موارد اول و دوم به ترتیب به اندازه ۱/۰۶ و ۳/۶۴ درصد نسبت به حالت پایه بهبود یافته است.

۵- نتیجه‌گیری

مقاله حاضر به مدیریت چندگانه انرژی و ساختار در ریزشبکه دارای تولیدکننده همزمان برق و حرارت با در نظر گرفتن بارهای پاسخ‌گو پرداخت. به منظور انجام شبیه‌سازی‌ها سه مورد مطالعاتی در نظر گرفته و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شد. از نتایج قابل توجه مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- میزان به‌کارگیری بارهای پاسخ‌گو در شین‌های ریزشبکه تا ۱۰ درصد بار شین‌ها بود، بنابراین انتظار می‌رفت که با به‌کارگیری آنها کاهش بیش از ۳/۴۱ در هزینه‌های بهره‌برداری ایجاد شود. اما از آنجا که قیمت مشارکت این بارها در برخی ساعت‌های شبانه‌روز بیشتر از سایر منابع بود، تنها در ۱۴ ساعت از آنها استفاده شد و بنابراین کاهش ۳/۴۱ درصدی حاصل شد.

- از آنجا که با به‌کارگیری بارهای پاسخ‌گو میزان مصرف ریزشبکه کاهش یافت، طبیعتاً آلودگی‌های زیست‌محیطی و تلفات توان نیز کاهش یافتند. با توجه به خروجی شبیه‌سازی‌ها، این دو تابع هدف به ترتیب به‌طور متوسط به اندازه ۱/۱۸ درصد و ۲/۰۳ کاهش یافتند. کاهش هر سه تابع هدف با به‌کارگیری بارهای پاسخ‌گو، سبب کاهش ۲/۶۱ درصدی در تابع هدف کل شد.

References

مراجع

- [1] R.J. Bavandpour, H. Ghadiri, H. Khodadadi, "Optimal design of a hybrid solar-wind-battery system using the Grasshopper optimization algorithm for minimization of the loss of power supply probability", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 13, no. 51, pp. 139-156, Dec. 2022 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1401.13.51.9.2).
- [2] H. Hasanshahi, M. Nafar, M. Simab, "Operation of micro-grid for provide clean energy constrained to system optimal reliability", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 13, no. 50, pp. 141-156, Sep. 2022 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1401.13.50.9.0).
- [3] S. Gorji, S. Zamanian, M. Moazzami, "Techno-economic and environmental base approach for optimal energy management of microgrids using crow search algorithm", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 11, no. 43, pp. 49-68, Sept. 2020 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1399.1-1.43.4.7).
- [4] J. Pascual, D.A. Aviles, A. Ursua, P. Sanchis, L. Marroyo, "Energy management for an electro-thermal renewable-based residential microgrid with energy balance forecasting and demand-side management", *Applied Energy*, vol. 295, pp. 1-22, Aug. 2021 (doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117062).
- [5] V.K. Garg, S. Sharma, "Overview on microgrid system", *Proceeding of the IEEE/PDGC*, pp. 694-699, Solan, India, Dec. 2018 (doi: 10.1109/PDGC.2018.8745849).
- [6] R. Velik, P. Nicolay, "Grid-price dependent energy management in microgrids using a modified simulated annealing triple-optimizer", *Applied Energy*, vol. 130, pp. 384-395, Oct. 2014 (doi: 10.1016/j.apenergy.2014.05.060).
- [7] T. Niknam, R.A. Abarghoee, M.R. Narimani, "An efficient scenario based stochastic programming framework for multi-objective optimal microgrid operation", *Applied Energy*, vol. 99, pp. 455-470, Nov. 2012 (doi: 10.1016/j.apenergy.2012.04.017).
- [8] C. Wang, T. Tian, Z. Xu, S. Cheng, S. Liu, R. Chen, "Optimal management for grid-connected three/single phase hybrid multimicrogrids", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 3, pp. 1870-1882, July 2020 (doi: 10.1109/TSTE.2019.2945924).
- [9] M. Zadsar, S.S. Sebtahmadi, M. Kazemi, S.M.M. Larimi, M.R. Haghifam, "Two stage risk based decision making for operation of smart grid by optimal dynamic multi microgrid", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 118, Article Number: 105791, June 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2019.1057-91).
- [10] M. Esmaili, M. Sedighzadeh, M. Esmaili, "Multi-objective optimal reconfiguration and DG power allocation in distribution network using big bang-big crunch algorithm considering load uncertainty", *Energy*, vol. 103, pp. 86-99, May 2016 (doi: 10.1016/j.energy.2016.02.152).

- [11] M. Sedighizadeh, M. Esmaili, M. Esmaeili, "Allocation of the hybrid big bang-big crunch algorithm to optimal reconfiguration and distributed generation power allocation in distribution systems", *Energy*, vol. 76, pp. 920-930, Nov. 2014 (doi: 10.1016/j.energy.2014.09.004).
- [12] M. Sedighizadeh, G. Shaghghi-shahr, M. Esmaili, M. R. Aghamohammadi, "Optimal distribution feeder reconfiguration and generation scheduling for microgrid day-ahead operation in the presence of electric vehicles considering uncertainties", *Journal of Energy Storage*, vol. 21, pp. 58-71, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.est.2018.11.009).
- [13] R. Jabbari-Sabet, S.M. Moghaddas Tafreshi, S.S. Mirhosseini, "Microgrid operation and management using probabilistic reconfiguration and unit commitment", *International journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 75, pp. 328-336, Feb. 2016 (doi: 10.1016/j.ijepes.2015.09.012).
- [14] I.B. Hamida, S.B. Salah, F. Msahli, M.F. Mimouni, "Optimal network reconfiguration and renewable DG integration considering time sequence variation in load and DGs", *Renewable Energy*, vol. 121, pp. 66-80, Mar. 2018 (doi: 10.1016/j.renene.2017.12.106).
- [15] F.S. Ghazijahani, J. Salehi, "Integrated DR and reconfiguration scheduling for optimal operation of microgrids using Hongs' point estimate method", *International journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 99, pp. 481-492, July 2018 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.01.044).
- [16] M.R. Kaveh, R.A. Hooshmand, S.M. Madani, "Simultaneous optimization of rephrasing, reconfiguration and DG placement in distribution networks using BF-SD algorithm", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 55-69, Aug. 2017 (doi: 10.1016/j.asoc.2017.09.041).
- [17] J. Shukla, B. Das, V. Pant, "Stability constrained optimal distribution system reconfiguration considering uncertainties in correlated loads and distributed generations", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 99, pp. 121-133, July 2018 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.01.010).
- [18] P. Harsh, D. Das "Energy management in microgrid using incentive-based demand response and reconfigured network considering uncertainties in renewable energy sources", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 46, Article Number: 101225, Aug. 2021 (doi: 10.1016/j.seta.2021.101225).
- [19] M. Kiani, J. Salahi, "Integrated approach of network reconfiguration with distributed generation and shunt capacitor placement for power loss minimization in radial distribution networks", *Applied Soft Computing*, vol. 52, pp. 1262-1284, Mar. 2017 (doi: 10.1016/j.asoc.2016.07.031).
- [20] M. Mohammadi, A.M. Rozbahani, S. Bahmanyar, "Power loss reduction of distribution systems using BFO based optimal reconfiguration along with DG and shunt capacitor placement simultaneously in fuzzy framework", *Journal of Central South University*, vol. 24, no. 1, pp. 90-103, Jan. 2017 (doi: 10.1007/s11771-017-3412-1).
- [21] S.N. Ravadanegh, M.R.J. Oskuee, M. Karimi "Multi-objective planning model for simultaneous reconfiguration of power distribution network and allocation of renewable energy resources and capacitors with considering uncertainties", *Journal of Central South University*, vol. 24, Issue. 8, pp. 1837-1849, Aug. 2017 (doi: 10.1007/s11771-017-3592-8).
- [22] S.S. Fazlhashemi, M. Sedighizadeh, M.E. Khodayar "Day-ahead energy management and feeder reconfiguration for microgrids with CCHP and energy storage systems", *Journal of Energy Storage*, vol. 29, Article Number: 101301, Jun. 2020 (doi: 10.1016/j.est.2020.101301).
- [23] M. Kia, M. Shafiekhani, H. Arasteh, S.M. Hashemi, M. Shafie-khah, J.P.S. Catalão "Short-term operation of microgrids with thermal and electrical loads under different uncertainties using information gap decision theory", *Energy*, vol. 208, Article Number: 118418, Jan. 2020 (doi: 10.1016/j.energy.2020.118418).
- [24] Y. Liu, D. Cetenovic, H. Li, E. Gryazina, V. Terzija "An optimized multi-objective reactive power dispatch strategy based on improved genetic algorithm for wind power integrated systems", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 136, Article Number: 107764, Mar. 2022 (doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107764).
- [25] H. Zheng, W. Huang, J. Zhao, J. Liu, Y. Zhang, Z. Shi, C. Zhang "A novel falling model for wind speed probability distribution of wind farms", *Renewable Energy*, vol. 184, pp. 91-99, Jan. 2022 (doi: 10.1016/j.renene.2021.11.073).
- [26] L. Zhu, J. Zhang, "Uncertainty and sensitivity analysis of cooling and heating loads for building energy planning", *Journal of Building Engineering*, vol. 45, Article Number: 103440, Jan. 2022 (doi: 10.1016/j.job-e.2021.103440).
- [27] Y. Kongjeen, K. Bhumkittipich, N. Mithulanathan, I.S. Amiri, P. Yupapin "A modified backward and forward sweep method for microgrid load flow analysis under different electric vehicle load mathematical models", *Electric Power Systems Research*, vol. 168, pp. 46-54, Mar. 2019 (doi: 10.1016/j.eprsr.2018.10.03-1).

ضمیمه

متغیرهای شمارشی

متغیر	نماد	متغیر	نماد
تعداد توربین‌های بادی	N_{WT}	تعداد واحدهای فتوولتائیک	N_{PV}
تعداد ذخیره‌سازهای حرارتی	N_{TESS}	تعداد واحدهای غیرتجدیدپذیر	N_{CCHP}
تعداد ذخیره‌سازهای الکتریکی	N_{BESS}	تعداد شین‌های شبکه	N_{Bus}
تعداد خازن	N_{CB}	تعداد فیدها	N_{BR}
عمر مفید تجهیزات	T_{Life}	احتمال رخداد هر سناریو	π_s

متغیرهای اقتصادی

متغیر	نماد	متغیر	نماد
هزینه بهره‌برداری کل ریزشبکه در ساعت t و سناریوی s (دلار بر ساعت)	$f_1(t,s)$	قیمت پیشنهادی توسط بار پاسخگو در ساعت t (دلار بر کیلووات ساعت)	$\rho_{DR}(t)$
هزینه بارهای پاسخگو در ساعت t و سناریوی s (دلار بر ساعت)	$C_{DR}(t,s)$	هزینه تبادل توان با شبکه بالادست در ساعت t و سناریوی s (دلار بر ساعت)	$C_{Grid}(t,s)$
هزینه تولید توان واحد بادی i در ساعت t و سناریوی s (دلار بر ساعت)	$C_{WT}(i,t,s)$	قیمت تبادل توان با شبکه بالادست در ساعت t (دلار بر کیلووات ساعت)	$\rho_{Grid}(t)$
هزینه تولید توان واحد فتوولتائیک i در ساعت t و سناریوی s (دلار بر ساعت)	$C_{PV}(i,t,s)$	هزینه تولید توان غیرتجدیدپذیر i در ساعت t و سناریوی s (دلار بر ساعت)	$C_{CCHP}(i,t,s)$
هزینه تولید توان راکتیو توسط خازن l در ساعت t و سناریوی s (دلار بر ساعت)	$C_{CB}(l,t,s)$	ضرایب تابع هزینه توربین بادی (دلار بر ساعت)	$a_{WT}(i), b_{WT}(i)$
ضرایب تابع هزینه واحد فتوولتائیک (دلار بر ساعت)	$a_{PV}(i), b_{PV}(i)$	هزینه بهره‌برداری از ذخیره‌ساز حرارتی i در ساعت t و سناریوی s (دلار بر ساعت)	$C_{TESS}(i,t,s)$
هزینه بهره‌برداری از ذخیره‌ساز الکتریکی i در ساعت t و سناریوی s (دلار بر ساعت)	$C_{BESS}(i,t,s)$	ضرایب تابع هزینه واحد غیرتجدیدپذیر (دلار بر ساعت)	$a_{CCHP}(i), b_{CCHP}(i)$
نرخ تنزیل سالانه	Gr	ضرایب تابع هزینه ذخیره‌ساز حرارتی (دلار بر ساعت)	$a_{TESS}(i), b_{TESS}(i)$
هزینه سرمایه‌گذاری واحد غیرتجدیدپذیر (دلار بر کیلووات)	$Cost_{Capital}^{CCHP}$	هزینه سرمایه‌گذاری ذخیره‌ساز الکتریکی (دلار بر کیلووات)	$Cost_{Capital}^{BESS}$
هزینه سوخت واحد غیرتجدیدپذیر (دلار بر کیلووات ساعت)	$Cost_{CCHP}^{Fuel}$	هزینه سرمایه‌گذاری ذخیره‌ساز حرارتی (دلار بر کیلووات)	$Cost_{Capital}^{TESS}$
ضرایب تابع هزینه خازن (دلار بر ساعت)	$a_{CB}(l), b_{CB}(l)$	قیمت گاز طبیعی (دلار بر مترمکعب)	ρ_{gas}
هزینه بهره‌برداری و تعمیرات واحد فتوولتائیک (دلار بر کیلووات ساعت)	$Cost_{PV}^{O\&M}$	هزینه بهره‌برداری و تعمیرات ذخیره‌ساز الکتریکی (دلار بر کیلووات ساعت)	$Cost_{BESS}^{O\&M}$
هزینه بهره‌برداری و تعمیرات واحد بادی (دلار بر کیلووات ساعت)	$Cost_{WT}^{O\&M}$	هزینه بهره‌برداری و تعمیرات ذخیره‌ساز حرارتی (دلار بر کیلووات ساعت)	$Cost_{TESS}^{O\&M}$
ضرایب تابع هزینه ذخیره‌ساز الکتریکی (دلار بر ساعت)	$a_{BESS}(i), b_{BESS}(i)$	قیمت مبادله توان با شبکه در ساعت t (دلار بر ساعت)	$\rho_{Grid}(t)$
ضریب هزینه مربوط به تابع هدف تلفات (دلار بر کیلووات ساعت)	ρ_a	ضریب هزینه مربوط به تابع هدف آلودگی (دلار بر کیلوگرم ساعت)	ρ_2
هزینه سرمایه‌گذاری خازن (دلار بر کیلووات)	$Cost_{Capital}^{CB}$		

متغیرهای الکتریکی

نماد	متغیر	نماد	متغیر
$P_{DR}(t,s)$	توان تولیدی توسط بار پاسخگو در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)	$P_{Grid}(t,s)$	توان مبادله شده با شبکه بالادست در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)
$CF_{CCHP}(i)$	ضریب ظرفیت واحد غیرتجدیدپذیر i	η_{ele}	بازدهی الکتریکی واحد غیرتجدیدپذیر
ER_{Grid}	نرخ آلودگی شبکه (کیلوگرم بر کیلووات-ساعت)	β_{gas}	نرخ تبدیل گاز به برق (مترمکعب بر کیلووات-ساعت)
$P_{Capacity}^{BESS}$	ظرفیت ذخیره‌ساز الکتریکی (کیلووات)	$P_{Capacity}^{CCHP}$	ظرفیت واحد غیرتجدیدپذیر (کیلووات)
$P_{Grid}(t,s)$	توان مبادله شده با شبکه در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)	$Q_{CB}(l,t,s)$	توان راکتیو تولیدی توسط خازن l در ساعت t و سناریوی s (کیلووار)
$P_{Capacity}^{CB}$	ظرفیت خازن (کیلووار)	CF_{BESS}	ضریب ظرفیت ذخیره‌ساز الکتریکی
$V(z,t,s)$	اندازه ولتاژ در شین Z در ساعت t و در سناریوی s (پریونیت)	$P_{CCHP}(i,t,s)$	توان تولیدی توسط واحد غیرتجدیدپذیر i در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)
$\varphi(z,r,t,s)$	زاویه ادمیتانس میان شین‌های Z و r در زمان t و سناریوی s (پریونیت)	$P_{BESS}(i,t,s)$	توان مبادله شده با ذخیره‌ساز الکتریکی i در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)
P_{loss}	تلفات توان (کیلووات)	$CF_{CB}(l)$	ضریب ظرفیت خازن l
$R(k)$	مقاومت فیدر k (اهم)	I_k^{max}	بیشینه جریان مجاز عبوری از خط k (آمپر)
$I(k,t,s)$	جریان فیدر k در ساعت t و در سناریوی s (آمپر)	$\delta(z,t,s)$	زاویه ولتاژ در شین Z در ساعت t و در سناریوی s
$Q_{DR}(z,t,s)$	ظرفیت راکتیو بار پاسخگو در شین Z در ساعت t و در سناریوی s (کیلووار)	$P_{DR}(z,t,s)$	ظرفیت اکتیو بار پاسخگو در شین Z در ساعت t و در سناریوی s (کیلووات)
$QD(z,t,s)$	بار راکتیو پاسخگو در شین Z در ساعت t و در سناریوی s (کیلووار)	$PD(z,t,s)$	بار اکتیو در شین Z در ساعت t و در سناریوی s (کیلووات)
$QG(z,t,s)$	تولید توان راکتیو در شین Z در ساعت t و در سناریوی s (کیلووار)	$PG(z,t,s)$	تولید توان اکتیو در شین Z در ساعت t و در سناریوی s (کیلووات)
$P_{BESS}^{ch}(i,t,s)$	توان ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز الکتریکی در سیستم انرژی ترکیبی i در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)	$E_{BESS}^{min}(i)$	حداقل انرژی ممکن در ذخیره‌ساز الکتریکی در سیستم انرژی ترکیبی i (کیلووات-ساعت)
$Q_{CB}^{min}(l), Q_{CB}^{max}(l)$	کمینه و بیشینه توان راکتیو قابل تولید توسط خازن (کیلووار)	$P_{CCHP}^{min}(i), P_{CCHP}^{max}(i)$	کمینه و بیشینه توان قابل تولید توسط منبع غیرتجدیدپذیر (کیلووات)
$P_{BESS}^{dis-max}(i)$	بیشینه توان قابل تخلیه از ذخیره‌ساز الکتریکی در سیستم انرژی ترکیبی i (کیلووات)	V_{min}, V_{max}	کمینه و بیشینه ولتاژ مجاز شین‌های شبکه (پریونیت)
$P_{BESS}^{dis}(i,t,s)$	توان تخلیه شده توسط ذخیره‌ساز الکتریکی در سیستم انرژی ترکیبی i در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)	$E_{BESS}(i,t,s)$	میزان انرژی ذخیره در ذخیره‌ساز الکتریکی در سیستم انرژی ترکیبی i در ساعت t و سناریوی s (کیلووات-ساعت)
$U_{BESS}^{dis}(i,t,s)$	وضعیت تخلیه ذخیره‌ساز الکتریکی در سیستم انرژی ترکیبی i در ساعت t و سناریوی s (۱ برای وضعیت تخلیه و صفر برای سایر وضعیت‌ها)	$U_{BESS}^{ch}(i,t,s)$	وضعیت شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی در سیستم انرژی ترکیبی i در ساعت t و سناریوی s (۱ برای وضعیت شارژ و صفر برای سایر وضعیت‌ها)
$E_{BESS}^{max}(i)$	حداکثر انرژی ممکن در ذخیره‌ساز الکتریکی در سیستم انرژی ترکیبی i (کیلووات-ساعت)	$P_{BESS}^{ch-max}(i)$	بیشینه توان قابل ذخیره‌سازی در ذخیره‌ساز الکتریکی در سیستم انرژی ترکیبی i (کیلووات)
η_{BESS}^{dis}	بازدهی تخلیه ذخیره‌ساز الکتریکی	η_{BESS}^{ch}	بازدهی ذخیره‌سازی ذخیره‌ساز الکتریکی
$P_{PV}(i,t,s)$	توان تولیدی توسط واحد فتوولتاییک i در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)	$P_{WT}(i,t,s)$	توان تولیدی توسط توربین بادی i در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)
$P_w(v)$	توان تولیدی توسط واحد بادی با وزش باد با سرعت v (کیلووات)	$P_{PV}(si)$	توان تولیدی توسط ماژول فتوولتاییک با تابش خورشید به اندازه si (کیلووات)

متغیرهای حرارتی و برودت

نماد	متغیر	نماد	متغیر
$H_{TESS}(i,t,s)$	توان حرارتی مبادله‌شده با ذخیره‌ساز حرارتی i در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)	$H_{ab}(i,t,s)$	توان حرارتی تولیدی توسط واحد غیرتجدیدپذیر در سیستم انرژی ترکیبی i در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)
$P_{Capacity}^{TESS}$	ظرفیت ذخیره‌ساز حرارتی (کیلووات)	η_{the}	بازدهی حرارتی بویلر کمکی
$H_{AB}^{min}(i), H_{AB}^{max}(i)$	کمینه و بیشینه توان حرارتی قابل تولید توسط بویلر کمکی (کیلووات)	$H_{CCHP}^{min}(i), H_{CCHP}^{max}(i)$	کمینه و بیشینه توان حرارتی قابل تولید توسط منبع غیرتجدیدپذیر (کیلووات)
$H_{TESS}^{ch-max}(i)$	بیشینه انرژی حرارتی قابل ذخیره‌سازی در ذخیره‌ساز حرارتی در سیستم انرژی ترکیبی i (کیلووات)	$H_{TESS}^{ch}(i,t,s)$	انرژی حرارتی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز حرارتی در سیستم انرژی ترکیبی i در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)
$E_{TESS}^{min}(i)$	حداقل انرژی ممکن در ذخیره‌ساز حرارتی در سیستم انرژی ترکیبی i (کیلووات-ساعت)	$E_{TESS}(i,t,s)$	میزان انرژی ذخیره در ذخیره‌ساز حرارتی در سیستم انرژی ترکیبی i در ساعت t و سناریوی s (کیلووات-ساعت)
$H_{TESS}^{dis}(i,t,s)$	انرژی حرارتی تخلیه‌شده از ذخیره‌ساز حرارتی در سیستم انرژی ترکیبی i در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)	$H_{TESS}^{dis-max}(i)$	بیشینه انرژی حرارتی قابل تخلیه از ذخیره‌ساز حرارتی در سیستم انرژی ترکیبی i (کیلووات)
$U_{TESS}^{dis}(i,t,s)$	وضعیت تخلیه ذخیره‌ساز حرارتی در سیستم انرژی ترکیبی i در ساعت t و سناریوی s (۱) برای وضعیت تخلیه و صفر برای سایر وضعیت‌ها)	$U_{TESS}^{ch}(i,t,s)$	وضعیت شارژ ذخیره‌ساز حرارتی در سیستم انرژی ترکیبی i در ساعت t و سناریوی s (۱) برای وضعیت شارژ و صفر برای سایر وضعیت‌ها)
CF_{TESS}	ضریب ظرفیت ذخیره‌ساز حرارتی	$E_{TESS}^{max}(i)$	حداکثر انرژی ممکن در ذخیره‌ساز حرارتی در سیستم انرژی ترکیبی i (کیلووات-ساعت)
η_{TESS}^{dis}	بازدهی تخلیه ذخیره‌ساز حرارتی	η_{TESS}^{ch}	بازدهی ذخیره‌سازی ذخیره‌ساز حرارتی
η_{EH}	نرخ توان حرارتی تولیدشده توسط واحد غیرتجدیدپذیر	$D^{cooling}(t,s)$	بار برودت مصرفی در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)
		$H_{CCHP}(i,t,s)$	توان حرارتی تولیدشده توسط واحد غیرتجدیدپذیر در سیستم انرژی ترکیبی i در ساعت t و سناریوی s (کیلووات)

متغیرهای مشخصات واحدهای بادی و فتوولتائیک

نماد	متغیر	نماد	متغیر
s_i	تابش خورشید (کیلووات بر مترمربع)	v_{ct}	سرعت کات این باد (متر بر ثانیه)
P_{rated}	توان خروجی نامی واحد بادی (کیلووات)	v_{co}	سرعت کات اوت باد (متر بر ثانیه)
S^{PV}	مساحت ماژول فتوولتائیک (مترمربع)	v_r	سرعت نامی باد (متر بر ثانیه)
η^{PV}	بازدهی ماژول فتوولتائیک	v	سرعت باد (متر بر ثانیه)

زیر نویس‌ها

1. Renewables
2. Wind turbines (WT)
3. Photovoltaic panels (PV)
4. Energy storage systems (ESS)
5. Demand response programs (DRP)
6. Microgrid (MG)
7. Reconfiguration

8. Combined cooling, heating and power (CCHP)
9. Battery energy storage system and thermal energy storage system (BESS and TESS)
10. Auxiliary boiler (AB)