

ماژول مقاوم‌سازی شده مدیریت انرژی برای یک خانه هوشمند مجهز به منابع انرژی تجدیدپذیر فتوولتاییک و توربین بادی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷

کد مقاله: ۷۲۵۴۹

بابک صفری چاپک^۱، صادق صباغ‌گل^۲،

سجاد غلامرضایی سرولات^۲، احسان عبداله‌زاده شهربابکی^۴

چکیده

با پیشرفت تکنولوژی، نیاز به حداقل رساندن هزینه مصرف انرژی مشترکین با حرکت به سمت هوشمندسازی و اتوماسیون خانه‌ها اجتناب‌ناپذیر می‌گردد. الحاق منابع فتوولتاییک و توربین بادی به خانه‌های هوشمند بواسطه عدم قطعیت در توان خروجی موجب افزودن یک چالش جدید به مسئله مدیریت بار خانه‌های هوشمند می‌شود. بنابراین، در این مقاله یک ماژول مقاوم‌سازی شده مدیریت انرژی برای خانه هوشمند مجهز به منابع انرژی تجدیدپذیر فتوولتاییک و توربین بادی پیشنهاد می‌گردد. طرح قیمت‌گذاری انرژی در بازار برق خرده‌فروشی به صورت مدل قیمت‌گذاری زمان-واقعی است. در اینجا، خانه هوشمند به شبکه سراسری متصل است و امکان خرید و فروش انرژی را در زمان مناسب دارد. کمینه‌سازی هزینه انتشار آلودگی بواسطه تولید انرژی توسط منابع تولید همزمان برق و حرارت، مصرف انرژی برای بارهای خانگی قابل قطع و غیر قابل قطع و بارهای خانگی ترموستاتی بعنوان تابع هدف تعریف می‌شود. الگوریتم هوشمند ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی مذکور استفاده می‌گردد. بمنظور اعتبارسنجی و تایید کارایی مدل پیشنهادی، مطالعات عددی بر روی یک خانه هوشمند تست می‌شود و نتایج مفهومی شبیه‌سازی بیان می‌گردد.

واژگان کلیدی: مدیریت انرژی خانه هوشمند، قیمت‌گذاری زمان-حقیقی، منابع خورشیدی و بادی، تولید واحدهای تولید همزمان برق-حرارت، ذخیره‌ساز باتری، الگوریتم ژنتیک.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی برق-قدرت، دانشگاه زنجان

bbk.sch@znu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری مهندسی برق-الکترونیک، هیئت علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، تهران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی برق-الکترونیک، هیئت علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، تهران

۴- دکتری مهندسی مکانیک، هیئت علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، تهران

خانه هوشمند، یک فناوری نوظهور و در حال گسترش است که در پایین‌ترین سطح خود می‌تواند به همه خدماتی اشاره داشته می‌برد بدون حضور صاحب خانه عمل یا پیامی را در محیط خانه اجرا کند یا به نمایش درآورد خانه‌هایی که از چنین تکنولوژی بهره می‌برند خانه هوشمند نامیده می‌شوند. کنترل از راه دور لوازم خانگی نیز بخشی از خانه هوشمند محسوب می‌شود. ابزارهای خانه هوشمند ممکن است برای روشن یا خاموش کردن وسایل منزل به کار روند یا تنظیمات عملکرد دستگاه‌ها را بر اساس زمان‌های از پیش تعیین شده تغییر دهد. این ابزارها همچنین ممکن است به گونه‌ای تنظیم شوند که عملکرد تجهیزات را با توجه به تغییرات پیش آمده در محیط خانه تغییر دهند. خانه هوشمند به روش متمرکز برنامه‌پذیر و غیرمتمرکز با حسگرها و کنترل‌کننده‌های مجزا از هم اجرا شود. در این سامانه‌ها ممکن است از کنترلرهای الکترونیکی پیشرفته برای کنترل روشنایی، گرمایش، سرمایش و وسایل سرگرمی استفاده شود که خود این سامانه‌ها می‌توانند از یک شبکه سیم‌کشی ویژه یا بی‌سیم برای ارتباط بهره‌برند یا به صورت چندین سیستم مجزا (مانند حسگرهای نوری که روشنایی را کنترل می‌کنند) عمل نمایند. یکی از جنبه‌های مهم خانه هوشمند، پتانسیل آن برای کاهش مصرف انرژی است. از آنجایی که خود سیستم‌های خانه‌های هوشمند انرژی مصرف می‌کنند، تنها در صورتی می‌توانند در کاهش مصرف انرژی مفید باشند که صرفه‌جویی حاصل از بکارگیری آنها بیشتر از مصرف انرژی شان باشد که این امر از راه کاهش زمان عملکرد دستگاه‌ها و محدود کردن زمان روشن بودنشان، و یا کاهش نیاز به استفاده از دستگاه، به صرفه‌جویی انرژی کمک می‌کند. ایده کلی خانه هوشمند این است که کلیه سامانه‌های الکتریکی و الکترونیکی و ابزارهای خانه را به یکدیگر و در یک شبکه به گونه‌ای به هم متصل کند که بتوان آنها را از طریق یک رابط مشترک کنترل نمود و با هم در ارتباط قرار داد. در شرایط جدید با توجه به رو به اتمام بودن سوخت‌های فسیلی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر رواج پیدا کرده است. در خانه‌های هوشمند بدلیل بروز بودن اطلاعات و تکنولوژی آن، و همچنین با لحاظ نمودن اصلی هدف از شکل-گیری آنها، مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر را به محدوده خانه هوشمند اضافه نمود تا خانه هوشمند استقلال بیشتر و در جهت کاهش هزینه و نشر آلودگی عمل نماید. با توجه به اهمیت بحث تا کنون مطالعات زیادی در خصوص این بحث انجام شده است که در ذیل به طور خلاصه به آنها پرداخته می‌شود. مرجع (Izadbakhsh, M, 2015:598-606) برنامه‌ریزی منابع تولیدی ریزشبکه در کنار ذخیره‌ساز باتری با تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری و آلاینده‌های زیست محیطی مورد توجه قرار داده و از طریق روش حل تقاطع مرزی نرمال برای حل مسئله اقدام می‌کند. در مرجع (Kamankesh, H, 2016:285-297) برنامه‌ریزی منابع ریزشبکه در حضور خودروهای هیبریدی-الکتریکی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت-کارلو بحث شده است. مرجع (Yoon, Y, 2016:936-945) کنترل یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی مسکونی در بازار برق با حضور و بدون حضور تولید کننده برق محلی با توجه به قیمت‌گذاری انرژی به فرم دینامیکی را بحث می‌کند. مرجع (Beaudin, M, 2015:318-335) مدیریت انرژی تحت شرایط افزایش تقاضای مصرف برق و لزوم وجود یک شبکه هوشمند جهت بهینه‌سازی پروفیل مصرف و تولید انرژی در مکان‌های مسکونی را بحث می‌کند و توابع هدفی مانند کمینه‌سازی هزینه مصرف انرژی و آلودگی زیست محیطی، پروفیل بار و رفاه اجتماعی مصرف کنندگان دنبال می‌کند. مرجع (Sarker, R, 2015:1341-1351) این مقاله یک چارچوب غیر متمرکز برای جمع‌کننده‌هایی که به دنبال حداکثر نمودن سود خود با حداقل‌سازی هزینه‌های مصرف‌کنندگان شامل تقاضای بارهای خانگی و خودروهای برقی، در زمان‌های مختلف را بیان می‌کند. از مدل RTP برای ایجاد انگیزه جهت کسب درآمد از طریق کاهش بار تقاضای خانگی در زمان پیک مصرف و مدیریت عملکرد EV استفاده شده است. در مرجع (Safdarian, A, 2014:733-741) یک چارچوب تصادفی برای بازارهای برق آبی در جهت حداکثر کردن سود شرکت توزیع در عین حال با قرارگیری کمتر در معرض ریسک با توجه به نرخ متغیر با زمان انرژی الکتریکی ارائه گردیده است. در مرجع (Zhu, J, 2015:223-236) برنامه‌ریزی و بهره‌برداری مصارف قابل انتقال با زمان خانه هوشمند را از طریق الگوریتم اجتماع گروه ذرات انجام شده است. در مرجع (Jia, L, 2016:1128-1136) ارتباطات میان یک خرده فروش و مشتریان بحث شده است. در مرجع (Shiltz, D, 2016: 875-885) با توجه به ماهیت متغیر تولید منابع تجدیدپذیر یک مکانیسم بازار برق با قیمت‌گذاری دینامیکی برای بازار زمان واقعی و تنظیم فرکانس پیشنهاد می‌شود. در مرجع (Haider, HT, 2016: 27-35) یک برنامه‌ریزی دینامیکی برای مدیریت بار مسکونی با هدف بهره‌برداری بهینه لوازم برقی خانگی پیشنهاد شده است که تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها در جهت تطبیق میزان تقاضای بار و قیمت برق می‌باشد. در مرجع (Ziminig, Z, 2015: 353-362) با توجه به پیشرفت تکنولوژی در امور انتقال اطلاعات و همچنین توسعه شبکه‌های هوشمند، ابداع راهکارهای نوین در جهت مدیریت بهینه مصرف انرژی یک چهارچوب برای برنامه‌ریزی مصرف خانوارها با استفاده از روش بهینه MIP پیشنهاد شده است. در مرجع (Shirazi, E, 2015: 4049-4056) بمنظور رسیدگی به برخی از مشکلات نظیر عدم وجود یک سیستم اتوماسیون موثر و عدم آگاهی مصرف‌کنندگان از قیمت‌های متغیر با زمان، تکنیک جدیدی برای برنامه‌ریزی مصرف به طور بهینه و خودکار انرژی در خانه‌های مسکونی برای کمینه‌سازی هزینه انرژی پیشنهاد شده است. در مرجع (Roe, C, 2011:1-6) استفاده از برنامه

پاسخگویی بار خانگی در کنترل و مدیریت بار خانگی از جمله خودروهای پریزی برقی در جهت به حداقل رساندن هزینه مشتری استفاده شده است. در مرجع (Lee, S, 2014: 2804-2812) یک طرح مدیریت انرژی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با هدف حداقل رساندن هزینه‌های انرژی مصرفی برای مشترکین خانگی با هدف برنامه‌ریزی توان با فرض اینکه مصرف کننده از قیمت انرژی و تقاضای ساعتی روز بعد با خبر است، پیشنهاد شده است. در مرجع (Du, P, 2011: 411-419) روشی برای برنامه‌ریزی تجهیزات سرمایشی و گرمایشی با توجه به قیمت انرژی در بازار برق، پیش بینی دمای محیط و سطح رفاه افراد با هدف کیمنه-سازگی هزینه پرداختی ارائه گردیده است. در مرجع (Du, P, 2011, 411-419) به شبیه‌سازی الگوریتم‌هایی برای کاهش پیک بار خانگی به روش جابجایی بارهای قابل برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن تعامل بین فناوری‌های اتوماسیون خانگی و نحوه رفتار انسانی پرداخته شده است و در مرجع (Kurucz, CN, 1996: 1817-1824) از مدل برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی مقدار کاهش پیک بار سیستم از طریق دوره‌های کنترلی در برنامه‌های کنترل بار خانگی و صنعتی استفاده شده است. در مرجع (Zhang, N, 2011) اثر مدیریت سمت مصرف بر کاهش پیک بار یک فیدر، با تغییر زمان استفاده از لوازم توان بالای بارهای خانگی و خازن‌های متصل به آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مرجع (Haider, HT, 2016: 166-178) و (Althaher, S, 1874-1883: 2015) بار مصرف کننده به دو نوع طبقه‌بندی می‌شود. نوع اول، تغییر بار که می‌توان برنامه‌ریزی آن را در زمان‌های مختلف از روز به عنوان مثال ماشین لباسشویی و ماشین ظرفشویی انجام داد. نوع دوم، بار غیرقابل تغییر که در طول زمان‌های خاص مانند روشنایی و اجاق پخت و پز اداره می‌شود. در مرجع (Kakigano, H, 2013: 2246-2258) یک مسئله کنترلی با هدف بهینه‌سازی پروفیل ولتاژ سیستم توزیع از طریق بهبود شرایط بهره‌برداری و عملکردی ریزشکبه‌های DC توسط روش کنترل فازی پیشنهاد می‌گردد. در مرجع (Li, C, 2014) توزیع اقتصادی بار بهینه با هدف کیمنه‌سازی هزینه برای ریزشکبه DC که از طریق کنترل دروبی عملکرد دارد تحت شرایط قیمت‌گذاری زمان-واقعی بازار برق پیشنهاد گردیده است. در مرجع (Malysz, P, 2014: 1785-1796) یک روش کنترل بهینه انرژی/ قدرت آنلاین برای بهره‌برداری از ذخیره انرژی در شبکه‌های میکروشکبه متصل شده به شبکه‌های سراسری با توجه به پیش بینی آینده مصرف برق و تولید انرژی تجدیدپذیر ارائه شده است، اما آنها محدوده ایمنی و مرحله شارژ مناسب را برای استفاده از ذخیره ساز باتری، که طول عمر طولانی تر آن را تضمین می‌کند در نظر نگرفته اند. در مرجع (Solanki, BV, 2015: 1-10) سیستم مدیریت انرژی متمرکز برای میکروشکبه مجزا از شبکه سراسری از طریق برنامه در مدار قرار گرفتن واحدها و پخش بار بهینه به منظور جلوگیری از فرمول بندی غیر خطی صحیح مختلط طراحی شده اند. همان که اشاره شد حضور منابع تولید پراکنده و ذخیره‌ساز در برنامه‌ریزی خانه‌های هوشمند چالش‌هایی را با خود به همراه دارد که باید راهکاری برای حل آنها اندیشیده شود. در مرجع (Javaid, N, 2017: 13587-13600) الگوریتم فراابتکاری اجتماع گروه ذرات باینری و جستجوی کوکو مبتنی بر مدلسازی برنامه مدیریت طرف تقاضا برای برنامه‌ریزی مصارف کاربرهای مسکونی پیشنهاد گردیده است. شبیه‌سازی‌ها بر اساس فضای قیمت‌گذاری زمان استفاده برای خانه‌های مرسوم، خانه‌های هوشمند و خانه‌های هوشمند با منابع تجدید پذیر انجام شده است نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی به طور بهینه قادر به کاهش بار پیک و صورت حساب برق مشترکین می‌باشد. در مرجع (Chatterjee, A, 2023: 138-147) یک مدل چندین هدفه زمان-واقعی برای مدیریت بار خانگی و ساختار مدیریت انرژی با توجه به تغییرات انرژی تولیدی توسط پنل‌های خورشیدی پشت‌بامی و قیمت انرژی در شبکه توزیع توسعه داده شده است. مرجع (Yuan, J, 2022: 2374-2384) برنامه‌ریزی دینامیکی تطبیقی زمان-واقعی مبتنی بر کرنل را با بازنمایشگرهای کدکننده دوسویه بازگشتی بر اساس روش‌های پیش‌بینی کوتاه مدت تلفیق می‌کند تا هزینه انرژی کیمنه سازد. مرجع (Dinh, H.T, 2022) از استراتژی‌های مبتنی بر یادگیری عمیق برای کنترل زمان-واقعی تجهیزات خانگی برای دستیابی به هزینه انرژی کیمنه استفاده کرده است. مرجع (Shuvo, S.S, 2022: 2812-2821) مدیریت بار زمان-واقعی مبتنی بر یادگیری تقویتی عمیق با توجه به فعالیت‌های بشری برای کاهش هزینه انرژی پیشنهاد شده است. در مرجع (Lu, R, 2022: 2662-2673) برای مدیریت عدم قطعیت قیمت انرژی از الگوریتم شکل‌دهی پاداش یادگیری تقویتی عمیق بازیگر-منتقد استفاده شده است. در مرجع (Aznavi, S, 2020: 1679-1689) یک مدل هایبرید بوسیله تجمیع بهینه‌سازی هزینه قطعی روز پیشرو و روش اولویت مبتنی بر قانون برای برنامه‌ریزی تجهیزات خانگی، خودرو برقی و باتری‌های ثابت پیشنهاد شد. در این مقاله، از بین منابع انرژی تجدیدپذیر، پانل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی که پاسخ بهتری به خواسته خانه‌های هوشمند دارند مورد توجه قرار گرفته‌اند. حضور منابع فتوولتائیک PV و Wind در خانه‌های هوشمند ضرورت استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی را بواسطه پوشش عدم قطعیت موجود در توان خروجی‌شان مطرح می‌سازد که در اینجا ذخیره‌ساز باتری مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی که تولید این منابع روزانه متغیر می‌باشد بنابراین ممکن در فصولی از سال بدلیل عدم تابش و وزش باد حضور ذخیره‌ساز باتری به تنهایی برای رفع نیاز روزانه کافی نباشد و در نتیجه باید کمبود برق از طریق منابع قابل دیسیچ CHP، و یا شبکه اصلی برق شهر تامین گردد. بمنظور بهینه‌سازی در مصرف خانه هوشمند، مدل خرده فروشی بازار برق مبتنی بر قیمت‌گذاری RTP برای خرید انرژی از شبکه سراسری ممکن می‌باشد. بنابراین، در این تحقیق قصد داریم فاکتورهای مذکور را بعنوان داده‌های مفروض مسئله مدیریت انرژی مقاوم خانه هوشمند با هدف حداقل‌سازی هزینه انتشار آلودگی و مصرف

انرژی برای بارهای خانگی قابل قطع نظیر خودرو برقی، پمپ استخر و بارهای خانگی غیرقابل قطع نظیر لباس شویی، ظرف شویی و بارهای خانگی ترموستاتی نظیر آبگرمکن برقی بکار گیریم. ادامه مقاله به صورت ذیل سازماندهی شده است. در بخش دوم، مدلسازی پیشنهادی برای مسئله برنامه‌ریزی بار خانه هوشمند شامل تابع هدف و قیود فنی انجام می‌شود. در بخش سوم، روش پیشنهادی برای مقاوم‌سازی مسئله مدیریت بار در خانه هوشمند در مقابل رخداد سناریوهای محتمل بواسطه تغییر سرعت باد و تابش خورشید ارائه می‌گردد. در بخش چهارم، نحوه کدسازی مسئله برنامه‌ریزی مقاوم سازی شده بار خانه هوشمند توسط الگوریتم ژنتیک تشریح می‌گردد. در بخش پنجم، بمنظور تایید کارایی و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی مطالعات شبیه‌سازی بر روی یک خانه هوشمند تست بکار گرفته می‌شود و در نهایت نتایج در بخش ششم بیان می‌شود.

۲- مدلسازی متداول مسئله برنامه‌ریزی بار خانه هوشمند

انرژی الکتریکی برای خانه‌های هوشمند از طریق منابعی همچون فتوولتاییک و توربین بادی، منبع تولید همزمان توان-حرارت و ذخیره‌سازهای انرژی نظیر باتری به طور محلی و شبکه سراسری قابل تأمین می‌باشد. دستگاه‌های خانگی مانند لوازم هوشمند، سنسورها و غیره به یکدیگر متصل شده‌اند تا یک شبکه برای ناحیه منزل مسکونی ایجاد کنند. سیستم مدیریت انرژی از این شبکه برای جمع‌آوری داده‌های عملکردی کلیه دستگاه‌ها و ارسال سیگنال‌های کنترلی برای کنترل آنها استفاده می‌کند. الگوریتم برنامه‌ریزی بار در سیستم مدیریت انرژی اجرا می‌شود تا مصرف بارهای خانگی را بر اساس اطلاعات دستگاه‌های موجود، تنظیمات کاربر و مکانیسم قیمت‌گذاری بهینه کند. در واقع هدف اصلی کمیته‌سازی پرداخت برق با ایجاد انعطاف‌پذیری در میزان مصرف بارهای خانگی مطابق با تولید منابع محلی و قیمت برق شبکه سراسری در عین حفظ سطح معینی از آسایش و رفاه برای کاربر می‌باشد (Wang, C, 2015: 247-257). اما مشکلات کار این است که بارها انعطاف‌پذیری متفاوتی را با توجه به دینامیک و مشخصات طراحی دارند، خروجی منابع فتوولتاییک و توربین بادی متغیر و تصادفی بوده و ذخیره‌سازها با ظرفیت محدود قابلیت پوشش عدم قطعیت تولید این نوع منابع را دارا می‌باشند و بعلاوه قیمت برق در شبکه سراسری با توجه به تعرفه‌ها در ساعات مختلف شبانه روز متفاوت است که بر پیچیدگی‌های مسئله مدیریت مصرف در خانه‌های هوشمند می‌افزاید. بنابراین، با توجه به عدم قطعیت‌های بالایی که در سیستم تأمین انرژی محلی خانه هوشمند وجود دارد لزوم بکارگیری روش مقاوم‌سازی به جای روش‌های قطعی متداول بیش از پیش احساس می‌شود که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است که در ذیل فرمولاسیون آن انجام می‌شود.

۲-۱- تابع هدف

تابع هدف برنامه‌ریزی بار خانگی برای روز آینده کمیته‌سازی پرداخت قبض برق در طی مدت شبانه روز پیشرو می‌باشد.

$$Min.(OF_{Load}^{Scheduling})$$

$$OF_{Load}^{Scheduling} = \sum_{i=1}^N \rho_i^{RTP} \left(\sum_{\delta \in A} X_{\delta,i}^{load} \right) - \left(P_{pv,i}^{source} + P_{wind,i}^{source} + P_{chp,i}^{source} + P_{Battery,i}^{source(discharge)} \right) + \sum_{i=1}^N \mathcal{E}C_i^{chp} \quad (1)$$

اندیس N کل بازه افق زمانی برنامه‌ریزی، A مجموعه لوازم مصرف‌کننده خانگی شامل بارهای قابل قطع، غیرقابل قطع و ترموستاتی، $P_{\delta,i}^{load}$ توان مصرفی تجهیز خانگی δ در بازه زمانی i ام، A مجموعه لوازم خانگی می‌باشد، $P_{pv,i}^{source}$ توان تولیدی منبع فتوولتاییک PV در بازه زمانی i ام و $P_{wind,i}^{source}$ توان تولیدی منبع توربین بادی wind در بازه زمانی i ام و $P_{chp,i}^{source}$ توان تولیدی منبع همزمان حرارت و گرما CHP در بازه زمانی i ام و $P_{Battery,i}^{source(discharge)}$ توان تولیدی منبع ذخیره‌ساز باتری $batt$ در بازه زمانی i ام است. اندیس ρ_i قیمت انرژی در بازه زمانی i ام را نشان می‌دهد. میزان مصرف لوازم خانگی قابل کنترل متغیر تصمیم بعنوان متغیر تصمیم‌گیری بایستی بهینه شود. باید توجه شود که قیمت خرید و فروش انرژی می‌تواند در هر یک از بازه‌های زمانی i ام متفاوت باشد که با توجه به وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز در دوره‌های زمانی مختلف مطابق رابطه (۲) قابل مدلسازی می‌باشد.

$$\rho_i = \left\{ \begin{array}{l} \rho_{buy,i} \rightarrow \sum_{\delta \in A} X_{\delta,i}^{load} \geq (P_{pv,i}^{source} + P_{wind,i}^{source} + P_{chp,i}^{source} + P_{Battery,i}^{source(discharge)}) \\ \rho_{sell,i} \rightarrow \sum_{\delta \in A} X_{\delta,i}^{load} < (P_{pv,i}^{source} + P_{wind,i}^{source} + P_{chp,i}^{source} + P_{Battery,i}^{source(discharge)}) \\ \rho_{buy,i} \rightarrow \sum_{\delta \in A} X_{\delta,i}^{load} \geq (P_{pv,i}^{source} + P_{wind,i}^{source} + P_{chp,i}^{source} - P_{Battery,i}^{source(charge)}) \\ \rho_{sell,i} \rightarrow \sum_{\delta \in A} X_{\delta,i}^{load} < (P_{pv,i}^{source} + P_{wind,i}^{source} + P_{chp,i}^{source} - P_{Battery,i}^{source(charge)}) \end{array} \right. \quad (2)$$

۲-۲-۲- قیود فنی

قیود برنامه‌ریزی بارهای خانگی با محدودیت‌های بهره‌برداری انواع لوازم مختلف و سطح تقاضای کاربر برای راحتی و آسایش درون خانه در ارتباط هستند. بارهای خانگی به دو دسته قابل کنترل و غیرقابل کنترل تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به محدودیت‌های عملیاتی تجهیزات قابل کنترل به سه کلاس لوازم خانگی غیرقابل قطع، قابل قطع و ترموستاتی تقسیم‌بندی می‌شوند. بارهای قابل قطع نیز در هر زمان به طور مستقل در دسترس نیستند و عملکرد آنها به مشخصات طراحی سخت افزاری آنها بستگی دارد. برای تجهیزات غیرقابل کنترل، آنها به طور ثابت در تابع هدف مشارکت می‌کنند و در محدودیت‌های بهره‌برداری ظاهر نمی‌شوند.

۲-۲-۱- قیود لوازم خانگی غیرقابل قطع

بارهای غیرقابل قطع طبق رابطه (۳) مجازند تا بعد زمان t_b فعالیت خود را آغاز کنند تا قبل زمان t_e به پایان برسانند. فرض می‌شود که توان مصرفی لوازم غیرقابل قطع ثابت است و طبق رابطه (۴) مدت زمان عملکرد آنها معادل L_{NL} گام زمانی می‌باشد. با توجه به مفروضات وضعیت توان مصرفی لوازم غیرقابل قطع در افق زمانی برنامه‌ریزی مطابق معادلات ذیل مدل‌سازی می‌شوند. که P_{NL}^{Load} توان نامی لوازم غیرقابل قطع و $X_{NL,i}^{load}$ توان نامی لوازم غیرقابل قطع در بازه زمانی i ام می‌باشد. بنابراین تعداد بازه‌های زمانی t_b تا t_e بایستی کوچکتر از L_{NL} باشد. در کنار دیگر قیود ویژگی غیر قابل قطع بودن نیز باید ارضاء گردد که مطابق (۵) در مدل‌سازی وارد می‌گردد (Chatterjee, A, 2023: 138-147)

$$X_{NL,i}^{load} = 0 \rightarrow \forall i < t_b, i > t_e \quad (3)$$

$$\sum_{i=t_b}^{t_e} X_{NL,i}^{load} = L_{NL} \cdot P_{NL}^{Load} \rightarrow t_1 \leq i \leq t_{24} \quad (4)$$

$$\sum_{i=j}^{j+L_{NL}-1} X_{NL,i}^{load} \geq (X_{NL,j}^{load} - X_{NL,j-1}^{load}) \cdot L_{NL} \rightarrow t_b < j \leq t_e - L_{NL} + 1 \quad (5)$$

۲-۲-۲- قیود لوازم خانگی قابل قطع

لوازم خانگی قابل قطع شامل خودرو پربری برقی، پمپ استخر و غیره هستند. مشابه به بارهای غیرقابل قطع این نوع بارها نیز بایستی بین بازه زمانی t_b تا t_e کار کنند. کل انرژی مورد نیاز برای انجام وظیفه معادل E_{IL} بایستی تامین شود. بعلاوه، فرض بر این است که قدرت بارهای قابل قطع بین صفر تا مقدار ماکزیم قابل تغییر است که این محدودیت‌ها در مدل‌سازی پیشنهادی مطابق روابط (۶) و (۷) وارد می‌شود (Chatterjee, A, 2023: 138-147).

$$X_{IL,i}^{load} = 0 \rightarrow \forall i < t_b, i > t_e \quad (6)$$

$$\sum_{i=t_b}^{t_e} X_{IL,i}^{load} \cdot \Delta t = E_{IL} \rightarrow X_{IL,i}^{load} \leq P_{IL}^{MAX}, t_1 \leq i \leq t_{24} \quad (7)$$

۲-۲-۳- قیود لوازم خانگی ترموستاتی

وسایل کنترل شونده ترموستاتی نیز از طریق خاصی و منحصر به فردی قابل قطع می‌باشند. آبرگمن، تهویه مطبوع و یخچال سه نوع بار کنترل‌شونده ترموستاتی هستند که در این مقاله، آبرگمن با ذخیره مشخصی از آبرگم برای فرآیند مدل‌سازی مورد توجه

می‌باشد. فرض می‌شود که آبگرمکن قادر است توان الکتریکی خود را متناسب با گرمایش از صفر تا مقدار ماکزیمم به طور پیوسته تغییر دهد. انرژی گرمایی بایستی تقاضای مشترکین را در هر محله زمانی ارضاء کند. که اندیس $X_{TCL,i}^{Load}$ وضعیت توان مصرفی آب گرم و اندیس C_n مصرف گرمایی در بازه زمانی i ام را نشان می‌دهد که C_i مطابق رابطه (۹) محاسبه می‌گردد. که d_i تقاضای آب گرم کشیده شده در بازه زمانی i ام و C_{water} گرمای ویژه آب، θ_{req} درجه حرارت مطلوب آب، $\theta_{e,i}$ درجه حرارت محیط در بازه زمانی i ام است. ذخیره گرمایی در بازه زمانی i ام نباید از حد ماکزیمم ذخیره آب تجاوز نماید که مطابق رابطه (۱۰) قابل مدلسازی می‌باشد. که M حجم آب در ذخیره کامل، اندیس θ_{up} و θ_0 بترتیب حد بالای دما و دمای اولیه آب در ذخیره‌ساز است و α ضریب ثابت برای تبدیل واحد بین ژول و کیلووات ساعت است. در اینجا تلف حرارتی صفر در نظر گرفته شده است (Chatterjee, A, 2023: 138-147).

$$\sum_{n=1}^i X_{TCL,i}^{Load} \geq \sum_{n=1}^i C_n \rightarrow t_1 \leq i \leq t_{24} \quad (8)$$

$$C_i = \alpha \cdot d_i \cdot C_{water} \cdot (\theta_{req} - \theta_{e,i}) \rightarrow t_1 \leq i \leq t_{24} \quad (9)$$

$$\sum_{n=1}^i X_{TCL,i}^{Load} \geq \alpha \cdot M \cdot C_{water} \cdot (\theta_{up} - \theta_0) + \sum_{n=1}^i C_n \rightarrow t_1 \leq i \leq t_{24} \quad (10)$$

۲-۲-۴- قید عملکرد توربین بادی

عملکرد یک توربین بادی از نظر ماهیت مکانیکال تا حدودی پیچیده است زیرا سرعت و جهت وزش باد بسیار متغیر است. معمولاً از توزیع ویبال برای مدلسازی و تولید داده‌های باد در محل نصب استفاده می‌شود. خروجی توربین بادی یک تابع از سرعت، جهت و انرژی جنبشی و ویژگی‌های مکانیکی آن است که توسط معادله (۱۱) مدلسازی می‌گردد. که توان خروجی ماکزیمم و به هنگام قطع توربین بادی بترتیب P_{furl} و P_{WTmax} متناظر با v_{rated} و v_{cutou} ، و اندیس v_w سرعت باد در بلندی برج است. اینجا، منحنی توان در مقابل سرعت باد از طریق معادلات (۱۱) مدلسازی می‌گردد. اندیس m برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. مقادیر اندازه‌گیری در هر ارتفاعی را می‌توان به سرعت در ارتفاع نصب از طریق قانده توان طبق رابطه (۱۲) تبدیل نمود. که اندیس α ثابت قانده توانی است. این مقادیر برای مکان‌های صاف کمتر از ۰٫۱، متغیر است، برای نواحی جنگلی پر تراکم با برف و باران بیشتر از ۰٫۲۵ است. معمولاً ضریب ۰٫۱۴ یک مرجع خوب برای نواحی تقریباً صاف نظیر ساختمان‌های بلند می‌باشد. در نهایت، توان الکتریکی تولید شده توسط توربین با استفاده از این رابطه قابل محاسبه می‌باشد. که اندیس A_w سطح جاروب شده توربین بادی بر حسب متر مربع می‌باشد و اندیس η_g راندمان توربین بادی و دیگر تجهیزات متصل به آن می‌باشد. در این مطالعه، تعداد توربین‌های بادی مورد نیاز برای تامین بخشی از لوازم خانگی با استفاده از رابطه (۱۴) تعیین می‌گردد که اندیس فاکتور ایمنی که معمولاً مقدار ۱٫۲ دارد و توان خروجی توربین بادی بر حسب وات می‌باشد (Arantegui, RL, 2015: 247-257).

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & ; v_w \leq v_{cutin}, v_w \geq v_{cutout} \\ P_{WTmax} \times \left(\frac{v_w - v_{cutin}}{v_{rated} - v_{cutin}} \right)^m & ; v_{cutin} \leq v_w \leq v_{rated} \\ P_{WTmax} + \frac{P_{furl} - P_{WTmax}}{v_{cutout} - v_{rated}} \times (v_w - v_{rated}) & ; v_{rated} \leq v_w \leq v_{cutout} \end{cases} \quad (11)$$

$$V_w = v_w^{measure} \times \left(\frac{h_{hub}}{h_{measure}} \right)^a \quad (12)$$

$$P_{wind_out} = P_{WT} \times A_w \times \eta_g \quad (13)$$

$$N_{turbine} = \frac{P_L \times SF}{P_{wind-out}} \quad (14)$$

۲-۲-۵- قید عملکرد پنل فتوولتائیک PV

توان خروجی تولید شده توسط ماژول فتوولتائیک توسط رابطه (۱۵) تعیین می‌گردد. آرایه‌های فتوولتائیک معمولاً به سیستم ردیاب ماکزیمم توان مجهز هستند و این کنترلر مسئولیت باقیماندن در نقطه کار بهینه یعنی ماکزیمم توان خروجی S_{pp} برای

سیستم فتولتاییک به عهده دارد. که اندیس A_{PV} سطح ماژول فتولتاییک را بر حسب مترمربع نشان می‌دهد. اندیس $H_t(AV)$ تابش متوسط به سطح پنل بر حسب وات بر مترمربع است، اندیس η_{pv} راندمان سیستم فتولتاییک، A_{Tcf} فاکتور تصحیح حرارتی و η_{inv} راندمان اینورتر می‌باشد. ماژول فتولتاییک باید بخشی از تقاضای بار تخمین زده شده E_L را تامین کند. تعداد ماژول‌های مورد نیاز برای تولید انرژی خورشیدی توسط رابطه (۱۵) قابل تخمین می‌باشد (Yuan, J, 2022: 2374-2384).

$$P_{PV} = H_t(AV) \times A_{PV} \times \eta_{pv} \quad (15)$$

$$A_{PV} = \frac{E_L}{H_t(AV) \times A_{FC} \times \eta_{pv} \times \eta_{inv} \times A_{Tcf}} \quad (16)$$

$$N_{PV} = \frac{P_{PV}}{S_{PP}} \quad (17)$$

۲-۶- قید عملکرد تولیدکننده همزمان برق و حرارت CHP

توربین‌های گازی کوچک که میکروتوربین نامیده می‌شوند اغلب برای تامین همزمان برق و حرارت در برخی ساختمان‌ها بکار گرفته می‌شوند. هزینه سوخت میکروتوربین به صورت تابع مرتبه دوم از تولید توان اکتیو برای مصارف خانگی مطابق رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود. انرژی حرارتی تولیدی میکروتوربین Q_i^{chp} متناسب با قدرت اکتیو تولیدی P_i^{chp} طبق رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود که α_{m-i} ، B_{m-i} و γ_{m-i} ضرایب هزینه سوخت مثبت برای واحد ژام هستند. هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای در محاسبات میکروتوربین طبق رابطه (۲۰) مدل‌سازی می‌شود که β_i ضریب مثبت و $\mathcal{E}C_i^{chp}$ هزینه آلاینش محیط زیست تعریف می‌گردد (Tafreshi, SMM, 2016: 934-947).

$$FC_i^{chp} = \alpha_{m-i} + B_{m-i} \times (P_i^{chp}) + \gamma_{m-i} \times (P_i^{chp})^2 \quad (18)$$

$$Q_i^{chp}(t) = 2 \times P_i^{chp} \quad (19)$$

$$\mathcal{E}C_i^{chp}(t) = \beta_i \times P_i^{chp} \quad (20)$$

۲-۷- ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی باتری

بمنظور پوشش عدم قطعیت تولید منابع خورشیدی و بادی منسوب در خانه‌های هوشمند معمولاً سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. محاسبه قدرت تحویلی یا جذبی و وضعیت شارژ حداقل و حداکثر باتری در بازه زمانی t مطابق رابطه (۲۱) محاسبه می‌گردد (Black, M, 2017: 197-205).

$$P_{Batt}^s(t) = \eta_{batt} \times (SOC^{batt}(t) - SOC^{batt}(t-1)) \quad (21)$$

$$SOC_{min}^{batt} \leq SOC^{batt}(t) \leq SOC_{max}^{batt} \quad (21)$$

در رابطه فوق‌الذکر، اندیس η_{batt} راندمان عملکرد باتری برای شارژ و دشارژ و اندیس SOC^{batt} وضعیت ذخیره انرژی باتری می‌باشد.

۲-۳- مدل‌سازی عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر و راهکار مقاوم‌سازی در برنامه‌ریزی بار خانه

هوشمند

۳-۱- مدل‌سازی عدم قطعیت تولید منابع PVs و WTs

از آنجایی که تولید منابع تجدیدپذیر توربین بادی و فتولتاییک ماهیت متغیر دارد و قابلیت پیش‌بینی دقیق برای تولید دسترس‌پذیر آنها وجود ندارد باید به هنگام برنامه‌ریزی مصارف خانه‌های هوشمند عدم قطعیت تولید انرژی توسط این منابع را مد نظر قرار داد. در اینجا، برای مدل‌سازی عدم قطعیت از روش سناریوپردازی درخت احتمالی استفاده می‌شود. بمنظور استخراج سناریوهای موثر از تابع توزیع احتمالاتی متناظر با تولید منابع توربین بادی (δ_{wind}) و فتولتاییک (δ_{pv}) از بلوک معادلات (۲۲) استفاده می‌گردد.

$$S_w = \{(P_{Wind}^1, \rho_w^1), (P_{Wind}^2, \rho_w^2), \dots, (P_{Wind}^{Sn}, \rho_w^{Sn})\}$$

$$\rho_w^1 + \rho_w^2 + \dots + \rho_w^{Sn} = 1$$

$$S_{PV} = \{(P_{PV}^1, \rho_{PV}^1), (P_{PV}^2, \rho_{PV}^2), \dots, (P_{PV}^{Sm}, \rho_{PV}^{Sm})\}$$

$$\rho_{PV}^1 + \rho_{PV}^2 + \dots + \rho_{PV}^{Sm} = 1 \quad (22)$$

$$S = S_w \times S_{PV}$$

$$\sum_{s \in S} \rho_w \times \rho_{PV} = 1$$

۲-۳- راهکار مقاوم سازی

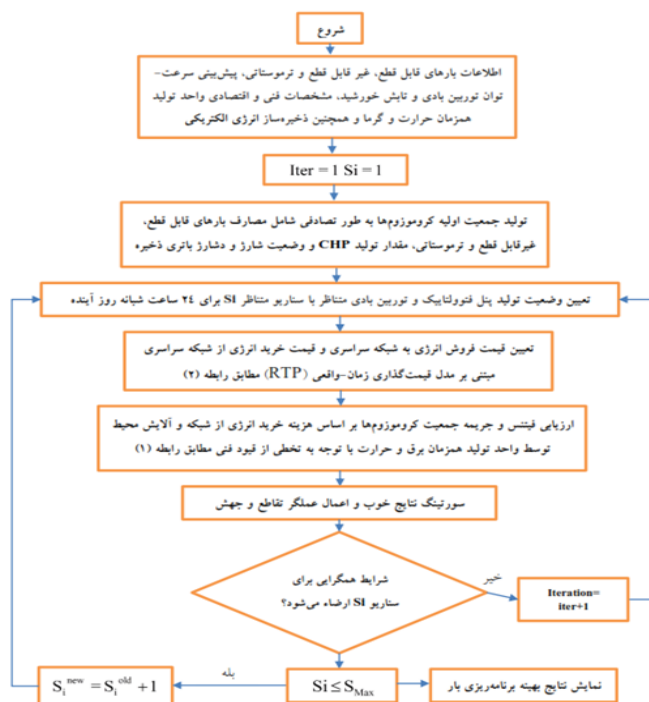
یکی از متداول ترین راهکارهای مقاوم سازی مسائل بهینه سازی در مقابل رخداد سناریوهای متنوع محتمل معتبر کمینه سازی امید ریاضی تابع هدف مورد نظر می باشد. معمولاً تابع هدف در اینگونه مسائل بر مبنای اقتصاد تعریف می گردد که در واقع به عنوان مدل تصادفی شناخته می شود. در این مقاله، بمنظور برنامه ریزی مقاوم سازی شده مصارف خانه هوشمند تحت رخداد سناریوهای مختلف تابش و وزش باد رابطه (۲۳) پیشنهاد می گردد (Yua, N, 2016).

$$u_E(OF_i) = \sum_{s=1}^{N_i} P_i^s OF_i^s \quad (23)$$

$$s.t. \rightarrow X_i = \{X_{NL,i}^{load}, X_{IL,i}^{load}, X_{TCL,i}^{load}, P_i^{pv}, P_i^{wind}, P_i^{chp}, P_i^{batt}\}$$

$$OF_i^s = f(X_i, Scenarios) \rightarrow OF_i = \{OF_i^1, OF_i^2 \dots OF_i^{Ns}\}$$

اگر چه هیچ تضمینی برای وقوع یک حالت خاص جهت برنامه ریزی وجود نداشته باشد فرآیند برای یک سطح معین روی همه فضای پارامترهای دارای عدم قطعیت اجرا خواهد شد و بعلاوه، معمولاً توجه به ارزیابی های مازاد مقاوم سازی تکنیکال و اقتصادی ضروری می باشد. در اینجا، یک نوع ارزیابی مقاوم سازی اقتصادی منحصر به فرد با توجه به بدترین سناریو با بیشترین هزینه مطابق رابطه (۲۴) در نظر گرفته می شود. در نهایت، حل نهایی مسئله برنامه ریزی مصارف خانه هوشمند بر اساس هزینه بدترین سناریو محتمل و معتبر مطابق رابطه (۲۵) مقاوم سازی می شود.



شکل ۱- فلوجارت حل ژنتیکی مدل پیشنهادی برای برنامه ریزی مصارف خانگی هوشمند با توجه به عدم قطعیت تولید WTs و PVs

$$u_{WC}(OF_i) = \text{Max}\{OF_i^s \mid s = 1, 2, \dots, N_s\} \quad (24)$$

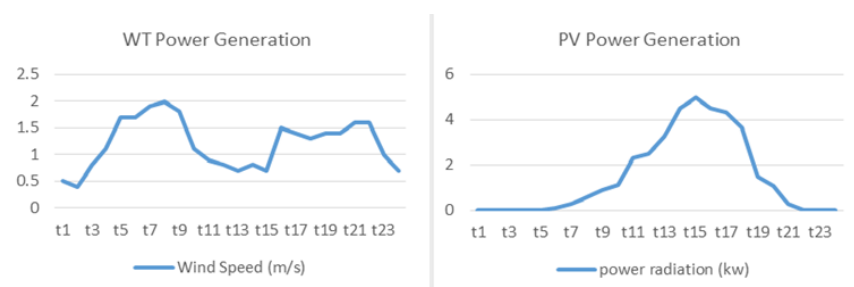
$$\text{Min}_{X=Loads, pv, wind, chp, batt} (u_E(OF_i), u_{WC}(OF_i)) \quad (25)$$

فلوچارت حل ژنتیکی برنامه‌ریزی مصرف خانه هوشمند با توجه به عدم قطعیت تولید توربین بادی و پنل فتوولتاییک در شکل (۱) به نمایش در آمده است.

از آنجایی که برنامه‌ریزی مصارف خانگی بایستی در مقابل کلیه سناریوهای تولید توربین بادی و فتوولتاییک مقاوم باشد بنابراین پس از محاسبه جریمه کلیه حالات محتمل کمینه مقدار امید ریاضی تابع هدف از رابطه (۲۳) و بدترین سناریو از رابطه (۲۴) را مطابق رابطه (۲۵) به عنوان فیتنس مطلوب ارزیابی می‌کنیم. پس از مرتب‌سازی کروموزوم‌ها با برآزندگی بالاتر فرآیند تقاطع با احتمال Pc ما بین جفت کروموزوم‌ها برای تولید فرزند انجام می‌گردد. در مرحله بعد، فرآیند جهش بر روی کروموزوم‌های فرزند تولید شده در روند حل مسئله با احتمال pm اعمال می‌گردد. سپس، برآزش کروموزوم هر یک از فرزندان تولیدی که معادل ارزیابی جواب‌های جدید برای حل مسئله فوق‌الذکر است مجدداً از رابطه (۲۶) انجام می‌شود. این روند برای نسل جدید جواب‌های تولید شده با فیتنس بهتر تکرار می‌گردد تا شرایط همگرایی به حل مسئله فراهم گردد.

۵- مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، مطالعات شبیه‌سازی بمنظور اعتبارسنجی و تایید کارایی مدل مقاوم‌سازی شده پیشنهادی برای برنامه‌ریزی ۲۴ ساعت نیمروز پیشرو مصارف خانه هوشمند با توجه به عدم قطعیت در تولید منابع فتوولتاییک و توربین بادی و مشارکت در تولید منبع تولید همزمان انرژی و حرارت و همچنین ذخیره‌ساز باتری بر روی یک خانه هوشمند تست بکار گرفته شده است. ظرفیت نصب سیستم فتوولتاییک و توربین بادی بترتیب ۵ کیلووات و ۲ کیلووات می‌باشد. مشخصات فنی توربین بادی شامل سرعت قطع پایین V_{ci} و قطع بالا V_{co} و سرعت عملکرد نرمال V_N بترتیب ۵، ۲۵ و ۱۵ متر بر ثانیه می‌باشد. منحنی توان بر حسب پیش‌بینی تابش و وزش باد برای روز آینده منابع مذکور در شکل (۲) نمایش شده است.



شکل ۲- منحنی‌های پیش‌بینی تابش-توان و سرعت-توان بترتیب برای پنل فتوولتاییک و توربین بادی برای روز پیشرو

عدم قطعیت منحنی تابش برای منبع فتوولتاییک با سه سناریو و برای وزش باد بمنظور بهره‌برداری از منبع توربین بادی توسط پنج سناریو مطابق جدول (۲) مدل‌سازی می‌گردد. از آنجایی که کلیه بارهای خانه هوشمند تست قابل کنترل هستند بنابراین، تعیین بهینه مصرف آنها توسط الگوریتم پیشنهادی پروفیل بار روزانه را تشکیل خواهد داد. در اینجا، ظرفیت حداقل و حداکثر ذخیره انرژی توسط باتری بترتیب ۱٫۵ تا ۵ کیلووات ساعت می‌باشد که دارای راندمان شارژ و دشارژ بترتیب معادل ۰٫۹۸ و ۰٫۹۵ می‌باشد. ظرفیت اولیه ذخیره باتری برای شروع برنامه‌ریزی بهره‌برداری خانه هوشمند تست ۲٫۵ کیلووات ساعت می‌باشد. خانه هوشمند تست به یک واحد تولید همزمان برق و حرارت مجهز است که ظرفیت نصب ۵ کیلووات دارد که ضرایب تابع هزینه α ، β و γ بترتیب معادل ۳، ۱٫۶ و ۰٫۰۰۰۳ است. ضریب ثابت برای انتشار آلودگی β_1 معادل ۰٫۲۵ می‌باشد. هزینه راه‌اندازی و خاموشی بترتیب معادل ۵۰ و ۲۰ دلار است و قبل شروع برنامه‌ریزی ۲ دوره واحد CHP خاموش بوده است. پارامترهای لوازم مصرف کننده داخلی خانه هوشمند و تنظیمات آنها برای سطح مشخصی از آسایش و راحتی درون خانه در جداول (۳) تا (۵) آمده است. توان نامی آبگرمکن معادل ۶٫۵ کیلووات، دمای اولیه، حداکثر و مورد نیاز بترتیب معادل ۳۰، ۸۰ و ۴۷ درجه سانتیگراد می‌باشد.

جدول ۲- مدل‌سازی عدم قطعیت پیش‌بینی منحنی تابش و وزش باد برای منبع فتوولتائیک و توربین بادی

Scenarios	ρ_{PV}^S	AF_{PV}^S	
Scenario1	0.5	AF(t1:t6) = 1	AF(t7:t12) = 1
Scenario2	0.3	AF(t1:t6) = 0.98	AF(t7:t12) = 0.96
Scenario3	0.2	AF(t1:t6) = 1.03	AF(t7:t12) = 1.05
Scenarios	ρ_{Wind}^S	AF_{Wind}^S	
Scenario1	0.50	AF(t1:t6) = 1	AF(t7:t12) = 1
Scenario2	0.15	AF(t1:t6) = 0.99	AF(t7:t12) = 0.98
Scenario3	0.15	AF(t1:t6) = 1.01	AF(t7:t12) = 1.02
Scenario4	0.10	AF(t1:t6) = 0.97	AF(t7:t12) = 0.95
Scenario5	0.10	AF(t1:t6) = 1.02	AF(t7:t12) = 1.05

مقدار α معادل $1/360000$ و M معادل $189,25$ ، C معادل $431,7$ و همچنین R معادل $0,7623$ می‌باشد. میزان تقاضای آب گرم و دمای محیط در جدول (۴) آمده است. برای قیمت خرید انرژی الکتریکی از شبکه مدل قیمت‌گذاری زمان-واقعی RTP دو نوع تعرفه‌ای در نظر گرفته شده است و قیمت‌های فروش نیز بر اساس پیشنهاد مالکان خانه‌های هوشمند یک قیمت فروش انرژی تعیین گردیده است که این مفروضات در جدول (۵) نمایش شده است.

جدول ۳- پارامترهای لوازم مصرف‌کننده قابل قطع و غیرقابل قطع داخلی خانه هوشمند

لوازم خانگی (گروه ۱)	بارهای غیرقابل قطع			
	P_{NL}^{Load} (KW)	t_b (Hour)	t_e (Hour)	L_{NL} (Hour)
ماشین لباس‌شویی	1.2	2	8	4
ماشین ظرف‌شویی	0.5	5	12	3
لوازم خانگی (گروه ۲)	بارهای قابل قطع			
	P_{IL}^{Load} (KW)	t_b (Hour)	t_e (Hour)	E_{IL}
خودرو برقی	2.5	4	11	$3^* P_{NEV}$

مدلسازی برنامه‌ریزی مقاوم‌سازی شده بارهای خانه هوشمند با توجه به پارامترهای مفروض و عدم قطعیت‌های تولید منابع فتوولتائیک و توربین بادی علاوه بر حضور منابع قابل دیسپچ تولید همزمان برق و حرارت CHP و ذخیره‌ساز باتری در نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است و بعنوان یک مسئله بهینه‌سازی ریاضیاتی برای مطالعه پایه توسط الگوریتم هوشمند ژنتیک حل می‌گردد.

جدول ۴- پارامترهای لوازم مصرف‌کننده ترموستاتی داخلی خانه هوشمند

time	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
$\theta_{e,i}$	21	23	25	28	29	30	32	35	37	39	41	44
d_i	60	85	90	105	120	140	165	185	160	150	140	120
time	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
$\theta_{e,i}$	21	23	25	28	29	30	32	35	37	39	41	44
d_i	60	85	90	105	120	140	165	185	160	150	140	120

جدول ۵- قیمت فروش و خرید انرژی الکتریکی از شبکه مبتنی بر مدل قیمت‌گذاری زمان-واقعی RTP دو تعرفه‌ای

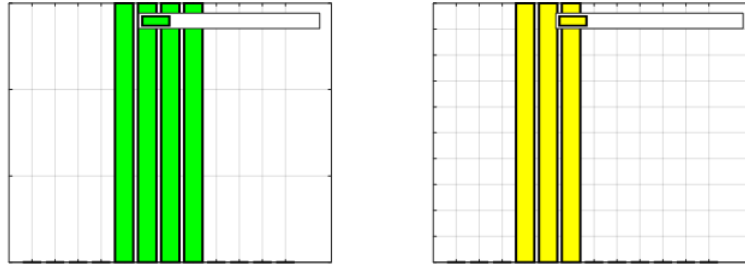
time	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
Sell	.7	.7	.7	.7	.8	.9	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12
Buy(RTP1)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16
Buy(RTP2)	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15

- سپس، مطالعات شبیه‌سازی و آنالیز حساسیت برای مدل پیشنهادی تحت شرایط ذیل مورد مطالعه قرار می‌گیرد.
- مطالعه موردی ۱: برنامه‌ریزی مقاوم تنها بارهای غیرقابل قطع خانه هوشمند در غیاب ذخیره‌ساز باتری
- مطالعه موردی ۲: برنامه‌ریزی مقاوم بارهای غیرقابل قطع و قابل قطع خانه هوشمند در غیاب ذخیره‌ساز باتری
- مطالعه موردی ۳: برنامه‌ریزی مقاوم بارهای غیرقابل قطع و قابل قطع و همچنین ترموستاتی در حضور ذخیره‌ساز باتری

جمعیت کروموزومها ۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است. الگوریتم ژنتیک برای حل نهایی قادر به اجرای سقف ۱۰۰ تکرار می‌باشد. احتمال تقاطع کروموزومها ۰,۸ و احتمال جهش ۰,۲ می‌باشد. نتایج عددی حاصل از حل مطالعات موردی بحث شده و به طور خلاصه بیان می‌گردد.

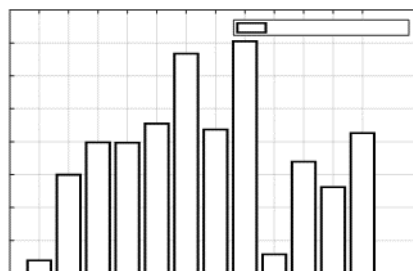
مطالعه موردی ۱: برنامه‌ریزی مقاوم تنها بارهای غیرقابل قطع خانه هوشمند در غیاب ذخیره‌ساز باتری

برنامه‌ریزی مقاوم تنها برای بارهای غیرقابل قطع خانه هوشمند تست شامل یک ماشین لباس شویی و ماشین ظرف‌شویی در عدم حضور ذخیره‌ساز باتری برای نیمروز آینده از ساعت ۱ بامداد تا ۱۲ ظهر با توجه به پارامترهای مفروض و عدم قطعیت در تولید منابع توربین بادی و پنل فتوولتاییک اجرا گردیده است و بایستی متذکر شد که قیمت‌گذاری دو تعرفه‌ای RTP بر اساس تبادل ۲ کیلوواتی در مدل لحاظ شده است. نتایج شبیه‌سازی بمنظور برنامه‌ریزی بار خانه هوشمند مطابق شکل (۳) می‌باشد.



شکل ۳- برنامه‌ریزی مقاوم ماشین لباس شویی و ماشین ظرف‌شویی در عدم حضور ذخیره‌ساز با توجه به عدم قطعیت تولید منابع PVs و WTs

برنامه‌ریزی مقاوم پیشنهادی برای استفاده از ماشین لباس‌شویی دوره‌های t_5 , t_6 , t_7 و t_8 و برای ماشین ظرف‌شویی دوره‌های t_4 , t_5 و t_6 را پیشنهاد می‌نماید. همان طور که از نتایج شبیه‌سازی دیده می‌شود بارهای کنترل‌پذیر غیرقابل قطع ماشین لباس‌شویی و ظرف‌شویی بترتیب در دوره‌های مجاز بهره‌برداری t_2 - t_8 و t_5 - t_{11} برای انجام وظایف خود طی ۴ و ۳ دوره زمانی متوالی برنامه‌ریزی می‌شوند. هزینه بهره‌برداری و آرایش محیط بعنوان تابع هدف برنامه‌ریزی بارهای خانه هوشمند معادل ۹,۹۱۹ دلار برای نیمروز آینده محاسبه شده است. در کنار منابع توربین بادی و پنل فتوولتاییک منصوب در خانه هوشمند واحد تولید همزمان برق و حرارت وجود دارد که میزان تولید آن برای فروش انرژی به شبکه یا مشارکت در تامین بارهای خانه مطابق شکل (۴) تعیین می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی گواه این حقیقت است که برنامه‌ریزی واحد تولید همزمان برق و حرارت برای تولید در خانه هوشمند با توجه به سطح تابش و وزش باد بمنظور فروش انرژی الکتریکی به شبکه سراسری بر اساس مدل قیمت‌گذاری زمان واقعی می‌باشد.



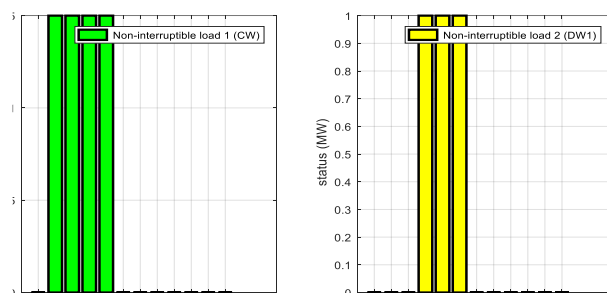
شکل ۴- واحد تولید همزمان برق و حرارت برای فروش انرژی به شبکه یا مشارکت در تامین بارهای

تا دوره t_5 که پنل خورشیدی که به دلیل عدم وجود تابش تولیدی نخواهد داشت و واحد توربین بادی نیز تولیدی پایین‌تر از ۱ کیلووات دارد تولید CHP به دلیل عدم برنامه‌ریزی مصرف‌کننده برای این دوره‌ها به شبکه سراسری فروخته می‌شود این در حالی است که در دوره‌های t_4 معادل ۱ کیلووات، t_5 و t_6 معادل ۲,۵ کیلووات و برای t_7 و t_8 معادل ۱,۵ کیلووات بار خانگی غیرقابل قطع برنامه‌ریزی شده است که واحد تولید همزمان برق و حرارت تنها در دوره t_5 قابلیت تامین تقاضای بار خانگی را دارا نمی‌باشد و از تولید توربین بادی برای تامین بار باقیمانده استفاده می‌شود زیرا پنل فتوولتاییک تولیدی ندارد درحالی که تولید توربین بادی در دوره t_5 با توجه به عدم قطعیت تولید نیز بیش از ۱ کیلووات خواهد بود که قادر خواهد شد علاوه بر تامین بار خانه هوشمند بخشی

از تولید را به شبکه سراسری نیز بر اساس قیمت‌گذاری پیشنهادی بفروشد. برای بقیه دوره‌های برنامه‌ریزی نیز تولید منابع توربین بادی و فتوولتاییک و CHP به شبکه سراسری فروخته خواهد شد.

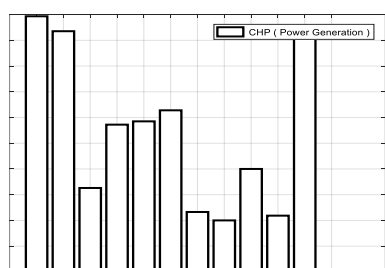
مطالعه موردی ۲: برنامه‌ریزی مقاوم بارهای غیرقابل قطع و قابل قطع خانه هوشمند در غياب ذخیره‌ساز باتری

برای مطالعه موردی ۲ برنامه‌ریزی مقاوم بارهای غیرقابل قطع ماشین لباس‌شویی و ماشین ظرف‌شویی و همچنین بار قابل قطع خودرو برقی برای خانه هوشمند در غياب ذخیره‌ساز باتری با توجه به عدم قطعیت در تولید منابع توربین بادی و پنل فتوولتاییک برای نیمروز آینده از ساعت ۱ بامداد تا ۱۲ ظهر انجام می‌شود البته باید متذکر شد که مابقی پارامترهای فنی و اقتصادی در مقایسه با مطالعه موردی ۱ بدون تغییر باقیمانده است. مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی بمنظور برنامه‌ریزی مقاوم بارهای قابل قطع خانه هوشمند تحت شرایط جدید مطابق شکل (۵) می‌باشد.

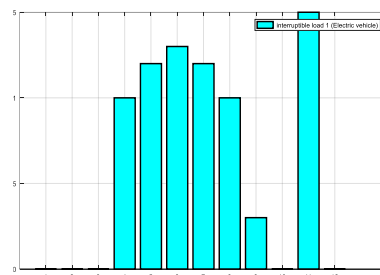


شکل ۵- برنامه‌ریزی مقاوم برای بارهای غیرقابل قطع با حضور بار قابل قطع در خانه هوشمند

همان طور که از نتایج شبیه‌سازی تحت شرایط جدید دیده می‌شود برنامه‌ریزی زمان بهره‌برداری بار غیرقابل قطع ماشین ظرف‌شویی در مقایسه با مطالعه قبل تغییری نداشته اما مصرف بار غیر قابل قطع ماشین لباس‌شویی به دوره‌های کم‌باری شیفت پیدا کرده به نحوی که در مقایسه با مطالعه قبل از زمان $t5-t8$ به $t2-t5$ انتقال می‌یابد تا هزینه برنامه‌ریزی مصرف بار قابل قطع خودرو برقی در بازه زمانی $t4-t11$ به طور بهینه مطابق شکل (۶) تعیین گردد. همان طور که از نتایج شبیه‌سازی دیده می‌شود پیوستگی کامل در دوره‌های زمانی وجود ندارد و مصرف خودرو برقی در دوره $t10$ قطع گردیده و مجدداً در ساعت $t11$ برنامه‌ریزی شده است. برنامه‌ریزی مقاوم بار قابل قطع خودرو برقی داخل محدوده مجاز عملکرد $t4-t11$ به طور بهینه انجام شده است و ضمناً میزان کل مصرف آن مجموعاً ۳ برابر ظرفیت نامی می‌باشد که در واقع قید دیگر بهره‌برداری بار قابل قطع خودرو برقی در برنامه‌ریزی ارضاء می‌گردد. برنامه‌ریزی تولید CHP تحت شرایط جدید در شکل (۷) نمایش داده شده است.



شکل ۷. برنامه‌ریزی تولید CHP تحت شرایط حضور بارهای قابل قطع برای خانه هوشمند



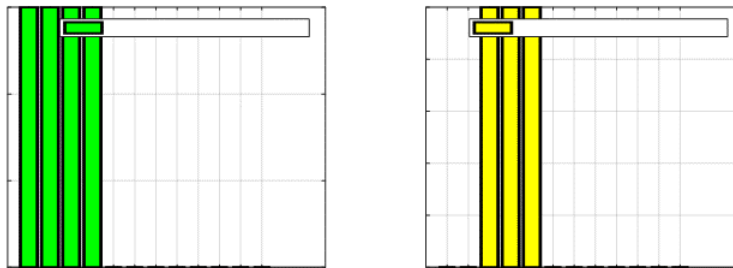
شکل ۶. برنامه‌ریزی مقاوم برای بارهای قابل قطع خودرو برقی در خانه هوشمند

برنامه‌ریزی تولید CHP تحت شرایط حضور بارهای قابل قطع برای خانه هوشمند بنحوی انجام می‌شود که از دوره زمانی $t1$ تا دوره زمانی $t6$ علاوه بر تامین بارهای غیر قابل قطع لباس‌شویی و ظرف‌شویی بخشی از تولید را در کنار تولید دسترس‌پذیر توربین بادی به شبکه می‌فروشد. پس از دسترس پذیر شدن تولید پنل فتوولتاییک خانه هوشمند از دوره زمانی $t5$ در کنار توربین بادی همان طور که از نتایج دیده می‌شود مشارکت تولید واحد CHP برای تامین بار قابل قطع خودرو برقی در دوره‌های مجاز بهره‌برداری $t4$ تا $t11$ بواسطه تحمیل هزینه و آرایش محیط تا سقف نهایتاً ۲ کیلووات در دوره $t9$ کاهش می‌یابد. در ضمن هزینه

بهره‌برداری و آرایش محیط بعنوان تابع هدف برنامه‌ریزی بارهای خانه هوشمند معادل ۱۰,۷۱۹ دلار برای نیمروز آینده محاسبه شده است.

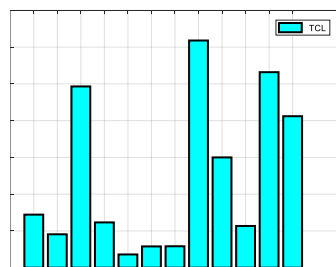
مطالعه موردی ۳: برنامه‌ریزی مقاوم بارهای غیرقابل قطع و قابل قطع و همچنین ترموستاتی در حضور ذخیره‌ساز باتری

برای مطالعه موردی ۳ برنامه‌ریزی مقاوم بارهای غیرقابل قطع ماشین لباس‌شویی و ماشین ظرف‌شویی و همچنین بار قابل قطع خودرو برقی و بار ترموستاتی آبگرمکن برقی برای خانه هوشمند در حضور ذخیره‌ساز باتری با توجه به عدم قطعیت در تولید منابع توربین بادی و پنل فتوولتائیک برای نیمروز آینده از ساعت ۱ بامداد تا ۱۲ ظهر انجام می‌شود البته باید مشابه با مطالعه موردی ۲ کلیه پارامترهای فنی و اقتصادی در مقایسه با مطالعه موردی ۱ بدون تغییر باقی‌مانده است. مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی بمنظور برنامه‌ریزی مقاوم بارهای قابل قطع خانه هوشمند تحت شرایط جدید مطابق شکل (۸) می‌باشد.

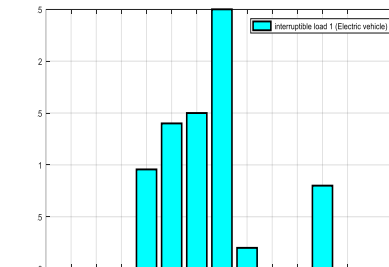


شکل ۸- برنامه‌ریزی مقاوم بارهای غیرقابل قطع با حضور بار قابل قطع و ترموستاتی و همچنین ذخیره‌ساز باتری

نتایج شبیه‌سازی تحت شرایط جدید نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی زمان مصرف بار غیرقابل قطع ماشین ظرف‌شویی در مقایسه با مطالعه قبل از دوره t4-t6 به t3-t5 انتقال یافته است و مصرف بار غیر قابل قطع ماشین لباس‌شویی از زمان t5-t8 به t1-t4 انتقال می‌یابد اضافه شدن تقاضای بار ترموستاتی باعث شیفت بیشتر مصرف بار غیرقابل قطع به دوره‌های کم باری حتی در حضور ذخیره‌سازی انرژی می‌شود. تحت شرایط جدید نتایج برنامه‌ریزی مصرف بار قابل قطع خودرو برقی در بازه زمانی t4-t11 به طور بهینه مطابق شکل (۹) تعیین گردد. نتایج شبیه‌سازی برای بار قابل قطع خودرو برقی در حضور بار ترموستاتی و ذخیره‌ساز باتری گواه این حقیقت است که دامنه مصرف بار قابل قطع برای دوره‌های زمانی t4-t7 در مقایسه با مطالعه موردی ۲ افزایش و برای دوره t8 و t11 کاهش داشته است، ضمناً در این برنامه‌ریزی شاهد قطع بار خودرو برقی برای دوره زمانی t9 علاوه بر t10 هستیم. این شیفت مصرف با اضافه شدن تقاضای بار ترموستاتی به مجموع تقاضای بارهای خانه هوشمند بواسطه دسترس‌پذیر شدن تولید پنل فتوولتائیک علاوه بر توربین بادی می‌باشد. برنامه‌ریزی مقاوم مصرف بار ترموستاتی آبگرمکن برقی خانه هوشمند در حضور ذخیره‌ساز باتری در شکل (۱۰) به نمایش در آمده است.

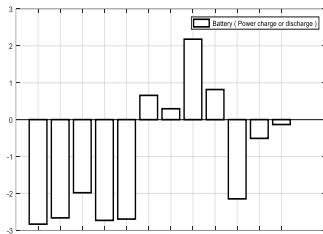


شکل ۹. برنامه‌ریزی مقاوم مصرف بار قابل قطع خودرو برقی خانه هوشمند در حضور ذخیره‌ساز باتری

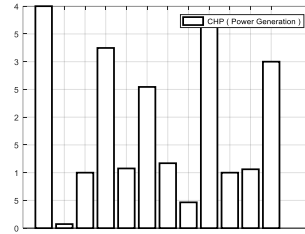


شکل ۱۰. برنامه‌ریزی مقاوم مصرف بار قابل قطع خودرو برقی خانه هوشمند در حضور ذخیره‌ساز باتری

طبیعتاً از نتایج شبیه‌سازی دیده می‌شود که میزان تقاضای مصرف بار ترموستاتی در ساعات t8 تا t12 به طور بهینه درمقایسه با دوره‌های دیگر بیشتر برنامه‌ریزی می‌شود که در مجموع بایستی به همراه تقاضای بارهای غیرقابل قطع و قابل قطع از طریق منبع توربین بادی، پنل خورشیدی و واحد CHP و همچنین ذخیره‌ساز باتری بر اساس هزینه بهره‌برداری پیشنهادی و شبکه سراسری مبتنی بر قیمت‌گذاری زمان-واقعی RTP تامین شوند. تولید انرژی واحد CHP و وضعیت عملکرد ذخیره‌ساز باتری بترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نمایش شده است.



شکل ۱۲. وضعیت عملکرد باتری برای مشارکت ذخیره-ساز در برنامه‌ریزی مقاوم بارهای خانه هوشمند



شکل ۱۱. برنامه‌ریزی مقاوم تولید انرژی واحد CHP برای مشارکت در تامین تقاضای بار خانه هوشمند

بایستی متذکر شد که باتری برای پوشش عدم قطعیت تولید منابع توربین بادی و فتوولتاییک در اینجا مورد استفاده قرار می‌گیرد برای دوره‌های t1-t5 به عنوان منبع تولیدی در کنار تولید منبع توربین بادی و واحد تولید همزمان برق و حرارت برای تامین بار خانه هوشمند و فروش انرژی به شبکه سراسری مجموعاً ۱۲٫۶ کیلووات ساعت در وضعیت دشارژ برنامه‌ریزی شده است در حالیکه از دوره t6 تا t9 باتری به مد شارژ تغییر وضعیت داده بواسطه دسترس پذیر شدن تولید مازاد پنل فتوولتاییک معادل ۴٫۱ کیلووات ساعت مجموعاً شارژ می‌گردد و مجدداً از دوره t10 تا t12 در مد دشارژ معادل ۲٫۸ کیلووات ساعت دشارژ می‌گردد. در ضمن هزینه بهره‌برداری و آرایش محیط بعنوان تابع هدف برنامه‌ریزی بارهای خانه هوشمند معادل ۱۲٫۲۲۹ دلار برای نيمروز آینده محاسبه شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل‌سازی مقاوم مدیریت انرژی خانه هوشمند مبتنی بر الگوریتم هوشمند ژنتیک با توجه به عدم قطعیت تولید منابع توربین بادی و فتوولتاییک و بکارگیری منابع قابل دیسپچ نظیر CHP و ذخیره‌سازهای باتری در وضعیت متصل به شبکه ارائه گردید. ابتدا مدل‌سازی عملکرد تک تک مصارف غیرقابل قطع، قابل قطع و ترموستاتی خانه هوشمند و سپس مدل‌سازی منابع غیرقابل دیسپچ توربین بادی و پنل فتوولتاییک و همچنین منبع قابل دیسپچ واحد تولید همزمان برق و حرارت انجام شد. در ادامه مدل‌سازی عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر و راهکار مقاوم‌سازی در برنامه‌ریزی بار خانه هوشمند در حضور ذخیره ساز باتری شرح گردید. مسئله برنامه‌ریزی مقاوم مصارف خانه هوشمند با توجه به مفروضات مسئله در الگوریتم ژنتیک برای حل کدسازی گردید و فلوجارت حل ارائه شد. مفروضات مسئله شامل قیمت‌گذاری انرژی در بازار برق خرده فروشی به صورت مدل RTP، کمینه‌سازی هزینه انتشار آلودگی بواسطه تولید CHP و مصرف انرژی برای بارهای خانگی قابل قطع نظیر خودرو برقی و بارهای خانگی غیر قابل قطع نظیر لباس شویی، ظرف شویی و بارهای خانگی ترموستاتی نظیر آبگرمکن برقی می‌باشد. مطالعات شبیه‌سازی برای اعتبارسنجی مدل در سه مطالعه بررسی شده است که در مطالعه موردی ۱ برنامه‌ریزی مقاوم تنها بارهای غیرقابل قطع، در مطالعه موردی ۲ برنامه‌ریزی مقاوم بارهای غیرقابل قطع و قابل قطع و در مطالعه موردی ۳ برنامه‌ریزی مقاوم بارهای غیرقابل قطع و قابل قطع و همچنین ترموستاتی در حضور ذخیره‌ساز باتری مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزایش انواع بارها از فقط غیرقابل قطع به قابل قطع در مورد ۲ و غیر قابل قطع و قابل قطع و ترموستاتی در مورد ۳ باعث شیفت مصرف بارهای قابل قطع و غیر قابل قطع از ساعات پیک به ساعات کم باری و استفاده از منابع ذخیره‌ساز حتی برای تامین آنها در صورت کمبود منبع تولید انرژی تجدیدپذیر در خانه هوشمند می‌شود پس ابتدا منابع قابل دیسپچ برای تامین تقاضای بار برنامه ریزی می‌شوند در صورت در دسترس نبودن تولید کافی از طریق منابع تجدیدپذیر توربین بادی و پنل فتوولتاییک منبع باتری برای تامین بار و در ادامه خرید از شبکه بر اساس قیمت گذاری زمان-واقعی برنامه ریزی می‌شود. اما اگر در برخی دوره ها تولید مازاد در خانه هوشمند در دسترس بود ابتدا ذخیره سازها شارژ شده و سپس برنامه ریزی مقاوم پیشنهادی در مقابل عدم قطعیت تولید منابع تجدید پذیر پذیر گزینه فروش انرژی به شبکه سراسری با قیمت پیشنهادی را پیشرو خواهد داشت.

منبع

1. Izadbakhsh, M., Gandomkar, M. (2015). Short-term Resources scheduling of Renewable energy Based Micro-Grid. Elsevier Renewable Energy, 75, 598-606.
2. Kamankesh, H., Agelidis Vassilios, G. (2016). Optimal Scheduling of Renewable micro-grids Considering Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Demand. Elsevier Energy, 100, 285-297.

3. Yoon, Y., Kim, YH. (2016). Effective scheduling Energy storage Systems Under Dynamic Pricing. Elsevier Renewable Energy, 87, 936-945.
4. Beaudin, M., Zareipour, H. (2015). Home energy Management systems: A Review of Modeling and Complexity. Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, 318-335.
5. Sarker, R. (2015). Optimal Coordination and Scheduling of Demand Response via Monetary Incentives. IEEE Transaction on Smart Grid, 6, (3), 1341-1351.
6. Safdarian, A., Fotuhi, FM. (2014). Impacts of Time-varying Electricity Rates on Forward Contact Scheduling of DisCos. IEEE Transaction on Power delivery, 29(2), 733-741.
7. Zhu, J., Lauri, F., Koukam, A., Hilaire, V. (2015). Scheduling Optimization of Smart Homes Based on Demand Response. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 223-236.
8. Jia, L., Tong, L., (2016). Dynamic Pricing and Distributed Energy Management for Demand Response. IEEE Transactions on Smart Grid, 7, (2), 1128-1136.
9. Shiltz, D., Cvetkovic, M. (2016). An Integrated Dynamic Market Mechanism for Real Time Markets and Frequency Regulation. IEEE Transaction on Sustainable Energy, 7(2), 875-885.
10. Haider, HT., See, OH. (2016). Dynamic Residential Load Scheduling Based on Adaptive Consumption Level Pricing scheme. Elsevier Electric Power Systems Researched, 133, 27-35.
11. Ziminig, Z., Lambotharan, S. (2015). A Game Theoretic Optimization Framework for Home Demand Management Incorporating Local Energy Resources. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 11, (2), 353-362.
12. Shirazi, E., Jadid, E. (2015). Optimal Residential Appliance Scheduling under Dynamic Pricing Scheme via HEMDAS. Elsevier Energy and Building, 93, 4049-4056.
13. Roe, C., Meliopoulos, S., Entriiken, R., Chhaya, S. (2011). Simulated demand response of a residential energy management system. IEEE Energy tech, 1-6.
14. Lee, S., Kwon, B., Lee, S. (2014). Joint energy management system of electric supply and demand in houses and buildings. IEEE Transaction on Power System, 29, (6), 2804-2812.
15. Du, P., Lu, N. (2011). Appliance commitment for household load scheduling. IEEE transactions on Smart Grid, 2, (2), 411-419.
16. Dlamini, NG., Cromieres, F. (2012). Implementing peak load reduction algorithms for household electrical appliances. Energy Policy, 44, 280-290.
17. Kurucz, CN., Brandt, D., Sim S (1996). A linear programming model for reducing system peak through customer load control programs. IEEE Transactions on Power Systems, 11, (4), 1817-1824.
18. Zhang, N., Ochoa, LF., Kirschen, DS. (2011). Investigating the impact of demand side management on residential customers. In Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Power Systems, Milan, Italy.
19. Haider, HT., See, OH., Elmenreich, W. (2015). A review of residential demand response of smart grid. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 166-178.
20. Althaher, S., Mancarella, P., Mutale, J. (2015). Automated demand response from home energy management system under dynamic pricing and power and comfort constraints. IEEE Transactions on Smart Grid, 6, (4), 1874-1883.
21. Kakigano, H., Miura, Y., Ise, T. (2013). Distribution voltage control for dc micro-grids using fuzzy control and gain-scheduling technique. IEEE Transactions on Power Electronics, 28, (5), 2246-2258.
22. Li, C., Bosio, F., Chen, F., Chaudhary SK., Vasquez, J., Guerrero, J. Economic dispatch for operating cost minimization under real time pricing in droop controlled dc micro-grid. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 99, 1-1.
23. Malysz, P., Sirouspour, S., Emadi, A. (2014). An optimal energy storage control strategy for grid-connected micro-grids. IEEE Transactions on Smart Grid, 5, (4), 1785-1796.
24. Solanki, BV., Raghurajan, A., Bhattacharya, K., Caizares, CA. (2015). Including smart loads for optimal demand response in integrated energy management systems for isolated micro-grids. IEEE Transactions on Smart Grid, 99, 1-10.
25. Javaid, N., Ullah, I., Akbar, M., Iqbal, Z., Khan, FA., Alrajeh, NA., Albell, MS. (2017). An Intelligent Load Management System With Renewable Energy Integration for Smart Homes. IEEE, Sensors, Communication Technologic and Application, 5, 13587-13600.

26. Chatterjee, A., Paul, S., Ganguly, B. (2023). Multi-Objective Energy Management of a Smart Home in Real Time Environment. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59, (1), 138-147.
27. Yuan, J., Chen, S.-Z., Yu, Zhang, S. S. G., Chen Z., and Zhang, Y. (2022). A kernel-based real-time adaptive dynamic programming method for economic household energy systems, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 19, (3), 2374-2384.
28. Dinh, H.T., Lee, K.-H., and Kim, D. (2022). Supervised-learning-based hour-ahead demand response for a behavior-based home energy management system approximating MILP optimization. *Applied Energy*, 321.
29. Shuvo, S.S., Yilmaz, Y. (2022). Home energy recommendation system (HERS): A deep reinforcement learning method based on residents' feedback and activity. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13, (4), 2812-2821.
30. Lu, R., Jiang, Z., Wu, H., Ding, Y., Wang, D., and Zhang, H.-T. (2022) Reward shaping-based actor-critic deep reinforcement learning for residential energy management. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 19, (3), 2662 – 2673.
31. Aznavi, S., Fajri, P., Asrari, A., Harirchi, F., (2020). Realistic and intelligent management of connected storage devices in future smart homes considering energy price tag. *IEEE Transactions on Industry Application*, 56, (2), 1679-1689.
32. Wang, C., Zhou, Y., Jiao, B., Wang, Y., Liu, W., Wang, D. (2015). Robust optimization for load scheduling of a smart home with photovoltaic system. *Elsevier, Energy Conversion and Management*, 102, 247-257.
33. Arantegui, RL., Jäger-Waldau, A. (2018). Photovoltaic and wind status in the European Union after the Paris Agreement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 81, 2460-2471.
34. Tafreshi, SMM., Ranjbar zadeh, H., Jafari, M., Khayyam, H., (2016). A probabilistic unit commitment model for optimal operation of plug-in electric vehicles in micro-grid. *Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 934-947.
35. Black, M., Strbac, G., (2017). Value of bulk energy storage for managing wind power fluctuations, *IEEE Transaction Energy Conversion*, 22, (1), 197–205.
36. Yua, N., Kang, JS., Chang, CC., Lee, TY., Lee, DY., (2016). Robust economic optimization and environmental policy analysis for micro-grid planning: An application.