مدیریت مصرف انرژی الکتریکی در یک مجتمع مسکونی بزرگ باوجود انرژی‌های تجدید پذیر

محمود زاده باقری
استادیار گروه مهندسی برق ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج (نویسنده مسئول)
Ma.zadehbagheri@iau.ac.ir

محمد جواد کیانی
استادیار گروه مهندسی برق ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج
kianiph@gmail.com

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۷/۱۱

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۹/۲۵

کلمات کلیدی:
مدیریت مصرف انرژی
خانه‌های هوشمند
انرژی‌های تجدید پذیر
دستگاه‌های توزیع انرژی
لوازم‌خانگی متصل

چکیده

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 باانرژی 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 درنتیجه کنترل هوشمند افزایش‌یافته 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, به‌طوری‌که 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 حاصل‌شده ، صورت می‌پذیرد. نتایج برنامه توزیع الکتریکی و توزیع گرمایشی نشان می‌دهد که با به‌کارگیری الگوریتم مدیریت انرژی در یک ساختمان با تغذیه منابع انرژی تجدید پذیر مقدار هزینه بهینه‌شده برابر۴۱۲/۶۳۴۸یورو بر ساعت هست, یعنی با سیستم HEMS پیشنهادی، حدود ۲۱ درصد در هزینه برق ساختمان صرف جویی می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر به‌منظور استفاده بهینه از شبکه توزیع , مدیریت سمت مصرف, قابلیت اطمینان شبکه, کنترل هوشمند افزایش‌یافته 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 تجدید پذیر خانگی منحصربه‌فرد خود که در ساختمان نصب‌شده است تغذیه کند. (نجف پور [۱] و دیگران،۱۳۹۹) یک ساختمان هوشمند ساختمانی است که دربردارنده محیطی پویا و مقرون‌به‌صرفه به‌وسیله یکپارچه کردن چهارعنصر 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 [۲] و دیگران،۱۳۹۵). درواقع 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 قابل‌اعتماد 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 موردبررسی قرار گرفتند. در (سوارس [۳] و دیگران،۲۰۱۴)، برنامه‌های HEMSوDR برای محیط تک خانوار بررسی‌شده است.در(نوریا [۴] و دیگران،۲۰۲۱)، رفتارهای روانی و اقتصادی مصرف‌کنندگان برای DR مسکونی تجزیه‌وتحلیل می‌شود. در (اچ تی دین [۵] و دیگران،۲۰۲۱)، تأثیر تحولات فنّاورانه در منطقه خانه هوشمند و بر رفتار مصرف‌کننده بررسی‌شده است.در(مصطفی نوحه [۶] و دیگران،۲۰۲۲)، لوازم‌خانگی برای بررسی تأثیر آن‌ها بر برنامه‌های DR طبقه‌بندی می‌شوند. در (دیلیپ [۷] و دیگران،۲۰۲۰) ، مدل‌سازی انرژی ساختمان با بررسی مدل‌های کنترل بهینه برای خانه‌های هوشمند تک و چندگانه بررسی‌شده است. در (حسین [۸] و دیگران،۲۰۱۸)، یک نظرسنجی جامع الگوریتم‌های DR را برای بخش‌های مسکونی، تجاری و صنعتی با توجه به روش‌های قیمت‌گذاری و بهینه‌سازی مورداستفاده، بررسی و طبقه‌بندی می‌کند. ساختار (رویکردهای متمرکز و توزیع‌شده) روش‌های پیشنهادی نیز در نظر گرفته‌شده است. بااین‌حال هماهنگی گروه‌های خانه‌ها موردبحث قرار نمی‌گیرد. در (حکیمی [۹] و دیگران،۲۰۲۰) ، الگوریتم‌های DR برای بخش مسکونی با مروری بر آخرین روش‌های زمان‌بندی و تکنیک‌های ارتباطی ارائه‌شده‌اند. درنهایت، در (سلیمانی [۱۰] و دیگران،۲۰۲۱)، چندین برنامه DR با تمرکز بر تعامل آن‌ها با RES بررسی‌شده است. بررسی ادبیات بالا نشان می‌دهد که اگرچه سیستم‌ها و تکنیک‌های

---

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

مدیریتی متعددی پیشنهاد و بررسی‌شده‌اند، ادبیات مربوط به مکانیسم‌های هماهنگی در سطح محله هوشمند هنوز با جزئیات موردمطالعه قرار نگرفته است.هدف این مقاله پر کردن این شکاف و بررسی و تحلیل مکانیسم‌های هماهنگی برای مدیریت انرژی چند خانوار است.به‌طوری‌که یک دید کلی از پیشرفته‌ترین مکانیسم‌های هماهنگی در اختیار خواننده قرار دهد. در شبکه‌های هوشمند هدف روش مدیریت توان یک راه‌حل کلی به فن اوره‌ای استانِ مختلف معرفی‌شده که در خانه‌های مختلف طبقه‌بندی‌شده است. بعلاوه ، اهداف متعددی در این روش ممکن است و هدف آن می‌تواند متفاوت باشد .درنتیجه روش بسیار جامع و انعطاف‌پذیر است. درحالی‌که هدف کلی و تجهیزات کنترل واقعی در خانه وجود دارد که برای هر دو حوزه کلی و کنترل‌کننده موردنیاز است. بعلاوه ، روش بهینه‌سازی باید قادر به‌اندازه گیری خانه‌های بسیار بزرگ باشد (نوجوان [۱۱] و دیگران،۱۳۹۸). کارهای چند سال اخیر در این موضوع می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: در مرجع (فاضلی [۱۲] 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 ۳۰خانه , ۹۰خانه) اعمال‌شده است. با استفاده از روش پیشنهادی بر روی سیستم‌های مورد آزمایش نتایج مطلوبی به‌دست‌آمده است. در مرجع (تقی‌خانی [۱۳] و دیگران،۱۳۹۸) ، یک‌خانه هوشمند به‌عنوان سرویس اولیه از اشیا خانه در نظر گرفته می‌شود .در این مقاله مفهوم به هوشمند سازی خانه هارا 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 (فصیحی هرندی [۱۴] و دیگران،۱۳۸۳) ، در این مقاله چگونگی استفاده از مصرف برق خانگی و تکنیک‌های سیستم انرژی خانه را موردبررسی و تجزیه‌وتحلیل قرار داده‌اند.با استفاده از برنامه‌نویسی از انرژی‌های هوشمند تمامی گزارش‌ها را پیشنهاد می‌کنند تا به‌صرفه جویی انرژی و به‌منظور دستیابی به‌صرفه جویی انرژی و بهینه‌سازی دست یابند.در مرجع (علایی[۱۵] و دیگران،۲۰۲۱) ، شبکه‌های هوشمند هدف روش مدیریت توان یک‌راه حل کلی به فن اوره‌ای استانه مختلف معرفی‌شده که در خانه‌های مختلف طبقه‌بندی‌شده است. مرجع (گنجی[۱۶] و دیگران،۲۰۲۲) ، خانه‌های هوشمند به‌عنوان شرکت‌کنندگان فعال در یک شبکه هوشمند به‌صورت 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، نحوه‌ی 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 خریدوفروش توان از بازار برق بر اساس مقدار پیش‌بینی بار و ذخیره‌سازی توان انجام‌شده است. هدف اصلی از ارائه‌ی این روش در خانه هوشمند، به حداقل رساندن قبوض مصرفی برق بر اساس مسطح کردن منحنی تقاضای کل است. در مرجع (مصطفی[۱۷] و دیگران،۲۰۲۲) ، از آخرین فن‌آوری ارتباطات، محاسبات و کنترل به‌منظور نوسازی زیرساخت‌های شبکه‌های قدیمی برق به شکل شبکه‌های هوشمند که کارآمدتر بوده و مصرف انرژی انعطاف‌پذیری دارند، استفاده‌شده 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[۱۸]) استفاده‌شده است. این روش به‌منظور دستیابی به دانش کلیدی در مباحث خانه‌های هوشمند، مانند شیفت بار و پاسخ قیمت زمان واقعی طراحی‌شده 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[۱۹] و دیگران،۲۰۲۱)، یک سیستم مدیریت انرژی خانگی (HEMS[۲۰]) برای صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی با توجه به نوسان قیمت برق در محیط خانه‌های هوشمند معرفی‌شده 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 کنتورهای هوشمند به اپراتور برق متصل است. اپراتور برق اطلاعات پیش‌بینی مفیدی را با استفاده از کنتورهای هوشمند مانند اطلاعات قیمت‌گذاری و تابش خورشیدی به HEMS ارسال می‌کند. HEMS پیشنهادی کمک‌های زیر را انجام می‌دهد. با ادغام RES وESS ، ما یک معماری جدید HEMS را برای کاهش هزینه انرژی

[۱۱] Nojavan
[۱۲] Fazeli
[۱۳] Taghikhani
[۱۴] Fasihiharandi
[۱۵] Alayi
[۱۶] Ganjei
[۱۷] Mostafa
[۱۸] Programming Base Learning
[۱۹] Amani
[۲۰] Home Energy Management System

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

و نسبت پیک به توان متوسط پیشنهاد می‌کنیم. ESSما می‌تواند برای ذخیره برق از شبکه اصلی باقیمت پایین و همچنین برق از منابع انرژی تجدید پذیر استفاده شود- تأمین منافع کافی برای مصرف‌کنندگان به‌طوری‌که 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 قابل‌استفاده - 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 قابل‌کنترل و غیرقابل‌کنترل ازجمله سیستم‌های گرمایش و سرمایش را در نظر بگیرد. بر اساس مطالعات قبلی، در نظر گرفتن بارهای صاعقه در پاسخ به تقاضا می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی مصرف انرژی را کاهش دهد، اما علاوه بر بارهای دیگر موردمطالعه 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 پیشنهادشده است. به‌طوری‌که از منابع انرژی‌های مختلف از قبیل سیستم‌های ذخیره انرژی و پیل سوختی برای تأمین انرژی خانه‌های هوشمند استفاده‌شده 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 انجام‌شده است. در این مقاله ، یک ساختمان هوشمند با تعدادی خانه در نظر گرفته‌شده 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 انجام‌شده 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[۲۱]) به‌عنوان جایگزینی برای شبکه برق موجود که نیازهای جدید مصرف‌کننده را پشتیبانی نمی‌کند، معرفی‌شده است. شبکه هوشمند از آخرین فن‌آوری‌های ارتباطی برای بهبود سیستم برق سنتی استفاده می‌کند. با ادغام RES و ESS، SG به کاهش انتشار ذرات کربن و گازهای گلخانه‌ای و همچنین کاهش تغییرات آب‌وهوا کمک می‌کند (گیامفی[۲۲] و دیگران،۲۰۱۳) . دو بخش جدایی‌ناپذیر SG که آن را بهتر از شبکه‌های سنتی می‌کند، زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته (AMI) و مدیریت سمت تقاضا (DSM[۲۳]) 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 تجزیه‌وتحلیل 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 درزمینهٔ های مختلف مانند کنترل بازار برق، مدیریت انرژی، ساخت زیرساخت‌ها و مدیریت منابع انرژی غیرمتمرکز فراهم می‌کند (سوارس[۲۴] و دیگران،۲۰۱۴) . مفهوم ریز شبکه به مجموعه‌ای از بارها، منابع تولید و ذخیره انرژی گفته می‌شود که به‌صورت یک‌بار قابل‌کنترل 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

[۲۱] Smart Grid
[۲۲] Gyamfi
[۲۳] Demand Side Management
[۲۴] Soares

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

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 به‌صورت مستقل و یا متصل به شبکه طبقه‌بندی گردد. به‌منظور بهره‌برداری مناسب از یک ریز شبکه، استفاده از سیستم مدیریت انرژی یک امر ضروری هست. هدف از مدیریت انرژی، تأمین توان با کمترین هزینه به‌منظور 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 به‌صورت 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 انجام‌شده است. اهداف مشترک این مطالعات به حداقل رساندن هزینه انرژی و نسبت پیک به میانگین(PAR[۲۵]) 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[۲۶] 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 به‌عنوان موتور اصلی بهینه‌سازی استفاده کردند. پاسخگویی بار (DR [۲۷]) 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 شبان هرروز با تعرفه کم باری محاسبه می‌شود (حیدر[۲۸] و دیگران،۲۰۱۶) . ماهیت این روش، کوتاه‌مدت است. در سال ۱۳۹۴ نیز روشی جهت تعیین مشوق دریافتی صنایع جهت اعلام آمادگی و کاهش بار طراحی‌شده است (زوالکرنان[۲۹] 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[۳۰] و دیگران،۲۰۱۵) . در سال‌های اخیر، اقداماتی درزمینهٔ 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[۳۱] 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 (نوریا[۳۲] و دیگران،۲۰۲۱) ، برنامه‌های HEMS و DR برای محیط خانه تک بررسی‌شده است. در (سلیمانی[۳۳] و دیگران،۲۰۲۱) ، رفتارهای روانی و اقتصادی مصرف‌کنندگان برای DR مسکونی

[۲۵] peak-to-average ratio
[۲۶] Li X
[۲۷] Demand Response
[۲۸] Haider
[۲۹] Zualkernan
[۳۰] Logenthiran
[۳۱] Chen
[۳۲] Nooriya
[۳۳] Solaymani

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

تجزیه‌وتحلیل می‌شود. در (یونقنگ[۳۴] و دیگران،۲۰۲۰) ، تأثیر تحولات تکنولوژیکی در منطقه خانه هوشمند و بر رفتار مصرف کننده بررسی شده است. در (هوی ترونگ[۳۵] و دیگران،۲۰۱۶) ، لوازم‌خانگی برای بررسی تأثیر آن‌ها بر برنامه‌های DR طبقه‌بندی می‌شوند. در (دی ژانگ[۳۶] و دیگران،۲۰۱۳) ، مدل‌سازی انرژی ساختمان با بررسی مدل‌های کنترل بهینه برای خانه‌های هوشمند تک و چندگانه بررسی‌شده است. در (شایانفر[۳۷] و دیگران،۲۰۱۲) ، یک نظرسنجی جامع الگوریتم‌های DR را برای بخش‌های مسکونی، تجاری و صنعتی با توجه به روش‌های قیمت‌گذاری و بهینه‌سازی مورداستفاده، بررسی و طبقه‌بندی می‌کند. ساختار (رویکردهای متمرکز و توزیع‌شده) روش‌های پیشنهادی نیز در نظر گرفته‌شده است. بااین‌حال هماهنگی گروه‌های خانه‌ها موردبحث قرار نمی‌گیرد. در (کنتی[۳۸] و دیگران،۲۰۱۲) ، الگوریتم‌های DR برای بخش مسکونی با مروری بر آخرین روش‌های زمان‌بندی و تکنیک‌های ارتباطی ارائه‌شده‌اند. در (ژو[۳۹] و دیگران،۲۰۱۱)، چندین برنامه DR با تمرکز بر تعامل آن‌ها با RES بررسی‌شده است. بررسی ادبیات بالا نشان می‌دهد که اگرچه سیستم‌ها و تکنیک‌های مدیریتی متعددی پیشنهاد و بررسی‌شده‌اند، ادبیات مربوط به مکانیسم‌های هماهنگی در سطح محله هوشمند هنوز با جزئیات موردمطالعه قرار نگرفته است. هدف این مقاله پر کردن این شکاف و بررسی و تحلیل مکانیسم‌های هماهنگی برای مدیریت انرژی چند خانوار است در (لیو[۴۰] و دیگران،۲۰۱۰) ، یک سیستم مدیریت انرژی خانگی بهینه‌شده [۴۱] (OHEMS) با منابع RES و ذخیره‌سازی یکپارچه برای بهینه‌سازی هزینه انرژی و PAR پیشنهاد شد. با تمرکز بر مقالات مجلات منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶. تفکیک سال‌های انتشار برای مقالات بررسی‌شده در شکل ۱ نشان داده‌شده است. شکل‌ها نشان می‌دهند که محبوبیت این موضوع از سال ۲۰۱۲ به‌طور قابل‌توجهی افزایش‌یافته است. اما باید توجه داشت که همه مقالات منتشرشده 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 مصرف‌کننده 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، درنتیجه کم شدن هزینه‌های بهره‌برداری سیستم را در بردارد. مطالعات انجام‌شده در این راستا بیانگر این است که سیستم مدیریت انرژی برای یک ریز شبکه در مد کاری جزیره‌ای در (کاستا[۴۲] و دیگران،۲۰۰۸) موردبررسی قرارگرفته است. در این مقاله از تکنیک مدل پیش‌بینی کنترل(MPC[۴۳]) برای مدیریت انرژی استفاده‌شده است. این تکنیک با کنترل فرکانس و ولتاژ مقدار توان اکتیو و راکتیو شبکه را پیش‌بینی می‌کند و بعدازآن به اجرای سیستم مدیریت می‌پردازد. در این مقاله سیستم مدیریت انرژی به دو مسئله‌ی درمدار قرار گرفتن واحدها و پخش بار بهینه تجزیه‌شده است. در (دیلیپ[۴۴] 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 [۴۵]) و با لحاظ کردن بارهای پاسخگو به همراه ذخیره‌سازها 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 تدوین‌شده است.

---

۳۴. Yonghong

۳۵. Huy Truong

۳۶. Di Zhang

۳۷. Shayanfar

۳۸. S.Conti

۳۹. Zhou

۴۰. Liu

۴۱ Optimized Home Energy Management System

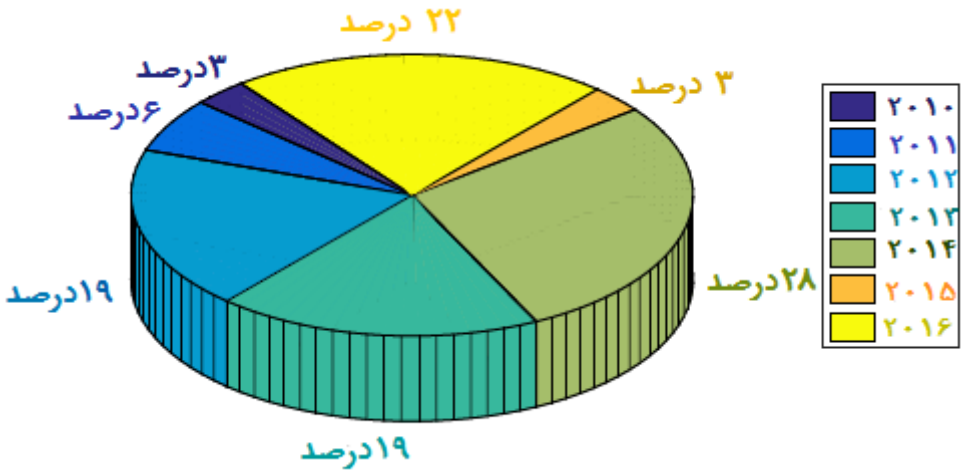
۴۲. Costa

۴۳Model Predictive Control

۴۴. Dileep

۴۵ Multi Agent System

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]



شکل ۱. تفکیک سال‌های انتشار مطالعات بررسی‌شده مربوط به مدیریت انرژی الکتریکی خانه‌های هوشمند چندگانه (احمد[۴۶] و دیگران،۲۰۱۷)

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

٤- مدیریت انرژی در ساختمان‌های مسکونی

٤-۱- خانه‌های هوشمند

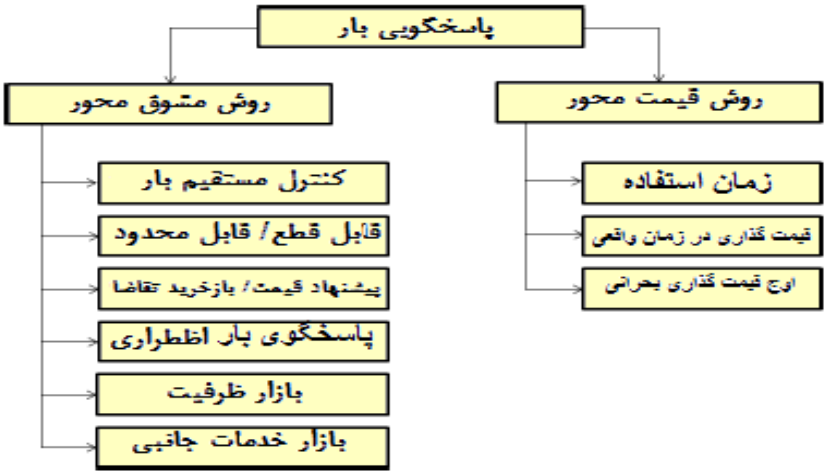
در چند سال گذشته، فن‌آوری‌های کلاسیک ساختمان‌های مسکونی تکامل‌یافته‌اند تا ویژگی‌های پیشرفته‌تری را در برگیرند تا امکان تبدیل خانه‌های سنتی به هوشمند را فراهم کنند. این خانه‌ها معمولاً شامل وسایل قابل‌برنامه‌ریزی، DG، ذخیره‌سازی انرژی، EV، یک کنترل‌کننده HEMS هستند که به اطلاعات تقریباً هم‌زمان در مورد مصرف برق، آب‌وهوا و نرخ‌های تغییر برق دسترسی دارند و فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا (IoT[۴۷]) 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[۴۸] و کنتورهای هوشمند حاصل می‌شود. AMI ارتباط دوطرفه رابین یک شبکه منطقه خانگی (HAN[۴۹]) در سطح پایین و شبکه منطقه همسایگی (NAN[۵۰]) در سطح بالا فراهم می‌کند (ملحم[۵۱] 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 جمع‌آوری‌شده معمولاً توسط HEMS ، از طریق ارتباط سیمی یا بی‌سیم، همراه با سیگنال قیمت به‌دست‌آمده از سیستم متمرکز می‌شود .یک رابط کاربری گرافیکی(GUI[۵۲]) ، 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 (به‌عنوان‌مثال، 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[۵۳] و دیگران،۲۰۱۸).

۴۶. Ahmad
۴۷ Internet-of-things
۴۸ Advanced Metering Iinfrastructure
۴۹ Home Area Network
۵۰ Neighborhood Network
۵۱. Melhem
۵۲ Graphical User Interface
۵۳. H. Hussain

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

٤-۲- 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 سرعت‌بالا 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 موردتوجه بوده‌اند ، که اخیراً شتاب قابل‌توجهی یافته است، با ظهور چیزی که امروزه به‌عنوان شبکه هوشمند شناخته می‌شود. این امر منجر به انتشاراتی در ادبیات علمی (اوایس[۵۴] و دیگران،۲۰۱۸) و عمومی (برک چلیک[۵۵] 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 ۱تا ۴ ساعت، در پاسخ به یک سیگنال خارجی (به‌عنوان‌مثال، قیمت، انگیزه و غیره است). دریافت شده از ارائه‌دهنده خدمات یا سیستم. از سوی دیگر، DSM بر بهبود کارایی مصرف برق به‌طورکلی در حوزه مشتری تمرکز دارد (اچ تی دین[۵۶] و دیگران،۲۰۲۱).



شکل ۲. برنامه‌های پاسخگویی بار(روزاریو[۵۷] و دیگران،۲۰۱۳).

Figure ۲.Programs of load response

۵۴. M. Awais

۵۵. Berk Celik

۵۶. H. T. Dinh

۵۷. Rosario

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

شش نوع تکنیک DSM معمولاً در نظر گرفته می‌شوند (روزاریو[۵۸] 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 طراحی‌شده‌اند. در این رابطه، دو نوع اصلی مکانیسم DR به‌طور گسترده مطالعه شده است: برنامه‌های مبتنی بر انگیزه (IBP[۵۹]) و برنامه‌های مبتنی بر قیمت(PBP[۶۰]) (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[۶۱]) ، قابل قطع/ قابل محدود شدن(I/C) ، پیشنهاد دیماند/ بازخرید[۶۲](DB) ، پاسخگوی بار اضطراری(EDR) ، بازار ظرفیت (CM) و بازار خدمات جانبی (AS) . (حکیمی[۶۳] و دیگران،۲۰۲۰).

٤-۳- ساختار HEMS

شکل ۳ عناصر اصلی HEMS را نشان می‌دهد. ما فرض می‌کنیم که هر مصرف‌کننده به[۶۴] AMI، یک کنترل‌کننده اصلی(MC) ، ESS و یک سیستم PV به‌عنوان منابع انرژی تجدید پذیر(RES[۶۵]) مجهز است. به‌طورکلی، AMI به مجموعه‌ای از سیستم‌ها اطلاق می‌شود که شامل کنتورهای هوشمند (SM[۶۶])، ارتباطات پیشرفته و سیستم‌های مدیریت داده هست (علایی[۶۷] 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، AMIنیز برای انتقال اطلاعات مفید شبکه از ارائه‌دهندگان برق به مصرف‌کنندگان مورداستفاده 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 ازجمله سیستم PV و ESS را کنترل کنید. وظیفه اصلی MC کنترل تمام لوازم‌خانگی ازجمله سیستم PV و ESS است. MC قادر است هر دستگاه را در سیستم ما بر اساس برنامه زمانی محاسبه‌شده از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی ما روشن یا خاموش کند. یک زمان‌بندی هوشمند (SS) که الگوریتم‌های بهینه‌سازی را انجام می‌دهد داخل MC نصب‌شده است. در ابتدای روز، اطلاعات مفید از ارائه‌دهنده برق از طریق AMI دریافت می‌شود. سپس SS[۶۸] 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[۶۹] 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[۷۰] و دیگران،۲۰۲۲).

---

۵۸. Rosario

۵۹ Incentive-based programs
۶۰ Price-based programs
۶۱ Direct Load Control
۶۲Demand Bidding / Buyback Programs
۶۳. Hakimi

۶۴ Advanced Metering Iinfrastructure
۶۵ Renewable Energy Resources
۶۶ Smart Meter
۶۷. Alayi

۶۸ Smart Scheduler
۶۹ Peak-to-Average Ratio
۷۰. Ganjei

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

شکل۳. ساختار HEMS(گنجی[۷۱] و دیگران،۲۰۲۲).
Figure ۳.Structure of HEMS

۵- شبکه‌های هوشمند و مفاهیم مربوط به آن

۵-۱- شبکه هوشمند

بر این اساس شبکه‌های هوشمند به‌عنوان مفهوم مدرنیزه کردن شبکه الکتریکی تعریف می‌شود(گیامفی[۷۲] و دیگران،۲۰۱۳). شبکه هوشمند یکی نمودن تکنولوژی‌های اطلاعات و الکتریکی فی‌مابین هر نقطه تولید و هر نقطه مصرف هست. برای بخش مصرف‌کننده ، شبکه‌های هوشمند بدین معنی است که آن‌ها می‌توانند بر روی مصرف خود مدیریت هوشمندانه انجام دهند تا در ساعات پیک که قیمت انرژی گران هست ، هزینه کمتری بپردازند و برای کارشناسان محیطزیست ، این شبکه‌ها به معنی استفاده از تکنولوژی به‌منظور کمک به حل تغییرات مضر آب و هوایی و اجتناب از تولید بیش‌ازاندازه گازهای گلخانه‌ای هست و برای سیستم صنعت برق ، پیک سایی و تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه در مواقع بحرانی و ارائه اطلاعات دقیق از وضعیت شبکه به‌منظور جلوگیری از خاموشی‌های ناخواسته است. باوجوداین بعضی از ویژگی‌های شبکه هوشمند همچون انعطاف‌پذیری و حالت ارتجاعی سیستم‌های توزیع ، زیرساخت خود درمان ، اتوماسیون مبتنی بر نفوذ بالای تکنولوژی اطلاعات و ارتباطات ، ادغام تولیدات پراکنده و ذخیره کننده انرژی ، کاربرد الکترونیک صنعتی ، زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته و دسترس‌پذیری سرویس‌های جدید مشتری به‌طورمعمول پذیرفته‌شده است(هوی ترونگ[۷۳] و دیگران،۲۰۱۶).

۵-۲- شبکه داخلی خانه‌های هوشمند

در شکل (۴) شبکه داخلی خانه هوشمند نشان داده‌شده است .در ساختمان‌های هوشمند با استفاده از سیستم خودکار کنترل روشنایی ساختمان، کنترل سیستم سرمایش و گرمایش، کنترل دوربین‌های مداربسته، کنترل درها، کنترل وضعیت‌های اضطراری همچون آتش‌سوزی، زلزله و بسیاری کنترل‌های هوشمند دیگر، مصرف انرژی به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد .ساختمان هوشمند، ساختمانی است که مجهز به یک زیر ساختار ارتباطاتی قوی بود که می‌تواند به‌صورت مستمر نسبت به وضعیت‌های متغیر محیط عکس‌العمل نشان داده و خود را با آن‌ها وفق

[۷۱] Ganjei

[۷۲] Gyamfi

[۷۳] Huy Truong

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

دهد و همچنین به ساکنین ساختمان این اجازه را می‌دهد که از منابع موجود به‌صورت مؤثرتری استفاده کرده و امنیت و آسایش آن‌ها را افزایش دهد(سوارس[۷۴] و دیگران،۲۰۱۴) .

شکل ۴. شبکه داخلی خانه‌های هوشمند(سوارس[۷۵] و دیگران،۲۰۱۴).

Figure ٤.Internal network of smart homes

٦- انرژی‌های به‌کارگیری در خانه‌های هوشمند

٦-١- انرژی‌های تجدید پذیر

٦-١-١- 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. ازجمله مهم‌ترین انرژی‌های تجدید پذیر می‌توان به سیستم‌های انرژی خورشیدی که پیشرفت‌های قابل‌توجهی 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 درنتیجه کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی باشد(نجف پور[۷۶] و دیگران،۱۳۹۹).

٦-١-٢- 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[۷۷] و دیگران،۲۰۲۱). گسترش تکنولوژی درزمینهٔ انرژی باد به‌عنوان یک چالش مهم در بحث انرژی‌های تجدید پذیر درآمده است. استفاده از انرژی باد برای تولید انرژی الکتریکی ، ازلحاظ کیفیت توان

۷۴. Soares

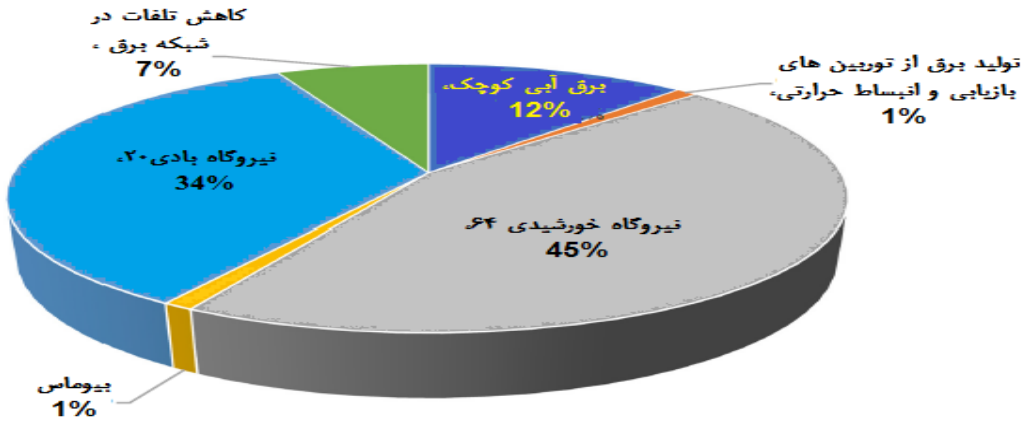
۷۵. Soares

۷۶. Najafpour

۷۷. Solaymani

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

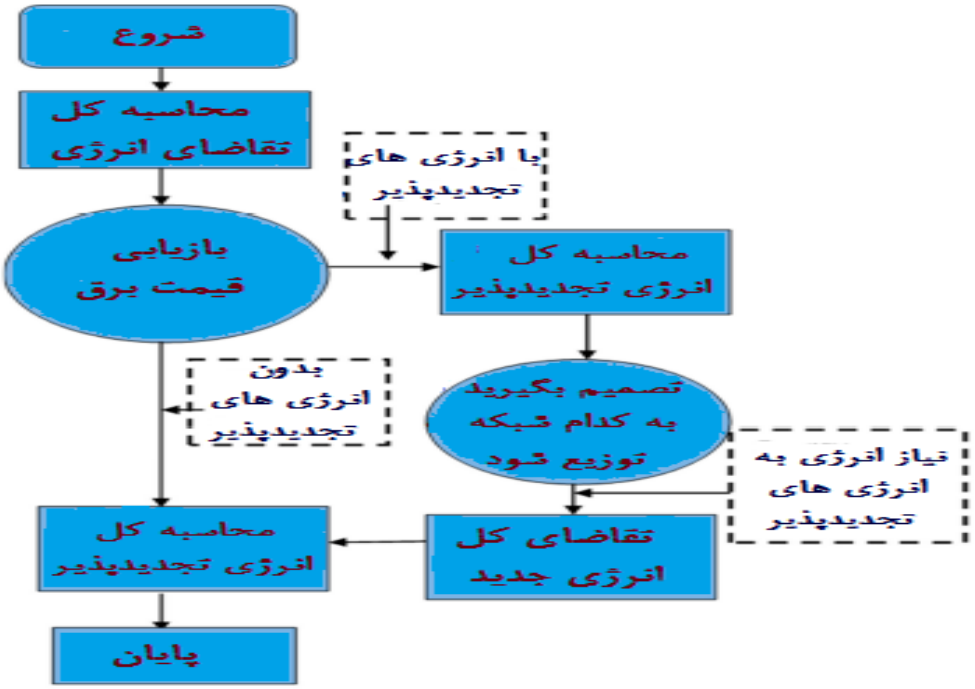
تولیدی ، در سطح پایینی قرار دارد. نوسانات سرعت باد سبب ایجاد نوسان در توان تحویلی مزرعه باد به شبکه الکتریکی می‌شود. شکل ۵ سهم ظرفیت انرژی‌های تجدید پذیر و بهره‌وری انرژی الکتریکی در ایران را تا ژوئیه ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. ساخت این نیروگاه‌ها نه‌تنها باعث ایجاد شغل و درآمدزایی برای مشاغل انرژی‌های تجدید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



شکل ۵. سهم ظرفیت انرژی‌های تجدید پذیر و بهره‌وری انرژی الکتریکی در ایران(سلیمانی[۷۹] 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 شکل۶ برای کاهش هزینه برق شبکه در تأسیسات انرژی تجدید پذیر پیشنهادشده است.این امر به تعیین میزان توان ذخیره‌شده در باتری بر اساس انرژی موجود، آب‌وهوای پیش‌بینی‌شده و مصرف برق مورد انتظار ۲۴ ساعت آینده کمک می‌کند.



۷۸. Solaymani

۷۹. Solaymani

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

شکل ۶ گردش کار الگوریتم پیشنهادی

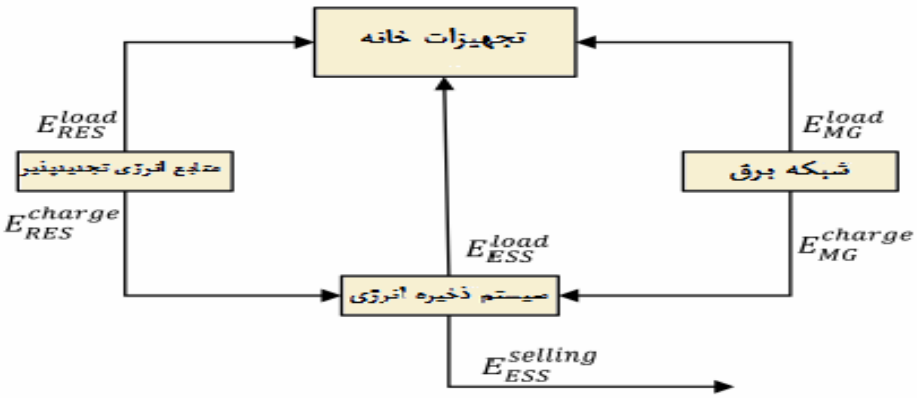
Figure ٦.Workflow of the proposed algorithm

همان‌طور 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 مدت‌زمان باکیفیت بالا، مقدار انرژی مورد انتظار باتری باقی بماند و انرژی خورشیدی پیش‌بینی‌شده باقی بماند، تا زمانی که ظرفیت شارژ و انرژی خورشیدی پیش‌بینی‌شده 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 ESSدر 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 موردنیاز 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 ٧.Electricity flow in HEMS

بررسی جامع از پژوهش بر روی فن‌آوری شبکه هوشمند، پژوهش حاضرو استانداردهای مربوطه در رفرنس(زوالکرنان[۸۰] و دیگران،۲۰۱۷) داده‌شده است، که در آن پروژه‌های آزمایشی و تحقیقات بیشتر موردبحث قرارگرفته است. انتخاب بهینه سرمایه‌گذاری و بهینه‌سازی زمان اجرا جدول زمانی بهره‌برداری برای شبکه هوشمند ساختمان‌های تجاری در رفرنس (مصطفی نوحه[۸۱] و دیگران،۲۰۲۲)، که در آن ذخیره‌سازی الکتریکی و ذخیره‌سازی حرارتی در توزیع منابع انرژی و مدل یکپارچه مشتری ارائه‌شده است.در (چن[۸۲] 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 گرفته‌شده است. تجزیه‌وتحلیل پایه برآورد منافع اقتصادی

۸۰. Zualkernan

۸۱. Mostafa, Noha

۸۲. Chen

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

ریز شبکه توسط کینگ و مورگان در رفرنس (نوریا[۸۳] و دیگران،۲۰۲۱)، و نتایج بررسی انجام‌شده نشان می‌دهد که کارایی سیستم روی‌هم‌رفته 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 خریداری‌شده از شبکه درآمد حاصل از برق جهت فروش به شبکه هست . ازآنجاکه ظرفیت تجهیزات ثابت هستند، هزینه‌های سرمایه‌شان مستقل از برنامه هستند و بنابراین در نظر گرفته نشده است.

هزینه بهره‌برداری CHP	$\emptyset = \sum_t \delta nu_t / \propto$
هزینه نگهداری توربین بادی	$+ \sum_t \delta m^w w_t$
هزینه بهره‌برداری بویلر	$+ \sum_t \delta nx_t / \eta_t$
هزینه نگهداری ذخیره‌سازی الکتریکی	$+ \sum_t \delta m^E y_t$
هزینه نگهداری ذخیره‌سازی گرمایی	$+ \sum_t \delta m^T f_t$
هزینه خرید برق از شبکه	$+ \sum_t \delta b_t I_t$
درآمد حاصل از فروش برق به شبکه	$- \sum_t \delta q R_t$

۷-۲- محدودیت ظرفیت

خروجی از هر یک از تجهیزات نباید از ظرفیت طراحی‌شده تخطی کند (سماواتی[۸۴] و دیگران،۱۳۹۵) :

(۱) ژنراتورCHP $u_t \leq C^{CHP} \quad \forall t$

(۲) بویلر: $x_t \leq C^B \quad \forall t$

(۳) ذخیره‌سازی برق: $S_t^E \leq C^E \quad \forall t$

(۴) ذخیره‌سازی حرارتی: $S_t^T \leq C^T \quad \forall t$

۷-۳- محدودیت ذخیره‌سازی برق

برق ذخیره‌شده در ذخیره‌سازی برق در زمان t برابر است با مقدار ذخیره‌شده در زمان t-۱ به‌اضافه برق شارژ شده ، منهای برق دشارژ شده است. برقی که در طول فرآیند شارژ و دشارژ ازدست‌رفته است .

۸۳. Nooriya

۸۴. Samavati

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

$$= S_t^T \quad S_{tt-1}^T + \quad \delta\eta^T g_t \quad - \quad \delta f^T/\eta^T \quad \forall t \tag{۵}$$

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 ۱روز 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 معین‌شده برای محافظت از تجهیزات برگردد(ملحم[۸۵] و دیگران،۲۰۱۷).

$$S_{\cdot}^E = \quad = S_t^E \quad S^{IE} \tag{۶}$$

میزان شارژ یا دشارژ برق نمی‌تواند از حد مشخص‌شده 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:

$$y_t \leq \quad D^E \qquad \forall t \tag{۷}$$

$$z_t \leq \quad C^E \qquad \forall t \tag{۸}$$

گرمای ذخیره‌شده در ذخیره‌سازی حرارتی در زمان t برابر است با مقدار ذخیره‌شده در t-۱ بعلاوه گرمای شارژ ، منهای گرمای دشارژ، گرمای ازدست‌رفته در طی فرایند ذخیره‌سازی گرمایی که نشان‌دهنده روش یکسان ، برای ذخیره‌سازی برق نشان داده‌شده هستند.

$$= S_t^T \quad S_{tt-1}^T + \quad \delta\eta^T g_t \quad - \quad \delta f^T/\eta^T \quad \forall t \tag{۹}$$

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

$$S_{\cdot}^T = S_T^T = S^{IT} \tag{۱۰}$$

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:

$$f_t \leq \ D^T \qquad \forall t \tag{۱۱}$$

$$g_t \leq \ G^T \qquad \forall t \tag{۱۲}$$

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 محاسبه‌شده است. خروجی توان در هر دو، سرعت قطع و قطع خروجی در این مدل محدودشده است. سرعت قطع در مینیمم سرعت باد که توربین بادی تولید خواهد کرد توان معین‌شده مجاز هست. درحالی‌که سرعت قطع خروجی سرعت باد در این ژنراتور بادی به دلایل امنیتی در امر حفاظت از آسیب توربین بادی خاموش خواهد بود(نوجوان[۸۶] و دیگران،۱۳۹۸).

$$w = \begin{cases} \cdot.\square\square\eta^W \ \min(\upsilon_t, V^{nom})^3 & \forall t: V^{cut-in} \leq \upsilon_t \leq V^{cut-out} \\ \cdot & \forall t: \upsilon_t \leq V^{cut-in} \text{and } \upsilon_t \geq V^{cut-out} \end{cases} \tag{۱۳}$$

۷-۵- تعادل انرژی

۸۵. Melhem

۸۶. Nojavan

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

در هر بازه زمانی، مصرف کل برق برابر با مجموع ظرفیت مصرف برق از همه کارها از همه خانه‌ها است. برق مصرف‌شده در طول هر دوره زمانی توسط ژنراتور بادی و ژنراتور CHP عرضه می‌شود، برق دریافت شده از ذخیره‌سازی برق و شبکه، منهای برق ارسال‌شده به ذخیره‌سازی برق و شبکه هست. اگر ظرفیت مصرف برق کار i ثابت باشد، بعدازآن تعادل برق می‌توان به‌عنوان در معادله ۱۴نشان 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 θ کارها مناسب‌تر است (حیدر[۸۷] و دیگران،۲۰۱۶).

$$\sum_{\mathrm{j}} \sum_{i} C_i \, E_{jit} = w_{\mathrm{t}} + \mathrm{u}_{\mathrm{t}} + y_{\mathrm{t}} + I_{\mathrm{t}} - \mathrm{z}_{\mathrm{t}} - R_{\mathrm{t}} \qquad \forall\, t \tag{۱۴}$$

$$\sum_{\mathrm{j}} \sum_{i} \sum_{\theta=.}^{P_{ji}-1} C_{i\theta} \, E_{jit-\theta} = w_{\mathrm{t}} + \mathrm{u}_{\mathrm{t}} + y_{\mathrm{t}} + I_{\mathrm{t}} - \mathrm{z}_{\mathrm{t}} - R_{\mathrm{t}} \qquad \forall\, t \tag{۱۵}$$

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

$$H_{\mathrm{t}} = \alpha \mathrm{u}_{\mathrm{t}} + x_{\mathrm{t}} + f_{\mathrm{t}} - g_t \qquad \forall t \tag{۱۶}$$

۷-۶- حداکثر تقاضای شارژ

میل به کاهش حداکثر تقاضای برق از شبکه برای جلوگیری از نیاز به ظرفیت بالا در اتصال به شبکه بزرگ وریزشبکه 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 بالاو درنتیجه انگیزه مصرف‌کنندگان برای توزیع مجدد و یا کاهش مصرف برق خود داشته باشند. به‌منظور انعکاس این، درروش مان، محدودیت اضافی در این مدل معرفی‌شده است. برای هر فاصله زمانی، هنگامی‌که بار الکتریسیته از شبکه که در زیر آستانه توافق j است، قیمت برق نرمال به‌کاربرده شده است(اچ تی دین[۸۸] و دیگران،۲۰۲۱).

$$\gamma_{\mathrm{t}} \geq \boldsymbol{I_t} - k \qquad \forall t \tag{۱۷}$$

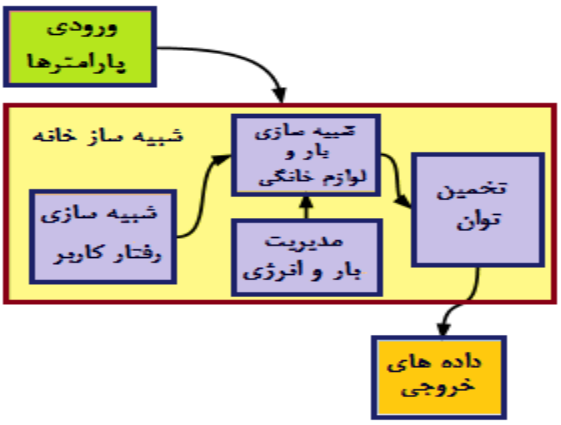
۸- سیستم موردمطالعه و نتایج شبیه‌سازی

ساختار شبیه‌سازی یک ساختمان هوشمند در شکل ۸ نشان داده‌شده است. و در حالت کلی از چهار واحد عملکردی مختلف تشکیل‌شده است:. شبیه‌سازی رفتار کاربر ، برای تولید تصادفی الگوهای مورداستفاده – 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 توزیع‌شده .

۸۷. Haider

۸۸. H. T. Dinh

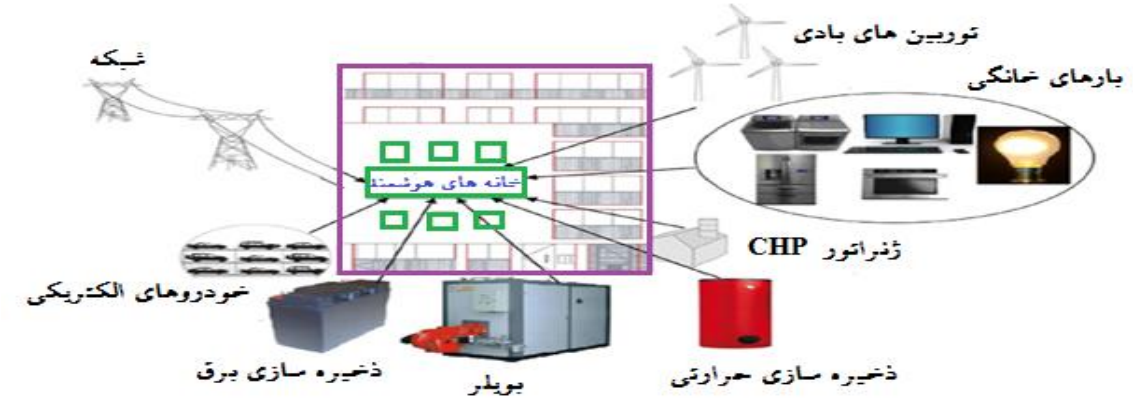
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]



شکل۸. ساختار شبیه‌سازی ساختمان هوشمند

Figure ۸.Smart building simulation structure

یک ساختمان هوشمند با تعدادی خانه‌های هوشمند در نظر گرفته‌شده است(اویس[۸۹] و دیگران،۲۰۱۸). نمونه‌ای از این ساختمان‌های هوشمند در شکل شماره (۹) نشان داده‌شده است.



شکل۹. سیستم موردمطالعه(اویس[۹۰] و دیگران،۲۰۱۸)

Figure ۹.The studied system

در این بخش مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی مصرف انرژی به دو مثال‌های عددی اعمال‌شده است: ساختمان هوشمند از ۳۰خانه.اطلاعات سیستم موردمطالعه در جدول (۱) نشان داده‌شده است.

جدول ۱. اطلاعات سیستم موردمطالعه(چن[۹۱] و دیگران،۲۰۱۷).

Table ۱.Information of the studied system

[۸۹] M. Awais

[۹۰] M. Awais

[۹۱] Chen

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

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 ($\mathrm{kw_e}$)۲۰ و راندمان الکتریکی ۳۵ درصد. حرارت نسبت به قدرت برابر۱/۳ فرض شده است ، و هزینه گاز طبیعی ۲/۷ p/kw h هست؛

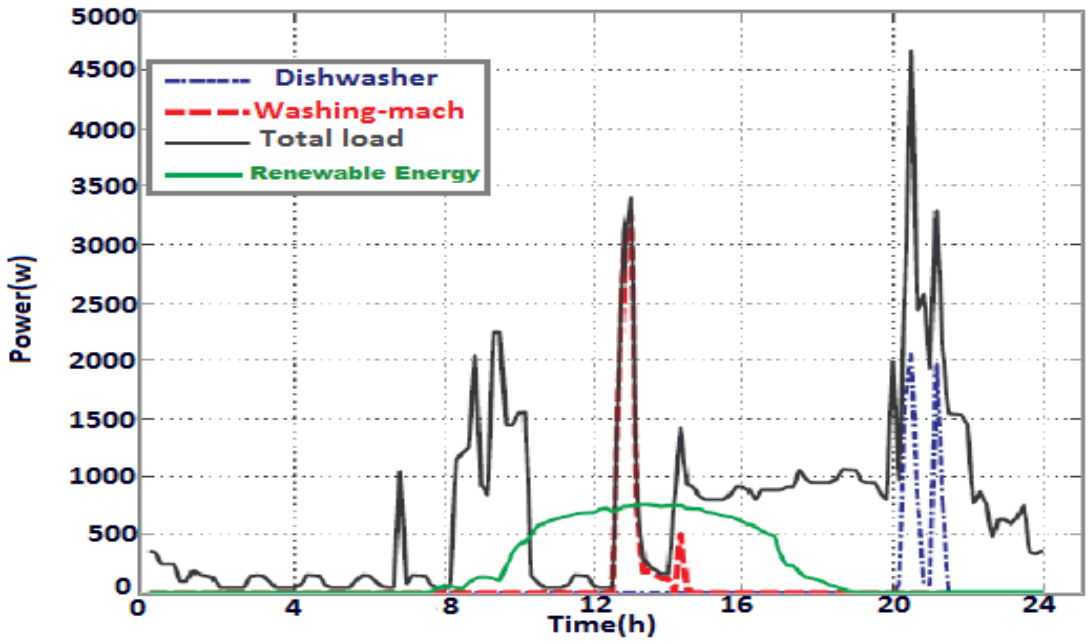
– یک مزرعه بادی با ظرفیت ($\mathrm{kw_e}$)۱۰ و هزینه تعمیر و نگهداری ۰/۵ $P/_{\mathrm{kw\ h_e}}$;

– یک بویلر با ظرفیت (KW_{th})۱۲۰ و هزینه گاز طبیعی ۲/۷ $P/_{\mathrm{kw\ h}}$;

– یک واحد ذخیره‌سازی الکتریکی با ظرفیت ($KW\ h_{\mathrm{e}}$)۱۰، شارژ / دشارژ ۹۵٪، حد شارژ و حد دشارژهر دو ($\mathrm{kw_e}$)۱۰ و هزینه تعمیر و نگهداری ۰/۵ $P/_{\mathrm{kw\ h_e}}$;

– یک واحد ذخیره‌سازی گرمایی با ظرفیت (KW_{th})۲۰، بازده شارژ / دشارژ ۹۸٪، حد شارژ وحد دشارژ هردو (KW_{th})۲۰ و هزینه تعمیر و نگهداری ۰/۱ $P/\mathrm{kw\ h_{th}}$; سیستم یک ساختمان هوشمند با ۳۰ خانه در نظر گرفته‌شده با زیر توزیع منابع انرژی، و ظرفیت‌هایشان مطابق با کل تقاضای انرژی به‌دست‌آمده است توجه به مجموع تقاضای انرژی درحالی‌که پارامترهای فنی و هزینه‌های به‌دست‌آمده‌اند .فرض می‌کنیم که توان و ظرفیت CHP برابر ۱۰کیلووات است و با تعریف بازه نیم‌ساعته برای مدیریت در طول شبانه‌روز مجتمع لازم است که میزان توان منابع بهینه برای ۴۸بازه تعیین گردد و نتایج برنامه توزیع الکتریکی در شکل(۱۱) و توزیع گرمایشی در شکل(۱۲) نشان داده‌شده است. مقدار هزینه بهینه‌شده برابر۴۱۲/۶۳۴۸یورو بر ساعت هست.

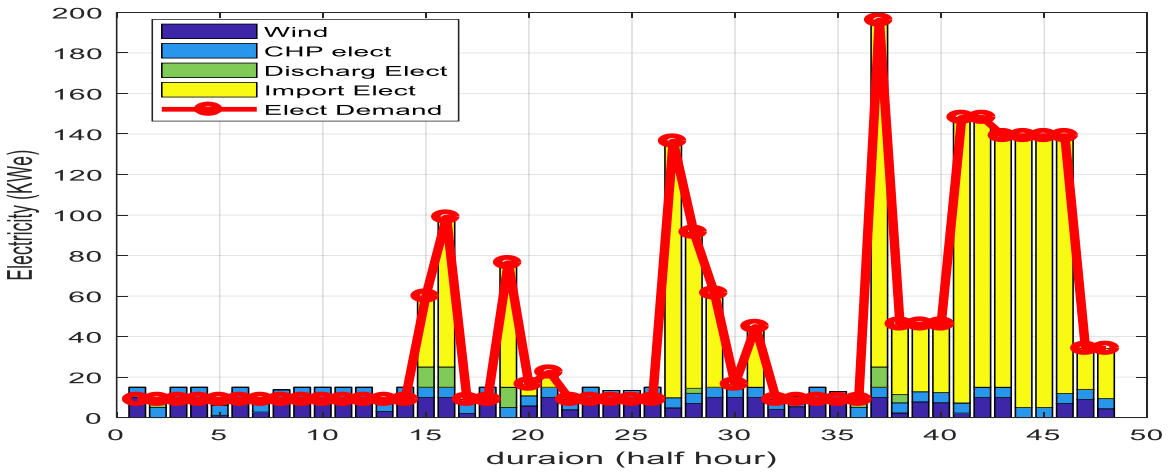
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]



شکل ۱۰. نتایج تست سیستم

Figure ۱۰.System test results

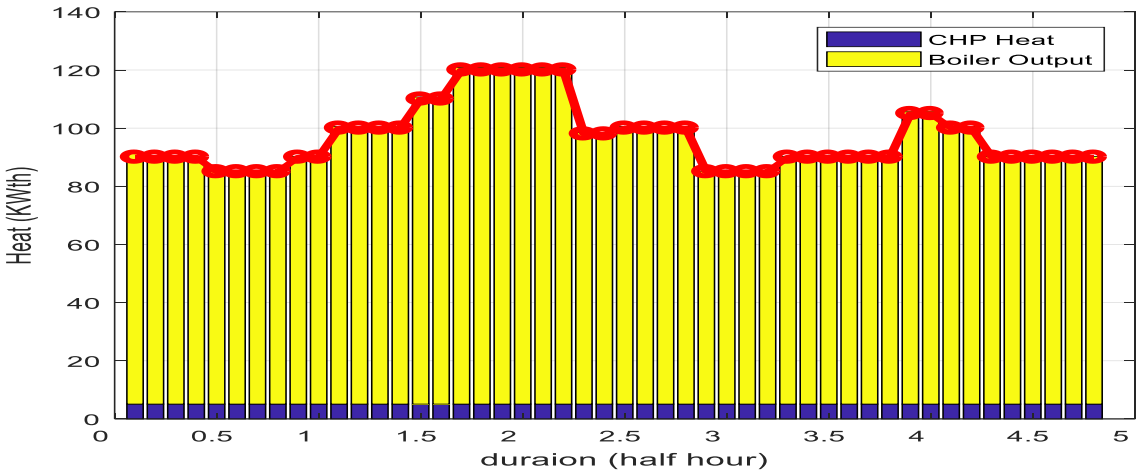
در شکل ۱۰ نتایج و صرفه‌جویی انرژی با استفاده از سیستم مدیریت انرژی ارائه‌شده است. با توجه به اینکه انرژی مصرفی در ماشین لباسشویی – انرژی ۱/۶ کیلووات ساعت و در ماشین ظرفشویی – انرژی۱/۲کیلووات ساعت و در آپارتمان مجموع انرژی جذب‌شده ۱۷/۲کیلووات ساعت است، می‌توان استنباط کنید که انرژی جذب‌شده آپارتمان بدون DW و WM برابر با ۱۴/۲کیلووات ساعت است. با آزمایش‌ها، انرژی الکتریکی تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر برابر با ۵/۱کیلووات ساعت اندازه‌گیری می‌شود و تعادل بین انرژی الکتریکی تولیدی PV و انرژی جذب‌شده آپارتمان بدون DW و WM برابر با ۹/۱کیلووات ساعت است. می‌توان نتیجه گرفت که با کمک سیستم مدیریت انرژی که در اینجا پیشنهادشده است، صرفه‌جویی در انرژی می‌تواند به ۲۱٪ از کل انرژی مصرف‌شده در آپارتمان برسد.



شکل۱۱. توزیع الکتریکی سیستم موردمطالعه درتوان و ظرفیت CHP برابر ۱۰کیلووات

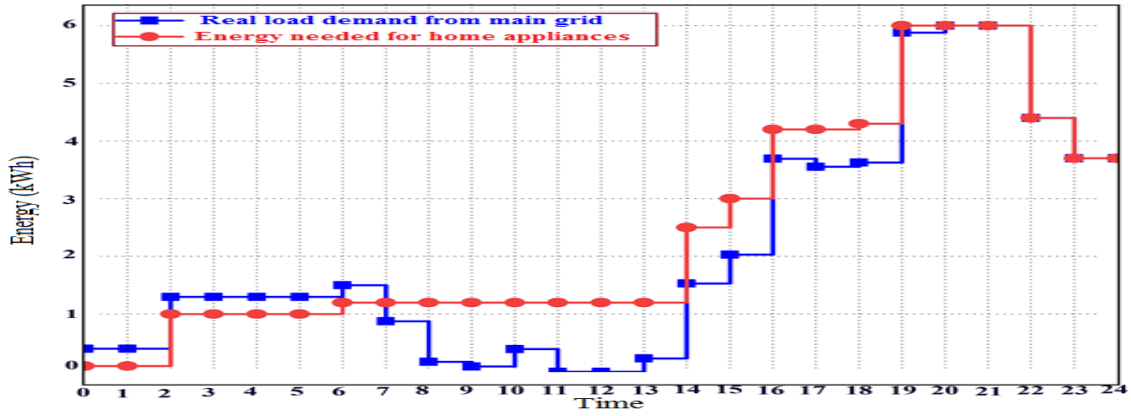
Figure ۱۱.Heating distribution of the studied system in the power and capacity of CHP equal to ۱۰ kilowatts

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]



شکل۱۲. توزیع گرمایشی سیستم موردمطالعه درتوان و ظرفیت CHP برابر ۱۰کیلووات

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



شکل۱۳. تقاضای بار ساعتی از شبکه اصلی در طی شبانه‌روز

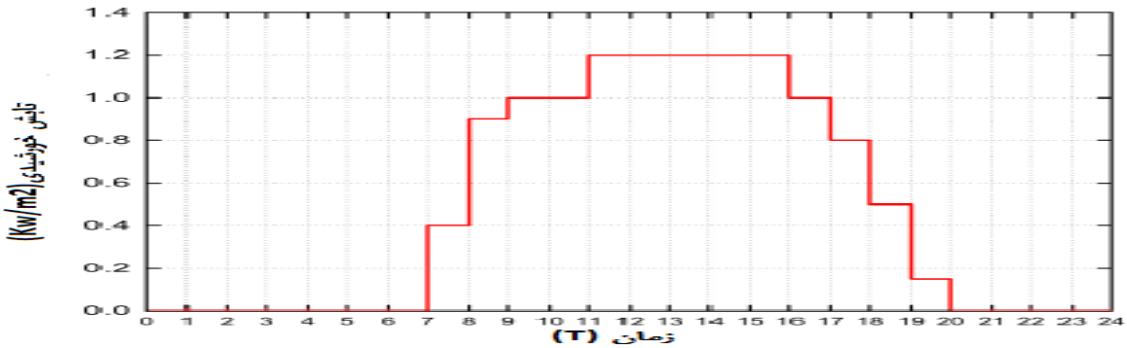
Figure ۱۳.Hourly load demand from the main grid during the day and night

سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی وسایل الکتریکی خانه را برای کار با هزینه‌های پایین برنامه‌ریزی می‌کند. با این برنامه، همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده‌شده است انرژی ساعتی موردنیاز لوازم‌خانگی (خط قرمز) و تقاضای بار ساعتی سیستم پیشنهادی را از شبکه اصلی (خط آبی) در هر زمان‌داریم .به‌طور دقیق، در زمان قیمت پایین مانند ۷بعدازظهر، ۸ بعدازظهر و ۹ بعدازظهر، سیستم ما انرژی زیادی از شبکه اصلی برای دستگاه‌های خانگی مصرف می‌کند. ضمناً از ساعت ۰صبح تا ساعت ۷صبح، به دلیل استفاده از انرژی ارزان از شبکه اصلی، تقاضای بار از شبکه اصلی بیشتر از انرژی موردنیاز لوازم‌خانگی است. درحالی‌که 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 ازآنجایی‌که این دو سیستم پشتیبان انرژی کافی برای بار خانه در این بازه‌های زمانی دارند., سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی از ساعت ۱۱صبح تا ساعت ۱ بعدازظهر به انرژی شبکه اصلی نیاز ندارد. پارامترهای ورودی شبیه‌سازی ما از (چن[۹۲] و دیگران،۲۰۱۷) شامل لوازم‌خانگی، سیگنال قیمت‌گذاری روز آینده، تابش خورشیدی و RES همان‌طور که در شکل ۱۲، شکل ۱۳ نشان داده‌شده است، در اینجا لوازم‌خانگی 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، درحالی‌که

۹۲. Chen

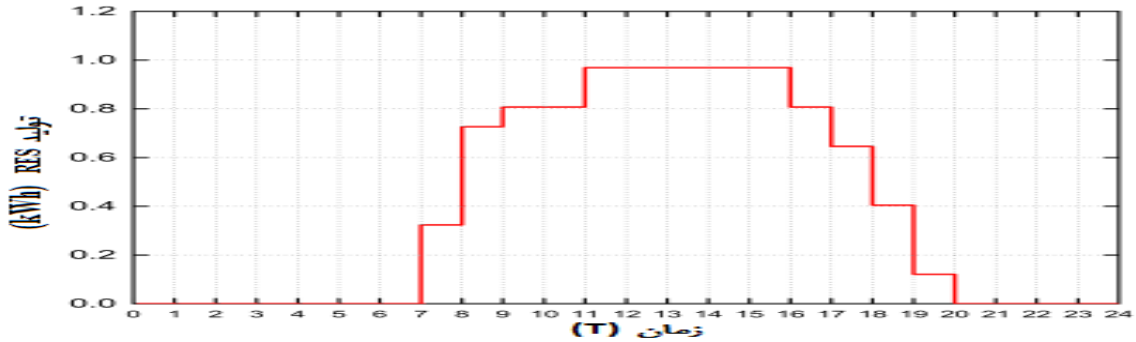
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

زمان کارکرد دستگاه‌های غیرقابل تغییر قابل‌تغییر 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 پیشنهادشده است. همان‌طور که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، انرژی حاصل از RES نه‌تنها برای لوازم‌خانگی 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 تجزیه‌وتحلیل قرار می‌دهیم تا ببینیم چگونه HEMS ما از انرژی شبکه اصلی و انرژی ESS همان‌طور که در شکل۱۴ نشان داده‌شده است، استفاده می‌کند.



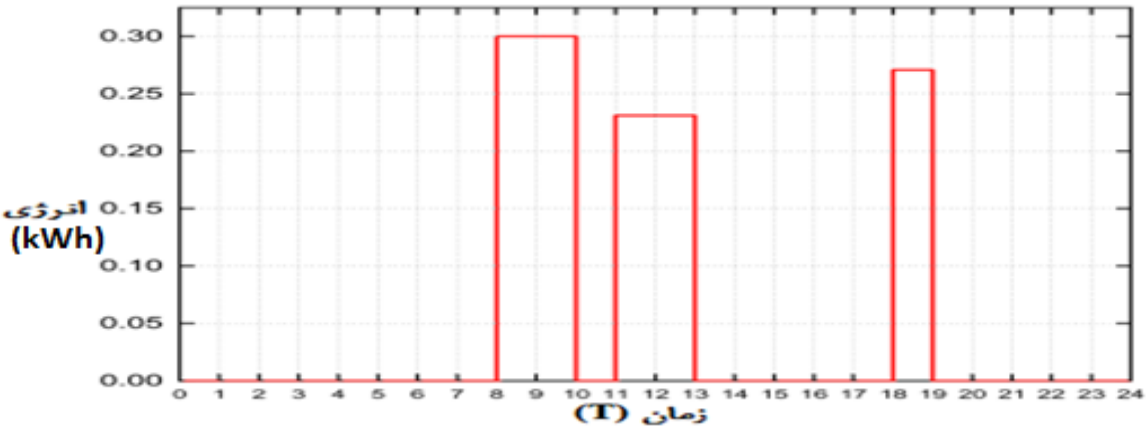
شکل۱۲. تابش خورشیدی برحسب زمان برای محاسبات لازم

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



شکل۱۳. انرژی RES ساعتی تولیدشده توسط سیستم PV

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



[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

شکل۱۴. انرژی ESS ساعتی برای بار خانه استفاده می‌شود

Figure ١٤.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 کاهش‌یافته، قبض برق کاهش‌یافته و انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) کاهش‌یافته 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 تجدید پذیر خانگی هوشمند هیبریدی ایمن‌تر، مؤثرتر و کاربرپسند تر، شبکه هوشمند شبکه آینده را می‌توان گسترش داد.

۹- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر توجه به شبکه‌های هوشمند افزایش‌یافته 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 تجدید پذیر خانگی(HEMS) را ارائه می‌کند. مکانیسم پیشنهادی برای به حداقل رساندن هزینه برق خانه‌های هوشمند با به حداکثر رساندن استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در طول یک روز در نظر گرفته‌شده است. بیشترین مصرف انرژی لوازم‌خانگی 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 به‌طوری‌که همه آن‌ها در همان زمان رخ ندهد درعین‌حال راضی نمودن مدت‌زمان تقاضای مشتریان خاموش،هزینه انرژی و حداکثر دیماند 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 به‌صورت 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 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. 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. مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی می‌تواند از توان تولیدشده توسط ژنراتورهای بادی استفاده کند به‌شرط آن‌که این ژنراتورها در دسترس باشند. اما تحت سناریو زمان‌بندی بهینه‌سازی شده، ژنراتورهای CHP بیشتر مورداستفاده 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 گرفته‌شده با زیر توزیع منابع انرژی، و ظرفیت‌هایشان مطابق با کل تقاضای انرژی به‌دست‌آمده است. توجه به مجموع تقاضای انرژی درحالی‌که پارامترهای فنی و هزینه‌های به‌دست‌آمده‌اند. 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 قابل‌قبول دست یابد. همان‌طوری که در ابتدای این مقاله عنوان شد سیستم مدیریت انرژی خانه با پشتیبانی سیستم‌های ذخیره انرژی و منابع انرژی تجدید پذیر قادر است از برق شبکه اصلی باقیمت پایین برای تأمین لوازم‌خانگی 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 HEMSپیشنهادی را با انجام شبیه‌سازی‌های ارزیابی کردیم. با توابع جدید، هزینه انرژی HEMS ما در مقایسه با نتایج قبلی در مراجع (علایی[۹۳] و دیگران،۲۰۲۱) و (اچ تی دین[۹۴] و دیگران،۲۰۲۱). به‌طور قابل‌توجهی به ۲۱٪ کاهش یافت. بااین‌حال، 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. درروش ها و شبکه‌های سنتی خدمات به مشتریان تنها قیمت‌گذاری مشترک برق هست درحالی‌که شبکه هوشمند می‌تواند قیمت‌گذاری برق در زمان واقعی را فراهم کند. مشکل این مدل مطرح‌شده ازنقطه‌نظر

[۹۳] Alayi

[۹۴] H. T. Dinh

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

مشتریان، با مشخصات زمان واقعی قیمت برق داده‌شده در طول زمان هست. در آینده، ممکن است امکان داشته باشد این مدل به‌عنوان بخشی از یک مدل شبکه هوشمند کامل که در آن قیمت برق همراه با برنامه‌ریزی از کارهای بهینه‌شده باشد بکار برده شود. درواقع با توسعه HEMS ها، معماری مدیریت انرژی حالت کاربر در مقیاس جهانی برای شبکه هوشمند پیشنهادشده است. که مسئولیت اصلی آن حفظ بهره‌وری انرژی و قابلیت اطمینان انرژی در تولید برق نامشخص و تقاضای مصرف‌کنندگان 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. بهینه‌سازی زمان واقعی راه دیگری برای بهبود سیستم است. با استفاده از این فناوری، سیستم را می‌توان با داده‌های استفاده بلادرنگ بهینه کرد.

منابع

نجف پور، وحید. (۱۳۹۹). مدیریت هو شمند انرژی در ساختمان‌های اداری با ا ستفاده از سی ستم کنترل تردد . سال بی ست و سوم. شماره یکم . نشریه انرژی ایران.

سماواتی، الهام. (۱۳۹۵). مدیریت انرژی ساختمان هوشمند با تغذیه‌ی منابع تجدید پذیر. دوره سوم . شماره اول .مجله انرژی‌های تجدید پذیر و نو.

نوجوان، صیاد.(۱۳۹۸). مدیریت م صرف انرژی الکتریکی و حرارتی در مجتمع‌های م سکونی. جلد ه شتم . شماره سوم . زم ستان۹۸ . کیفیت و بهره‌وری در صنعت برق ایران.

فاضلی، عبدالرضا. (۱۳۹۲). بهینه‌سازی مصرف انرژی در مناطق مسکونی شهر تهران با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی انرژی روتردام (REAP). سال اول. شماره ۳، پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری انرژی.

تقی‌خانی، محمدعلی. (۱۳۹۸). تأثیر خانه‌های هوشـمند در مدیریت و کاهش مصـرف انرژی الکتریکی . سـال نهم. شـماره دوم، نشـریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی.

فصیحی هرندی، فریبا. (۱۳۸۳). برر سی 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 configurationformicrogridsintegratedtothenationalgridusing back-to-back converters in a renewable power system," Electronics, vol. ۱۰, no. ۱۵, p. ۱۸۲٦, 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): ۱۰۰۳٦۳.

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. ۳, (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 ۲٤٤ (۲۰۲۰): ۱۱۸۹۰٦.

Gyamfi S, Krumdieck S, Urmee T, (۲۰۱۳). Residential peak electricity demand responsehighlights of some behavioural issues. Renewable and Sustainable Energy Reviews ۲۰۱۳;۲۵:۷۱–۷.

Soares A, Gomes A , (۲۰۱٤). 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 ۲۰۱٤;۳۰:٤۹۰–۵۰۳.

Li X, Wen J, (۲۰۱٤). Review of building energy modeling for control and operation. Renewable and Sustainable Energy Reviews ۲۰۱٤;۳۷:۵۱۷–۳۷.

Haider HT, See OH, Elmenreich W, (۲۰۱٦). A review of residential demand response of smart grid. Renewable and Sustainable Energy Reviews ۲۰۱٦;۵۹:۱٦٦ –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, ٦۳, ٤۲٦–٤۳٤.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

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, ۳–٦ November ۲۰۱۵; pp. ۱–٦.
Chen, S.; Ji, J.; Xu, Z.; Wu, H.; Liu, T, (۲۰۱۷).A Human-Centric Smart Home Energy Management System. IEEE Commun. Mag. ۲۰۱۷, ٥٥, ۲۷–۳۳.
Mohammed, Nooriya A., and Ammar Al-Bazi, (۲۰۲۱) . " Management of renewable energy production and distribution planning using agent-based modelling." Renewable Energy ١٦٤ (۲۰۲۱): ٥٠٩-٥۲٠.
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/su۱۲۰٥۲۱۱۷,۲۰۲۰.
Huy Truong, Jaeseok Yun, Dong Min Kim, (۲۰۱٦). "A Home Energy Management System with Renewable Energy and Energy Storage Utilizing Main Grid and Electricity Selling", IEEE Access, Issue ١٦, ۱۰,۱۱۰۹/ACCESS.۲۰۲۰,۲۹۷۹۱۸۹, ۲۰۱٦.
Di Zhang, Nilay Shah, Lazaros G. Papageorgiou, (۲۰۱۳). '' Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid'', Energy Conversion and Management ۷٤ ,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. ٤, 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. ۲٦۱-۲۷۰, 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 Induastrial Electronics., Vol. ٥۸, No. ۱, pp. ۹٥-۱۰٤, Jan ۲۰۱۱.
X. Liu, W. Xu, (۲۰۱۰). "Minimum Emission Dispatch Constrained by Stochastic Wind Power Availability and Cost," IEEE Trans. On Power System., Vol, ۲٥. No. ۳, pp. ۱۷۰٥-۱۷۱۳, 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. ١٤٦, pp. ۲٥۸۹–۲٦۲٥, 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. ٤, p. ٥٤۹, 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. ٤۰, 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. ۳۱۲٥, 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.۲٦۰ - ۲۷٥. 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. ٤۹٤۳٦-٤۹٤٥۰, ۲۰۲۰, doi: ۱۰,۱۱۰۹/ACCESS.۲۰۲۰,۲۹۷۹۱۸۹.
Miceli, Rosario, (۲۰۱۳). " Energy management and smart grids." Energies ٦,٤ (۲۰۱۳): ۲۲٦۲-۲۲۹۰.

ضمیمه

پارامتر و متغیرهای مدل‌سازی

Modeling parameters and variables

نماد	پارامتر	نماد	پارامتر

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]