

## مدیریت مصرف انرژی الکتریکی در یک مجتمع مسکونی بزرگ با وجود انرژی‌های تجدید پذیر

محمود زاده باقری

استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج (نویسنده مسئول)

Ma.zadehbagheri@iaau.ac.ir

محمد جواد کیانی

استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج

kianiph@gmail.com

### چکیده

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۷/۱۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۹/۲۵

کلمات کلیدی:

مدیریت مصرف انرژی  
خانه‌های هوشمند  
انرژی‌های تجدید پذیر  
دستگاه‌های توزیع انرژی  
لوازم خانگی متصل

تعامل انرژی بین خانه‌های هوشمند می‌تواند راه‌حلی برای توسعه سیستم‌های انرژی تجدید پذیر در بخش‌های مسکونی و مصرف بهینه انرژی در خانه‌ها باشد. اهداف اصلی این‌گونه تعاملات انرژی، افزایش مشارکت مصرف‌کننده در مدیریت انرژی، افزایش بهره‌وری اقتصادی، افزایش رضایت کاربر با انتخاب بین فروشندگان و خریداران برق و کاهش برق خریداری‌شده از شبکه به‌ویژه در ساعات اوج مصرف است. ترکیب خانه‌های هوشمند با انرژی تجدید پذیر تحت مدیریت شبکه توزیع هوشمند موجب پدید آمدن شبکه‌های هوشمند شده است. بنابراین در سال‌های اخیر توجه به شبکه‌های هوشمند به‌منظور استفاده بهینه از شبکه توزیع، مدیریت سمت مصرف، بالا بردن قابلیت اطمینان شبکه و در نتیجه کنترل هوشمند افزایش یافته است. در این مقاله، برای تحقق خانه‌های هوشمند روشی برای بهره‌برداری بهینه از واحدهای انرژی تجدید پذیر (مانند باد و خورشید)، حرارتی، باتری و بارهای کنترل‌شده پیشنهاد می‌شود و برنامه‌ریزی بهینه مصرف انرژی خانه هوشمند با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی مطالعه شده است. به طوری که یک روش جدید مدیریت انرژی با استفاده از انتقال بار برای خانه‌های هوشمند با تغذیه منابع تجدید پذیر بکار می‌رود. بدین ترتیب، به کمک مدل‌سازی دقیق مسئله مبتنی بر مدیریت بار خانگی و انجام شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار MATLAB بررسی و ارزیابی نتایج حاصل شده، صورت می‌پذیرد. نتایج برنامه توزیع الکتریکی و توزیع گرمایشی نشان می‌دهد که با به کارگیری الگوریتم مدیریت انرژی در یک ساختمان با تغذیه منابع انرژی تجدید پذیر مقدار هزینه بهینه شده برابر ۴۱۲/۶۳۴۸ یورو بر ساعت هست، یعنی با سیستم HEMS پیشنهادی، حدود ۲۱ درصد در هزینه برق ساختمان صرف جویی می‌شود.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر به‌منظور استفاده بهینه از شبکه توزیع، مدیریت سمت مصرف، قابلیت اطمینان شبکه، کنترل هوشمند افزایش یافته است. در میان بخش‌های مختلف مربوط به شبکه‌های هوشمند ساختمان‌های هوشمند به دلیل قابلیت مدیریت کلیه تجهیزات درون ساختمان از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشند. تحقیقات نشان می‌دهد که امروزه ساختمان‌ها انرژی بیشتری نسبت به دیگر بخش‌های مصرف‌کننده مانند صنعت و انتقال مصرف می‌کنند. بیشترین انرژی مصرفی یک ساختمان به فرم برق است که توسط نیروگاه‌های آلوده‌کننده هوا تولید می‌شود. و همچنین مطالعات نشان می‌دهد که تقریباً نیمی از انرژی برق از تولید تا مصرف‌کننده نهایی در انتقال و توزیع تلف خواهد شد. بهترین راه برای کاهش این تلفات انتقال و توزیع و آلودگی‌های زیست‌محیطی این است که هر ساختمان از منابع انرژی تجدیدپذیر خانگی منحصربه‌فرد خود که در ساختمان نصب شده است تغذیه کند. (نجف پور<sup>۱</sup> و دیگران، ۱۳۹۹) یک ساختمان هوشمند ساختمانی است که در بردارنده محیطی پویا و مقرون‌به‌صرفه به‌وسیله یکپارچه کردن چهار عنصر اصلی یعنی سامانه‌ها، ساختار، سرویس‌ها مدیریت و رابطه میان آن‌هاست. از سوی دیگر سیستم مدیریت انرژی می‌تواند در حدود ده تا سی درصد کاهش هزینه‌ها را در پی داشته باشد (سماواتی<sup>۲</sup> و دیگران، ۱۳۹۵). در واقع افزایش انعطاف‌پذیری منابع سمت تقاضا (بارها) با کنترل لوازم مصرف‌کننده نهایی از طریق سیستم مدیریت انرژی خانه (HEMS) انجام می‌شود. چنین رویکردهایی نیاز به اطلاعات گسترده و قابل اعتماد در کل سیستم دارند. این اطلاعات را می‌توان از طریق فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT)، معمولاً با استفاده از حسگرها و کنترل نظارتی و جمع‌آوری داده‌ها (SCADA) در سیستم انتقال و توزیع در دسترس قرارداد. اگرچه برنامه‌های HEMS راه‌حل‌های امیدوارکننده‌ای را برای مدیریت بهتر و ایده آل انرژی ساده‌تر در خانه‌های هوشمند پیشنهاد می‌کنند، مدیریت ناهماهنگ ممکن است باعث نتایج غیرمنتظره شود و ممکن است به‌طور متناقضی منجر به عملیات ناپایدار یا هزینه‌های بالاتر، مانند پیک‌های برگشتی شود. بنابراین، این مقاله در درجه اول بر انعطاف‌پذیری تقاضا و مکانیسم‌های هماهنگی مرتبط در محله‌های مسکونی متمرکز است - که به‌عنوان یک گروه از ده‌ها یا صدها خانه هوشمند تعریف می‌شوند. روش‌ها و برنامه‌های مختلف پاسخگویی بار در ادبیات مورد بررسی قرار گرفتند. در (سوارس<sup>۳</sup> و دیگران، ۲۰۱۴)، برنامه‌های DR و HEMS برای محیط تک خانوار بررسی شده است. در (نوریا<sup>۴</sup> و دیگران، ۲۰۲۱)، رفتارهای روانی و اقتصادی مصرف‌کنندگان برای DR مسکونی تجزیه و تحلیل می‌شود. در (اچ تی دین<sup>۵</sup> و دیگران، ۲۰۲۱)، تأثیر تحولات فناوریانه در منطقه خانه هوشمند و بر رفتار مصرف‌کننده بررسی شده است. در (مصطفی نوحه<sup>۶</sup> و دیگران، ۲۰۲۲)، لوازم‌خانگی برای بررسی تأثیر آن‌ها بر برنامه‌های DR طبقه‌بندی می‌شوند. در (دیلیپ<sup>۷</sup> و دیگران، ۲۰۲۰)، مدل‌سازی انرژی ساختمان با بررسی مدل‌های کنترل بهینه برای خانه‌های هوشمند تک و چندگانه بررسی شده است. در (حسین<sup>۸</sup> و دیگران، ۲۰۱۸)، یک نظرسنجی جامع الگوریتم‌های DR را برای بخش‌های مسکونی، تجاری و صنعتی با توجه به روش‌های قیمت‌گذاری و بهینه‌سازی مورد استفاده، بررسی و طبقه‌بندی می‌کند. ساختار (رویکردهای متمرکز و توزیع‌شده) روش‌های پیشنهادی نیز در نظر گرفته شده است. با این حال هماهنگی گروه‌های خانه‌ها مورد بحث قرار نمی‌گیرد. در (حکیمی<sup>۹</sup> و دیگران، ۲۰۲۰)، الگوریتم‌های DR برای بخش مسکونی با مروری بر آخرین روش‌های زمان‌بندی و تکنیک‌های ارتباطی ارائه شده‌اند. در نهایت، در (سلیمانی<sup>۱۰</sup> و دیگران، ۲۰۲۱)، چندین برنامه DR با تمرکز بر تعامل آن‌ها با RES بررسی شده است. بررسی ادبیات بالا نشان می‌دهد که اگرچه سیستم‌ها و تکنیک‌های

<sup>۱</sup> Najafpour<sup>۲</sup> Samavati<sup>۳</sup> Soares<sup>۴</sup> Nooriya<sup>۵</sup> H. T. Dinh<sup>۶</sup> Mostafa, Noha<sup>۷</sup> Dileep<sup>۸</sup> H. Hussain<sup>۹</sup> Hakimi<sup>۱۰</sup> Solaymani

مدیریتی متعددی پیشنهاد و بررسی شده‌اند، ادبیات مربوط به مکانیسم‌های هماهنگی در سطح محله هوشمند هنوز با جزئیات مورد مطالعه قرار نگرفته است. هدف این مقاله بر کردن این شکاف و بررسی و تحلیل مکانیسم‌های هماهنگی برای مدیریت انرژی چند خانوار است. به طوری که یک دید کلی از پیشرفته‌ترین مکانیسم‌های هماهنگی در اختیار خواننده قرار دهد. در شبکه‌های هوشمند هدف روش مدیریت توان یک راه حل کلی به فن اوره‌ای استان مختلف معرفی شده که در خانه‌های مختلف طبقه‌بندی شده است. بعلاوه، اهداف متعددی در این روش ممکن است و هدف آن می‌تواند متفاوت باشد. در نتیجه روش بسیار جامع و انعطاف‌پذیر است. در حالی که هدف کلی و تجهیزات کنترل واقعی در خانه وجود دارد که برای هر دو حوزه کلی و کنترل‌کننده مورد نیاز است. بعلاوه، روش بهینه‌سازی باید قادر به اندازه‌گیری خانه‌های بسیار بزرگ باشد (نوجوان<sup>۱۱</sup> و دیگران، ۱۳۹۸). کارهای چند سال اخیر در این موضوع می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: در مرجع (فاضلی<sup>۱۲</sup> و دیگران، ۱۳۹۲)، برنامه‌ریزی بهینه مصرف انرژی خانه هوشمند با استفاده از یک روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) مطالعه شده است. مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی مصرف انرژی به دو مثال‌های عددی (ساختمان هوشمند از ۳۰ خانه، ۹۰ خانه) اعمال شده است. با استفاده از روش پیشنهادی بر روی سیستم‌های مورد آزمایش نتایج مطلوبی به دست آمده است. در مرجع (تقی‌خانی<sup>۱۳</sup> و دیگران، ۱۳۹۸)، یک خانه هوشمند به عنوان سرویس اولیه از اشیاء خانه در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله مفهوم به هوشمند سازی خانه‌ها را با تحلیل عوامل مؤثر برای پذیرش و انتشار خانه‌های هوشمند پیشنهاد می‌کنند. نتایج این مدل نشان می‌دهد که سازگاری و سودمندی و تأثیرات مثبت در بین شبکه‌های ارتباطی دیگر از اهمیت خاصی برخوردار است. در مرجع (فصیحی‌هرندی<sup>۱۴</sup> و دیگران، ۱۳۸۳)، در این مقاله چگونگی استفاده از مصرف برق خانگی و تکنیک‌های سیستم انرژی خانه را مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. با استفاده از برنامه‌نویسی از انرژی‌های هوشمند تمامی گزارش‌ها را پیشنهاد می‌کنند تا به صرفه جویی انرژی و به منظور دستیابی به صرفه جویی انرژی و بهینه‌سازی دست یابند. در مرجع (علایی<sup>۱۵</sup> و دیگران، ۲۰۲۱)، شبکه‌های هوشمند هدف روش مدیریت توان یک راه حل کلی به فن اوره‌ای استان مختلف معرفی شده که در خانه‌های مختلف طبقه‌بندی شده است. مرجع (گنجی<sup>۱۶</sup> و دیگران، ۲۰۲۲)، خانه‌های هوشمند به عنوان شرکت‌کنندگان فعال در یک شبکه هوشمند به صورت منحنی‌های بار انعطاف‌پذیر مدل‌سازی شده‌اند. به دلیل ارتباط تعاملی دوطرفه‌ای که بین تقاضای برق و نرخ فروش آن در ساعات شبانه‌روز شبکه‌های هوشمند وجود دارد، نحوه مدیریت مصرف لوازم الکتریکی خانه‌های هوشمند در ساعات مختلف اهمیت فراوانی پیدا می‌کند. در این مقاله با استفاده از یک رویکرد مبتنی بر سیستم‌عامل‌ها تأمین مصرف خانه‌های هوشمند بر مبنای تصمیم‌گیری منطقی برای خرید و فروش توان از بازار برق بر اساس مقدار پیش‌بینی بار و ذخیره‌سازی توان انجام شده است. هدف اصلی از ارائه این روش در خانه هوشمند، به حداقل رساندن قبوض مصرفی برق بر اساس مسطح کردن منحنی تقاضای کل است. در مرجع (مصطفی<sup>۱۷</sup> و دیگران، ۲۰۲۲)، از آخرین فن‌آوری ارتباطات، محاسبات و کنترل به منظور نوسازی زیرساخت‌های شبکه‌های قدیمی برق به شکل شبکه‌های هوشمند که کارآمدتر بوده و مصرف انرژی انعطاف‌پذیری دارند، استفاده شده است. منابع تولید توان در این شبکه شامل انواع مختلفی از انرژی‌های نو مانند باد و خورشید هست. در این مقاله از الگوریتمی بر اساس مدل آموزشی یادگیری مبتنی بر پروژه (PBL<sup>۱۸</sup>) استفاده شده است. این روش به منظور دستیابی به دانش کلیدی در مباحث خانه‌های هوشمند، مانند شیف‌ت بار و پاسخ قیمت زمان واقعی طراحی شده است. نتایج این مقاله نشان می‌دهند که استفاده از این روش موجب افزایش کیفیت زندگی عمومی مردم، کاهش انتشار آلاینده‌ها و مصرف بهینه می‌شود. در مرجع (امانی<sup>۱۹</sup> و دیگران، ۲۰۲۱)، یک سیستم مدیریت انرژی خانگی (HEMS<sup>۲۰</sup>) برای صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی با توجه به نوسان قیمت برق در محیط خانه‌های هوشمند معرفی شده است. بر اساس پیشینه فوق، ما یک سیستم مدیریت انرژی خانه (HEMS) جدید با ادغام RES و ESS را پیشنهاد می‌کنیم. HEMS ما از طریق کنترل‌های هوشمند به اپراتور برق متصل است. اپراتور برق اطلاعات پیش‌بینی مفیدی را با استفاده از کنترل‌های هوشمند مانند اطلاعات قیمت‌گذاری و تابش خورشیدی به HEMS ارسال می‌کند. HEMS پیشنهادی کمک‌های زیر را انجام می‌دهد. با ادغام RES و ESS، ما یک معماری جدید HEMS را برای کاهش هزینه انرژی

<sup>۱۱</sup>. Nojavan

<sup>۱۲</sup>. Fazeli

<sup>۱۳</sup>. Taghikhani

<sup>۱۴</sup>. Fasihharandi

<sup>۱۵</sup>. Alayi

<sup>۱۶</sup>. Ganjei

<sup>۱۷</sup>. Mostafa

<sup>۱۸</sup>. Programming Base Learning

<sup>۱۹</sup>. Amani

<sup>۲۰</sup>. Home Energy Management System

و نسبت پیک به توان متوسط پیشنهاد می‌کنیم. ESS ما می‌تواند برای ذخیره برق از شبکه اصلی باقیمت پایین و همچنین برق از منابع انرژی تجدید پذیر استفاده شود- تأمین منافع کافی برای مصرف‌کنندگان به طوری که به مشتریان مسکونی مزایای زیر ارائه می‌شود: افزایش بهره‌وری انرژی که به هزینه‌ها کمک می‌کند- استفاده محلی بهینه از انرژی خورشیدی با انتقال عملکرد برخی دستگاه‌ها به زمان‌های انرژی خورشیدی قابل استفاده - رضایت کامل مصرف‌کننده از طریق تعامل کاربر، الگوهای استفاده و آب‌وهوا- آگاهی و مشارکت فعال مصرف‌کننده - داده‌های مربوط به روندهای منظم، هفتگی و ماهانه مصرف برق و راهنمایی در مورد صرفه‌جویی در مصرف انرژی را می‌توان در اختیار کاربران قرارداد تا نیازهای انرژی ماهانه خود را برآورده کنند. با توجه به اهمیت به‌کارگیری سیستم مدیریت انرژی در کاهش مصرف انرژی و به حداقل رساندن هزینه‌ها، توسعه EMS جامع اجتناب‌ناپذیر است. سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی باید تمام بارهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل از جمله سیستم‌های گرمایش و سرمایش را در نظر بگیرد. بر اساس مطالعات قبلی، در نظر گرفتن بارهای صاعقه در پاسخ به تقاضا می‌تواند به‌طور قابل توجهی مصرف انرژی را کاهش دهد، اما علاوه بر بارهای دیگر مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این تحقیق یک EMS جامع به‌منظور به حداقل رساندن هزینه‌ها با توجه به سیستم‌های انرژی تجدید پذیر، سیستم ذخیره انرژی الکتریکی و حرارتی، در ساختمان هوشمند پیشنهاد شده است. به طوری که از منابع انرژی‌های مختلف از قبیل سیستم‌های ذخیره انرژی و پیل سوختی برای تأمین انرژی خانه‌های هوشمند استفاده شده است. بیشترین تمرکز این مقاله بر روی برنامه‌ریزی ترکیب گرمایش و تهویه مطبوع به‌منظور راحتی مشتریان صورت گرفته است. در این مقاله تأمین گرمایش و تهویه مطبوع با استفاده از روش برنامه‌ریزی هوشمند در محیط یک‌خانه‌ی هوشمند انجام شده است. در این مقاله، یک ساختمان هوشمند با تعدادی خانه در نظر گرفته شده است. فرض شده که انرژی‌های تجدید پذیر خود را برای تأمین انرژی به‌صورت محلی، که شامل برخی از ژنراتور CHP، دیگ بخار، ژنراتور بادی، ذخیره‌سازی حرارتی و ذخیره‌سازی الکتریکی. آن همچنین دارای یک اتصال شبکه برای به دست آوردن برق در طول ساعات اوج تقاضای قدرت و یا فروش برق به شبکه زمانی که تولید برق مازاد وجود دارد. هر خانه دارای تعدادی از لوازم‌خانگی، مانند ماشین ظرف‌شویی، ماشین لباسشویی و یخچال و... دارد. ساختمان به یک سیستم مدیریت انرژی فرض شده است، و سیستم‌های ارتباطی برای توزیع طرح مصرف انرژی است.

## ۲- اهمیت و ضرورت تحقیق

در دهه‌های اخیر، سرعت گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی شدیدتر بوده و باعث بروز حوادث شدید جهان مانند آب شدن یخ‌های نیمکره‌ای دریا، سیل شدید، طوفان شدید و غیره شده است. یکی از دلایل اصلی گرم شدن کره زمین انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی برای تأمین نیاز روزانه انرژی است. برای کاهش این مشکل، تحقیقات به دو روش مختلف انجام شده است: یافتن منابع انرژی تجدید پذیر (RES) بیشتر برای جایگزینی سوخت فسیلی و استفاده از انرژی به کارآمدترین روش با ادغام RES و سیستم‌های ذخیره انرژی (ESS). به‌منظور استفاده، شبکه هوشمند ( $SG^{21}$ ) به‌عنوان جایگزینی برای شبکه برق موجود که نیازهای جدید مصرف‌کننده را پشتیبانی نمی‌کند، معرفی شده است. شبکه هوشمند از آخرین فن‌آوری‌های ارتباطی برای بهبود سیستم برق سنتی استفاده می‌کند. با ادغام RES و ESS، به کاهش انتشار ذرات کربن و گازهای گلخانه‌ای و همچنین کاهش تغییرات آب‌وهوا کمک می‌کند (گیامفی<sup>۲۲</sup> و دیگران، ۲۰۱۳). دو بخش جدایی‌ناپذیر SG که آن را بهتر از شبکه‌های سنتی می‌کند، زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته (AMI) و مدیریت سمت تقاضا ( $DSM^{23}$ ) هستند. عملکرد اصلی AMI اندازه‌گیری انرژی و جمع‌آوری اطلاعات است. این شامل کنتورهای هوشمند و فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) است. ICT شبکه هوشمند را قادر می‌سازد تا مصرف‌کنندگان را در مورد قیمت‌های مختلف برق، یا رویدادها/شکست‌های ناشی از تجهیزات یا بلایا به‌روز نگه دارد. همچنین اطلاعات مصرف انرژی اندازه‌گیری شده توسط کنتور هوشمند را برای اپراتورهای برق ارسال می‌کند تا اپراتورها را قادر سازد تا داده‌های بلادرنگ را نظارت و تجزیه و تحلیل کنند و در مورد فعالیت‌های شبکه‌های برق تصمیم‌گیری در زمان واقعی بگیرند. DSM بخش مهمی در مدیریت انرژی شبکه هوشمند است. DSM عملکردهای متنوعی را در زمینه‌های مختلف مانند کنترل بازار برق، مدیریت انرژی، ساخت زیرساخت‌ها و مدیریت منابع انرژی غیرمتمرکز فراهم می‌کند (سوارس<sup>۲۴</sup> و دیگران، ۲۰۱۴). مفهوم ریز شبکه به مجموعه‌ای از بارها، منابع تولید و ذخیره انرژی گفته می‌شود که به‌صورت یک‌بار قابل کنترل و یا ژنراتور عمل کرده و می‌تواند توان و حرارت را برای یک ناحیه محلی فراهم نماید. مدیریت توان تولیدی در ریز شبکه یکی از اصلی‌ترین

<sup>۲۱</sup> Smart Grid

<sup>۲۲</sup> Gyamfi

<sup>۲۳</sup> Demand Side Management

<sup>۲۴</sup> Soares

مباحث حال حاضر در طراحی و بهره‌برداری از ریز شبکه هست. وجود منابع تولید پراکنده باعث شده است که مدیریت یک ریز شبکه با مباحث تازه و نو روبرو شود. وضعیت‌های بهره‌برداری ریز شبکه بسته به سطح تبادلات بین یک ریز شبکه و شبکه اصلی می‌تواند به صورت مستقل و یا متصل به شبکه طبقه‌بندی گردد. به منظور بهره‌برداری مناسب از یک ریز شبکه، استفاده از سیستم مدیریت انرژی یک امر ضروری هست. هدف از مدیریت انرژی، تأمین توان با کمترین هزینه به منظور پاسخگویی مطلوب به بار است. در این مقاله مسئله‌ی مدیریت انرژی توسط برنامه‌های پاسخگویی بار پیاده‌سازی شده است. برنامه‌های پاسخگویی بار باهدف کاهش هزینه‌ها، حل مشکل تراکم مصرف صورت گرفته‌اند. در این تحقیق، برنامه‌ریزی بهینه مصرف انرژی خانه هوشمند با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی مطالعه شده است. فرض شده که انرژی‌های نو خود را برای تأمین انرژی به صورت محلی، که شامل برخی از ژنراتور، دیگ بخار، ژنراتور بادی، ذخیره‌سازی حرارتی و ذخیره‌سازی الکتریکی. همچنین دارای یک اتصال شبکه برای به دست آوردن برق در طول ساعات اوج تقاضای قدرت و یا فروش برق به شبکه زمانی که تولید برق مازاد وجود دارد. برای تحقق خانه‌های هوشمند روشی برای بهره‌برداری بهینه از واحدهای انرژی تجدید پذیر (مانند باد و خورشید)، حرارتی، باتری و بارهای کنترل‌شده در این مقاله پیشنهاد می‌شود.

### ۳- ادبیات تحقیق

اخیراً مطالعات مختلفی بر روی HEMS با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف انجام شده است. اهداف مشترک این مطالعات به حداقل رساندن هزینه انرژی و نسبت پیک به میانگین (PAR<sup>۲۵</sup>) بود. در کنار این دو هدف، برخی مقالات راحتی کاربر مانند زمان انتظار، آسایش حرارتی، کیفیت هوا و غیره را نیز در نظر می‌گیرند. در (لی<sup>۲۶</sup> و دیگران، ۲۰۱۴)، یک سیستم اتوماسیون خانگی/مدیریت انرژی (HAEMS) با ESS یکپارچه ارائه شد. هدف این مقاله بهینه‌سازی یک تابع هدف ترکیبی است که شامل هزینه انرژی، راحتی کاربر و راحتی حرارتی است. تعرفه استفاده‌شده در سیستم آن‌ها قیمت‌گذاری RTP بود. در این مقاله، آن‌ها از نرم‌افزار سیستم مدل‌سازی جبری عمومی (GAMS) با حل‌کننده‌های Cplex/Dicopt به عنوان موتور اصلی بهینه‌سازی استفاده کردند. پاسخگویی بار (DR<sup>۲۷</sup>) یکی از تحولات جدید در حوزه مدیریت انرژی هست که به معنای مشارکت مصرف‌کنندگان در بهبود الگوی مصرف انرژی هست. با نرخ میان باری و در صورت کاهش بار در ساعات اعلام‌شده، تمامی انرژی مصرفی در بقیه ساعات شبان‌هروز با تعرفه کم باری محاسبه می‌شود (حیدر<sup>۲۸</sup> و دیگران، ۲۰۱۶). ماهیت این روش، کوتاه‌مدت است. در سال ۱۳۹۴ نیز روشی جهت تعیین مشوق دریافتی صنایع جهت اعلام آمادگی و کاهش بار طراحی شده است (زوالکران<sup>۲۹</sup> و دیگران، ۲۰۱۷). از میان مصرف‌کنندگان برق، مشترکین صنعتی بزرگ، به دلیل توان زیاد مصرفی و تعداد محدود، گزینه مناسبی برای کاهش بار در ساعات اوج مصرف به شمار می‌روند (لوگنتیران<sup>۳۰</sup> و دیگران، ۲۰۱۵). در سال‌های اخیر، اقداماتی در زمینه استفاده از صنایع بزرگ در برنامه‌های پاسخگویی بار، تحت عنوان "طرح ذخیره عملیاتی" صورت گرفته است. با توجه به لزوم اجرای این برنامه در ماه‌های تیر و مرداد و به دلیل فرصت بسیار کم و ناقص بودن زیرساخت‌های سخت‌افزاری و مخابراتی جهت پایش مشترکین صنعتی، در سال گذشته برخی از شرکت‌ها موفق به اجرای طرح نگردیدند (چن<sup>۳۱</sup> و دیگران، ۲۰۱۷). در این طرح، هزینه مصرف برق در ساعات پیک‌بار برای صنایعی که جهت کاهش بار در ساعات بحرانی اعلام آمادگی نمایند، در (نوری<sup>۳۲</sup> و دیگران، ۲۰۲۱)، برنامه‌های HEMS و DR برای محیط خانه تک بررسی شده است. در (سلیمانی<sup>۳۳</sup> و دیگران، ۲۰۲۱)، رفتارهای روانی و اقتصادی مصرف‌کنندگان برای DR مسکونی

<sup>۲۵</sup> peak-to-average ratio

<sup>۲۶</sup> Li X

<sup>۲۷</sup> Demand Response

<sup>۲۸</sup> Haider

<sup>۲۹</sup> Zualkernan

<sup>۳۰</sup> Logenthiran

<sup>۳۱</sup> Chen

<sup>۳۲</sup> Nooriya

<sup>۳۳</sup> Solaymani

تجزیه و تحلیل می‌شود. در (یونگ<sup>۳۴</sup> و دیگران، ۲۰۲۰)، تأثیر تحولات تکنولوژیکی در منطقه خانه هوشمند و بر رفتار مصرف کننده بررسی شده است. در (هوی ترونگ<sup>۳۵</sup> و دیگران، ۲۰۱۶)، لوازم خانگی برای بررسی تأثیر آن‌ها بر برنامه‌های DR طبقه‌بندی می‌شوند. در (دی ژانگ<sup>۳۶</sup> و دیگران، ۲۰۱۳)، مدل سازی انرژی ساختمان با بررسی مدل‌های کنترل بهینه برای خانه‌های هوشمند تک و چندگانه بررسی شده است. در (شایانفر<sup>۳۷</sup> و دیگران، ۲۰۱۲)، یک نظرسنجی جامع الگوریتم‌های DR را برای بخش‌های مسکونی، تجاری و صنعتی با توجه به روش‌های قیمت گذاری و بهینه سازی مورد استفاده، بررسی و طبقه بندی می‌کند. ساختار (رویکردهای متمرکز و توزیع شده) روش‌های پیشنهادی نیز در نظر گرفته شده است. با این حال هماهنگی گروه‌های خانه‌ها مورد بحث قرار نمی‌گیرد. در (کتی<sup>۳۸</sup> و دیگران، ۲۰۱۲)، الگوریتم‌های DR برای بخش مسکونی با مروری بر آخرین روش‌های زمان بندی و تکنیک‌های ارتباطی ارائه شده‌اند. در (ژو<sup>۳۹</sup> و دیگران، ۲۰۱۱)، چندین برنامه DR با تمرکز بر تعامل آن‌ها با RES بررسی شده است. بررسی ادبیات بالا نشان می‌دهد که اگرچه سیستم‌ها و تکنیک‌های مدیریتی متعددی پیشنهاد و بررسی شده‌اند، ادبیات مربوط به مکانیسم‌های هماهنگی در سطح محله هوشمند هنوز با جزئیات مورد مطالعه قرار نگرفته است. هدف این مقاله پر کردن این شکاف و بررسی و تحلیل مکانیسم‌های هماهنگی برای مدیریت انرژی چند خانوار است در (لیو<sup>۴۰</sup> و دیگران، ۲۰۱۰)، یک سیستم مدیریت انرژی خانگی بهینه شده<sup>۴۱</sup> (OHEMS) با منابع RES و ذخیره سازی یکپارچه برای بهینه سازی هزینه انرژی و PAR پیشنهاد شد. با تمرکز بر مقالات مجلات منتشر شده بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶. تفکیک سال‌های انتشار برای مقالات بررسی شده در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل‌ها نشان می‌دهند که محبوبیت این موضوع از سال ۲۰۱۲ به طور قابل توجهی افزایش یافته است. اما باید توجه داشت که همه مقالات منتشر شده در این نظرسنجی گنجانده نشده‌اند و بنابراین نمودار توصیف دقیقی از ادبیات موجود را نشان نمی‌دهد. استفاده از برنامه‌های پاسخگویی بار، سودهای مالی و کاربردی فراوانی هم برای مصرف کننده و هم خود شبکه دارد که از آن جمله می‌توان به کاهش میزان خاموشی، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، صاف و هموار شدن منحنی بار اشاره کرد. در این مقاله با ارائه پاداش و جریمه در قالب برنامه‌های پاسخگویی بار، میزان مصرف مشترکین کاهش می‌یابد که این کاهش مصرف، کاهش تولید، در نتیجه کم شدن هزینه‌های بهره‌برداری سیستم را در بردارد. مطالعات انجام شده در این راستا بیانگر این است که سیستم مدیریت انرژی برای یک ریز شبکه در مد کاری جزیره‌ای در (کاستا<sup>۴۲</sup> و دیگران، ۲۰۰۸) مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله از تکنیک مدل پیش بینی کنترل (MPC<sup>۴۳</sup>) برای مدیریت انرژی استفاده شده است. این تکنیک با کنترل فرکانس و ولتاژ مقدار توان اکتیو و راکتیو شبکه را پیش بینی می‌کند و بعد از آن به اجرای سیستم مدیریت می‌پردازد. در این مقاله سیستم مدیریت انرژی به دو مسئله‌ی درمدار قرار گرفتن واحدها و پخش بار بهینه تجزیه شده است. در (دیلیپ<sup>۴۴</sup> و دیگران، ۲۰۲۰) یک سیستم مدیریت انرژی در ریز شبکه با استفاده از بارهای پاسخگو به همراه سیستم ذخیره توزیع، تشریح شده است. در این مقاله سیستم مدیریت انرژی با استفاده از دستگاه‌های چند عامله (MAS<sup>۴۵</sup>) و با لحاظ کردن بارهای پاسخگو به همراه ذخیره سازها قادر بوده است تا مقدار تقاضا را در پیک و همچنین هزینه‌های سیستم را در حالت متصل به شبکه کاهش دهد. این مقاله در سال ۲۰۱۳ تدوین شده است.

<sup>۳۴</sup>. Yonghong

<sup>۳۵</sup>. Huy Truong

<sup>۳۶</sup>. Di Zhang

<sup>۳۷</sup>. Shayanfar

<sup>۳۸</sup>. S.Conti

<sup>۳۹</sup>. Zhou

<sup>۴۰</sup>. Liu

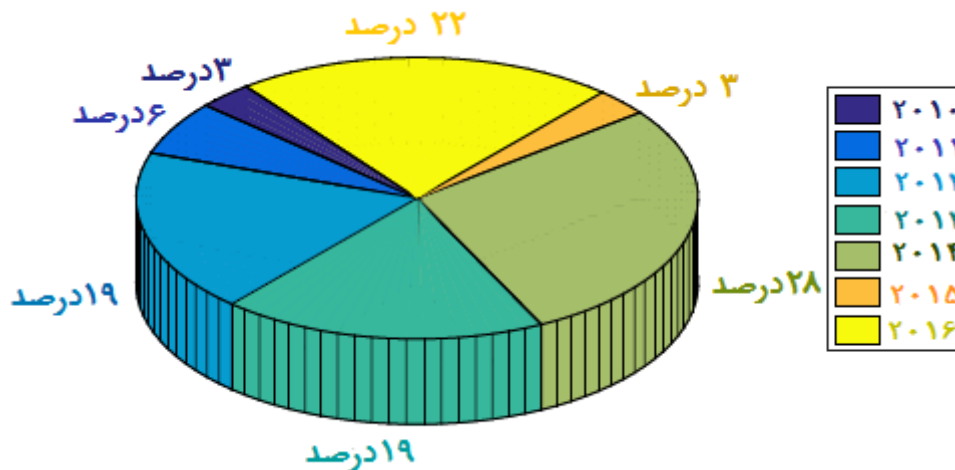
<sup>۴۱</sup> Optimized Home Energy Management System

<sup>۴۲</sup>. Costa

<sup>۴۳</sup> Model Predictive Control

<sup>۴۴</sup>. Dileep

<sup>۴۵</sup> Multi Agent System



شکل ۱. تفکیک سال‌های انتشار مطالعات بررسی شده مربوط به مدیریت انرژی الکتریکی خانه‌های هوشمند چندگانه (احمد<sup>۴۶</sup> و دیگران، ۲۰۱۷)

Figure ۱ Distribution of published years of reviewed studies related to electrical energy management of multiple smart homes

#### ۴- مدیریت انرژی در ساختمان‌های مسکونی

##### ۴-۱- خانه‌های هوشمند

در چند سال گذشته، فن‌آوری‌های کلاسیک ساختمان‌های مسکونی تکامل یافته‌اند تا ویژگی‌های پیشرفته‌تری را در برگیرند تا امکان تبدیل خانه‌های سنتی به هوشمند را فراهم کنند. این خانه‌ها معمولاً شامل وسایل قابل برنامه‌ریزی، DG، ذخیره‌سازی انرژی، EV، یک کنترل‌کننده HEMS هستند که به اطلاعات تقریباً هم‌زمان در مورد مصرف برق، آب‌وهوا و نرخ‌های تغییر برق دسترسی دارند و فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا (IoT<sup>۴۷</sup>) را فعال می‌کنند. HEMS مسئول مدیریت مصرف انرژی، تولید و نیازهای ذخیره‌سازی کاربران نهایی درحالی‌که نیازهای آسایش و اقتصادی آن‌ها را برآورده می‌کند. ارتباط بین شرکت و مشتری از طریق AMI<sup>۴۸</sup> و کنتورهای هوشمند حاصل می‌شود. AMI ارتباط دوطرفه را بین یک شبکه منطقه خانگی (HAN<sup>۴۹</sup>) در سطح پایین و شبکه منطقه همسایگی (NAN<sup>۵۰</sup>) در سطح بالا فراهم می‌کند (ملحم<sup>۵۱</sup> و دیگران، ۲۰۱۸). با استفاده از اطلاعات ارائه‌شده توسط سیستم (مانند قیمت‌های پیش‌بینی و زمان واقعی، درخواست‌های DR و اطلاعات محلی در مورد تولید و بارها، HEMS تلاش می‌کند تا با برنامه‌ریزی مناسب استفاده از منابع محلی و شبکه، مصرف انرژی در خانه‌های هوشمند را مدیریت کند. اطلاعات جمع‌آوری شده معمولاً توسط HEMS، از طریق ارتباط سیمی یا بی‌سیم، همراه با سیگنال قیمت به‌دست‌آمده از سیستم متمرکز می‌شود. یک رابط کاربری گرافیکی (GUI<sup>۵۲</sup>)، که معمولاً از طریق یک رابط کامپیوتری یا یک برنامه تلفن هوشمند یا تبلت به کاربر تحویل داده می‌شود، با HEMS ارتباط برقرار می‌کند و اطلاعاتی را در مورد شرایط فعلی (به‌عنوان مثال، مصرف، قیمت) در اختیار کاربر قرار می‌دهد. چنین اطلاعاتی برای تصمیم‌گیری آگاهانه، تنظیم اولویت‌ها برای استفاده از وسایل هوشمند یا برای نادیده گرفتن برنامه‌های خودکار حیاتی است (حسین<sup>۵۳</sup> و دیگران، ۲۰۱۸).

<sup>۴۶</sup>. Ahmad

<sup>۴۷</sup> Internet-of-things

<sup>۴۸</sup> Advanced Metering Infrastructure

<sup>۴۹</sup> Home Area Network

<sup>۵۰</sup> Neighborhood Network

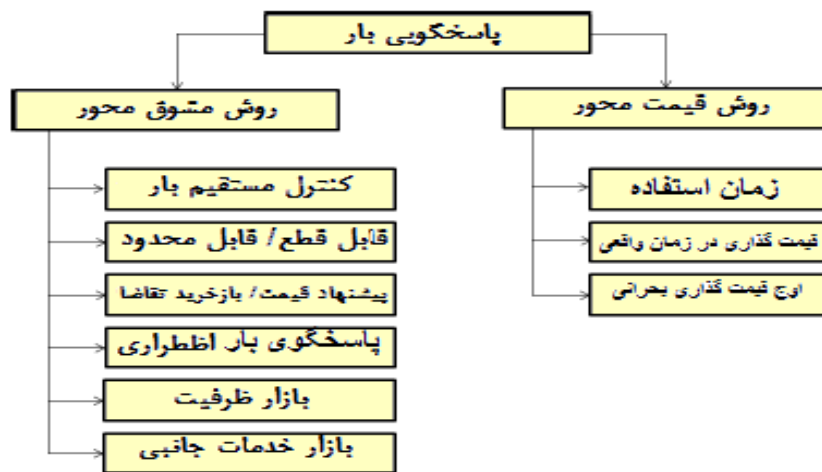
<sup>۵۱</sup>. Melhem

<sup>۵۲</sup> Graphical User Interface

<sup>۵۳</sup>. H. Hussain

#### ۴-۲- مدیریت انرژی خانه هوشمند

رشد مصرف برق و افزایش بار پیک در سال‌های اخیر، سبب بروز مشکلاتی از قبیل کمبود ظرفیت تولید، پرشدگی خطوط انتقال، افزایش قیمت انرژی، مصرف سوخت بیشتر و آلودگی محیط‌زیست شده است. با ادامه روند افزایش مصرف، تأمین بار پیک در سال‌های آینده، مستلزم صرف هزینه‌های زیادی جهت احداث نیروگاه جدید و نگهداری مناسب از تأسیسات موجود برای بهره‌برداری حداکثر از آن‌ها خواهد بود. درحالی‌که این هزینه، تنها برای تأمین برق در چند ساعت محدود از سال است. بنابراین، لازم است با روش‌هایی، پیک مصرف برق کاهش یابد. از سوی دیگر، افزایش استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر و عدم قطعیت تولید انرژی توسط این منابع، موجب افزایش نیاز به ذخیره چرخان و غیر چرخان با سرعت بالا گردیده است. تأمین این نوع ذخیره، به روش‌های سنتی، هزینه‌های سنگینی را برای سیستم قدرت به دنبال خواهد داشت. روش رایجی که برای رفع مشکلات فوق‌الذکر مطرح می‌شود پاسخگویی بار (DR) است که یکی از مهم‌ترین روش‌های مدیریت اختلاف بین میزان تقاضا و تولید، با ایجاد تغییراتی در منحنی بار مصرفی، به شمار می‌رود. کنترل پاسخگویی بار، به دو روش قیمت محور و مشوق محور انجام می‌گیرد؛ که روش مشوق محور، قابلیت اطمینان بیشتری را به همراه دارد. خانه‌های هوشمند برای چندین دهه موضوع مورد توجه بوده‌اند، که اخیراً شتاب قابل توجهی یافته است، با ظهور چیزی که امروزه به‌عنوان شبکه هوشمند شناخته می‌شود. این امر منجر به انتشاراتی در ادبیات علمی (اوایس<sup>۵۴</sup> و دیگران، ۲۰۱۸) و عمومی (برک چلیک<sup>۵۵</sup> و دیگران، ۲۰۱۷) شده است که نشان‌دهنده علاقه محققان و همچنین عموم مردم است. مدیریت مصرف انرژی و پاسخگویی بار فعالیت‌هایی هستند که بر مصرف برق مشتری تأثیر می‌گذارند. اصطلاحات DSM و DR معانی نسبتاً نزدیکی دارند، اما برای پرداختن به فلسفه‌های مختلف استفاده می‌شوند. باوجود برخی شباهت‌ها بین هر دو اصطلاح، هدف DR تغییر مصرف برق مصرف‌کننده نهایی (یعنی منحنی بار)، معمولاً در محدوده ۴ تا ۱ ساعت، در پاسخ به یک سیگنال خارجی (به‌عنوان مثال، قیمت، انگیزه و غیره است). دریافت شده از ارائه‌دهنده خدمات یا سیستم. از سوی دیگر، DSM بر بهبود کارایی مصرف برق به‌طور کلی در حوزه مشتری تمرکز دارد (اچ تی دین<sup>۵۶</sup> و دیگران، ۲۰۲۱).



شکل ۲. برنامه‌های پاسخگویی بار (روزاریو<sup>۵۷</sup> و دیگران، ۲۰۱۳).

Figure ۲. Programs of load response

<sup>۵۴</sup>. M. Awais

<sup>۵۵</sup>. Berk Celik

<sup>۵۶</sup>. H. T. Dinh

<sup>۵۷</sup>. Rosario

شش نوع تکنیک DSM معمولاً در نظر گرفته می‌شوند (روزاریو<sup>۵۸</sup> و دیگران، ۲۰۱۳): اصلاح پیک‌بار، افزایش بار در ساعات غیر اوج، حفاظت استراتژیک، رشد بار استراتژیک، تغییر بار، و شکل‌دهی بار انعطاف‌پذیر. چنین تکنیک‌های DSM معمولاً با مکانیسم‌های مالی (مشوق‌ها) همراه هستند که برای تشویق مشارکت مشتری طراحی شده‌اند. در این رابطه، دو نوع اصلی مکانیسم DR به‌طور گسترده مطالعه شده است: برنامه‌های مبتنی بر انگیزه (IBP<sup>۵۹</sup>) و برنامه‌های مبتنی بر قیمت (PBP<sup>۶۰</sup>) (شکل ۲). که روش IBP، قابلیت اطمینان بیشتری را به همراه دارد. برنامه‌های IBP و PBP بیشتر توسط کمیسیون تنظیم مقررات انرژی فدرال (FERC) تقسیم می‌شوند. IBP بسته به حالت‌های عملکردشان به شش دسته طبقه‌بندی می‌شود: کنترل مستقیم بار (DLC<sup>۶۱</sup>)، قابل قطع/ قابل محدود شدن (I/C)، پیشنهاد دیماندا/ بازخرید<sup>۶۲</sup> (DB)، پاسخگوی بار اضطراری (EDR)، بازار ظرفیت (CM) و بازار خدمات جانبی (AS). (حکیمی<sup>۶۳</sup> و دیگران، ۲۰۲۰).

### ۴-۳- ساختار HEMS

شکل ۳ عناصر اصلی HEMS را نشان می‌دهد. ما فرض می‌کنیم که هر مصرف‌کننده به AMI<sup>۶۴</sup>، یک کنترل‌کننده اصلی (MC)، ESS و یک سیستم PV به‌عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر (RES<sup>۶۵</sup>) مجهز است. به‌طور کلی، AMI به مجموعه‌ای از سیستم‌ها اطلاق می‌شود که شامل کنتورهای هوشمند (SM<sup>۶۶</sup>)، ارتباطات پیشرفته و سیستم‌های مدیریت داده هست (علایی<sup>۶۷</sup> و دیگران، ۲۰۲۱). AMI به‌عنوان ستون فقرات زیرساخت اساسی شبکه از ارائه‌دهندگان برق به مصرف‌کنندگان کار می‌کند. SM مسئول خواندن، پردازش و ارسال داده‌های مصرف انرژی از خانه ما به ارائه‌دهندگان از طریق AMI است. علاوه بر این، AMI نیز برای انتقال اطلاعات مفید شبکه از ارائه‌دهندگان برق به مصرف‌کنندگان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع اطلاعات ممکن است اطلاعات قیمت، دمای پیش‌بینی، تابش خورشیدی و سرعت باد باشد. MC قلب HEMS است. وظیفه اصلی MC این است که تمام لوازم‌خانگی از جمله سیستم PV و ESS را کنترل کنید. وظیفه اصلی MC کنترل تمام لوازم‌خانگی از جمله سیستم PV و ESS است. MC قادر است هر دستگاه را در سیستم ما بر اساس برنامه زمانی محاسبه شده از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی ما روشن یا خاموش کند. یک زمان‌بندی هوشمند (SS) که الگوریتم‌های بهینه‌سازی را انجام می‌دهد داخل MC نصب شده است. در ابتدای روز، اطلاعات مفید از ارائه‌دهنده برق از طریق AMI دریافت می‌شود. سپس SS<sup>۶۸</sup> برای ایجاد یک برنامه بهینه برای هر دستگاه در طول یک روز اجرا می‌شود. MC می‌تواند تمام لوازم‌خانگی را با پیروی از این برنامه کنترل کند تا هزینه انرژی و PAR<sup>۶۹</sup> را به حداقل برساند. انواع مختلفی از RES مانند توربین‌های بادی، سیستم‌های PV، سلول‌های سوختی وجود دارد. ما در سیستم خود از سیستم PV به دلیل نصب آسان و قیمت ارزان آن استفاده می‌کنیم. یک اینورتر DC/AC برای تبدیل جریان DC از سیستم PV به جریان AC استفاده می‌شود. برای استفاده از برق شبکه اصلی، ما از ESS برای ذخیره برق از شبکه اصلی باقیمت پایین و تأمین برق برای لوازم‌خانگی خود باقیمت بالا استفاده می‌کنیم. ESS همچنین به ما کمک می‌کند تا از سیستم PV به‌طور مؤثر بهره‌برداری کنیم. انرژی حاصل از یک سیستم PV می‌تواند در هر شکاف زمانی در ESS ذخیره شود و در شکاف‌های زمانی مختلف دوباره استفاده شود. علاوه بر این، سیستم ما از فروش انرژی به افراد خارجی مانند وسایل نقلیه الکتریکی هوشمند، خانه‌های دیگر، یا حتی شبکه اصلی پشتیبانی می‌کند. (گنجی<sup>۷۰</sup> و دیگران، ۲۰۲۲).

<sup>۵۸</sup> Rosario

<sup>۵۹</sup> Incentive-based programs

<sup>۶۰</sup> Price-based programs

<sup>۶۱</sup> Direct Load Control

<sup>۶۲</sup> Demand Bidding / Buyback Programs

<sup>۶۳</sup> Hakimi

<sup>۶۴</sup> Advanced Metering Infrastructure

<sup>۶۵</sup> Renewable Energy Resources

<sup>۶۶</sup> Smart Meter

<sup>۶۷</sup> Alayi

<sup>۶۸</sup> Smart Scheduler

<sup>۶۹</sup> Peak-to-Average Ratio

<sup>۷۰</sup> Ganjei



دهد و همچنین به ساکنین ساختمان این اجازه را می‌دهد که از منابع موجود به صورت مؤثرتری استفاده کرده و امنیت و آسایش آن‌ها را افزایش دهد (سوارس<sup>۷۴</sup> و دیگران، ۲۰۱۴).



شکل ۴. شبکه داخلی خانه‌های هوشمند (سوارس<sup>۷۵</sup> و دیگران، ۲۰۱۴).

Figure ۴. Internal network of smart homes

## ۶- انرژی‌های به کارگیری در خانه‌های هوشمند

### ۶-۱-۱-۶ انرژی‌های تجدید پذیر

#### ۶-۱-۱-۱-۶ انرژی خورشیدی

در حال حاضر، استفاده از این منابع انرژی در جایگزینی با سوخت‌های فسیلی با توجه به ویژگی‌های زیست‌محیطی و اقتصادی دغدغه اصلی سیاست‌گذاران انرژی محسوب می‌شود. از جمله مهم‌ترین انرژی‌های تجدید پذیر می‌توان به سیستم‌های انرژی خورشیدی که پیشرفت‌های قابل توجهی داشته است، اشاره نمود. کشور ایران یکی از کشورهای با مصرف انرژی بالا به‌ویژه در بخش ساختمان‌های مسکونی هست، و همچنین از پتانسیل بالای انرژی خورشیدی برخوردار است، لذا استفاده از سیستم‌های خورشیدی می‌تواند در طولانی‌مدت گامی بزرگ در جهت تحقق اهداف توسعه پایدار، کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی و در نتیجه کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی باشد (نجف پور<sup>۷۶</sup> و دیگران، ۱۳۹۹).

#### ۶-۱-۲-۱-۶ انرژی بادی

افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و رو به پایان بودن منابع سوخت فسیلی در استفاده از این نوع منابع و بهبود عملکرد زیست‌محیطی باعث شده کشورها رو به منابع انرژی تجدید پذیر آورند. انرژی باد یکی از منابع انرژی تجدید پذیر است که بدون پایان و موافق با محیط‌زیست است و استفاده از آن باعث کاهش وابستگی به سوخت فسیلی می‌شود (سلیمانی<sup>۷۷</sup> و دیگران، ۲۰۲۱). گسترش تکنولوژی در زمینه انرژی باد به‌عنوان یک چالش مهم در بحث انرژی‌های تجدید پذیر درآمده است. استفاده از انرژی باد برای تولید انرژی الکتریکی، از لحاظ کیفیت توان

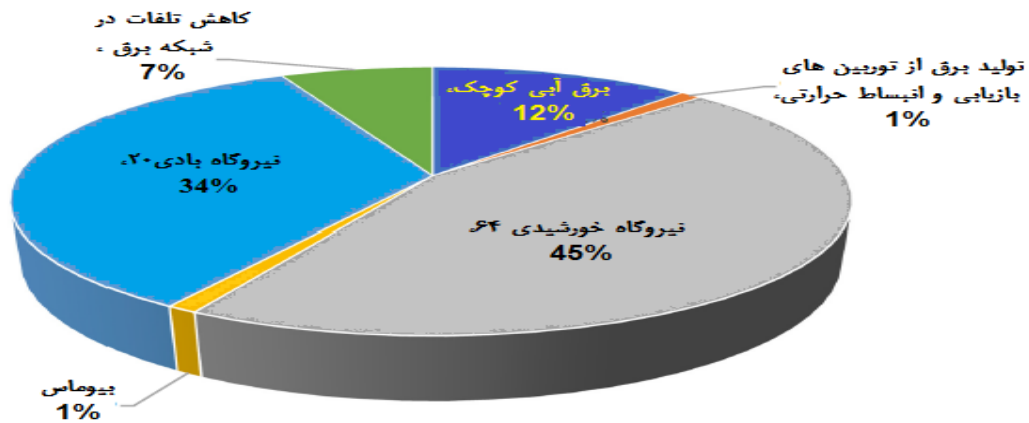
<sup>۷۴</sup>. Soares

<sup>۷۵</sup>. Soares

<sup>۷۶</sup>. Najafpour

<sup>۷۷</sup>. Solaymani

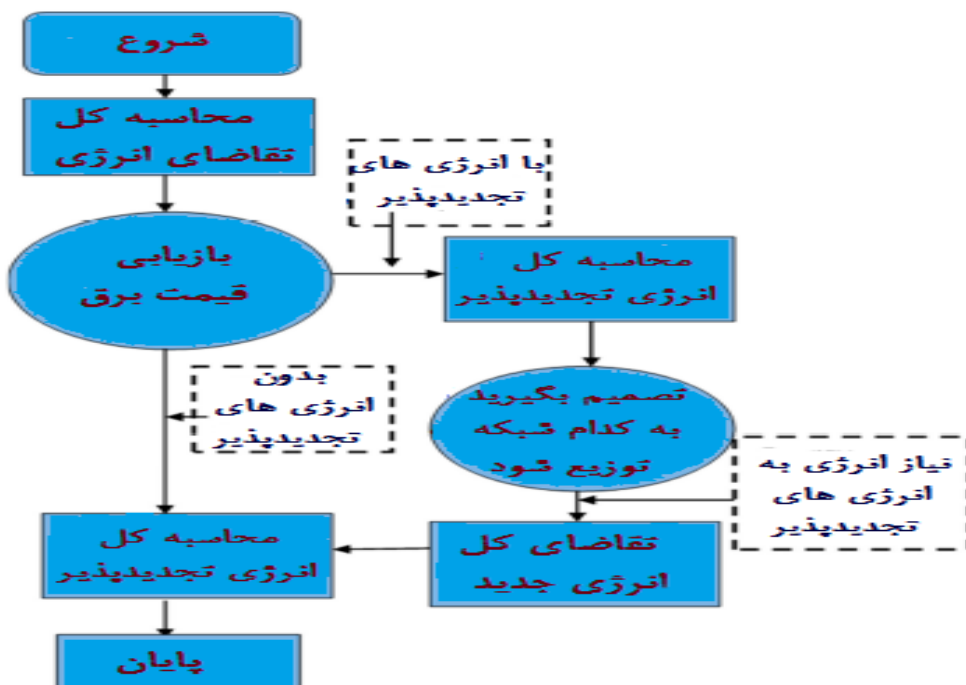
تولیدی، در سطح پایینی قرار دارد. نوسانات سرعت باد سبب ایجاد نوسان در توان تحویلی مزرعه باد به شبکه الکتریکی می‌شود. شکل ۵ سهم ظرفیت انرژی‌های تجدید پذیر و بهره‌وری انرژی الکتریکی در ایران را تا ژوئیه ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. ساخت این نیروگاه‌ها نه تنها باعث ایجاد شغل و درآمدزایی برای مشاغل انرژی‌های تجدید پذیر می‌شود، بلکه درآمدهای مالیاتی دولت را نیز افزایش می‌دهد (سلیمانی<sup>۷۸</sup> و دیگران، ۲۰۲۱).



شکل ۵. سهم ظرفیت انرژی‌های تجدید پذیر و بهره‌وری انرژی الکتریکی در ایران (سلیمانی<sup>۷۹</sup> و دیگران، ۲۰۲۱).

Figure ۵. Share of renewable energy capacity and electrical energy efficiency in Iran

با استفاده از مدل پیش‌بینی ساده برداشت و مصرف، یک الگوریتم کنترلی ساده در شکل ۶ برای کاهش هزینه برق شبکه در تأسیسات انرژی تجدید پذیر پیشنهاد شده است. این امر به تعیین میزان توان ذخیره‌شده در باتری بر اساس انرژی موجود، آب‌وهوای پیش‌بینی شده و مصرف برق مورد انتظار ۲۴ ساعت آینده کمک می‌کند.



<sup>۷۸</sup> Solaymani

<sup>۷۹</sup> Solaymani

شکل ۶. گردش کار الگوریتم پیشنهادی

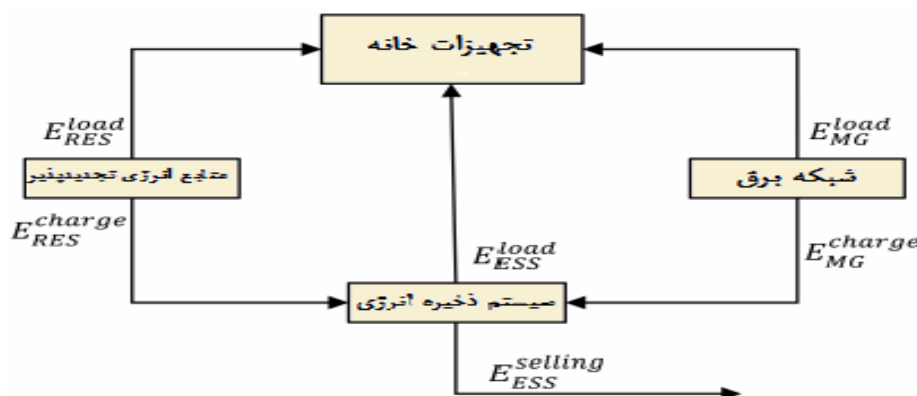
Figure ۶. Workflow of the proposed algorithm

همان طور که از الگوریتم. استنباط می‌شود، مراحل مختلف به شرح زیر فهرست شده است: مرحله ۱: اگر حجم باتری تخمین زده شود، خانه نیازی به استفاده از برق شبکه ندارد. مرحله ۲: خواه تعادل باتری بیشتر یا مساوی یک چرخه مصرف انرژی با نرخ بالا باشد، و انرژی خورشیدی ثابت باشد، پس از اتمام زمان، باتری باید قدرت اضافی داشته باشد. باتری باید با منبع انرژی ذخیره‌سازی بارگیری شود. مرحله ۳: اگر برای مدت زمان باکیفیت بالا، مقدار انرژی مورد انتظار باتری باقی بماند و انرژی خورشیدی پیش‌بینی شده باقی بماند، تا زمانی که ظرفیت شارژ و انرژی خورشیدی پیش‌بینی شده برابر با عملکرد مورد انتظار باتری باشد، مرکز کنترل باتری را با نرخ پایین شارژ می‌کند.

## ۷- فرمولاسیون مسئله

### ۷-۱- جریان الکتریسیته

شکل ۷ تمام جریان‌های برق را در سیستم ما نشان می‌دهد. در مدل ما، RES می‌تواند برای تأمین برق برای وسایل خانه و ذخیره برق در ESS در هر شکاف زمانی و به هر مقدار استفاده شود. ESS را می‌توان برای تأمین برق لوازم‌خانگی و فروش برق در هر زمان و با هر مقدار استفاده کرد. اگر برق RES و ESS برای وسایل خانگی کافی نباشد، برق شبکه اصلی مورد نیاز است. علاوه بر این، برق از شبکه اصلی را می‌توان در ESS در اسلات زمانی باقیمت پایین ذخیره کرد و در شکاف زمانی باقیمت بالا استفاده می‌شود.



شکل ۷. جریان الکتریسیته در HEMS

Figure ۷. Electricity flow in HEMS

بررسی جامع از پژوهش بر روی فن‌آوری شبکه هوشمند، پژوهش حاضر و استانداردهای مربوطه در رفرنس (زوالکران<sup>۸۰</sup> و دیگران، ۲۰۱۷) داده شده است، که در آن پروژه‌های آزمایشی و تحقیقات بیشتر مورد بحث قرار گرفته است. انتخاب بهینه سرمایه‌گذاری و بهینه‌سازی زمان اجرا جدول زمانی بهره‌برداری برای شبکه هوشمند ساختمان‌های تجاری در رفرنس (مصطفی نوحه<sup>۸۱</sup> و دیگران، ۲۰۲۲)، که در آن ذخیره‌سازی الکتریکی و ذخیره‌سازی حرارتی در توزیع منابع انرژی و مدل یکپارچه مشتری ارائه شده است. در (چن<sup>۸۲</sup> و دیگران، ۲۰۱۷) توسعه یک روش برای طراحی تعداد و ظرفیت هر یک از تجهیزات در یک شبکه هوشمند با ترکیب حرارت و برق (CHP) سیستم با توجه به راندمان بار جزئی از یک موتور گازومقیاس اقتصادی آن برای به حداقل رساندن هزینه سالیانه در نظر گرفته شده است. تجزیه و تحلیل پایه برآورد منافع اقتصادی

<sup>۸۰</sup>. Zualkernan

<sup>۸۱</sup>. Mostafa, Noha

<sup>۸۲</sup>. Chen

ریز شبکه توسط کینگ و مورگان در رفرنس (نوریا<sup>۸۳</sup> و دیگران، ۲۰۲۱)، و نتایج بررسی انجام شده نشان می‌دهد که کارایی سیستم روی هم‌رفته بهتر و صرفه‌جویی هزینه می‌تواند از یک ترکیب خوب از انواع مشتریان به دست آید. تابع هدف برای به حداقل رساندن هزینه کل روزانه، که شامل: عملیات و تعمیر و نگهداری هزینه‌های ژنراتور CHP، ژنراتور بادی، بویلر، ذخیره‌سازی الکتریکی و ذخیره‌سازی حرارتی. هزینه برق خریداری شده از شبکه درآمد حاصل از برق جهت فروش به شبکه هست. از آنجاکه ظرفیت تجهیزات ثابت هستند، هزینه‌های سرمایه‌شان مستقل از برنامه هستند و بنابراین در نظر گرفته نشده است.

$$\begin{aligned} \phi &= \sum_t \delta n u_t / \alpha && \text{هزینه بهره‌برداری CHP} \\ &+ \sum_t \delta m^w w_t && \text{هزینه نگهداری توربین بادی} \\ &+ \sum_t \delta n x_t / \eta_t && \text{هزینه بهره‌برداری بویلر} \\ &+ \sum_t \delta m^E y_t && \text{هزینه نگهداری ذخیره‌سازی الکتریکی} \\ &+ \sum_t \delta m^T f_t && \text{هزینه نگهداری ذخیره‌سازی گرمایی} \\ &+ \sum_t \delta b_t I_t && \text{هزینه خرید برق از شبکه} \\ &- \sum_t \delta q R_t && \text{درآمد حاصل از فروش برق به شبکه} \end{aligned}$$

## ۲-۷- محدودیت ظرفیت

خروجی از هر یک از تجهیزات نباید از ظرفیت طراحی شده تخطی کند (سماواتی<sup>۸۴</sup> و دیگران، ۱۳۹۵):

$$u_t \leq C^{CHP} \quad \forall t \quad \text{ژنراتور CHP} \quad (1)$$

$$x_t \leq C^B \quad \forall t \quad \text{بویلر:} \quad (2)$$

$$S_t^E \leq C^E \quad \forall t \quad \text{ذخیره‌سازی برق:} \quad (3)$$

$$S_t^T \leq C^T \quad \forall t \quad \text{ذخیره‌سازی حرارتی:} \quad (4)$$

## ۳-۷- محدودیت ذخیره‌سازی برق

برق ذخیره‌شده در ذخیره‌سازی برق در زمان  $t$  برابر است با مقدار ذخیره‌شده در زمان  $t-1$  به اضافه برق شارژ شده، منهای برق دشارژ شده است. برقی که در طول فرآیند شارژ و دشارژ از دست رفته است.

<sup>۸۳</sup>. Nooriya

<sup>۸۴</sup>. Samavati

$$= S_t^T S_{tt-1}^T + \delta \eta^T g_t - \delta f^T / \eta^T \quad \forall t \quad (5)$$

ذخیره‌سازی الکتریکی یک حالت ذخیره‌سازی اولیه در آغاز هرروز به‌عنوان نمونه است. در پایان هرروز، ذخیره‌سازی الکتریکی برای اجتناب از ذخیره خالص باید به مقدار اولیه خود بازمی‌گردد. حالت اولیه مقدار ذخیره‌سازی از طریق مدل بهینه‌سازی شده برای تصمیم‌گیری بهترین حالت اولیه برای ۱ روز مصرف است. در غیر این صورت حالت اولیه را می‌توان از روز قبل و پایان روز به دست آورد. ذخیره‌سازی الکتریکی باید به پایین‌ترین حد معین شده برای محافظت از تجهیزات برگردد (ملحم<sup>۸۵</sup> و دیگران، ۲۰۱۷).

$$S_t^E = S_t^E \quad S^{IE} \quad (6)$$

میزان شارژ یا دشارژ برق نمی‌تواند از حد مشخص شده شارژ یا دشارژ ذخیره‌سازی برق به‌وسیله سازنده باطری در امر جلوگیری از شارژ یا دشارژ بیش‌ازاندازه تخطی کند. میزان آسیب به باطری یا کاهش ظرفیت عبارت‌اند از:

$$y_t \leq D^E \quad \forall t \quad (7)$$

$$z_t \leq C^E \quad \forall t \quad (8)$$

گرمای ذخیره‌شده در ذخیره‌سازی حرارتی در زمان  $t$  برابر است با مقدار ذخیره‌شده در  $t-1$  بعلاوه گرمای شارژ، منهای گرمای دشارژ، گرمای از دست‌رفته در طی فرایند ذخیره‌سازی گرمایی که نشان‌دهنده روش یکسان، برای ذخیره‌سازی برق نشان داده شده هستند.

$$= S_t^T S_{tt-1}^T + \delta \eta^T g_t - \delta f^T / \eta^T \quad \forall t \quad (9)$$

گرمای ذخیره‌شده باید به حالت اولیه در پایان روز بازگردد به‌طوری که هیچ گرمایی در ۱ روز انباشته نشود. ذخیره‌سازی حالت اولیه بارز نیز از طریق بهینه‌سازی مدل شده است.

$$S_t^T = S_t^T = S^{IT} \quad (10)$$

میزان شارژ یا دشارژ گرما نمی‌تواند از حد ذخیره‌سازی حرارتی شارژ یا دشارژ بر اساس نوع ذخیره‌سازی متوسط، جرم و گرمای نهفته در مواد تخطی کند:

$$f_t \leq D^T \quad \forall t \quad (11)$$

$$g_t \leq G^T \quad \forall t \quad (12)$$

## ۷-۴- خروجی ژنراتور بادی

برق خروجی از ژنراتور بادی از یکسان بودن قدرت ژنراتور بادی بر اساس سطح پره‌های ژنراتور بادی، سرعت باد و راندمان ژنراتور بادی محاسبه شده است. خروجی توان در هر دو، سرعت قطع و قطع خروجی در این مدل محدود شده است. سرعت قطع در مینیمم سرعت باد که توربین بادی تولید خواهد کرد توان معین شده مجاز هست. درحالی که سرعت قطع خروجی سرعت باد در این ژنراتور بادی به دلایل امنیتی در امر حفاظت از آسیب توربین بادی خاموش خواهد بود (نوجوان<sup>۸۶</sup> و دیگران، ۱۳۹۸).

$$w = \begin{cases} \cdot \cdot \cdot \cdot \eta^W \min(v_t, V^{\text{nom}}) & \forall t: V^{\text{cut-in}} \leq v_t \leq V^{\text{cut-out}} \\ \cdot & \forall t: v_t \leq V^{\text{cut-in}} \text{ and } v_t \geq V^{\text{cut-out}} \end{cases} \quad (13)$$

## ۷-۵- تعادل انرژی

<sup>۸۵</sup>. Melhem

<sup>۸۶</sup>. Nojavan

در هر بازه زمانی، مصرف کل برق برابر با مجموع ظرفیت مصرف برق از همه کارها از همه خانه‌ها است. برق مصرف شده در طول هر دوره زمانی توسط ژنراتور بادی و ژنراتور CHP عرضه می‌شود، برق دریافت شده از ذخیره‌سازی برق و شبکه، منهای برق ارسال شده به ذخیره‌سازی برق و شبکه هست. اگر ظرفیت مصرف برق کار  $I$  ثابت باشد، بعد از آن تعادل برق می‌توان به‌عنوان در معادله ۱۴ نشان داد. اما ظرفیت مصرف برق برخی از کارها در سرتاسر فاصله زمانی عملیات متفاوت است. ماشین لباسشویی دارای فرآیند ظرفیت‌های مختلف پروفیل بیش از شستشو و نخ‌ریسی می‌باشد (معادله ۱۵). در چنین صورتی، که در آن حساب کردن مصرف برق بیش از دوره عملیات  $\theta$  کارها مناسب‌تر است (حیدر<sup>۸۷</sup> و دیگران، ۲۰۱۶).

$$\sum_j \sum_i C_i E_{jit} = w_t + u_t + y_t + I_t - z_t - R_t \quad \forall t \quad (14)$$

$$\sum_j \sum_i \sum_{\theta=.}^{P_{ji}^{-1}} C_{i\theta} E_{jit-\theta} = w_t + u_t + y_t + I_t - z_t - R_t \quad \forall t \quad (15)$$

گرمای مصرف شده در طول هر دوره زمانی برابر است با گرمای عرضه شده توسط ژنراتور CHP، دیگ بخار، حرارت دریافت شده از ذخیره‌سازی گرمایی، منهای حرارت فرستاده شده به ذخیره‌سازی گرمایی.

$$H_t = \alpha u_t + x_t + f_t - g_t \quad \forall t \quad (16)$$

## ۶-۷- حداکثر تقاضای شارژ

میل به کاهش حداکثر تقاضای برق از شبکه برای جلوگیری از نیاز به ظرفیت بالا در اتصال به شبکه بزرگ و ریزشبکه همچنان وجود دارد (برای جلوگیری از جمع‌آوری هزینه توسط اپراتور سیستم برای مصرف در زمان حداکثری شبکه بزرگ). یکی از راه‌های رسیدن به این، این است که افزایش میزان تعرفه شبکه برای دوره بار برق بالا و در نتیجه انگیزه مصرف‌کنندگان برای توزیع مجدد و یا کاهش مصرف برق خود داشته باشند. به‌منظور انعکاس این، در روش مان، محدودیت اضافی در این مدل معرفی شده است. برای هر فاصله زمانی، هنگامی که بار الکتریسیته از شبکه که در زیر آستانه توافق  $J$  است، قیمت برق نرمال به‌کاربرده شده است (چ تی دین<sup>۸۸</sup> و دیگران، ۲۰۲۱).

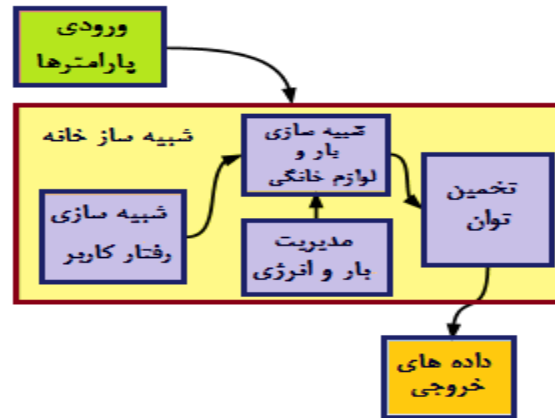
$$\gamma_t \geq I_t - k \quad \forall t \quad (17)$$

## ۸- سیستم مورد مطالعه و نتایج شبیه‌سازی

ساختار شبیه‌سازی یک ساختمان هوشمند در شکل ۸ نشان داده شده است. و در حالت کلی از چهار واحد عملکردی مختلف تشکیل شده است: شبیه‌سازی رفتار کاربر، برای تولید تصادفی الگوهای مورد استفاده - شبیه‌سازی بار و لوازم‌خانگی - برآورد توان برای ارزیابی مصرف برق و تلفات انرژی - مدیریت انرژی و بار، برای اجرای مدیریت سمت تقاضا و/یا اقدامات کنترلی توزیع شده.

<sup>۸۷</sup> Haider

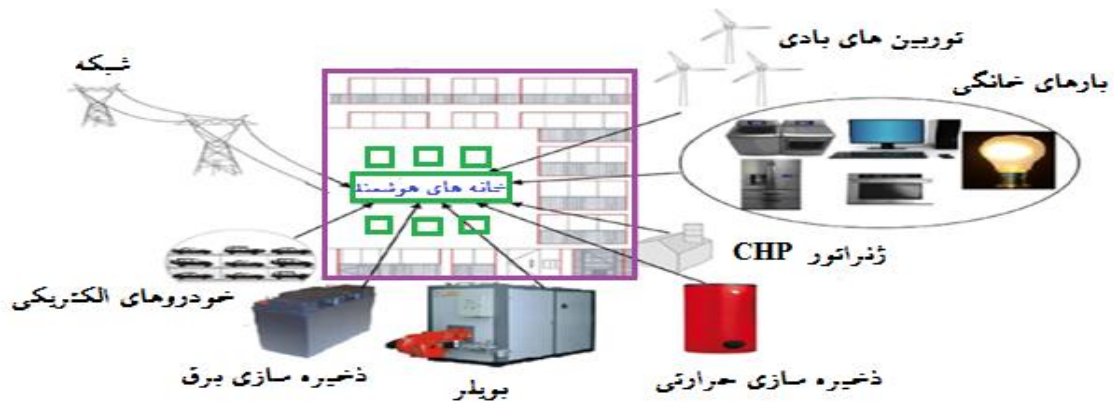
<sup>۸۸</sup> H. T. Dinh



شکل ۸. ساختار شبیه سازی ساختمان هوشمند

Figure ۸. Smart building simulation structure

یک ساختمان هوشمند با تعدادی خانه های هوشمند در نظر گرفته شده است (اویس<sup>۸۹</sup> و دیگران، ۲۰۱۸). نمونه ای از این ساختمان های هوشمند در شکل شماره (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹. سیستم مورد مطالعه (اویس<sup>۹۰</sup> و دیگران، ۲۰۱۸)

Figure ۹. The studied system

در این بخش مدل پیشنهادی برای برنامه ریزی مصرف انرژی به دو مثال های عددی اعمال شده است: ساختمان هوشمند از ۳۰ خانه. اطلاعات سیستم مورد مطالعه در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. اطلاعات سیستم مورد مطالعه (چن<sup>۹۱</sup> و دیگران، ۲۰۱۷).

Table ۱. Information of the studied system

<sup>۸۹</sup>. M. Awais

<sup>۹۰</sup>. M. Awais

<sup>۹۱</sup>. Chen

Task	Power (kW)	Earliest Starting Time (h)	Latest Finishing Time (h)	Time Window Length (h)	Duration (h)
Dishwasher	—	۹	۱۷	۸	۲
Washing machine	—	۹	۱۲	۳	۱/۵
Spin dryer	۲/۵	۱۳	۱۸	۵	۱
Cooker hob	۳	۸	۹	۱	۰/۵
Cooker oven	۵	۱۸	۱۹	۱	۰/۵
Microwave	۱/۷	۸	۹	۱	۰/۵
Interior lighting	۰/۸۴	۱۸	۲۴	۶	۶
Laptop	۰/۱	۱۸	۲۴	۶	۲
Desktop	۰/۳	۱۸	۲۴	۶	۳
Vacuum cleaner	۱/۲	۹	۱۷	۸	۰/۵
Fridge	۰/۳	۰	۲۴	—	۲۴
Electrical car	۳/۵	۱۸	۸	۱۴	۳

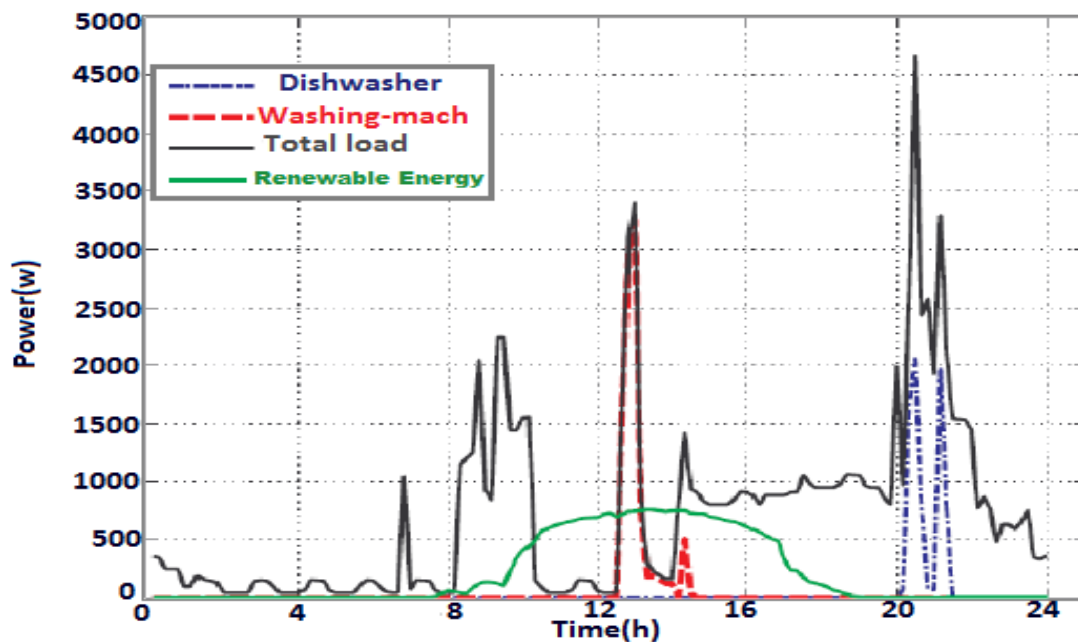
- یک ژنراتور CHP با ظرفیت  $20 (kW_e)$  و راندمان الکتریکی ۳۵ درصد. حرارت نسبت به قدرت برابر  $1/3$  فرض شده است، و هزینه گاز طبیعی  $2/7 p/kw h$  هست؛

- یک مزرعه بادی با ظرفیت  $10 (kW_e)$  و هزینه تعمیر و نگهداری  $0/5 P/kw h_e$ ؛

- یک بویلر با ظرفیت  $120 (KW_{th})$  و هزینه گاز طبیعی  $2/7 P/kw h$ ؛

- یک واحد ذخیره‌سازی الکتریکی با ظرفیت  $10 (KW h_e)$ ، شارژ / دشارژ ۹۵٪، حد شارژ و حد دشارژ هر دو  $10 (kW_e)$  و هزینه تعمیر و نگهداری  $0/5 P/kw h_e$ ؛

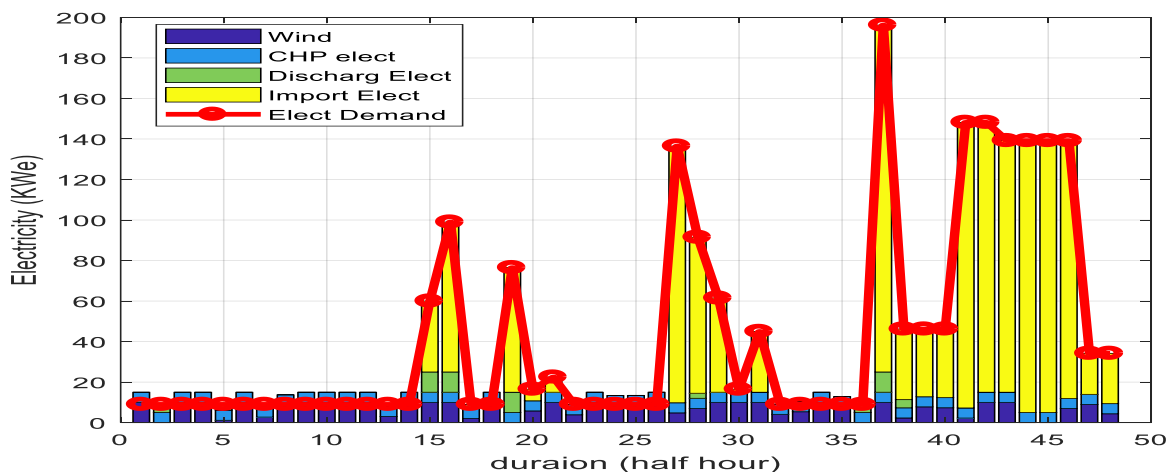
- یک واحد ذخیره‌سازی گرمایی با ظرفیت  $20 (KW_{th})$ ، بازده شارژ / دشارژ ۹۸٪، حد شارژ و حد دشارژ هر دو  $20 (KW_{th})$  و هزینه تعمیر و نگهداری  $0/1 P/kw h_{th}$ ؛ سیستم یک ساختمان هوشمند با ۳۰ خانه در نظر گرفته شده با زیر توزیع منابع انرژی، و ظرفیت‌هایشان مطابق با کل تقاضای انرژی به دست آمده است توجه به مجموع تقاضای انرژی در حالی که پارامترهای فنی و هزینه‌های به دست آمده اند. فرض می‌کنیم که توان و ظرفیت CHP برابر ۱۰ کیلووات است و با تعریف بازه نیم‌ساعته برای مدیریت در طول شبانه‌روز مجتمع لازم است که میزان توان منابع بهینه برای ۴۸ بازه تعیین گردد و نتایج برنامه توزیع الکتریکی در شکل (۱۱) و توزیع گرمایشی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مقدار هزینه بهینه شده برابر  $412/6348$  یورو بر ساعت هست.



شکل ۱۰. نتایج تست سیستم

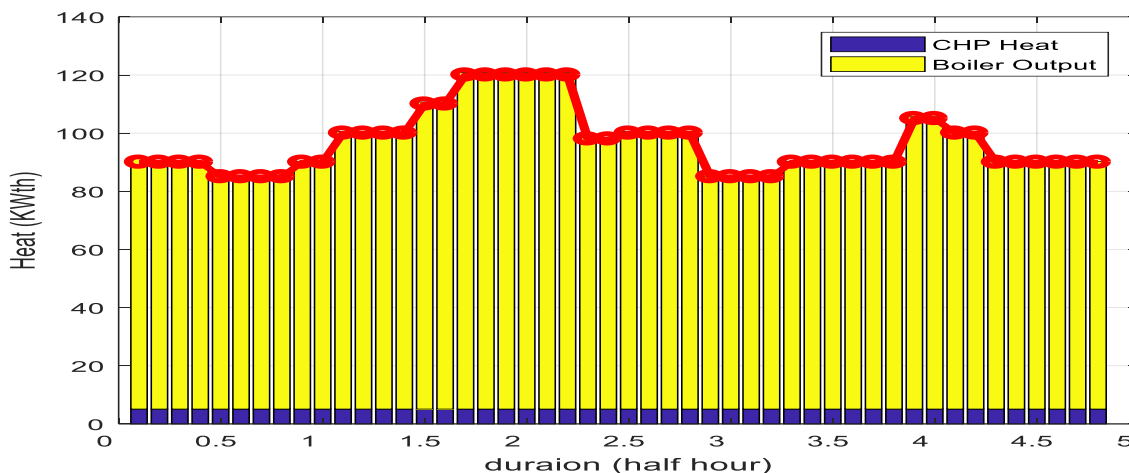
Figure ۱۰. System test results

در شکل ۱۰ نتایج و صرفه‌جویی انرژی با استفاده از سیستم مدیریت انرژی ارائه شده است. با توجه به اینکه انرژی مصرفی در ماشین لباسشویی - انرژی ۱/۶ کیلووات ساعت و در ماشین ظرفشویی - انرژی ۱/۲ کیلووات ساعت و در آپارتمان مجموع انرژی جذب شده ۱۷/۲ کیلووات ساعت است، می‌توان استنباط کنید که انرژی جذب شده آپارتمان بدون DW و WM برابر با ۱۴/۲ کیلووات ساعت است. با آزمایش‌ها، انرژی الکتریکی تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر برابر با ۵/۱ کیلووات ساعت اندازه‌گیری می‌شود و تعادل بین انرژی الکتریکی تولیدی PV و انرژی جذب شده آپارتمان بدون DW و WM برابر با ۹/۱ کیلووات ساعت است. می‌توان نتیجه گرفت که با کمک سیستم مدیریت انرژی که در اینجا پیشنهاد شده است، صرفه‌جویی در انرژی می‌تواند به ۲۱٪ از کل انرژی مصرف شده در آپارتمان برسد.



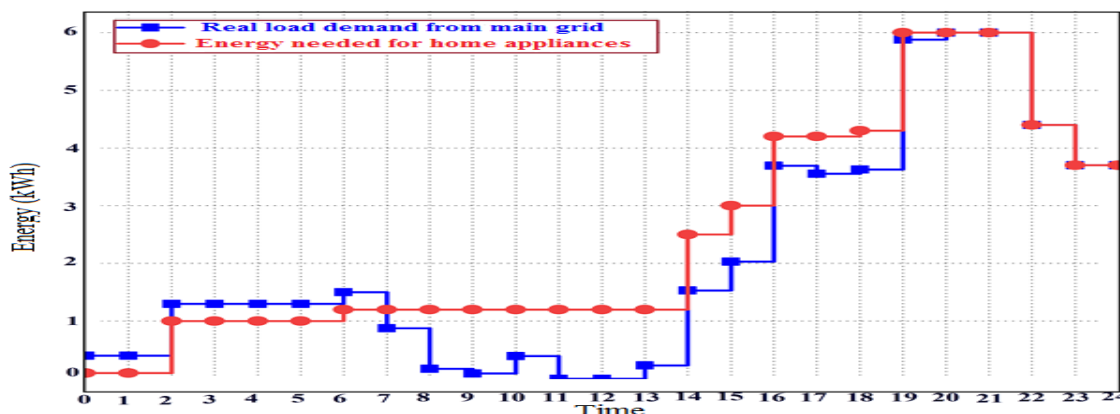
شکل ۱۱. توزیع الکتریکی سیستم مورد مطالعه در توان و ظرفیت CHP برابر ۱۰ کیلووات

Figure ۱۱. Heating distribution of the studied system in the power and capacity of CHP equal to ۱۰ kilowatts



شکل ۱۲. توزیع گرمایشی سیستم مورد مطالعه در توان و ظرفیت CHP برابر ۱۰ کیلووات

Figure ۱۲. Heating distribution of the studied system in the power and capacity of CHP equal to ۱۰ kilowatts



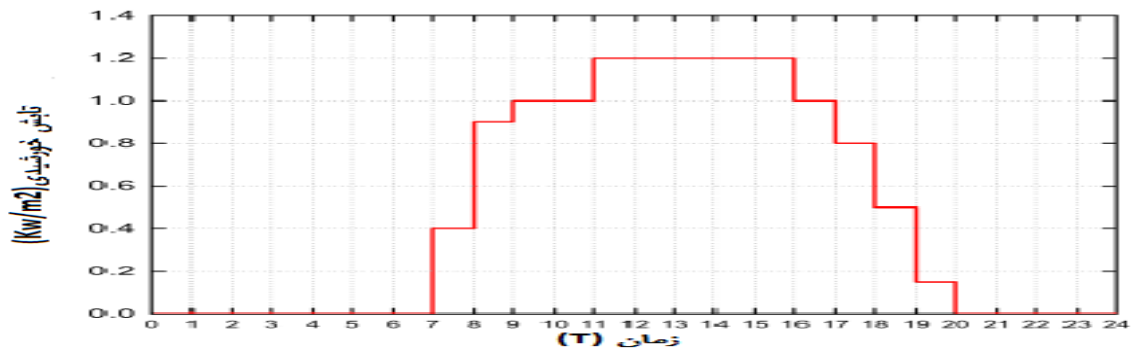
شکل ۱۳. تقاضای بار ساعتی از شبکه اصلی در طی شبانه روز

Figure ۱۳. Hourly load demand from the main grid during the day and night

سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی وسایل الکتریکی خانه را برای کار با هزینه‌های پایین برنامه‌ریزی می‌کند. با این برنامه، همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است انرژی ساعتی مورد نیاز لوازم خانگی (خط قرمز) و تقاضای بار ساعتی سیستم پیشنهادی را از شبکه اصلی (خط آبی) در هر زمان داریم. به‌طور دقیق، در زمان قیمت پایین مانند ۷ بعد از ظهر، ۸ بعد از ظهر و ۹ بعد از ظهر، سیستم ما انرژی زیادی از شبکه اصلی برای دستگاه‌های خانگی مصرف می‌کند. ضمناً از ساعت ۰ صبح تا ساعت ۷ صبح، به دلیل استفاده از انرژی ارزان از شبکه اصلی، تقاضای بار از شبکه اصلی بیشتر از انرژی مورد نیاز لوازم خانگی است. در حالی که نیاز به انرژی شبکه اصلی در زمان قیمت بالا مانند ۷ صبح، ۸ صبح بسیار کم است. به دلیل پشتیبانی منابع انرژی تجدید پذیر و سیستم ذخیره کننده انرژی از آنجایی که این دو سیستم پشتیبان انرژی کافی برای بار خانه در این بازه‌های زمانی دارند، سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی از ساعت ۱۱ صبح تا ساعت ۱ بعد از ظهر به انرژی شبکه اصلی نیاز ندارد. پارامترهای ورودی شبیه‌سازی ما از (چن<sup>۹۲</sup> و دیگران، ۲۰۱۷) شامل لوازم خانگی، سیگنال قیمت‌گذاری روز آینده، تابش خورشیدی و RES همان‌طور که در شکل ۱۲، شکل ۱۳ نشان داده شده است، در اینجا لوازم خانگی به دودسته قابل تعویض و غیرقابل تعویض تقسیم می‌شوند. لوازم قابل تعویض دستگاه‌هایی هستند که زمان کارکرد آن‌ها را می‌توان به اسلات‌های زمانی باقیمت پایین منتقل کرد، در حالی که

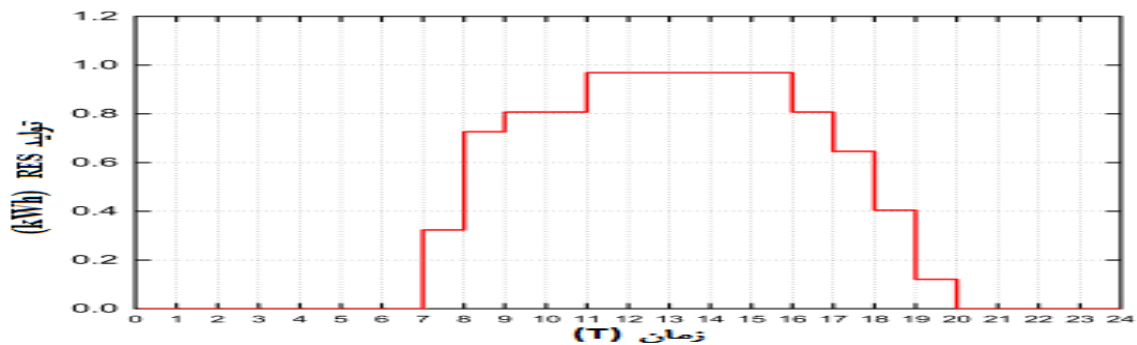
<sup>۹۲</sup>. Chen

زمان کارکرد دستگاه‌های غیرقابل تغییر قابل تغییر نیست. در حین کار نمی‌توان تمام دستگاه‌ها را قطع کرد. RES عمدتاً به بازده تبدیل انرژی ژنراتور خورشیدی، مساحت سلول‌های خورشیدی، تابش خورشیدی بستگی دارد. در این مقاله، یک طرح کلی کاملاً انعطاف‌پذیر برای RES و ESS پیشنهاد شده است. همان‌طور که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، انرژی حاصل از RES نه تنها برای لوازم خانگی استفاده می‌شود، بلکه برای شارژ ESS با هر مقدار و در هر شکاف زمانی استفاده می‌شود. مقدار انرژی ESS همچنین می‌تواند برای فروش به خارج در هر زمان استفاده شود. خروجی شبیه‌سازی را برای همه لوازم مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهیم تا ببینیم چگونه HEMS ما از انرژی شبکه اصلی و انرژی ESS همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، استفاده می‌کند.



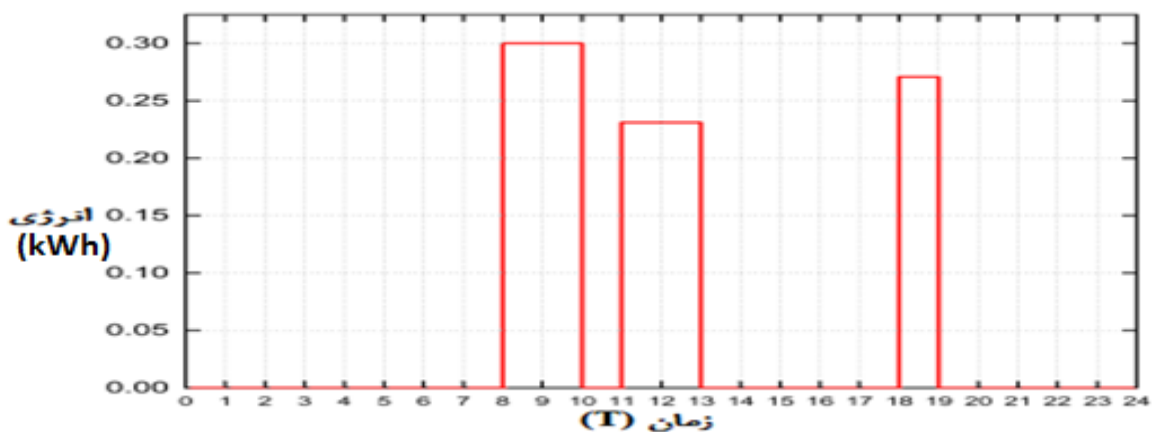
شکل ۱۲. تابش خورشیدی برحسب زمان برای محاسبات لازم

Figure ۱۲. Solar radiation in terms of time for the necessary calculations



شکل ۱۳. انرژی RES ساعتی تولیدشده توسط سیستم PV

Figure ۱۳. The hourly RES energy produced by the PV system



شکل ۱۴. انرژی ESS ساعتی برای بار خانه استفاده می‌شود

Figure ۱۴. Hourly ESS energy is used for house load

مشتری از این طریق با کاهش هزینه‌ها، بهبود خدمات و افزایش راحتی سود می‌برد. نتایج نشان داد که بارهای زیاد کاهش یافته، قبض برق کاهش یافته و انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) کاهش یافته است. در این مقاله، لوازم هوشمند در خانه هوشمند به‌طور خودکار اجرا می‌شوند که حالت خودکار راحت‌تر و راحتی بالاتر را برای مصرف‌کنندگان فراهم می‌کند. برای اجرای یک سیستم مدیریت انرژی تجدیدپذیر خانگی هوشمند هیبریدی ایمن‌تر، مؤثرتر و کاربرپسندتر، شبکه هوشمند شبکه آینده را می‌توان گسترش داد.

## ۹- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر توجه به شبکه‌های هوشمند افزایش یافته است. تمام سناریوهای فرضی مربوط به شبکه‌های هوشمند نیازمند فرآیندهای تکامل و توسعه شامل جنبه‌های بسیاری هستند که امروزه زمینه‌های بسیار جالبی برای مطالعه و تحقیق هستند. در این مقاله یک سیستم مدیریت انرژی تجدیدپذیر خانگی (HEMS) را ارائه می‌کند. مکانیسم پیشنهادی برای به حداقل رساندن هزینه برق خانه‌های هوشمند با به حداکثر رساندن استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در طول یک روز در نظر گرفته شده است. بیشترین مصرف انرژی لوازم خانگی تحت بار نیازی نیست که حتماً در زمان‌های بخصوصی انجام شود بلکه در مدت‌زمان موردنظر انجام می‌شود. اگر این نوع وظایف بتواند در میان خانه‌های متعدد هماهنگی ایجاد کند به طوری که همه آن‌ها در همان زمان رخ ندهد درعین حال راضی نمودن مدت‌زمان تقاضای مشتریان خاموش، هزینه انرژی و حداکثر دیمانند قدرت می‌تواند کاهش یابد. در این مقاله، برنامه‌ریزی بهینه مصرف انرژی خانه هوشمند با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی مطالعه شده است. در اینجا فرض شده است که انرژی‌های نو برای تأمین انرژی به صورت محلی بکار برده می‌شوند، که شامل برخی از ژنراتورها، دیگ بخار، ژنراتور بادی، ذخیره‌سازی حرارتی و ذخیره‌سازی الکتریکی هست. همچنین دارای یک اتصال شبکه است که برای به دست آوردن برق در طول ساعات اوج تقاضای توان و یا فروش برق به شبکه زمانی که تولید برق مازاد وجود دارد. هر خانه دارای تعدادی از لوازم خانگی، مانند ماشین ظرفشویی، ماشین لباسشویی و یخچال و... دارد. ساختمان به یک سیستم مدیریت انرژی فرض شده است، و سیستم‌های ارتباطی برای توزیع طرح مصرف انرژی است. برای تحقق خانه‌های هوشمند روشی برای بهره‌برداری بهینه از واحدهای انرژی تجدیدپذیر (مانند باد و خورشید)، حرارتی، باتری و بارهای کنترل شده در این مقاله پیشنهاد می‌شود. مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی می‌تواند از توان تولیدشده توسط ژنراتورهای بادی استفاده کند به شرط آن که این ژنراتورها در دسترس باشند. اما تحت سناریو زمان بندی بهینه‌سازی شده، ژنراتورهای CHP بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و به‌طور پیوسته تحت اولین زمان شروع سناریو گرمای بیشتری را فراهم می‌کنند. در این تحقیق سیستم یک ساختمان هوشمند با ۳۰ خانه در نظر گرفته شده با زیر توزیع منابع انرژی، و ظرفیت‌هایشان مطابق با کل تقاضای انرژی به دست آمده است. توجه به مجموع تقاضای انرژی درحالی که پارامترهای فنی و هزینه‌های به دست آمده‌اند. با افزایش نرخ شارژ/دشارژ ESS، هزینه انرژی را می‌توان ۴/۳ درصد برای ۰/۶ کیلووات و ۸/۵ درصد برای ۰/۹ کیلووات کاهش داد. علاوه بر این، با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه، سیستم ما می‌تواند به PAR بهتر با هزینه انرژی قابل قبول دست یابد. همان طوری که در ابتدای این مقاله عنوان شد سیستم مدیریت انرژی خانه با پشتیبانی سیستم‌های ذخیره انرژی و منابع انرژی تجدیدپذیر قادر است از برق شبکه اصلی باقیمت پایین برای تأمین لوازم خانگی باقیمت بالا استفاده کند. علاوه بر این، سیستم مدیریت انرژی خانه از فروش برق به خارج پشتیبانی می‌کند. برای دستیابی به هدف خود، فرمول‌های ریاضی عمومی را برای هزینه انرژی و نسبت پیک به میانگین ساختیم و HEMS پیشنهادی را با انجام شبیه‌سازی‌های ارزیابی کردیم. با توابع جدید، هزینه انرژی HEMS ما در مقایسه با نتایج قبلی در مراجع (علایی<sup>۹۳</sup> و دیگران، ۲۰۲۱) و (اچ تی دین<sup>۹۴</sup> و دیگران، ۲۰۲۱). به‌طور قابل توجهی به ۲۱٪ کاهش یافت. با این حال، زمانی که سیستم ما فقط بر به حداقل رساندن هزینه انرژی تمرکز می‌کند، نسبت پیک به میانگین سیستم ما بسیار بالا باقی می‌ماند. به‌منظور کاهش PAR، از روش وزنی برای به حداقل رساندن هزینه انرژی و PAR استفاده می‌شود. در روش‌ها و شبکه‌های سنتی خدمات به مشتریان تنها قیمت‌گذاری مشترک برق هست درحالی که شبکه هوشمند می‌تواند قیمت‌گذاری برق در زمان واقعی را فراهم کند. مشکل این مدل مطرح شده از نقطه نظر

<sup>۹۳</sup>. Alayi

<sup>۹۴</sup>. H. T. Dinh

مشتریان، با مشخصات زمان واقعی قیمت برق داده شده در طول زمان هست. در آینده، ممکن است امکان داشته باشد این مدل به عنوان بخشی از یک مدل شبکه هوشمند کامل که در آن قیمت برق همراه با برنامه ریزی از کارهای بهینه شده باشد بکار برده شود. در واقع با توسعه HEMS ها، معماری مدیریت انرژی حالت کاربر در مقیاس جهانی برای شبکه هوشمند پیشنهاد شده است. که مسئولیت اصلی آن حفظ بهره‌وری انرژی و قابلیت اطمینان انرژی در تولید برق نامشخص و تقاضای مصرف کنندگان است. در تحقیقات آینده، HEMS باید با این سیستم برای بهبود عملیات شبکه هوشمند همکاری کند. در سیستم آینده، علاوه بر هزینه برق و PAR، راحتی کاربر، مانند راحتی حرارتی و کارهای متوالی نیز در نظر گرفته خواهد شد. بهینه سازی زمان واقعی راه دیگری برای بهبود سیستم است. با استفاده از این فناوری، سیستم را می توان با داده های استفاده بلادرنگ بهینه کرد.

## منابع

- نجف پور، وحید. (۱۳۹۹). مدیریت هوشمند انرژی در ساختمان های اداری با استفاده از سیستم کنترل تردد. سال بیست و سوم. شماره یکم. نشریه انرژی ایران.
- سماواتی، الهام. (۱۳۹۵). مدیریت انرژی ساختمان هوشمند با تغذیه منابع تجدید پذیر. دوره سوم. شماره اول. مجله انرژی های تجدید پذیر و نو.
- نوجوان، صیاد. (۱۳۹۸). مدیریت مصرف انرژی الکتریکی و حرارتی در مجتمع های مسکونی. جلد هشتم. شماره سوم. زمستان ۹۸. کیفیت و بهره‌وری در صنعت برق ایران.
- فاضلی، عبدالرضا. (۱۳۹۲). بهینه سازی مصرف انرژی در مناطق مسکونی شهر تهران با استفاده از رویکرد برنامه ریزی انرژی روتردام (REAP). سال اول. شماره ۳، پژوهش های برنامه ریزی و سیاست گذاری انرژی.
- تقی خانی، محمدعلی. (۱۳۹۸). تأثیر خانه های هوشمند در مدیریت و کاهش مصرف انرژی الکتریکی. سال نهم. شماره دوم، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی.
- فصیحی هرندی، فریبا. (۱۳۸۳). بررسی عملکرد ابزارهای مدیریت مصرف انرژی الکتریکی در ایران. دوره هشتم. شماره نوزدهم. نشریه انرژی ایران.

**R. Alayi, F. Zishan, M. Mohkam, S. Hoseinzadeh, (۲۰۲۱).** "A sustainable energy distribution configuration for microgrids integrated to the national grid using back-to-back converters in a renewable power system," *Electronics*, vol. ۱۰, no. ۱۵, p. ۱۸۲۶, ۲۰۲۱.

**N. Ganjei, F. Zishan, R. Alayi, H. Samadi, M. Jahangiri, (۲۰۲۲).** "Designing and Sensitivity Analysis of an Off-Grid Hybrid Wind-Solar Power Plant with Diesel Generator and Battery Backup for the Rural Area in Iran", *Hindawi, Journal of Engineering*, Volume ۲۰۲۲.

**Mostafa, Noha, Haitham Saad Mohamed Ramadan, (۲۰۲۲).** "Renewable energy management in smart grids by using big data analytics and machine learning" *Machine Learning with Applications* (۲۰۲۲): ۱۰۰۳۶۳.

**Amani, N. and Reza Soroush, A.A, (۲۰۲۱).** "Energy consumption management of commercial buildings by optimizing the angle of solar panels", *Journal of Renewable Energy and Environment (JREE)*, Vol. ۸, No. ۲, (۲۰۲۱), ۱-۷.

**Hakimi, Seyed Mehdi, and Arezoo Hasankhani, (۲۰۲۰).** "Intelligent energy management in off-grid smart buildings with energy interaction" *Journal of Cleaner Production* ۲۴۴ (۲۰۲۰): ۱۱۸۹۰۶.

**Gyamfi S, Krumdieck S, Urme T, (۲۰۱۳).** Residential peak electricity demand response highlights of some behavioural issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ۲۰۱۳;۲۵:۷۱-۷.

**Soares A, Gomes A, (۲۰۱۴).** Antunes CH. Categorization of residential electricity consumption as a basis for the assessment of the impacts of demand response actions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ۲۰۱۴;۳۰:۴۹۰-۵۰۳.

**Li X, Wen J, (۲۰۱۴).** Review of building energy modeling for control and operation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ۲۰۱۴;۳۷:۵۱۷-۳۷.

**Haider HT, See OH, Elmenreich W, (۲۰۱۶).** A review of residential demand response of smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ۲۰۱۶;۵۹:۱۶۶-۷۸.

**Al-Ali, A.; Zualkernan, I.A.; Rashid, M, (۲۰۱۷).** A smart home energy management system using IoT and big data analytics approach. *IEEE Trans. Consum. Electron.* ۲۰۱۷, ۶۳, ۴۲۶-۴۳۴.

- Li, W.; Logenthiran, T.; Woo, W.L.**, (۲۰۱۵). Intelligent multi-agent system for smart home energy management. In Proceedings of the ۲۰۱۵ IEEE Innovative Smart Grid Technologies—Asia (ISGT ASIA), Bangkok, Thailand, ۳-۶ November ۲۰۱۵; pp. ۱-۶.
- Chen, S.; Ji, J.; Xu, Z.; Wu, H.; Liu, T.**, (۲۰۱۷). A Human-Centric Smart Home Energy Management System. IEEE Commun. Mag. ۲۰۱۷, ۵۵, ۲۷-۳۳.
- Mohammed, Nooriya A., and Ammar Al-Bazi.** (۲۰۲۱). " Management of renewable energy production and distribution planning using agent-based modelling." Renewable Energy ۱۶۴ (۲۰۲۱): ۵۰۹-۵۲۰.
- S. Solaymani, S.**, (۲۰۲۱). "A Review on Energy and Renewable Energy Policies in Iran" Sustainability. ۲۰۲۱, ۱۳, ۷۳۲۸
- Yonghong. M and Baixuan Li.** (۲۰۲۰). "Hybridized Intelligent Home Renewable Energy Management System for Smart Grids", sustainability, Issue ۱۰, ۱۲, ۲۱۱۷; doi:۱۰.۳۳۹۰/su۱۲۰۵۲۱۱۷,۲۰۲۰.
- Huy Truong, Jaeseok Yun, Dong Min Kim.** (۲۰۱۶). "A Home Energy Management System with Renewable Energy and Energy Storage Utilizing Main Grid and Electricity Selling", IEEE Access, Issue ۱۶, ۱۰, ۱۱۰۹/ACCESS.۲۰۲۰,۲۹۷۹۱۸۹, ۲۰۱۶.
- Di Zhang, Nilay Shah, Lazaros G. Papageorgiou.** (۲۰۱۳). " Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid", Energy Conversion and Management ۷۴ .p.p.۲۰۹-۲۲۲,۲۰۱۳.
- H.A. Shayanfar, G. Derakhshan, A. Ameli.** (۲۰۱۲). "Optimal Operation of Microgrids Using Renewable Energy Resources", International Journal of Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE), Issue ۱۰, Vol. ۴, No. ۱, pp. ۹۷-۱۰۲, March ۲۰۱۲.
- S.Conti, R. Nicolosi, S. A.Rizoo.** (۲۰۱۲). "Generalized Systematic Approach to Assess Distribution System Reliability With Renewable Distributed Generators and Microgrids" IEEE Trans. on Power Delivery., Vol. ۲۷, No. ۱, pp. ۲۶۱-۲۷۰, Jan ۲۰۱۲.
- T. Zhou, B. Francois.** (۲۰۱۱). "Energy Management and Power Control of a Hybrid Active Wind Generator for Distributed Power Generation and Grid Integration, " IEEE Trans. on Industrial Electronics., Vol. ۵۸, No. ۱, pp. ۹۵-۱۰۴, Jan ۲۰۱۱.
- X. Liu, W. Xu.** (۲۰۱۰). "Minimum Emission Dispatch Constrained by Stochastic Wind Power Availability and Cost," IEEE Trans. On Power System., Vol, ۲۵. No. ۳, pp. ۱۷۰۵-۱۷۱۳, Aug ۲۰۱۰.
- L. Costa, F. Bourry, J. Juban, G. Kariniotakis.** (۲۰۰۸). "Management of Energy Storage Coordinated with Wind Power under Electricity Market Conditions," ۱۰th International Conference on Probability Methods Applied Power System (PMAPS), pp. ۱-۸, ۲۰۰۸.
- G. Dileep.** (۲۰۲۰). "A survey on smart grid technologies and applications," Renew. Energy, vol. ۲۰۲۰, no. ۱۴۶, pp. ۲۵۸۹-۲۶۲۵, ۲۰۲۰.
- A. Ahmad, A. Khan, N. Javaid.** (۲۰۱۷). "An optimized home energy management system with integrated renewable energy and storage resources," Energies, vol. ۱۰, no. ۴, p. ۵۴۹, ۲۰۱۷.
- F. Y. Melhem, O. Grunder, Z. Hammoudan.** (۲۰۱۷). "Optimization and energy management in smart home considering photovoltaic, wind, and battery storage system with integration of electric vehicles," Can J Elect Comput E, vol. ۴۰, no. ۲, pp. ۱۲۸-۱۳۸, ۲۰۱۷.
- H. Hussain, N. Javaid, S. Iqbal.** (۲۰۱۸). "An efficient demand side management system with a new optimized home energy management controller in smart grid," Energies, vol. ۱۱, no. ۱, p. ۱۹۰, ۲۰۱۸.
- M. Awais, N. Javaid, K. Aurangzeb.** (۲۰۱۸). "Towards effective and efficient energy management of single home and a smart community exploiting heuristic optimization algorithms with critical peak and real-time pricing tariffs in smart grids," Energies, vol. ۱۱, no. ۱۱, p. ۳۱۲۵, ۲۰۱۸.
- Berk Celik, Robin Roche.** (۲۰۱۷). Electric energy management in residential areas through coordination of multiple smart homes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, ۲۰۱۷, ۸۰, pp.۲۶۰ - ۲۷۵. hal-۰۲۱۳۱۰۲۲.
- H. T. Dinh, J. Yun, D. M. Kim.** (۲۰۲۰). "A Home Energy Management System With Renewable Energy and Energy Storage Utilizing Main Grid and Electricity Selling," in IEEE Access, vol. ۸, pp. ۴۹۴۳۶-۴۹۴۵۰, ۲۰۲۰, doi: ۱۰.۱۱۰۹/ACCESS.۲۰۲۰,۲۹۷۹۱۸۹.
- Miceli, Rosario.** (۲۰۱۳). " Energy management and smart grids." Energies ۶, ۴ (۲۰۱۳): ۲۲۶۲-۲۲۹۰.

## ضمیمه

پارامتر و متغیرهای مدل سازی

Modeling parameters and variables

پارامتر	نماد	پارامتر	نماد
---------	------	---------	------

تکرار	$f_t$	میزان دشارژ ذخیره‌سازی گرمایی در زمان $t$ ( $KW_{th}$ )
$j$	خانه‌ای در ساختمان هوشمند	میزان شارژ ذخیره‌سازی گرمایی در زمان $t$ ( $KW_{th}$ )
$t$	فاصله زمانی	حالت اولیه ذخیره‌سازی الکتریکی ( $KW h_e$ )
$\theta$	دوره عملیات کار	حالت اولیه ذخیره‌سازی حرارتی ( $KW h_{th}$ )
$A$	سطح پره‌های ژنراتور بادی برحسب مترمربع	ذخیره‌سازی گرمایی در زمان $t$ ( $KW h_{th}$ )
$b_r$	قیمت خرید برق از شبکه در زمان $t$ ( $\text{€}/KW h_e$ )	خروجی برق از ژنراتور CHP در زمان $t$ ( $kw_e$ )
$C_i$	ثابت ظرفیت مصرف برق، در تکرار $i$ ( $kw_e$ )	خروجی گرمایی از بویلر در زمان $t$ ( $KW_{th}$ )
$C_{i\theta}$	ظرفیت مصرف برق از تکرار $i$ در دوره عملیات $\theta$	سرعت باد cut-in ( $m/s$ )
$C^{CHP}$	ظرفیت ژنراتور CHP ( $kw_e$ )	میزان شارژ ذخیره‌سازی برق در زمان $t$ ( $kw_e$ )
$C^W$	ظرفیت ژنراتور بادی ( $kw_e$ )	کل هزینه روزانه ساختمان‌های هوشمند ( $\text{€}$ )
$C^B$	ظرفیت بویلر ( $KW_{th}$ )	میزان دشارژ ذخیره‌سازی برق در زمان $t$ ( $kw_e$ )
$C^T$	ظرفیت ذخیره‌سازی گرمایی ( $KW_{th}$ )	موافقت حداکثر تقاضای آستانه برق از شبکه ( $kw_e$ )
$D^E$	محدودیت دشارژ ذخیره‌سازی برق ( $kw_e$ )	بازده قدرت ژنراتور بادی
$G^T$	محدودیت ذخیره‌سازی شارژ گرمایی ( $KW_{th}$ )	آستانه توافقی بار اضافی برق از سرتاسر شبکه در زمان $t$ ( $kw_e$ )
$H_r$	تقاضای حرارت در زمان $t$ ( $KW_{th}$ )	خارج کردن برق از شبکه در زمان $t$ ( $KW_{th}$ )
$m^E$	هزینه هر واحد ورودی (تعمیر و نگهداری) برای واحد ذخیره‌سازی برق ( $\text{€}/KW h_e$ )	واردکردن برق از شبکه در زمان $t$ ( $KW_{th}$ )
$m^T$	هزینه هر واحد ورودی (تعمیر و نگهداری) برای واحد ذخیره‌سازی گرمایی ( $\text{€}/KW h_{th}$ )	بازده شارژ/ دشارژ ذخیره‌سازی گرمایی
$m^W$	هزینه تعمیر و نگهداری ژنراتور بادی ( $\text{€}/KW h_e$ )	بازده شارژ/ دشارژ ذخیره‌سازی الکتریکی
$n$	هزینه گاز طبیعی ( $\text{€}/KW h$ )	راندمان الکتریکی ژنراتور CHP
$P$	تفاوت بین حداکثر و هزینه تقاضای برق پایه از شبکه ( $\text{€}/KW h_e$ )	بازده بویلر
$P_{ji}$	زمان پردازش تکرار $i$ از خانه $j$	چگالی هوا ( $Kg/m^3$ )
$q$	هزینه فروش برق به شبکه ( $\text{€}/KW h_e$ )	مدت زمان فاصله ( $h$ )
$T_{ji}^F$	اولین زمان شروع تکرار $i$ از خانه $j$	نسبت گرمای CHP به قدرت
$\mathcal{V}_t(m/s)$	سرعت باد در زمان $t$ ( $m/s$ )	خروجی برای ژنراتور بادی در زمان $t$ ( $kw_e$ )
$v^{nom}$	سرعت باد اسمی ( $m/s$ )	سرعت باد cut-out ( $m/s$ )