

Distribution Systems Energy Management in the presence of Smart Homes, Renewable Energy Resources and Demand Response Programs by Considering Uncertainties**Seyed Alireza Alavi Matin¹, M.Sc., Pouria Radmehr², Ph.D. Student, Amir Ahmarinejad³, Assistant Professor, Seyed Amir Mansouri², Ph.D.**¹Department of Electrical Engineering- Faculty of Engineering Arak University, Arak, Iran²Department of Electrical Engineering- Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran³Department of Electrical Engineering- Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
alireza.samtin@gmail.com, power.radmehr@gmail.com, amir.mansouri24@gmail.com,
a.ahmarinejad@iauctb.ac.ir**Abstract**

In this paper, a comprehensive energy management model is proposed in order to the operation of a modified 33-radial bus distribution system, in the presence of smart homes. In the proposed model, smart home customers are able to participate in a demand response (DR) program and their comfort index is also considered as the main constraint. The model also considers uncertainties related to the load demand, the generation of renewable energy resources, and electricity price. The Monte Carlo simulation method and the ScenRed tool are utilized to generate and reduce the scenarios, respectively. In order to mimic the actual operating conditions, in the simulation, the seasonal variations of load and generation are considered and the operation problem is solved for four seasons. A linear ac power flow is also used in the model. Finally, the problem is modeled as a mixed-integer linear programming (MILP) problem and solved by the CPLEX solver in GAMS software. The simulation results demonstrate that the model proposed in this study is a comprehensive framework for the operation of distribution systems in the presence of smart homes, which not only reduces operating costs but also increases the consumers' comfort index.

Keywords: demand response programs, distribution network, energy management, renewable energy resources, smart homes, social welfare index, uncertainties**Received:** 26 October 2021**Revised:** 23 December 2021**Accepted:** 9 February 2022**Corresponding Author:** Dr. Amir Ahmarinejad**Citation:** S.A. Alavi-Matin, P. Radmehr, A. Ahmarinejad, S.A. Mansouri, "Distribution systems energy management in the presence of smart homes, renewable energy resources and demand response programs by considering uncertainties", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 53, pp. 79-98, June 2023 (in Persian).

مدیریت انرژی شبکه‌های توزیع در حضور خانه‌های هوشمند، منابع انرژی تجدیدپذیر و برنامه‌های پاسخگویی بار با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

سید علیرضا علوی‌متین^۱، کارشناسی‌ارشد، پوریا رادمهر^۲، دانشجوی دکتری، امیر احمری‌نژاد^۳، استادیار، سید امیر منصوری^۴، دانش آموخته دکتری

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- دانشکده فنی و مهندسی - واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

alireza.samtin@gmail.com, power.radmehr@gmail.com, amir.mansouri24@gmail.com,
a.ahmarinejad@iauctb.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک مدل مدیریت انرژی جامع به‌منظور بهره‌برداری از یک سیستم توزیع ۳۳ شینه شعاعی اصلاح شده، با در نظر گرفتن خانه‌های هوشمند ارائه شده است. در مدل پیشنهادی مشترکین خانه‌های هوشمند قادر به مشارکت در یک برنامه پاسخ‌گویی بار (DR) بوده و شاخص رفاه مشترکین به‌عنوان یک قید اصلی در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل مذکور عدم قطعیت‌های میزان تقاضای بار، میزان تولید منابع تجدیدپذیر و همچنین قیمت برق در نظر گرفته شده‌اند. جهت تولید سناریوها از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و جهت کاهش تعداد آنها نیز از الگوریتم ScenRed استفاده شده است. به‌منظور نزدیکی شرایط شبیه‌سازی به شرایط بهره‌برداری واقعی، در مدل تغییرات تقاضا و تولید فصلی در نظر گرفته شده و مسئله بهره‌برداری به‌صورت چهار فصل حل می‌شود. همچنین از یک برنامه پخش بار AC خطی شده در این مدل، استفاده شده است. مسئله نهایی به‌صورت یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مدل شده و توسط حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار گمز حل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی، یک مدل جامع برای بهره‌برداری از سیستم‌های توزیع در حضور خانه‌های هوشمند است، که نه تنها منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود، بلکه شاخص رفاه مشترکین را نیز افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: برنامه پاسخگویی بار، خانه‌های هوشمند، شاخص رفاه مشترکین، شبکه توزیع، عدم قطعیت‌ها، مدیریت انرژی، منابع انرژی تجدیدپذیر

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۸/۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر امیر احمری‌نژاد

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

در دهه‌های گذشته شبکه انتقال توان با فرض تولید و کنترل متمرکز، انتقال توان یک جهته از طریق شبکه‌های انتقال و توزیع تا بار و ذخیره‌سازی انرژی کم یا صفر، استوار بوده است. اما با افزایش استفاده از وسایل تولید انرژی، مانند فتوولتائیک، سیستم ذخیره‌سازی انرژی باتری و وسایل نقلیه الکتریکی در خانه‌ها، این الگو مختل شده است [۱]. لذا روش‌های جدید برای کنترل توزیع شده و کاهش مصرف انرژی نیاز است. سیستم‌های مدیریت انرژی^۱ خانه کنترل‌کننده‌هایی هستند که تولید، ذخیره‌سازی و مصرف انرژی در یک خانه را مدیریت و هماهنگ می‌کنند. بنابراین با توجه به موارد بیان شده فوق، لزوم مدیریت انرژی خانه جایگاه ویژه‌ای در بحث بهینه‌سازی و مدیریت انرژی پیدا می‌کند [۲]. امروزه بهینه‌سازی منابع تولید انرژی در شبکه هوشمند و بخصوص در محیط خانه نقش اصلی در کشورهای پیشرفته و در حال توسعه دارد. بدیهی است ارائه یک روش بهینه‌سازی مطلوب باعث کاهش هزینه، سود بیشتر و استفاده بهینه مصرف‌کنندگان می‌شود و حتی از خاموشی‌های ناخواسته جلوگیری می‌کند [۳]. لذا در استفاده از منابع تولید انرژی در شبکه هوشمند علاوه بر محل نصب و ظرفیت منبع، نحوه بهره‌برداری هم نقش بسزایی دارد که رابطه مستقیم با نحوه کار خانه هوشمند با حضور منابع تجدیدپذیر^۲ مزایایی چون کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، کاهش هزینه‌هایی که ناشی از قطع و وصل از راه دور مشترکین است، کاهش زمان خاموشی مشترکین را شامل می‌شود [۴، ۵]. در شبکه توزیع هوشمند نیروی برق، شبکه می‌تواند بالقوه متشکل از هزاران تولیدکننده و فروشنده خرده و عمده برق باشد. این فروشندگان از طریق منابع تجدیدپذیر انرژی مانند سلول‌های خورشیدی، بادی، گرمای زمین و یا از طریق ذخیره انرژی در ساعات و ایام کم‌باری (و البته ارزان) و فروش آن در ساعات پرباری (گران) وارد بازار خرده فروشی برق می‌شوند. هدف تأمین برق مطمئن و پاسخ‌گویی به نیازهای رو به رشد مشتریان با کمترین خسارت به محیط زیست است [۶، ۷].

امروزه بیشتر مراکز تحقیقاتی و صنعتی با همراهی شرکت‌های برق دنیا به این نتیجه رسیده‌اند که شبکه هوشمند یک نیاز و ضرورت است. شبکه هوشمند نه یک شبکه تازه تأسیس، بلکه شکل تکامل یافته شبکه امروزی است که باید نقاط ضعف شبکه کنونی را برطرف سازد [۸]. شبکه هوشمند، زیربنای شبکه برق قدرت پیشرفته است برای بهبود کارایی، قابلیت اطمینان و ایمنی یا همین شبکه امروزی با افزودن قابلیت‌های پایش، تحلیل دقیق و ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر و کنترل و امکانات مخابراتی برای پاسخ‌گویی فوری به هرگونه اتفاق در شبکه است. مدیریت بار با حضور پویای مشترکان، بالا بردن بازدهی اقتصادی از طریق مدیریت دارایی‌ها، قابلیت اطمینان بالاتر، امنیت بیشتر و ایجاد محیطی پاک‌تر و سبزتر با حضور تولیدات پراکنده از اهم مزایای هوشمندسازی شبکه است [۹]. در مرجع [۱۰] ریزشبکه‌های هوشمند^۳ (MGs) به‌عنوان یک طرح قدرتمند برای استخراج سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی^۴ (EESs) شناخته می‌شوند. از سویی دیگر، برنامه‌های بهره‌وری انرژی^۵ (EEPs) به‌عنوان یک مؤلفه با ارزش و جدایی‌ناپذیر از سرمایه‌گذاری‌ها و بهره‌برداری‌های MGها شناخته می‌شوند. در حالی که EEPها به‌عنوان برنامه‌های بلند مدت شناخته می‌شوند، برنامه‌های کوتاه مدت مانند مدیریت انرژی روز پیش‌رو تأثیر می‌گذارند. در این مرجع، مدل برنامه مدیریت انرژی بهینه مرتبط با EESSها و EEPها به نام EMP پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۱] یک چارچوب مدیریت انرژی جدید براساس برچسب قیمت انرژی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی متصل شده به‌منظور رسیدگی به چالش‌های مدیریت انرژی روزانه در حضور عدم قطعیت‌ها ارائه شده که اثربخشی چارچوب پیشنهادی بر روی سیستم مدیریت انرژی یک ساختمان هوشمند نمونه در یک بازه زمانی ۲۴ ساعت بررسی شده است. در مرجع [۱۲] مطالعه یک روش مدیریت انرژی کارآمد برای مدیریت سیستماتیک مصرف انرژی در ناحیه خانگی برای کاهش ضریب میانگین به پیک و کاهش هزینه الکتریکی همراه با حداکثرسازی آسایش کاربر پیشنهاد می‌نماید که در آن طرح مدیریت انرژی کارآمد را با استفاده از برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح^۶ مختلط (MILP) توسعه داده تا لوازم هوشمند و شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی^۷ (EVs) به‌طور بهینه به‌منظور کاهش هزینه‌های انرژی زمانبندی شوند. در مرجع [۱۳]، الگوریتم ازدحام سالپ کارآمد^۸ (ESSA) برای حل مدیریت انرژی (EM) با مسئله انتشار ریزشبکه تجدیدپذیر شامل وسایل ذخیره‌سازی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۴] یک چارچوب برنامه‌نویسی دینامیکی تصادفی برای مدیریت انرژی بهینه از یک خانه هوشمند با ذخیره‌سازی انرژی خودرو متصل به شبکه^۹ (PEV) ارائه شده که در آن هدف حداقل کردن هزینه پخش‌کننده نرخ برق است در حالی که تقاضای برق خانگی و نیازهای شارژ PEV برآورده نماید. در ابتدا، حالت‌های بهره‌برداری تعریف شده، که شامل خودرو به شبکه^{۱۰} (V2G)، خودرو به خانه^{۱۱} (V2H)، و شبکه به

خودرو^{۱۲} (G2V) است. در مرجع [۱۵] روش ادغام شده‌ای برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه از هاب‌های انرژی با در نظر گرفتن اثرات منابع انرژی بادی با استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز انجام شده است. در مرجع [۱۶] چارچوب تصادفی دو سطحی برای مدیریت انرژی از نیروگاه‌های مجازی با در نظر گرفتن خودروهای برقی و برنامه‌های پاسخگویی بار^{۱۳} با استفاده از برنامه نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط انجام شده است. در مرجع [۱۷] استراتژی مدیریت انرژی در عملکرد و اقتصادی خانه‌های هوشمند^{۱۴} ادغام شده با انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز انرژی است که با استفاده از برنامه‌نویسی دینامیکی تصادفی انجام شده است. در مرجع [۱۸]، یک روش مدیریت انرژی بهینه ریزشبه‌بر اساس معیارهای فنی اقتصادی و زیست محیطی با استفاده از الگوریتم جستجوی کلاغ ارائه شده است. در مرجع [۱۹] مدیریت بهینه انرژی در شبکه‌های هوشمند چند ناحیه‌ای سبب افزایش رفاه اجتماعی، کاهش هزینه‌های اقتصادی و آلاینده‌گی زیست محیطی خواهد شد که در آن یک رویکرد دوسطحی به‌منظور حل مدل پیشنهادی ارائه شده که سطح بالایی به‌منظور کمینه‌سازی هزینه اقتصادی و آلاینده‌گی و سطح پایینی به‌منظور پیشینه‌سازی رفاه اجتماعی و به‌صورت شرایط خطی KKT فرموله شده است. در مرجع [۲۰] ساختار خانه‌های هوشمند تحت زیرساخت‌های شبکه‌های هوشمند (یا ریزشبه‌ها) اخیراً یکی از موضوع‌های مهم در زمینه سیستم‌های انرژی هوشمند بوده و لذا بهینه‌سازی وسایل خانگی و باتری با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر تحت سلطه^{۱۵} (NSGA-II) انجام شده است. در مرجع [۲۱] مطالعه با هدف بهینه‌سازی سیستم ذخیره‌ساز باتری و فتوولتائیک نصب شده در یک ساختمان کم مصرف در چین است که بهینه‌سازی‌های تک معیاره و چند معیاره به‌طور جامع با در نظر گرفتن عملکردهای فنی، اقتصادی و محیطی سیستم بر اساس استراتژی‌های تصمیم‌گیری شامل جمع وزنی و حداقل کردن فاصله تا روش‌های نقطه بهینه انجام می‌شود. در مرجع [۲۲] خطای حاصل از پیش‌بینی سرعت باد و تابش خورشید به وسیله توابع چگالی احتمال مدل‌سازی شده و یک مدل برنامه‌ریزی احتمالاتی به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد ریزشبه‌ها هوشمند در کوتاه مدت جهت حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی با حضور منابع تجدیدپذیر پیشنهاد می‌شود.

بررسی پژوهش‌های اخیر نشان داد که اکثر مقاله‌ها مسئله بهره‌برداری از سیستم‌های توزیع را بدون در نظر گرفتن خانه‌های هوشمند بررسی کرده و یا مسئله برنامه‌ریزی خانه‌های هوشمند را بدون در نظر گرفتن شبکه و قیود پخش بار حل کرده‌اند. اما در این مقاله مسئله بهره‌برداری از سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن چندین مجموعه از خانه‌های هوشمند حل شده است. همچنین در این تحقیق منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره‌ساز و برنامه‌های پاسخگویی تقاضا نیز در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که به‌منظور در نظرگیری شرایط بهره‌برداری واقعی، در مدل پیشنهادی تمامی عدم قطعیت‌های مربوط به تولید منابع تجدیدپذیر، قیمت بازار و تقاضای برق در نظر گرفته شده است. همچنین تغییرات فصلی نیز در مسئله در نظر گرفته شده است. به‌طور کلی نوآوری‌های این مقاله عبارتند از:

- ارائه یک مدل تصادفی MILP تصادفی برای بهره‌برداری از سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن خانه‌های هوشمند
 - به کارگیری یک روش مبتنی بر سناریو برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تولید و مصرف در مدل
 - در نظر گرفتن شاخص آسایش خانه‌های هوشمند به‌عنوان یک قید اصلی در مدل
 - اجرای یک برنامه پاسخگویی تقاضا به‌منظور اصلاح الگوی مصرف مشترکین
- ساختار مقاله به این شرح است. پس از بیان مسئله و اهمیت موضوع، در بخش دوم به مدل‌سازی سیستم و ذکر توابع هدف و قیود مسئله بیان شده است. در بخش سوم روش حل مدل پیشنهادی ارائه شده است. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی مسئله با استفاده از نرم‌افزار گمز آمده و در نهایت در بخش پنجم به نتیجه‌گیری مسئله می‌پردازیم.

۲- مدل‌سازی ریاضی مدل پیشنهادی

در این قسمت نکات مهم برای مدل‌سازی مانند تابع هدف و قیود پخش بار بیان می‌شود.

۲-۱- تابع هدف

تابع هدف اصلی مدل پیشنهادی، شامل حداقل‌سازی خرید توان از شبکه بالادست و مجموع هزینه‌های بهره‌برداری از تجهیزات تولیدی شبکه است. مقدار تابع هدف هزینه سالانه بهره‌برداری است که با واحد دلار بر سال در معادله (۱) بیان می‌شود.

$$Z = \sum_{sc} \rho_s \left[\sum_s w_s \left(\sum_t \sum_{sub} P_{sc,s,sub,t}^s \tau_{sc,s,t}^e + \sum_t \sum_g C_{sc,s,g,t}^{sg} \right) \right] \quad (1)$$

۲-۲- بهره‌برداری از تجهیزات داخلی خانه‌های هوشمند

در این قسمت نحوه مدل‌سازی خانه‌های هوشمند ارائه شده است. براساس معادله (۲) میزان بار هر یک از مصرف‌کنندگان از شبکه به‌طور مجزا و با توجه به نوع مشترک (سنتی یا هوشمند) به‌دست می‌آید. مطابق این رابطه میزان بار هر شین متشکل از یک بار ثابت، یک بار غیرقابل برنامه‌ریزی و یک بار قابل برنامه‌ریزی است. قید (۳) بیان می‌کند که بار قابل برنامه‌ریزی برای خانه های سنتی، صفر است. در نقطه مقابل قید (۴) نیز بیان می‌کند که بار غیرقابل برنامه‌ریزی برای خانه‌های هوشمند، صفر است.

$$P_{i,sc,s,t}^n = \sum_c P_{c,sc,s,t}^{fix} + \sum_{c \in \Lambda^i} P_{c,sc,s,t}^{schedule} + \sum_{c \notin \Lambda^i} P_{c,sc,s,t}^{traditional} \quad (2)$$

$$P_{c,sc,s,t}^{schedule} \Big|_{c \notin \Lambda^i} = 0 \quad (3)$$

$$P_{c,sc,s,t}^{traditional} \Big|_{c \in \Lambda^i} = 0 \quad (4)$$

رابطه‌های (۵) الی (۱۴) مربوط به بهره‌برداری از تجهیزات داخلی خانه‌های هوشمند است. به‌منظور تعیین میزان بار قابل کنترل خانه‌های هوشمند در هر ساعت از بهره‌برداری، قیود (۵) تا (۷) ارائه شده‌اند. قید (۵) بیان می‌کند که میزان بار قابل کنترل در هر ساعت، با توجه به تجهیزات فعال در آن ساعت تعیین می‌گردد. رابطه (۶) میزان متوسط مصرف هر تجهیز را محاسبه می‌کند. لازم به ذکر است که دوره زمانی فعال بودن هر تجهیز باید برابر با مدت زمان مورد نیاز همان تجهیز و در محدوده زمانی منحصر به خود باشد، که این قید در (۷) مدل‌سازی شده است.

$$P_{c,sc,s,t}^{schedule} = \sum_{d \in \Lambda^c} P_{d,sc,s,t}^{appliance} \quad (5)$$

$$P_{d,sc,s,t}^{appliance} = \frac{EEC_d S_{d,sc,s,t}}{LOT_d} \quad (6)$$

$$\sum_{t \in \Lambda^{UTR}} S_{d,sc,s,t} = LOT_d \quad (7)$$

نظر به اینکه تجهیزات موجود در خانه‌های هوشمند به سه شکل مختلف بهره‌برداری می‌شوند، در رابطه‌های (۸) تا (۱۴) نحوه بهره‌برداری از هر سه دسته، ارائه شده‌اند. در دسته اول تجهیزاتی قرار می‌گیرند که دوره عملکرد آنها پیوسته است. نحوه بهره برداری از این تجهیزات توسط قید (۸) مدل شده است. در دسته دوم تجهیزاتی قرار می‌گیرند که شروع فعالیت آنها مقید به پایان فعالیت تجهیز دیگری است. مدل ریاضی بهره‌برداری از تجهیزات دسته دوم در قیود (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده است. در نهایت در دسته سوم تجهیزاتی قرار می‌گیرند که علاوه بر محدودیت‌های ارائه شده برای تجهیزات دسته دوم، فاصله زمانی بین پایان فعالیت تجهیز دیگر و آغاز فعالیت آنها نباید از یک مقدار مشخص بیشتر شود. به‌منظور مدل‌سازی تجهیزات دسته سوم نیز قیود (۱۳) و (۱۴) ارائه شده‌اند.

$$\sum_{t \in \Lambda^{UTR}} |S_{d,sc,s,t} - S_{d,sc,s,t-1}| \leq 2 \quad d \in \Lambda^{type1} \quad (8)$$

$$\sum_{t \in \Lambda^{UTR}} S_{d,sc,s,t} - LOT_d = \sum_h H_{h,d,sc,s,t} \alpha_h \quad d \in \Lambda^{type2} \quad (9)$$

$$\sum_h H_{h,d,sc,s,t} = 1 \quad d \in \Lambda^{type2} \quad (10)$$

$$S_{d,sc,s,t} \leq H_{h=H,d,sc,s,t} \quad d \in \Lambda^{type2} \quad (11)$$

$$S_{d,sc,s,t}^{on} - S_{d,sc,s,t}^{off} = S_{d,sc,s,t} - S_{d,sc,s,t-1} \quad d \in \Lambda^{type3} \quad (12)$$

$$0 \leq S_{d,sc,s,t}^{on} + S_{d,sc,s,t}^{off} \leq 1, \quad d \in \Lambda^{type3} \quad (13)$$

$$S_{d,sc,s,t}^{on} - S_{d,sc,s,t}^{off} \leq T_{d,d}^{gap} \quad d \in \Lambda^{type3} \quad (14)$$

۲-۳- مدل‌سازی پنل فتوولتائیک و سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی

با نظر به اینکه در این مقاله هر خانه هوشمند مجهز به یک پنل فتوولتائیک^{۱۶} (PV) و سیستم ذخیره‌ساز است، در این قسمت نحوه مدل‌سازی دو تجهیز مذکور ارائه شده است. در این راستا در (۱۵) نحوه تولید توان در پنل PV نشان داده شده است.

$$P_{i,sc,s,t}^{PV} = \frac{G_{sc,s,t}^a}{G_0^a} \left[P_{Max,0}^M + \mu_{Pmax} \left(T_{sc,s,t}^a + G_{sc,s,t}^a \frac{NOCT-20}{800} - T_{M,0} \right) \right] \quad i \in \Lambda^{smart} \quad (15)$$

در رابطه‌های (۱۶) تا (۲۴)، نحوه مدل‌سازی سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی ارائه شده است. قید (۱۶) بیان می‌کند که سطح انرژی ذخیره شده در سیستم ذخیره‌ساز همواره بین ۳۰ درصد تا ۱۰۰ درصد ظرفیت ذخیره‌ساز است. حداکثر میزان شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز در هر ساعت به ترتیب توسط قیود (۱۷) و (۱۸) محدود شده است. قیود (۱۹) و (۲۰) نشان می‌دهند که میزان شارژ و دشارژ در هر ساعت باید از حداکثر ظرفیت مبدل متصل به سیستم ذخیره‌ساز کوچک‌تر باشند. لازم به ذکر است که در صورت فعالیت سیستم ذخیره‌ساز در هر یک از این حالت‌ها مقدار متغیر باینری مربوط به آن برابر با یک، و در غیر این صورت برابر با صفر است. همچنین قید (۲۱) بیان می‌کند که سیستم ذخیره‌ساز به‌طور همزمان نمی‌تواند در هر دو حالت شارژ و دشارژ فعال باشد. میزان انرژی ذخیره شده در سیستم ذخیره‌ساز در هر ساعت از طریق معادله (۲۲) محاسبه می‌شود. مطابق این رابطه میزان انرژی ذخیره‌ساز در ساعت جاری به سطح انرژی ساعت قبل و میزان شارژ و دشارژ در ساعت جاری وابسته است. در نهایت قیود (۲۳) و (۲۴) میزان انرژی ذخیره‌ساز را به ترتیب در ساعات شروع و پایان بهره‌برداری مشخص می‌کنند.

$$0.3 \leq SoC_{i,sc,s,t} \leq 1 \quad i \in \Lambda^{smart} \quad (16)$$

$$P_{i,sc,s,t}^{ch} \leq E_i^{max} \frac{(1 - SoC_{i,sc,s,t-1})}{(1 - \eta_{loss}^{ch}) \eta_{conv}} \quad i \in \Lambda^{smart} \quad (17)$$

$$P_{i,sc,s,t}^{dch} \leq E_i^{max} SoC_{i,sc,s,t-1} (1 - \eta_{loss}^{dch}) \eta_{conv} \quad i \in \Lambda^{smart} \quad (18)$$

$$P_{i,sc,s,t}^{ch} \leq \frac{E^{conv}}{\eta_{conv}} I_{i,sc,s,t}^{ch} \quad i \in \Lambda^{smart} \quad (19)$$

$$P_{i,sc,s,t}^{dch} \leq \frac{E^{conv}}{\eta_{conv}} I_{i,sc,s,t}^{dch} \quad (20)$$

$$0 \leq I_{i,sc,s,t}^{ch} + I_{i,sc,s,t}^{dch} \leq 1 \quad i \in \Lambda^{smart} \quad (21)$$

$$SoC_{i,sc,s,t} = SoC_{i,sc,s,t-1} - \frac{1}{E^{max}} \left[\frac{P_{i,sc,s,t}^{dch}}{(1 - \eta_{loss}^{dch}) \eta_{conv}} + P_{i,sc,s,t}^{ch} (1 - \eta_{loss}^{ch}) \eta_{conv} \right] \quad i \in \Lambda^{smart} \quad (22)$$

$$SoC_{i,sc,s,t=0} = SoC^{initial} \quad i \in \Lambda^{smart} \quad (23)$$

$$SoC_{i,sc,s,t=T} = SoC^{final} \quad i \in \Lambda^{smart} \quad (24)$$

۲-۴- شاخص آسایش مشترکین

همان‌طور که پیشتر نیز به آن اشاره شد، در این مقاله برنامه پاسخ‌گویی تقاضا با در نظر گرفتن شاخص آسایش مشترکین پیاده سازی شده است. در همین راستا، نحوه محاسبه شاخص رفاه مشترکین^{۱۷} در این بخش ارائه شده است. معادله (۲۵)، نحوه محاسبه میزان رفاه مشترکین را بیان می‌کند، که تابعی از مجموع رضایت‌مندی به‌دست آمده برای تمامی تجهیزات و همچنین ضریب وزنی مربوط به هر تجهیز است. لازم به ذکر است که ضرایب وزنی تجهیزات مختلف متفاوت هستند و ارزش هر تجهیز را مشخص می‌کنند. مقدار رضایت‌مندی هر تجهیز نیز به‌طور مجزا و توسط معادله (۲۶) محاسبه می‌شود، که تابعی از زمان بهره‌برداری از تجهیز است. تابع سه قسمتی ارائه شده در معادله (۲۷)، میزان رضایت‌مندی در هر ساعت و برای هر تجهیز را محاسبه می‌کند. مطابق این تابع، اگر زمان بهره‌برداری از هر تجهیز در بازه مورد رضایت مشترک باشد میزان شاخص رضایت‌مندی مربوط به آن تجهیز برابر با یک است. در مقابل اگر زمان بهره‌برداری از تجهیز مورد نظر قبل و یا بعد از بازه مورد رضایت مشترک باشد، شاخص رضایت‌مندی آن تجهیز کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در این مقاله شاخص رفاه مشترکین به عنوان یک قید اساسی در نظر گرفته شده است، میزان شاخص مذکور باید همواره بیشتر از یک مقدار مشخص باشد. این محدودیت در معادله (۲۸) مدل شده است.

$$UCL_c = \sum_{d \in \Lambda^c} w_d CV_{d,sc,s} \quad (25)$$

$$CV_{d,sc,s} = \sum_t S_{d,sc,s,t} PCV_{d,t} \quad (26)$$

$$PCV_{d,t} = \begin{cases} 1 & , t \in t^{PTR} \\ \alpha_b e^{t-t_s^{PTR}} & , t < t_s^{PTR} \\ \alpha_a e^{t_e^{PTR}-t} & , t > t_e^{PTR} \end{cases} \quad (27)$$

$$\sum_c UCL_c \geq UCL^{min} \quad (28)$$

۲-۵- قیود پخش بار

در این مقاله از یک مدل پخش بار AC خطی شده استفاده شده است تا علاوه بر نزدیکی شرایط شبیه‌سازی به شرایط بهره برداری واقعی، از مبادلات غیر واقعی توان در شبکه نیز جلوگیری شود. در رابطه‌های (۲۹) تا (۳۸) نحوه مدل‌سازی مدل مذکور ارائه شده است. در رابطه‌های (۲۹) و (۳۰) به ترتیب کندوکنانس و سوسپتانس هر خط محاسبه می‌شود. در رابطه‌های (۳۱) و (۳۲) نیز به ترتیب میزان توان اکتیو و راکتیو عبوری از هر خط محاسبه می‌شود، که تابعی از مقدار سوسپتانس و کندوکنانس هر خط و همچنین اندازه ولتاژ و زاویه آن در شین‌های ابتدا و انتهای هر خط است. قیود (۳۳) و (۳۴) نیز به ترتیب میزان توان اکتیو و راکتیو عبوری از هر خط را محدود می‌کنند. محدودیت‌های حداقل و حداکثر میزان مجاز اندازه ولتاژ و زاویه آن در هر شین نیز در قیود (۳۵) و (۳۶) مدل شده‌اند. در نهایت معادلات تعادل توان اکتیو و راکتیو نیز به ترتیب در رابطه‌های (۳۷) و (۳۸) ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که معادلات مذکور برای هر شین به صورت مجزا اجرا می‌شوند. مطابق معادله (۳۷) مجموع میزان توان اکتیو تولیدی و تزریق شده در هر شین باید با میزان توان اکتیو مصرفی و خارج شده از آن شین برابر باشد. شرایط مذکور برای معادله توان راکتیو نیز صادق است.

$$G_{le}^{line} = \frac{r_{le}}{r_{le}^2 + x_{le}^2} \quad (29)$$

$$B_{le}^{line} = \frac{x_{le}}{r_{le}^2 + x_{le}^2} \quad (30)$$

$$P_{sc,s,le,t}^{flow} = B_{le}^{line} (\delta_{sc,s,le,t} - \delta_{sc,s,le,t}) + G_{le}^{line} (V_{sc,s,le,t} - V_{sc,s,le,t}) \quad (31)$$

$$Q_{sc,s,i,t}^{flow} = B_{le}^{line} (V_{sc,s,i,t} - V_{sc,s,i,t}) - G_{le}^{line} (\delta_{sc,s,i,t} - \delta_{sc,s,i,t}) \quad (32)$$

$$-P_{le}^{flow,max} \leq P_{sc,s,le,t}^{flow} \leq P_{le}^{flow,max} \quad (33)$$

$$-Q_{le}^{flow,max} \leq Q_{sc,s,le,t}^{flow} \leq Q_{le}^{flow,max} \quad (34)$$

$$V_i^{min} \leq V_{sc,s,i,t} \leq V_i^{max} \quad (35)$$

$$\delta_i^{min} \leq \delta_{sc,s,i,t} \leq \delta_i^{max} \quad (36)$$

$$\sum_{sub \in \Lambda_{sub}^i} P_{sc,s,sub,t}^s + \sum_{le \in \Lambda_{lo}^i} P_{sc,s,le,t}^{flow} + \sum_{g \in \Lambda_g^i} P_{sc,s,g,t}^g + \sum_{w \in \Lambda_w^i} P_{sc,s,w,t}^{wind} + P_{i,sc,s,t}^{pv} + P_{i,sc,s,t}^{dch} = P_{i,sc,s,t}^n + \sum_{le \in \Lambda_{from}^i} P_{sc,s,le,t}^{flow} + P_{i,sc,s,t}^{ch} \quad (37)$$

$$Q_{sc,s,t}^s + \sum_{le \in \Lambda_{lo}^i} Q_{sc,s,le,t}^{flow} + \sum_{g \in \Lambda_g^i} Q_{sc,s,g,t}^g = Q_{i,sc,s,t}^n + \sum_{le \in \Lambda_{from}^i} Q_{sc,s,le,t}^{flow} \quad (38)$$

۲-۶- قیود مربوط به منابع تولید پراکنده

در این بخش قیود و هزینه بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده قرار گرفته بر روی شبکه، شامل توربین‌های گازی و توربین‌های بادی ارائه می‌شود. قید (۳۹) محدودیت مربوط به میزان تولید توربین گازی را مدل می‌کند. در این معادله یک متغیر باینری به کار رفته که وضعیت خاموش یا روشن بودن توربین گازی در هر ساعت را مشخص می‌کند. لازم به ذکر است که در صورت روشن بودن توربین در هر ساعت از بهره‌برداری مقدار این متغیر باینری یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود. قید (۴۰) نیز محدودیت

مربوط به توان راکتیو توربین گازی می‌باشد. نحوه تولید توان توسط توربین گازی نیز در معادله (۴۱) بیان شده است، که تابعی از میزان گاز ورودی و راندمان توربین گازی است. هزینه بهره‌برداری از توربین گازی نیز مطابق معادله (۴۲) محاسبه می‌شود. نحوه بهره‌برداری از توربین بادی نیز در تابع سه قسمتی (۴۳) ارائه شده است. قسمت اول این تابع بیان می‌کند که اگر سرعت باد در هر ساعت بیشتر از سرعت مجاز یا کمتر از سرعت مورد نیاز توربین بادی باشد، میزان تولید توربین بادی صفر خواهد بود. قسمت دوم تابع نیز بیان می‌کند که در صورتی که سرعت باد در هر ساعت بین حداقل سرعت مورد نیاز و سرعت نامی توربین باشد، میزان تولید توربین بادی توسط رابطه ارائه شده در قسمت دوم تابع محاسبه می‌شود. قسمت سوم تابع نیز بیان می‌کند که اگر سرعت باد در هر ساعت بین سرعت نامی و حداکثر سرعت مجاز توربین باشد، میزان تولید توربین بادی برابر با توان نامی آن خواهد بود. معادله‌های (۴۴) تا (۴۶) توابع توزیع احتمال را نشان می‌دهد.

$$P_g^{Gen,min} I_{sc,s,g,t}^g \leq P_{sc,s,g,t}^g \leq P_g^{Gen,max} I_{sc,s,g,t}^{Gen} \quad (39)$$

$$-\alpha^g P_{sc,s,g,t}^{Gen} \leq Q_{sc,s,g,t}^g \leq \alpha^g P_{sc,s,g,t}^{Gen} \quad (40)$$

$$P_{sc,s,g,t}^g = \eta_{ge}^g G_{sc,s,g,t}^g \quad i \in \Lambda^{GT} \quad (41)$$

$$C_{sc,s,g,t}^g = \tau_g P_{sc,s,g,t}^g \quad (42)$$

$$\begin{cases} P_{sc,s,w,t}^{wind} = 0, & v_{sc,s,t} < v^{ci}, v_{sc,s,t} > v^{co} \\ P_{sc,s,w,t}^{wind} = P^f \frac{v_{sc,s,t} - v^{ci}}{v^f - v^{ci}}, & v^{ci} \leq v_{sc,s,t} < v^f \\ P_{sc,s,w,t}^{wind} = P^f, & v^f \leq v_{sc,s,t} < v^{co} \end{cases} \quad (43)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (44)$$

$$g(x) = \frac{1}{B(\alpha,\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \quad (45)$$

$$h(x) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)} \quad (46)$$

معادله (۴۶) بیانگر توزیع نرمال یا توزیع گاوسی، یکی از مهم‌ترین توزیع‌های احتمال پیوسته در نظریه احتمالات است، علت نامگذاری و نیز اهمیت این توزیع این است که اُفت‌وخیز بسیاری از کمیت‌های طبیعی (فیزیکی) حول یک مقدار ثابت، از این توزیع پیروی می‌کند. دلیل اصلی این موضوع، قضیه حد مرکزی است. تابع چگالی احتمال این توزیع دو پارامتر دارد که یکی تعیین‌کننده میانگین (μ) و دیگری تعیین‌کننده واریانس توزیع هستند. منحنی تابع چگالی احتمال حول میانگین توزیع متقارن است. در حالت خاص اگر μ برابر صفر و σ برابر یک باشد، توزیع را نرمال استاندارد می‌نامند. معادله (۴۷) بیانگر توزیع بتا، توزیع احتمال پیوسته‌ای است که بر بازه $[0, 1]$ تعریف می‌گردد و به توزیع گاما مرتبط است. توزیع بتا دارای دو پارامتر آزاد است که این دو پارامتر شامل α و β می‌شوند. لازم به ذکر است که مقادیر α و β در این تابع مثبت هستند. تابع چگالی احتمال این توزیع بر حسب توان متغیر x و بازتاب آن، یعنی $(x-1)$ نوشته می‌شود. در این تابع، مقدار B ، یک ثابت عددی برای نرمال‌سازی است تا اطمینان حاصل شود که احتمال کل برابر با ۱ است. معادله (۴۸) بیانگر توزیع ویبول، یکی از توزیع‌های احتمالاتی پیوسته است. در این تابع توزیع، k بزرگتر از صفر بیانگر پارامتر شکل و λ بزرگتر از صفر بیانگر پارامتر مقیاس توزیع است. تابع توزیع چگالی این تابع با افزایش پارامتر شکل (k)، به سمت توزیع نرمال سوق پیدا می‌کند. با توجه به تغییر شکل تابع با تغییر متغیر k ، در ادامه حالت مختلف منحنی چگالی بطور موردی بیان می‌شود.

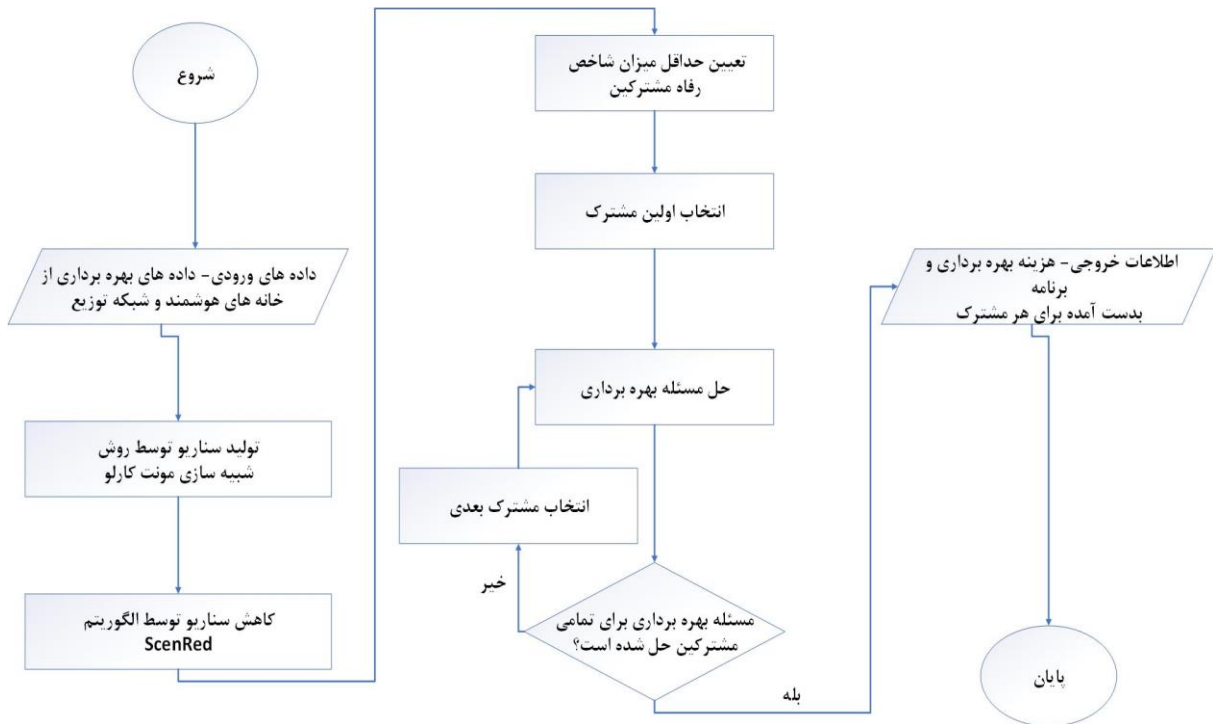
۳- روش حل مدل پیشنهادی

در این مقاله یک مدل مدیریت انرژی به‌منظور بهره‌برداری از خانه‌های سنتی و هوشمند قرار گرفته بر روی یک شبکه توزیع شعاعی ۳۳ شینه ارائه شده است. در مدل مذکور منابع تولید پراکنده شامل منابع تجدیدپذیر (توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی) و منابع غیرتجدیدپذیر (توربین‌های گازی)، و همچنین سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی در نظر گرفته شده اند. به‌منظور نزدیکی شرایط شبیه‌سازی به شرایط بهره‌برداری، در مدل مذکور عدم قطعیت‌های میزان بار مصرفی مشترکین، میزان تولید منابع تجدیدپذیر و همچنین قیمت برق در نظر گرفته شده‌اند. در این راستا در ابتدا برای هر یک از پارامترهای دارای عدم قطعیت، ۱۰۰۰ سناریو تولید شده است. به‌منظور تولید سناریوهای بار، باد، تابش و قیمت از توابع توزیع گوسی و بتا در روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. سپس به‌منظور کاهش حجم محاسبات تعداد سناریوها توسط الگوریتم ScenRed در نرم‌افزار GAMS به ۱۰ عدد کاهش داده شده‌اند. علاوه بر این، در این مقاله از چهار الگوی متفاوت برای تولید سناریوها و قیمت در هر فصل استفاده شده است تا به‌طور دقیق تأثیر تغییر فصل‌های مختلف بر نتایج بهره‌برداری از شبکه و خانه‌های هوشمند بررسی شود. مسئله نهایی نیز به‌صورت یک مسئله MILP مدل شده و توسط حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل شده است. در شکل (۱)، فلوچارت مربوط به روش حل مدل پیشنهادی در این مقاله ارائه شده است. با توجه به فلوچارت مشخص است که در ابتدا داده‌های ورودی شامل اطلاعات اولیه مربوط به بهره‌برداری از تجهیزات شبکه توزیع و تجهیزات داخلی خانه‌های هوشمند به نرم‌افزار GAMS داده می‌شوند. سپس سناریوهای مربوط به پارامترهای دارای عدم قطعیت برای هر فصل و به‌طور جداگانه تولید می‌شوند. در مرحله بعد با نظر به اینکه حل مسئله بهره‌برداری به‌صورت چهار فصل و تعداد ۱۰۰۰ سناریو برای هر پارامتر در هر فصل یک مسئله به شدت سنگین و زمان‌بر خواهد بود، تعداد سناریوها برای هر پارامتر به ۱۰ عدد کاهش داده می‌شوند. فرآیند کاهش سناریو توسط الگوریتم ScenRed انجام می‌شود. در مرحله بعد به‌منظور رعایت شاخص رفاه مشترکین، یک مقدار حداقل شاخص رفاه برای مشترکین تعیین می‌شود. در ادامه مسئله برنامه‌ریزی برای هر مشترک به‌طور مجزا و برای یک روز از هر فصل حل خواهد شد. در انتها نیز برنامه به‌دست آمده برای خانه‌های هوشمند و هزینه بهره‌برداری به‌صورت فصلی و سالیانه به عنوان خروجی ذخیره می‌شود.

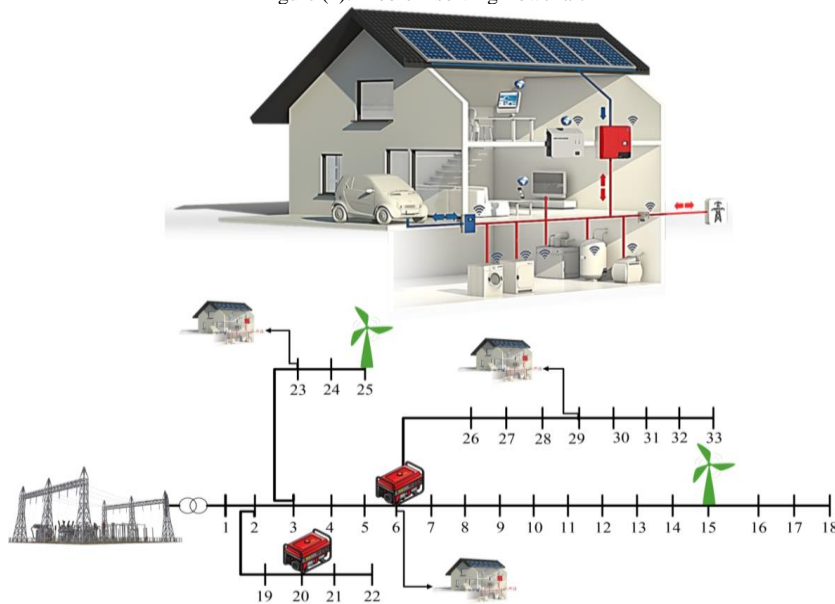
۴- شبیه‌سازی مدل پیشنهادی

۴-۱- شبکه مورد بررسی و داده‌های ورودی

سیستم مورد بررسی در این مقاله مطابق شکل (۲)، یک شبکه توزیع ۳۳ شینه شعاعی است. توان الکتریکی مورد نیاز شبکه، مطابق شکل از طریق خرید از شبکه بالادست و منابع تولید پراکنده قرار گرفته بر روی شبکه تأمین می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود دو توربین بادی بر روی شین‌های ۱۵ و ۲۵ و همچنین دو توربین گازی بر روی شین‌های ۶ و ۲۰ قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که مصرف‌کنندگان شبکه شامل خانه‌های سنتی و هوشمند هستند. چنانچه در شین‌های ۶، ۲۳ و ۲۹ به‌ترتیب تعداد ۴۱، ۸۶ و ۴۱ خانه هوشمند قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است هر خانه هوشمند علاوه بر تجهیزات داخلی، دارای یک پنل خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز است تا با استفاده از آن‌ها علاوه بر کاهش هزینه‌های بلند مدت تأمین انرژی، به افزایش انعطاف‌پذیری خود کمک کند. در ادامه این بخش به‌ترتیب فرمول‌بندی و روش حل مدل پیشنهادی به‌طور کامل ارائه خواهند شد. با توجه به بهره‌برداری چهارفصل در این مقاله، در ابتدا برای هر یک از پارامترهای دارای عدم قطعیت ۱۰۰۰ سناریو تولید شده و سپس تعداد آنها به ۱۰ عدد کاهش یافته است. سناریوهای کاهش یافته مربوط به تقاضای بار، سرعت باد، شدت تابش و قیمت برق به صورت چهار فصل و به ترتیب در شکل‌های (۳) تا (۶) ارائه شده‌اند. در جدول‌های (۱) و (۲) به‌ترتیب داده‌های مربوط به بهره‌برداری از واحدهای تولیدی تجهیزات داخلی خانه‌های هوشمند ارائه شده‌اند که مطابق با مرجع [۲۲] هستند. داده‌های مربوط به تولید سناریوها نیز از مرجع مذکور استخراج شده‌اند.



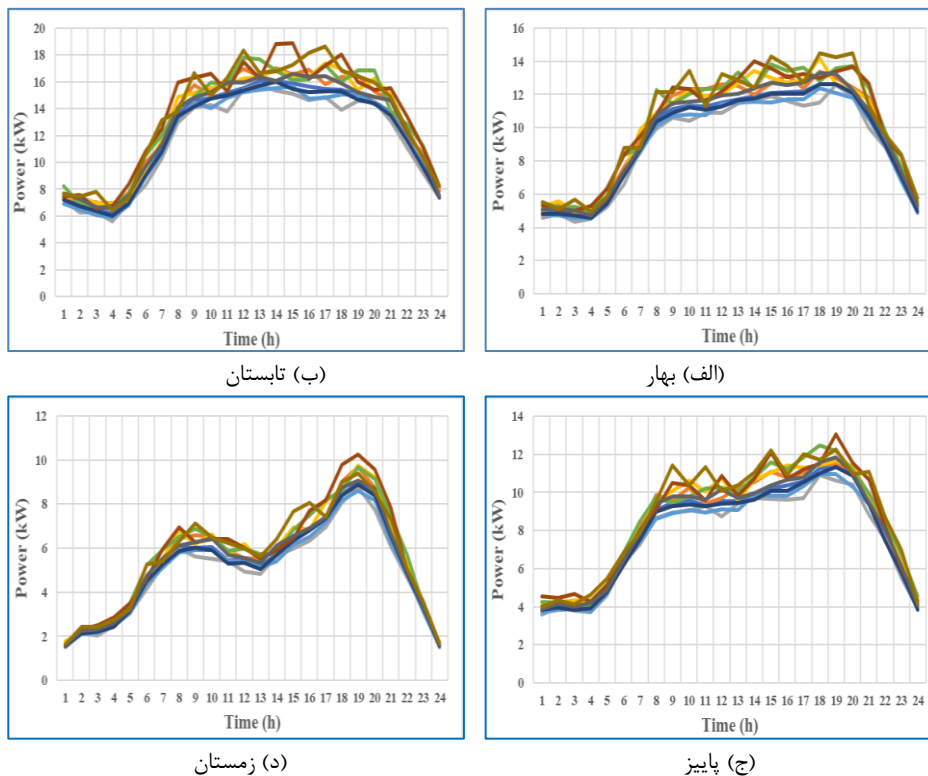
شکل (۱): فلوچارت حل مسئله
Figure (1): Problem solving flowchart



شکل (۲): سیستم مورد بررسی در این مقاله
Figure (2): Studied system in this paper

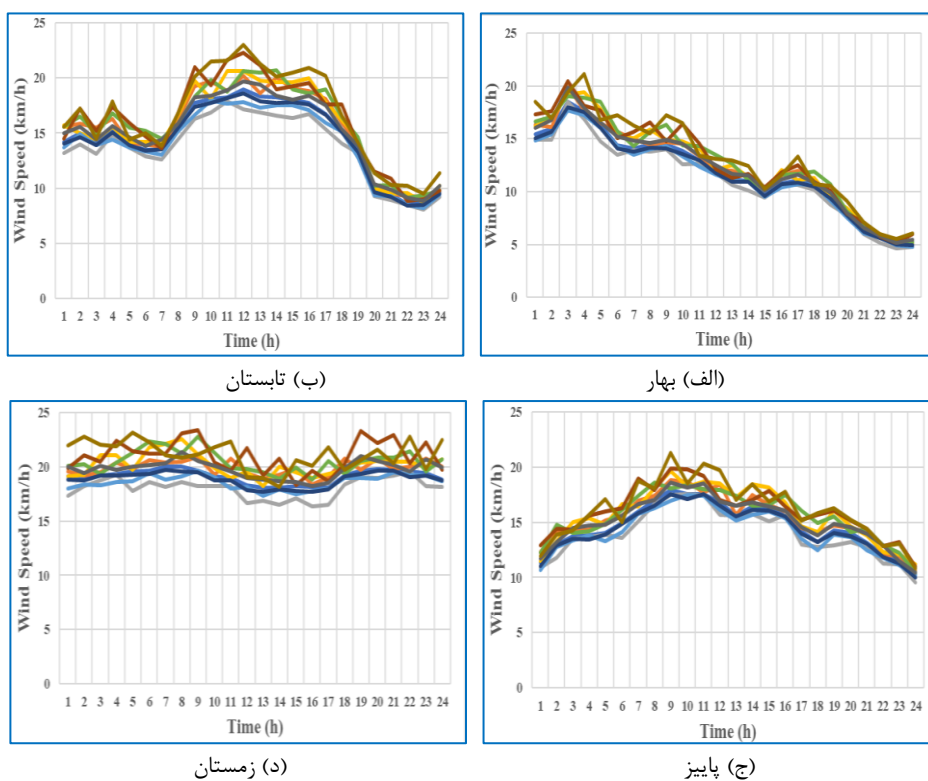
۲-۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش مسئله مدیریت انرژی تصادفی MILP پیشنهادی، توسط حل کننده CPLEX در نرم افزار GAMS حل شده و نتایج حاصل از مدل مذکور به طور مفصل ارائه خواهند شد. این نکته قابل ذکر است که کلیه نتایج ارائه شده در این بخش، مقادیر انتظاری حاصل از حل مدل تصادفی هستند. در این راستا در جدول (۳) هزینه بهره برداری سیستم توزیع تحت مطالعه برای یک روز از هر فصل ارائه شده است. در شکل (۷) نیز یک نمودار مقایسه‌ای، به منظور مقایسه هزینه بهره برداری در هر فصل ارائه شده است. با توجه به شکل مشخص است که بیشترین هزینه بهره برداری مربوط به فصل تابستان است که این امر با نظر به تقاضای بالای بار شبکه در فصل تابستان منطقی است.



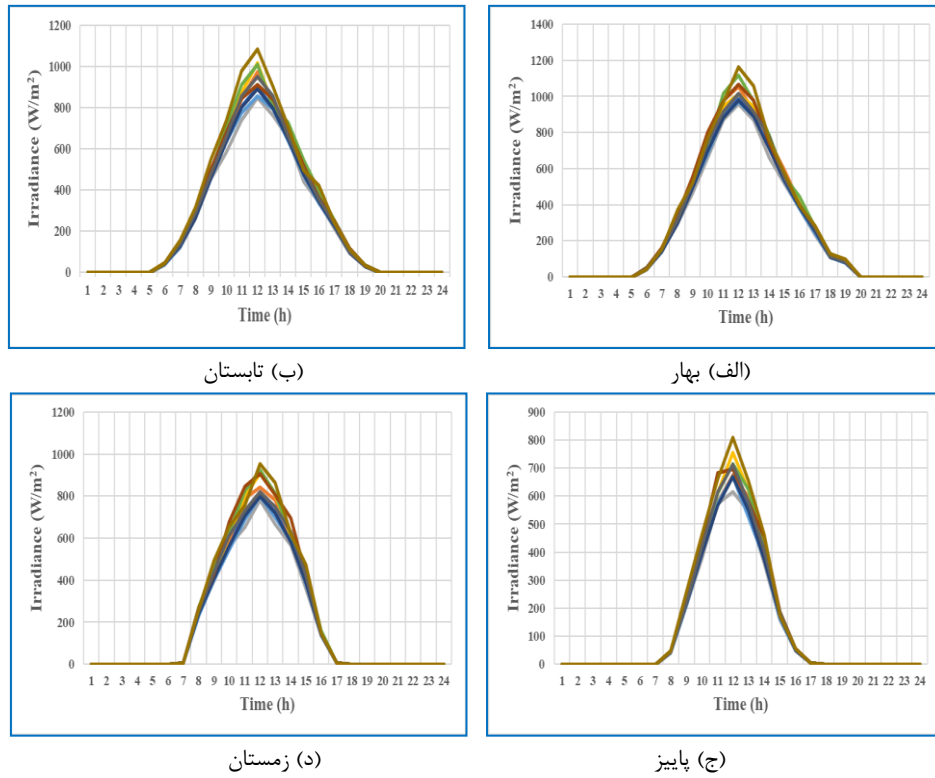
شکل (۳): سناریوهای فصلی مربوط به میزان تقاضای بار

Figure (3): Seasonal scenarios of the load demand, (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, (d) Winter



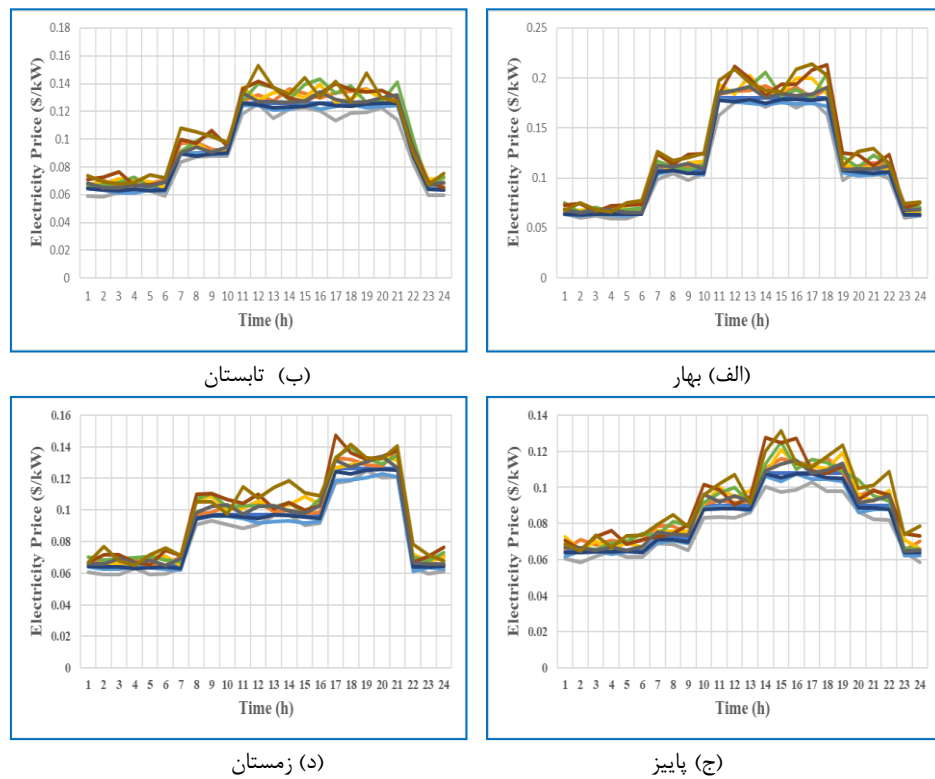
شکل (۴): سناریوهای فصلی مربوط به سرعت باد

Figure (4): Seasonal scenarios related to the wind speed, (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, (d) Winter



شکل (۵): سناریوهای فصلی مربوط به شدت تابش خورشید

Figure (5): Seasonal scenarios related to the solar radiation, (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, (d) Winter



شکل (۶): سناریوهای مربوط به قیمت خرید برق از شبکه بالادست

Figure (6): Seasonal scenarios related to the electricity purchase price, (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, (d) Winter

Table (1): Data related to the operation of gas and wind turbines

جدول (۱): داده‌های مربوط به بهره‌برداری از توربین‌های گازی و بادی

توربین	راندمان	هزینه بهره‌برداری (کیلووات ساعت)	مینیمم توان	ماکزیمم توان	شماره شین
بادی	۰/۹	۰	۰	۲۵۰	۱۵
بادی	۰/۹	۰	۰	۲۵۰	۲۵
گازی	۰/۶۵	۰/۰۲	۰	۳۰۰	۶
گازی	۰/۶۵	۰/۰۲	۰	۳۰۰	۲۰

Table (2): Data related to the operation of the appliances of smart homes

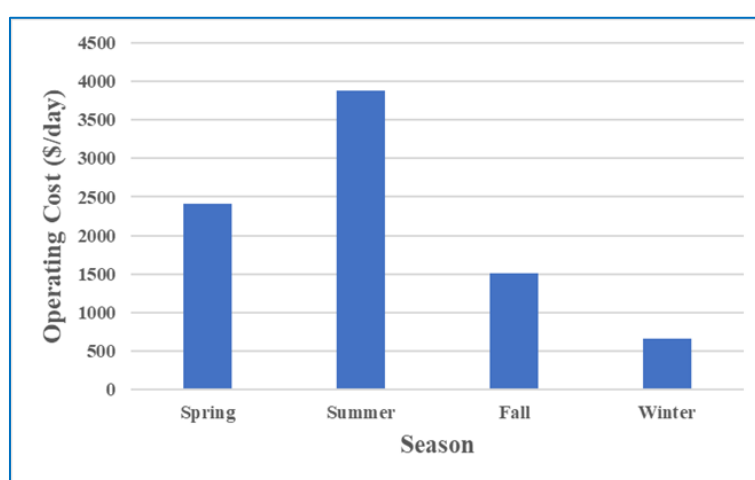
جدول (۲): داده‌های مربوط به بهره‌برداری از تجهیزات خانه‌های هوشمند

تجهیز	بازه مجاز (شروع)	بازه مجاز (پایان)	بازه ترجیحی (شروع)	بازه ترجیحی (پایان)	مدت فعالیت	بار مصرفی	ضریب وزنی
ماشین لباسشویی	۹	۱۵	۱۰	۱۴	۲	۱	۱
ماشین ظرفشویی	۹	۱۵	۱۴	۱۸	۲	۱/۴	۲
خشک‌کن لباس	۱۱	۱۶	۱۱	۱۷	۱	۱/۸	۱
اتو	۶	۸	۵	۷	۱	۱/۱	۲
جاروبرقی	۸	۱۲	۹	۱۲	۱	۰/۶۵	۲
مایکروویو	۱۱	۱۴	۱۱	۱۴	۱	۰/۹	۳
زودپز	۱۴۱	۱۷	۱۴	۱۷	۲	۰/۶	۳
کتری برقی	۷	۸	۶	۷	۱	۱	۳
توستر	۷	۸	۶	۸	۱	۰/۸	۳

پس از تابستان بیشترین هزینه بهره‌برداری به ترتیب مربوط به فصول بهار، پاییز و زمستان است. لازم به ذکر است که به‌منظور بررسی دقت روش K-means، تعداد سناریوهای اولیه توسط این روش نیز کاهش یافت و مسئله با در نظر گرفتن سناریوهای مذکور حل شد. نتایج حاصل از حل با این روش نیز در جدول (۳) ارائه شده‌اند. همان‌طور که می‌توان دید هزینه‌های بهره‌برداری در هر فصل به‌طور نسبی افزایش یافته‌اند که دلیل این امر انتخاب سناریوهای متفاوت توسط روش K-means است. به عبارت دیگر ۱۰ سناریو انتخاب شده در روش K-means با روش ScenRed متفاوت هستند. علاوه بر این مسئله یک بار توسط روش پیشنهادی در مرجع [۲۳] حل شد تا مقایسه‌ای میان روش پیشنهادی در مرجع مذکور و روش پیشنهادی صورت پذیرد. لازم به ذکر است که در مرجع [۲۳] مسئله بهره‌برداری توسط روش فازی به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی سه هدفه با اهداف حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری، حداقل‌سازی انتشار آلودگی و حداقل‌سازی شاخص اوج به‌متوسط است. قابل ذکر است که شاخص اوج به‌متوسط بیانگر فاصله میان پیک و میانگین تقاضای بار در هر ساعت است. به این ترتیب با کاهش آن منحنی تقاضا مسطح‌تر می‌شود. نتایج حاصل از حل مسئله توسط روش ارائه شده در مرجع [۲۳] در جدول (۳) ارائه شده‌اند. همان‌طور که می‌توان دید هزینه بهره‌برداری در تمامی فصل‌ها افزایش یافته است که دلیل این امر دست‌یابی به یک تعادل بین هزینه و انتشار آلودگی است. لازم به ذکر است که دلیل دست‌یابی به هزینه بهره‌برداری پایین‌تر در روش پیشنهادی در این مقاله نسبت به روش پیشنهادی در مرجع [۲۳]، در نظر گرفتن حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری به عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی است. در شکل‌های (الف-۸) الی (د-۸) میزان خرید توان و گاز طبیعی از شبکه بالادست برای یک روز از هر فصل ارائه شده است. با بررسی شکل‌ها مشخص است که بیشترین خرید توان مربوط به فصل تابستان بوده و کمترین خرید در فصل زمستان. با توجه به شکل‌ها مشخص است که در ساعات اولیه بهره‌برداری در فصل‌های مختلف تنها گاز طبیعی از شبکه بالادست خریداری شده و بار شبکه از طریق توربین‌های گازی و منابع بادی تأمین شده است. تنها در فصل تابستان به مقدار اندکی در ساعات مذکور از شبکه بالادست توان خریداری شده است تا کمبود تولید جبران شود.

Table (3): Seasonal operating cost
جدول (۳): هزینه بهره‌برداری فصلی

کاهش سناریو توسط روش ScenRed				
فصل	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
هزینه بهره‌برداری	۲۴۰۷/۰۵۷	۳۸۸۱/۰۳	۱۵۰۶/۹۸	۶۶۶/۱۹۸
کاهش سناریو توسط روش K-means				
فصل	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
هزینه بهره‌برداری	۲۴۳۷/۶۵	۳۸۹۸/۲۳	۱۵۱۴/۴۲	۶۷۵/۷۹
حل توسط روش پیشنهادی در مرجع [۲۲]				
فصل	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
هزینه بهره‌برداری	۲۶۴۲/۹۵	۴۰۰۲/۵۵	۱۶۹۹/۳۴	۸۰۹/۱۳



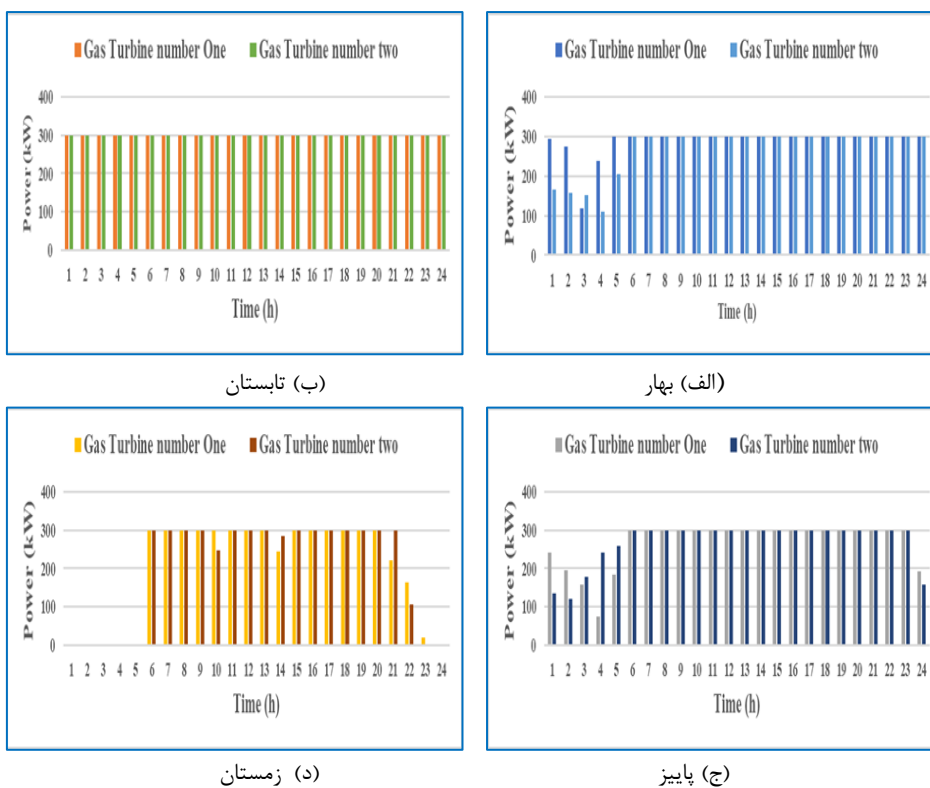
شکل (۷): نمودار مقایسه‌ای هزینه بهره‌برداری در هر فصل
Figure (7): Comparative chart of seasonal operating costs

همچنین بررسی فصل زمستان نشان می‌دهد که در ساعات اولیه روز شبکه خریدی از شبکه بالادست نداشته است، چرا که با توجه به میزان پایین تقاضای بار در این ساعات از فصل زمستان، شبکه قادر بوده در این ساعات بار مشترکین خود را از طریق منابع بادی تأمین کند. لازم به ذکر است که با توجه به سرعت باد در فصل زمستان، توربین‌های بادی در این فصل در اکثر ساعات در نقطه کار حداکثر خود هستند. در شکل‌های (الف-۹) الی (د-۹) میزان تولید توربین‌های گازی قرار گرفته در دو نقطه شبکه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود توربین‌های گازی در فصل تابستان در نقطه کار حداکثر خود هستند و پس از فصل تابستان نیز بیشترین تولید را به ترتیب در فصل‌های بهار و پاییز داشته‌اند. در شکل (۱۰) اندازه ولتاژ در هر شین در ساعت ۲۱ که ساعت اوج بار است، برای هر فصل و بر مبنای پیرونیته ارائه شده است. با توجه به شکل مشخص است که بیشترین سطح ولتاژ مربوط به فصل تابستان است، زیرا در این فصل منابع تولید محلی بیشترین تولید را داشته‌اند. به‌طور کلی بررسی شکل نشان می‌دهد در فصل‌هایی که بیشترین میزان تولید توسط منابع تولید محلی وجود داشته، اندازه ولتاژ در سطح بالاتری حفظ شده است. همچنین این نکته قابل ذکر است که افزایش میزان تولیدات محلی علاوه بر کاهش افت ولتاژ، باعث کاهش تلفات نیز در شبکه می‌شوند. با توجه به رعایت شاخص رفاه مشترکین در مدل پیشنهادی در این مقاله و در نظر گرفتن مفهوم مذکور به عنوان یک قید اصلی در مدل ریاضی، در شکل‌های (الف-۱۱) الی (د-۱۱) برنامه‌ریزی به‌دست آمده برای یک خانه هوشمند نوعی در فصل‌های مختلف ارائه شده است. بررسی ساعات فعالیت تجهیزات داخلی خانه هوشمند با بازه ترجیحی مشترکین در جدول (۲) نشان می‌دهد که قید رفاه مشترکین به‌طور کامل رعایت شده است.



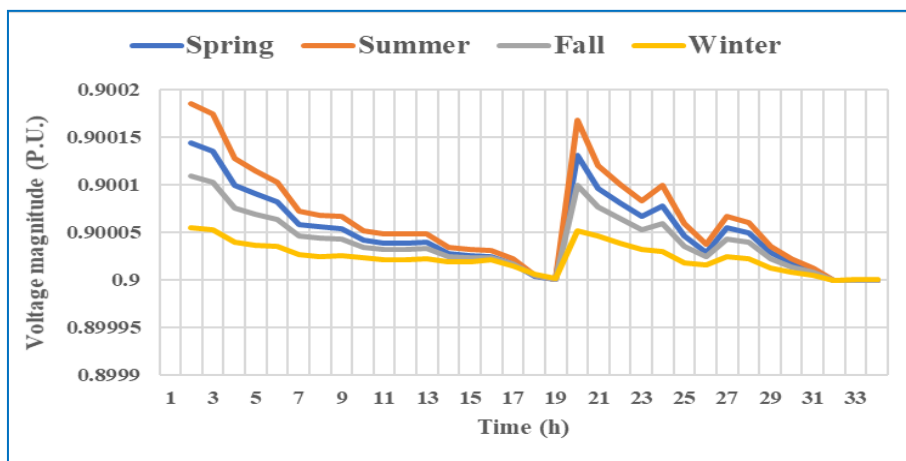
شکل (۸): میزان خرید توان و گاز طبیعی از شبکه بالادست

Figure (8): Power and gas purchased from the upstream grid, (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, (d) Winter



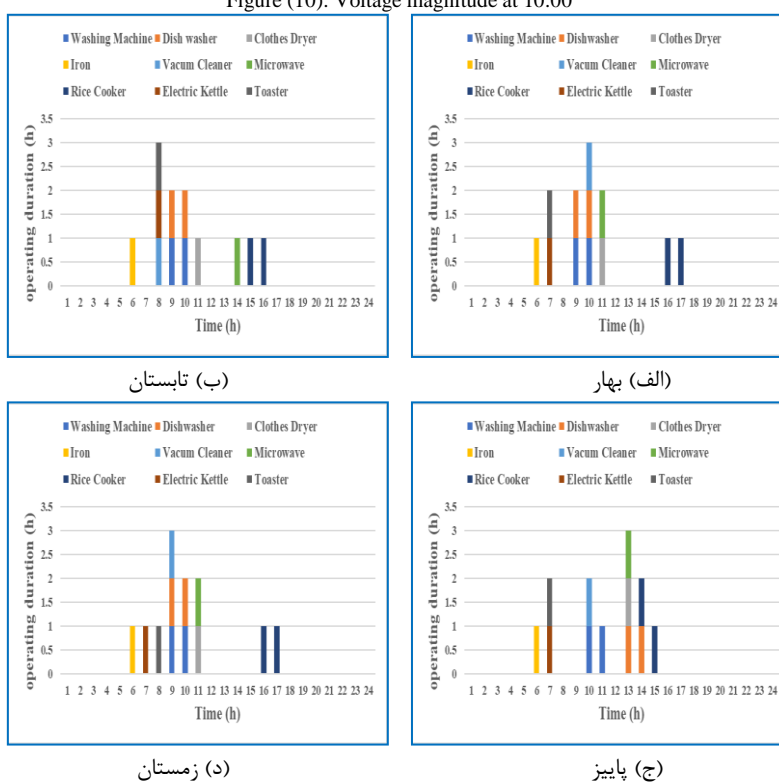
شکل (۹): میزان تولید توربین‌های گازی در هر فصل

Figure (9): Power purchased by gas turbines per season, (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, (d) Winter



شکل (۱۰): اندازه ولتاژ در ساعت ۲۱:۰۰

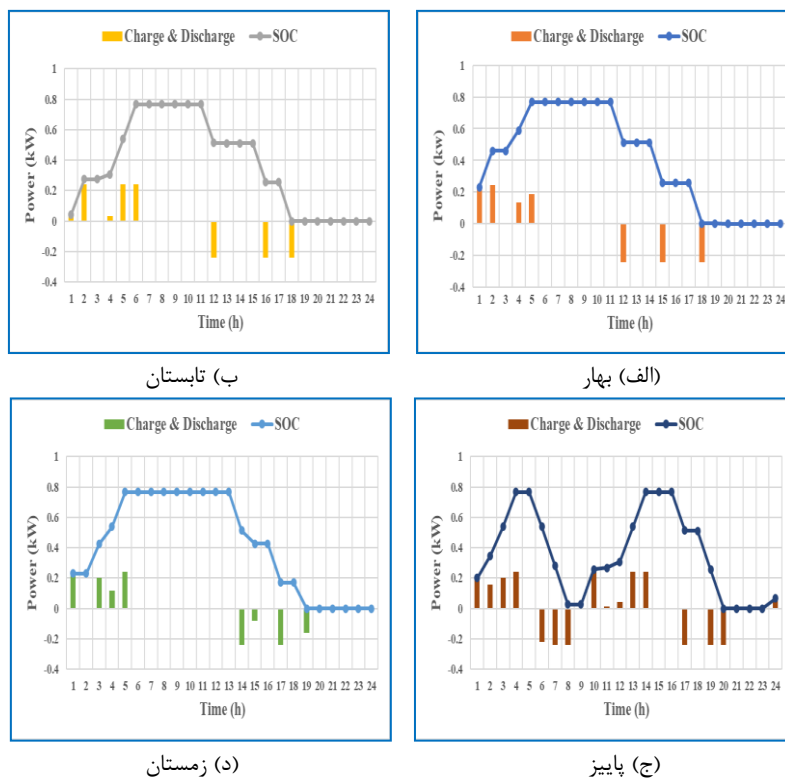
Figure (10): Voltage magnitude at 10:00



شکل (۱۱): برنامه روزانه بدست آمده برای یک خانه هوشمند در هر فصل

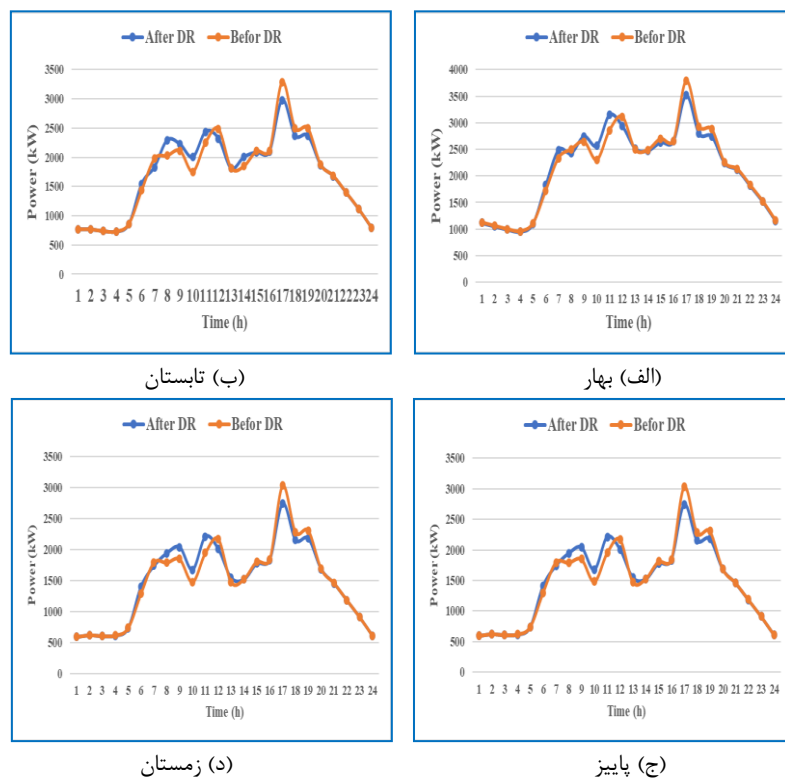
Figure (۱۱): Schedule obtained for a smart home per season, (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, (d) Winter

به منظور بررسی نحوه بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی قرار گرفته در خانه‌های هوشمند، در شکل‌های (الف-۱۲) الی (د-۱۲) نحوه بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز قرار گرفته در یک خانه هوشمند به طور جداگانه برای یک روز از هر فصل ارائه شده است. با توجه به شکل‌ها مشخص است که در فصل‌های مختلف سیستم ذخیره‌ساز در ساعات ابتدایی روز که میزان بار پایین است و قیمت انرژی الکتریکی نیز ارزان است، اقدام به شارژ کرده، و در ساعات میانی و پایانی روز که میزان بار و همچنین قیمت خرید انرژی الکتریکی بالا است اقدام به دشارژ نموده است. لازم به ذکر است که چنین عملکردی علاوه بر کاهش نیاز به خرید انرژی الکتریکی از شبکه بالادست در ساعات اوج بار و کاهش هزینه‌های تأمین انرژی، منجر به افزایش قابلیت اطمینان شبکه بالادست می‌شود. چرا که با توجه به تعداد بالای خانه‌های هوشمند در شبکه تحت مطالعه، در مجموع توان بسیار کمتری در ساعات اوج مصرف از شبکه درخواست شده است.



شکل (۱۲): نقطه کار باتری در هر فصل

Figure (12): The operating point of battery in each season, (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, (d) Winter



شکل (۱۳): تأثیر به کارگیری برنامه پاسخگویی بار بر منحنی تقاضای بار

Figure (13): Impact of demand response program on the load demand curve, (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, (d) Winter

با نظر به استفاده از برنامه پاسخگویی بار در برنامه‌ریزی خانه‌های هوشمند همراه با رعایت شاخص رفاه مشترکین، در شکل‌های (الف-۱۳) الی (د-۱۳) تأثیر به‌کارگیری برنامه پاسخگویی بار بر منحنی تقاضای مشترکین برای یک روز نوعی از هر فصل ارائه شده است. لازم به ذکر است که در هر شکل منحنی تقاضای مشترکین قبل و بعد از به‌کارگیری برنامه پاسخگویی بار نشان داده شده است. با توجه به شکل‌ها مشخص است که به‌کارگیری برنامه پاسخگویی بار با انتقال بخشی از بار از ساعات اوج به ساعات غیر اوج، باعث کاهش میزان تقاضا از شبکه در ساعات اوج و در نتیجه کاهش هزینه بهره‌برداری شده است. لازم به ذکر است که انتقال بخشی از بار به ساعات اولیه روز باعث تأمین بخش زیادی از آن توسط منابع تولید محلی می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله مدیریت انرژی سیستم توزیع با در نظر گرفتن خانه‌های هوشمند و همچنین خانه‌های سنتی بررسی شد. سیستم مورد بررسی در این مقاله یک شبکه توزیع ۳۳ شینه شعاعی اصلاح شده بود، که در آن خانه‌های هوشمند، منابع تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز قرار گرفته بودند. به‌منظور جلوگیری از مبادلات غیرواقعی توان در شبکه، از یک مدل پخش بار AC خطی شده استفاده شده و همچنین عدم قطعیت‌های تولید و مصرف در نظر گرفته شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که در برنامه‌ریزی به‌دست آمده برای شبکه، قید آسایش مشترکین در تمامی فصل‌ها همواره در محدوده بالایی بوده است. همچنین بررسی تبادل توان با شبکه بالادست نشان داد که استفاده از منابع بادی باعث کاهش چشم‌گیر خرید از شبکه شده‌اند به‌طوری که در ساعات ابتدایی فصل‌های مختلف توان الکتریکی از شبکه خریداری نشده و یا این مقدار بسیار ناچیز بوده است. بررسی اندازه ولتاژ در شین‌های شبکه نشان داد که در فصل تابستان علی‌رغم تقاضای بالای بار، میزان افت ولتاژ در شبکه کمتر بوده که دلیل این امر تولید بسیار بالاتر منابع تولید محلی در این فصل است. در نهایت، نتایج نشان دادند که اجرای برنامه پاسخگویی تقاضا منجر به اصلاح منحنی تقاضای مشترکین و همچنین کاهش هزینه‌های بهره‌برداری شده است. به‌طور کلی نتایج نشان دادند که مدل پیشنهادی قادر به بهره‌برداری بهینه از سیستم توزیع در حضور خانه‌های هوشمند و عدم قطعیت‌های مختلف است.

References

مراجع

- [1] G. Dileep, "A survey on smart grid technologies and applications", *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2589-2625, Feb. 2020 (doi: 10.1016/j.renene.2019.08.092).
- [2] Y. Yoldaş, A. Önen, S.M. Muyeen, A.V. Vasilakos, İ. Alan, "Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 205-214, May 2017 (doi: 10.1016/j.rser.2017.01.064).
- [3] Y. Li, X. Cheng, Y. Cao, D. Wang, L. Yang, "Smart choice for the smart grid: Narrowband internet of things (NB-IoT)", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 1505-1515, June 2018 (doi: 10.1109/JIOT-2017.2781251).
- [4] S. M. Amin, B.F. Wollenberg, "Toward a smart grid: power delivery for the 21st century", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 3, no. 5, pp. 34-41, Sept. 2005 (doi: 10.1109/MPAE.2005.1507024).
- [5] H. Merdanoğlu, E. Yakıcı, O. T. Doğan, S. Duran, M. Karatas, "Finding optimal schedules in a home energy management system", *Electric Power Systems Research*, vol. 182, Article Number: 106229, May 2020 (doi: 10.1016/j.epsr.2020.106229).
- [6] P.S. Kumar, R. Chandrasena, V. Ramu, G. Srinivas, K.V.S.M. Babu, "Energy management system for small scale hybrid wind solar battery based microgrid", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 8336-8345, Jan. 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.2964052).
- [7] T. Ahmad, H. Zhang, B. Yan, "A review on renewable energy and electricity requirement forecasting models for smart grid and buildings", *Sustainable Cities and Society*, vol. 55, Article Number: 102052, April 2020 (doi: 10.1016/j.scs.2020.102052).
- [8] L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, J. Ruan, C. Ma, Z. Song, D.G. Dorrell, M.G. Pecht, "Hybrid electrochemical energy storage systems: An overview for smart grid and electrified vehicle applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 139, Article Number: 110581, April 2021 (doi: 10.1016/j.rser.2020.110581).
- [9] G. Yuan, Y. Gao, B. Ye, R. Huang, "Real-time pricing for smart grid with multi-energy microgrids and uncertain loads: a bilevel programming method", *International Journal of Electrical Power and Energy*

- Systems, vol. 123, Article Number: 106206, Dec. 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106206).
- [10] S. Dorahaki, R. Dashti, H.R. Shaker, "Optimal energy management in the smart microgrid considering the electrical energy storage system and the demand-side energy efficiency program", Journal of Energy Storage, vol. 28, Article Number: 101229, April 2020 (doi: 10.1016/j.est.2020.101229).
- [11] S. Aslam, A. Khalid, N. Javaid, "Towards efficient energy management in smart grids considering microgrids with day-ahead energy forecasting", Electric Power Systems Research, vol. 182, Article Number: 106232, May 2020 (doi: 10.1016/j.epsr.2020.106232).
- [12] S. Aznavi, P. Fajri, R. Sabzehgar, A. Asrari, "Optimal management of residential energy storage systems in presence of intermittencies", Journal of Building Engineering, vol. 29, Article Number: 101149, May 2020 (doi: 10.1016/j.jobe.2019.101149).
- [13] E.E. Elattar, S.K. ElSayed, "Probabilistic energy management with emission of renewable micro-grids including storage devices based on efficient salp swarm algorithm", Renewable Energy, vol. 153, pp. 23-35, June 2020 (doi: 10.1016/j.renene.2020.01.144).
- [14] X. Wu, X. Hu, X. Yin, S.J. Moura, "Stochastic optimal energy management of smart home with PEV energy storage", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 9, no. 3, pp. 2065-2075, Sept. 2016 (doi: 10.1109/TSG.2016.2606-442).
- [15] S. Mansouri, A. Ahmarinejad, M. Ansarian, M. Javadi, J. Catalao, "Stochastic planning and operation of energy hubs considering demand response programs using Benders decomposition approach", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 120, Article Number: 106030, Sept. 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106030).
- [16] F. Sheidaei, A. Ahmarinejad, "Multi-stage stochastic framework for energy management of virtual power plants considering electric vehicles and demand response programs", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 120, Article Number: 106047, Sept. 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106047).
- [17] X. Wu, X. Hu, S. Moura, X. Yin, V. Pickert, "Stochastic control of smart home energy management with plug-in electric vehicle battery energy storage and photovoltaic array", Journal of Power Sources, vol. 333, pp. 203-212, Nov. 2016 (doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.09.157).
- [18] M.A. Hormozi, B.B. Firoozi, T. Niknam, "Bi-level energy management optimization in multi-area smart grids", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 42, pp. 29-40, May 2020 (doi: 20.1001.1.23223871.1399.11.42.3.4).
- [19] 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 (doi: 20.1001.1.23223871.1399.11.43.4.7).
- [20] A.H. Sharifi, P. Maghouli, "Energy management of smart homes equipped with energy storage systems considering the PAR index based on real-time pricing", Sustainable Cities and Society, vol. 45, pp. 579-587, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.scs.2018.12.019).
- [21] J. Liu, X. Chen, H. Yang, Y. Li, "Energy storage and management system design optimization for a photovoltaic integrated low-energy building", Energy, vol. 190, Article Number: 116424, Jan. 2020 (doi: 10.1016/j.energy.2019.116424).
- [22] G.R. Aghajani, H.A. Shayanfar, H. Shayeghi, "Demand side management in a smart micro-grid in the presence of renewable generation and demand response", Energy, vol. 126, pp. 622-637, May 2017 (doi: 10.1016/j.energy.2017.03.051).
- [23] S.A. Mansouri, A. Ahmarinejad, E. Nematbakhsh, M.S. Javadi, A.R. Jordehi, J.P. Catalão, "Energy management in microgrids including smart homes: A multi-objective approach", Sustainable Cities and Society, vol. 69, Article Number: 102852, June 2021 (doi: 10.1016/j.scs.2021.102852).

ضمیمه

پارامترهای مربوط به توربین‌های بادی	
توان بادی	$P_{sc,s,w,t}^{wind}$
متغیر باینری تعیین‌کننده وضعیت خاموش یا روشن بودن توربین بادی را روشن می‌کند	$I_{sc,s,g,t}^{Gen}$
توان نامی توربین بادی	P^r
حداکثر سرعت باد توربین بادی	$v_{sc,s,t}$
حداقل سرعت باد مورد نیاز برای تولید توان توسط توربین بادی	v^{ci}

پارامترهای مربوط به شبکه	
احتمال وقوع هر سناریو	$\sum_{sc} \rho_s$
تعداد روزهای هفته	w_s
توان خریداری شده از شبکه بالادست / قیمت خرید برق	$\sum_t \sum_{sub} P_{sc,s,sub,t}^s \pi_{sc,s,t}^e$
بخش ثابت تقاضای بار	$P_{c,sc,s,t}^{fix}$
تقاضای بار در منازل هوشمند/ بار قابل برنامه‌ریزی خانه‌های هوشمند	$P_{c,sc,s,t}^{schedule}$
بخشی از تقاضای بار منحنی تقاضای بار منازل سنتی / بار خانه‌های سنتی	$P_{c,sc,s,t}^{traditional}$
بار هر یک از تجهیزات خانه‌های هوشمند	$\sum_{d \in A^c} P_{d,sc,s,t}^{appliance}$
متغیر باینری وضعیت روشن و خاموش بودن هر وسیله	$EEC_d S_{d,sc,s,t}$
زمان فعالیت تجهیزات	LOT_d
میزان مصرف انرژی هر یک از تجهیزات	$S_{d,sc,s,t}$
وضعیت روشن و خاموش بودن هر وسیله در ساعت قبل	$S_{d,sc,s,t-1}$
متغیر باینری تعیین‌کننده گام تابع	$H_{h,d',sc,s,t}$
گام تابع	α_h
شاخص وضعیت خاموش شدن هر تجهیز و شاخص وضعیت روشن شدن هر تجهیز	$S_{d,sc,s,t}^{off}, S_{d,sc,s,t}^{on}$
فاصله زمانی بین تجهیزات وابسته	$T_{d,d'}^{gap}$
ضریب تأثیر حرارتی	μ_{Pmax}
دمای هوا در هر ساعت	$T_{sc,s,t}^a$
ضریب وزنی مربوط به هر تجهیز خانه هوشمند	w_d
میزان رضایت و میزان رضایت مشترکین	$CV_{d,sc,s}, UCL_c$
متغیر باینری مربوط به وضعیت بهره‌برداری از هر تجهیز	$S_{d,sc,s,t}$
بازه زمانی ترجیحی مشترکین / میزان رضایت ترجیحی مشترکین	$PCV_{d,t}$
بازه ترجیحی مشترکین	$\alpha_b e^{t-s^{PTR}}$
حداقل میزان رضایت مشترکین	UCL^{min}
مقاومت و اندوکتانس	R_{le}, G_{le}^{line}
راکتانس و سوسپتانس	X_{le}^2, B_{le}^{line}
توان عبوری از هر خط و توان راکتیو عبوری از هر خط	$P_{sc,s,le,t}^{flow}, Q_{sc,s,i,t}^{flow}$
اندازه و زاویه ولتاژ در هر باس	$V_{sc,s,le,t}, \delta_{sc,s,le,t}$
حداکثر میزان مجاز توان عبوری از هر خط و حداکثر توان عبوری از هر خط	$-P_{le}^{flow,max}, P_{le}^{flow,max}$
حداقل و حداکثر توان راکتیو عبوری از هر خط	$-Q_{le}^{flow,max}, Q_{le}^{flow,max}$
حداقل و حداکثر میزان مجاز ولتاژ در هر باس	V_i^{min}, V_i^{max}
توان خریداری شده از شبکه بالادست	$P_{sc,s,sub,t}^s$
تقاضای توان در هر نقطه و توان ذخیره شده در هر نقطه شین	$P_{i,sc,s,t}^n, P_{i,sc,s,t}^{ch}$

پارامترهای مربوط به پنل‌های خورشیدی	
شدت تابش استاندارد خورشید و شدت تابش خورشید در هر ساعت	$G_0^a, G_{sc,s,t}^a$
حداکثر توان خروجی فتوولتائیک در شرایط تابش استاندارد	$P_{max,0}^M$
ظریب عملکرد مربوط به پنل خورشیدی	NOCT
دمای مخصوص پنل در شرایط استاندارد	$T_{M,0}$
توان خورشیدی	$P_{i,sc,s,t}^{pv}$

پارامترهای مربوط به سیستم‌های ذخیره‌ساز	
میزان شارژ هر باتری در هر ساعت و تحت شارژ باتری در هر ساعت	$SOC_{i,sc,s,t}^ch, P_{i,sc,s,t}^ch$
ظرفیت باتری	E_i^{max}
راندمان شارژ و دشارژ	η_{loss}^{ch}
راندمان مبدل سیستم ذخیره‌ساز	$\eta^{conv}, \eta_{loss}^{dech}$
میزان دشارژ هر باتری در هر ساعت	$P_{i,sc,s,t}^{dech}$
متغیر باینری که وضعیت شارژ را تعیین می‌کند	$I_{i,sc,s,t}^{ch}$
متغیر باینری که وضعیت دشارژ را تعیین می‌کند	$I_{i,sc,s,t}^{dech}$
تحت شارژ باتری در ساعت اولیه	$SOC^{initial}$
تحت شارژ باتری در ساعت نهایی	SOC^{final}
توان تخلیه شده توسط سیستم ذخیره‌ساز	$P_{i,sc,s,t}^{dch}$

پارامترهای مربوط به واحدهای حرارتی	
هزینه بهره‌برداری از واحدهای حرارتی یا توربین‌های گازی	$\sum_t \sum_g C_{sc,s,g,t}^g$
توان اکتیو توسط توربین‌های گازی	$P_{sc,s,g,t}^g$
حداکثر میزان مجاز	$P_g^{Gen,max}$
راندمان توربین گازی	η_{ge}^g
گاز مصرفی توربین گازی	$G_{sc,s,g,t}^g$
هزینه بهره‌برداری از توربین گازی	$C_{sc,s,g,t}^g$
هزینه تولید هر کیلووات توان توسط توربین گازی	π_g
توان اکتیو توسط توربین‌های گازی	$P_{sc,s,g,t}^g$
حداکثر میزان مجاز	$P_g^{Gen,max}$
راندمان توربین گازی	η_{ge}^g
گاز مصرفی توربین گازی	$G_{sc,s,g,t}^g$
توان تولید شده توسط توربین‌های گازی	$P_{sc,s,g,t}^g$

زیر نویس‌ها

1. Energy management
2. Energy renewable resources
3. Smart micro-grids
4. Electrical energy storage systems
5. Energy efficiency programs
6. Mixed integer linear programming
7. Electric vehicles
8. Efficient salp swarm algorithm
9. Plug-in electric vehicle
10. Vehicle to grid
11. Vehicle to home
12. Grid to vehicle
13. Demand response
14. Smart homes
15. Non-dominated sorting genetic algorithm
16. Photovoltaic
17. Social welfare index