مدیریت انرژی بهینه در ساختمان های هوشمند با قابلیت دادوستد انرژی

مهدی امینیان[1] شهرام جدید[2]

۱- قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت دانشکده مهندسی برق-دانشگاه علم و صنعت- تهران- ایران

m_aminian@elec.iust.ac.ir

۲- قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت دانشکده مهندسی برق-دانشگاه علم و صنعت- تهران- ایران

jaded@iust.ac.ir

چکیده: در این مقاله، ایجاد تعامل میان ساختمان‌های هوشمند در امر تبادل انرژی به عنوان راه‌حلی برای افزایش مشارکت مصرف‌کنندگان در امر مدیریت مصرف و بهبود بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های مسکونی متصل به ریزشبکه پیشنهاد شده است. در مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی مصرف برق در ساختمان‌های هوشمند و بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع تولید انرژی با مدل‌سازی تبادل توان الکتریکی میان ساختمان‌های هوشمند به صورت برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح (MILP) انجام شده است. ساختمان-های هوشمند مورد نظر مجهز به سیستم مدیریت انرژی ساختمان (BEMS)، منابع تولیدپراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی هستند. هر ساختمان تشکیل یک ریزشبکه کوچک را می‌دهد که قادر به تغذیه بخشی از بارهای الکتریکی و تمام بارهای حرارتی خود است. مدل پیشنهادی بر روی دو مجتمع ۳۰ و ۹۰ واحدی پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که تعامل میان ساختمان‌های هوشمند باعث افزایش حق انتخاب مصرف‌کنندگان در خرید و فروش برق، کاهش هزینه‌های مصرف انرژی، کاهش توان دریافتی از شبکه و نیز کمک به تعادل عرضه و تقاضا خواهد شد.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی، بهره‌برداری، تعامل ساختمان‌های هوشمند، ریزشبکه.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۹/۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر شهرام جدید

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران– تهران – بزرگراه رسالت– خیابان هنگام– دانشگاه علم و صنعت– دانشکده برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.11.9]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

۱- مقدمه

در طول دهه‌های آینده علاوه بر مسائل زیست‌محیطی و گرم شدن کره‌زمین، رشد روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی و به طبع آن افزایش هزینه تولید برق بی‌تردید یکی دیگر از چالش‌های پیش‌رو خواهد بود. از این رو تامین تمام انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان از طریق ایجاد ظرفیت‌های نیروگاهی و توسعه شبکه‌ها مقرون به صرفه نخواهد بود [۲,۱]. از نقطه‌نظر مصرف برق، ساختمان‌های مسکونی مصرف‌کننده عمده انرژی الکتریکی می‌باشند. بر اساس گزارش دپارتمان انرژی ایالات‌متحده، در کشورهای صنعتی حدود ٪۴۰ از کل انرژی در ساختمان‌ها مصرف می‌شود، که در میان آن سهم برق ٪۶۸ است. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که ۲۰ تا ۳۰ درصد مصرف انرژی ساختمان‌ها را می‌توان از طریق عملیات مدیریت و بهینه‌سازی بدون تغییر در ساختار ساختمان و پیکربندی سخت‌افزاری سیستم تامین انرژی صرفه‌جویی نمود. بنابراین، پتانسیل بسیار بالایی برای صرفه-جویی انرژی در ساختمان از طریق بهره‌برداری کارآمد وجود دارد [۴,۳]. از نقطه‌نظر صرفه‌جویی و کاهش هزینه مصرف انرژی بهبود بهره‌وری در مصرف انرژی بخش‌های صنعتی، تجاری و خانگی موثرترین و معمول‌ترین روش است [۸,۵].

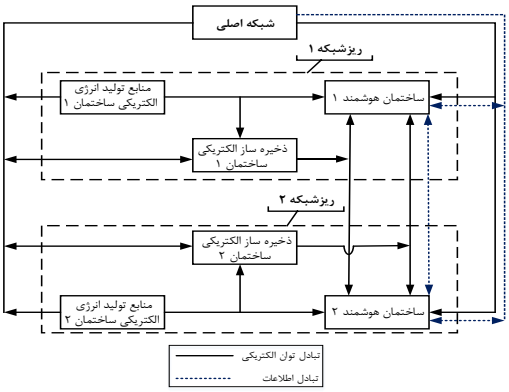
در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در زمینه برنامه‌ریزی و بهینه-سازی مصرف انرژی با هدف کاهش هزینه‌های مصرف‌کننده و کاهش اوج بار با تکیه بر مفهوم ساختمان هوشمند انجام شده است که می-توان آن‌ها را در سه دسته کلی تقسیم‌بندی نمود. دسته اول شامل مقالاتی می‌شود که در آن‌ها ادغام منابع تولید انرژی محلی در ساختمان‌های هوشمند با هدف بهبود بهره‌وری انرژی مورد توجه قرار گرفته است. در مرجع [۶] نویسندگان به تجزیه‌وتحلیل و مقایسه عملکرد ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی در سیستم انرژی ساختمان در محیط ریزشبکه پرداخته‌اند. در این مقاله مسئله کمینه‌سازی هزینه انرژی با در نظر گرفتن دستگاه‌های ذخیره‌ساز و سایر تجهیزات (CCHP[۱]، ژنراتور بادی و سلول‌های خورشیدی) فرمول‌بندی شده است. عدم قطعیت در پروفیل‌های بار و تابش خورشید نیز در نظر گرفته شده و مسئله به صورت بهینه‌سازی تصادفی مدل‌سازی شده است. نتایج عددی شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی آن‌ها در انتخاب بهترین ترکیب و ظرفیت بهینه دستگاه‌های ذخیره‌ساز و در دستیابی به راهبُرد بهره‌برداری بهینه از هر دستگاه در سیستم انرژی ساختمان موثر است. در مراجع [۸,۷,۳] ساختمان هوشمند با منابعی مانند CHP[۲]، مولد فتوولتائیک و باتری تشکیل یک ریزشبکه را می-دهد که به شبکه اصلی نیز متصل است و با آن می‌تواند به دادوستد انرژی الکتریکی بپردازد. هدف نویسندگان مقالات مذکور یافتن راه‌حلی بهینه برای مسئله برنامه‌ریزی منابع انرژی ساختمان است. مرجع [۹] مسئله متعادل‌سازی بار در خانه‌های هوشمند را با استفاده از بهینه-سازی ازدحام ذرات (PSO)[۳] انجام داده است. مقاله مذکور استفاده از انرژی باد و خورشید را به عنوان منابع انرژی پاک برای خانه هوشمند در نظر گرفته است و موازنه بار را به گونه‌ای انجام داده است که هزینه برق مصرفی خانه کاهش یابد که این هدف با حداکثرسازی مصرف انرژی از منابع انرژی پاک به دست آمده است. دسته دوم، شامل مقالاتی می‌باشد که در آن‌ها بر روی برنامه‌ریزی بارهای خانگی با هدف کاهش هزینه‌های مصرف‌کننده و کاهش اوج مصرف تمرکز شده است. مرجع [۱۰] مکانیزم برنامه‌ریزی مصرف برای مدیریت بار در بخش خانگی را به روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (ILP)[۴] مدل‌سازی نموده است. مکانیزم ارائه شده در این مرجع قادر به برنامه‌ریزی توان بهینه و زمان بهره‌برداری بهینه برای وسایلی که از نظر میزان توان و زمان مصرف قابل‌تغییر هستند بر اساس الگوهای مصرف برق وسایل می‌باشد. مرجع [۱۱] بر توسعه الگوریتم‌های برنامه‌ریزی بار برای انواع لوازم خانگی به منظور کاهش هزینه‌های انرژی در چارچوب تعرفه زمان استفاده (TOU)[۵] بر اساس نیاز کاربر تمرکز کرده است. در این مرجع سیستم‌های سرمایش و گرمایش خانه به عنوان یک بار قابل کاهش، آبگرم‌کن به عنوان یک بار قابل قطع و ماشین لباس‌شویی به عنوان یک بار غیرقابل قطع برنامه‌ریزی شده‌اند.

در دسته سوم، با هدف افزایش بازدهی شبکه و کاهش مشکلات بهره‌برداری از سیستم برق‌رسانی مقالات بیشتر بر روی نحوه اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار در ساختمان‌های هوشمند تمرکز کرده‌اند. در همین راستا نویسندگان مرجع [۱۲] برنامه‌ریزی مشارکت بارهای خانگی در برنامه‌های پاسخگویی بار را به گونه‌ای انجام داده‌اند که بر اساس قراردادی مشخص شرکت برق در تعدادی از ساعات از پیش تعیین شده وسایل قابل کنترل مصرف‌کننده را خاموش می‌کند. از آنجا که کنترل مستقیم بار آسایش مشتری را مختل می‌کند، برای ترغیب مشارکت مصرف‌کنندگان در این برنامه‌ها مشوقی را به صورت کاهش تعرفه‌ها در نظر گرفته است. در مرجع [۱۳] نویسندگان با در نظر گرفتن کشسانی (حساسیت بار نسبت به تغییرات قیمت) برای وسایل الکتریکی خانگی به بررسی اثرات و مزایای اجرای پاسخگویی بار خودکار در چارچوب قیمت‌گذاری زمان واقعی (RTP)[۶] بر روی مصرف‌کنندگان مسکونی پرداخته‌اند.

اما در این مقاله جهت بهبود بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های مسکونی، تعامل میان ساختمان‌های هوشمند به عنوان یک راه‌حل پیشنهاد شده است. لذا فرض شده است که ساختمان‌های هوشمند مجهز به سیستم مدیریت انرژی ساختمان (BEMS)[۷]، منابع تولیدپراکنده (DG)[۸] و ذخیره‌سازهای انرژی بوده و تشکیل یک ریزشبکه کوچک می‌دهند. فرض می‌شود ریزشبکه مذکور قادر به تغذیه بخشی از بارهای الکتریکی و تامین کل بارهای حرارتی خود است. BEMS به عنوان یک رابط کلیدی بین شبکه هوشمند و خانه هوشمند تعرفه RTP را از شرکت برق توسط کنتور هوشمند نصب شده در داخل ساختمان دریافت می‌کند و برنامه‌ریزی بارهای قابل‌انعطاف و بهره‌برداری از منابع تولید انرژی را به گونه‌ای انجام می-

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.11.9]

دهد که هزینه کل شامل هزینه مصرف انرژی و بهره‌برداری از منابع انرژی موجود در ساختمان هوشمند در ۲۴ ساعت آینده حداقل گردد. علاوه بر این فرض می‌شود BEMS هر ساختمان قابلیت ارتباط با سایر ساختمان‌های مجاور خود را داشته باشد تا بتوانند با یکدیگر به تبادل اطلاعات بپردازند. جهت در نظر گرفتن امکان تبادل انرژی میان ساختمان‌های هوشمند در این مقاله فرض شده است ساختمان‌ها بتوانند از سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی یکدیگر در مواقع نیاز استفاده کنند. با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی می‌توان برق را در ساعاتی که قیمت برق پایین است و یا در مواقعی که در ساختمان‌ها اضافه تولید وجود دارد ذخیره نمود. ساختمان‌ها نیز می‌توانند با استفاده از شارژ موجود در ذخیره‌سازها علاوه بر تغذیه بارهای مصرفی خود در ساعاتی که قیمت برق بالا است، شارژ مازاد خود را به شبکه و یا ساختمان‌های دیگر نیز بفروشند. این امر علاوه بر افزایش مشارکت مصرف‌کنندگان در امر مدیریت مصرف موجب سودآوری اقتصادی، افزایش حق انتخاب در خرید و فروش برق، کاهش توان گرفته شده از شبکه در ساعات اوج بار و استفاده کارآمدتر از منابع انرژی موجود در ساختمان‌ها خواهد شد. شکل (۱) مدل پیشنهادی تبادل انرژی میان ساختمان‌ها را به صورت شماتیکی نمایش می‌دهد.



شکل (۱): نحوه تبادل انرژی میان ساختمان‌های هوشمند

مدل ارائه شده در این مقاله با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح (MILP)[۹] برنامه زمان‌بندی استفاده از بارهای خانگی، نحوه بهره‌برداری از منابع تولیدپراکنده، نحوه شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای انرژی و میزان تبادل انرژی میان ساختمان‌های هوشمند با یکدیگر و با شبکه را بر اساس تعرفه‌های RTP تعیین می‌نماید.

در ادامه ساختار مقاله به این شرح است: در بخش ۲ مدل پیشنهادی ارائه و در بخش ۳ مطالعه موردی برای شبیه‌سازی مدل شرح داده خواهد شد، در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی در سه سناریو متفاوت ارائه می‌گردد و در نهایت نتیجه‌گیری پایان‌بخش این مقاله در بخش ۵ خواهد بود.

۲- مدل‌سازی

هدف از این بخش ارائه مدل برنامه‌ریزی بهینه بار خانگی است، به گونه‌ای که با در نظر گرفتن محدودیت‌های وسایل قابل برنامه‌ریزی و منابع انرژی هزینه مصرف‌کننده حداقل شود. مسئله برنامه‌ریزی مصرف برق خانه‌های هوشمند به صورت یک مدل MILP مدل‌سازی شده است. بارهای مصرفی در هر خانه بر اساس بازه زمانی عملکرد داده شده (زودترین زمان شروع و دیرترین زمان پایان) برنامه‌ریزی می‌شوند و هدف کمینه‌سازی هزینه برق روزانه و کاهش اوج مصرف برق می‌باشد.

۲-۱- دسته‌بندی بارهای خانگی

در برنامه‌ریزی بارهای خانگی، بارهای موجود در خانه هوشمند را می‌توان از نظر توانایی شرکت در برنامه‌های مدیریت انرژی به دو دسته تقسیم‌بندی نمود. بارهای قابل انتقال که زمان استفاده از آن‌ها را می‌توان به ساعاتی دیگر منتقل کرد و بارهایی که قابل انتقال نیستند. از طرفی بارهای قابل انتقال خود به دو دسته وقفه‌پذیر و وقفه‌ناپذیر تقسیم می‌شوند. اگر به یک بار در حین اجرا بتوان وقفه داد و ادامه آن را به زمان دیگری موکول کرد، آن بار وقفه‌پذیر بوده و در غیر این صورت بار وقفه‌ناپذیر است [۱۶]. در ادامه نحوه مدل‌سازی هر کدام از بارها جهت استفاده در مدل MILP بیان شده است.

۲-۱-۱- بارهای غیرقابل انتقال

منظور از بارهای غیرقابل انتقال آن دسته از وسایل مشترکین می‌باشد که در زودترین زمان شروع درخواست شده توسط کاربر باید توان موردنیاز آنها تامین گردد و امکان انتقال زمان استفاده از آنها به ساعات دیگر امکان پذیر نمی‌باشد. لذا از آنجا که کنترلی بر روی بارهای غیرقابل انتقال وجود ندارد و هر لحظه تابع دستورات کاربر بوده و در بازه‌های مشخصی توسط مشترکین به صورت تصادفی مورد استفاده قرار می‌گیرند، از این رو برای مدل کردن آن‌ها فرض می‌کنیم هر یک از آن‌ها در صورت روشن شدن تا اتمام مدت عملکرد خود به طور پیوسته روشن می‌مانند و سپس خاموش می‌شوند. به عنوان مثال تلویزیون که بازه عملکرد آن از ساعت ۱۸ تا ۲۴ شب و مدت زمان استفاده از آن ۴ ساعت است در صورت روشن شدن در ساعت ۲۰ باید به طور پیوسته تا ساعت ۲۴ مورد استفاده قرار گیرد سپس خاموش شود. همچنین هیچ یک از برنامه‌های مذکور زودتر از زودترین زمان شروع و دیرتر از دیرترین زمان پایان آن‌ها مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

۲-۱-۲- بارهای قابل انتقال وقفه‌ناپذیر

بارهای قابل انتقال وقفه ناپذیر آن دسته از وسایل مشترکین را شامل می‌شود که زمان استفاده از این وسایل را می‌توان به زمان دیگری موکول نمود (قابلیت انتقال بار) اما در صورت روشن شدن وسیله توان

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.11.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

موردنیاز آن باید تا پایان دوره عملکرد آن بطور پیوسته تامین گردد (خاصیت وقفه‌ناپذیری بار). زمان شروع هر وسیله نمی‌تواند زودتر از زودترین زمان شروع داده شده باشد[۱۴]،

$$\sum_{t\ge S_{h,k}}^{E_{h,k}-D_{h,k}} Ts_{b,h,k,t}=1 \qquad \forall\ b,\ h,\ k \tag{۱}$$

زمان پایان هر وسیله نمی‌تواند دیرتر از دیرترین زمان پایان داده شده باشد،

$$\sum_{t\ge S_{h,k}+D_{h,k}}^{E_{h,k}} Te_{b,h,k,t}=1 \qquad \forall\ b,\ h,\ k \tag{۲}$$

اگر یک وسیله در بازه t شروع شود، باید در بازه t بعلاوه زمان عملکرد آن ($D_{h,k}$) خاتمه یابد،

$$Ts_{b,h,k,t}=Te_{b,h,k,t+D_{h,k}} \qquad \forall\ b,\ h,\ k,\ S_{h,k}\le t\le T-D_{h,k}+1 \tag{۳}$$

تمام وسایل باید به طور پیوسته از زمان شروع تا زمان پایان کار کنند،

$$w_{b,h,k,t}=w_{b,h,k,t-1}+Ts_{b,h,k,t}-Te_{b,h,k,t} \qquad \forall\ b,\ h,\ k, 1\le t\le T \tag{۴}$$

۳-۱-۲- بارهای قابل انتقال وقفه‌پذیر

بارهای قابل انتقال وقفه‌پذیر آن دسته از وسایل مشترکین را شامل می‌شود که ضمن داشتن قابلیت انتقال بار، در صورت روشن شدن وسیله می‌توان در تامین توان موردنیاز آن وقفه ایجاد کرده و مابقی توان مورد نیاز آن را در ساعات دیگر تامین نمود (خاصیت وقفه‌پذیری بار). قید (۵) تضمین می‌کند که وسیله مورد نظر به تعداد بازه‌های مورد نیاز کاربر استفاده شده است. قید (۶) از استفاده وسیله مورد نظر در بازه‌های خارج از زودترین زمان شروع ($S_{h,k}$) و دیرترین زمان پایان ($E_{h,k}$) جلوگیری می‌کند.

$$\sum_{t} w_{b,h,k,t}=D_{h,k} \qquad \forall\ b,\ h,\ k \tag{۵}$$

$$\sum_{t>E_{h,k}}^{t<S_{h,k}} w_{b,h,k,t}=0 \qquad \forall\ b,\ h,\ k \tag{۶}$$

۲-۲- قیود ظرفیت منابع تولیدپراکنده

خروجی هر یک از تجهیزات نباید بیش از ظرفیت طراحی شده آن‌ها باشد،

ژنراتور CHP:

$$wc_{b,t}\le C_b^{CHP} \qquad \forall\ b, 1\le t\le T \tag{۷}$$

دیگ بخار:

$$x_{b,t}\le C_b^{Boiler} \qquad \forall\ b, 1\le t\le T \tag{۸}$$

۳-۲- قیود ذخیره‌ساز الکتریکی

برق ذخیره شده در ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان b در بازه t برابر است با:

$$Se_{b,t}=Se_{b,t-1}+z_{b,t}\eta_{ELE}\delta-y_{b,t}\delta/\eta_{ELE} \qquad \forall\ b, 1\le t\le T \tag{۹}$$

میزان برقی که از طریق ذخیره‌ساز مبادله می‌شود با اعمال بازده در طول فرآیند شارژ و دشارژ کاهش می‌یابد که این امر به دلیل بازده تبدیل جریان ac به dc و یا بلعکس است. زیرا، ذخیره‌ساز برق را به صورت dc ذخیره می‌کند. بدیهی است که شارژ و دشارژ همزمان ذخیره‌ساز الکتریکی امکان‌پذیر نیست. این موضوع در رابطه (۱۰) بیان شده است.

$$T_{b,t}^{y}+T_{b,t}^{z}\le 1 \qquad \forall\ b, 1\le t\le T \tag{۱۰}$$

ذخیره‌ساز الکتریکی در آغاز هر دوره برنامه‌ریزی دارای یک شارژ اولیه است که در پایان همان دوره باید به مقدار شارژ اولیه خود بازگردد. این قید نیز توسط رابطه (۱۱) بیان شده است:

$$Se_{b,0}=Se_{b,T}=ISe_b \qquad \forall\ b \tag{۱۱}$$

جهت بهبود بهره‌وری ذخیره‌ساز و افزایش طول عمر آن، دو قید به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

طول عمر ذخیره‌ساز ممکن است در اثر کار در کمتر از یک سطح شارژ خاص کاهش یابد، به منظور جلوگیری از آسیب دیدن ذخیره‌ساز، انرژی ذخیره شده در آن باید همواره در قید زیر صدق نماید:

$$Se_b^{\min}\le Se_{b,t}\le Se_b^{\max} \qquad \forall\ b, 1\le t\le T \tag{۱۲}$$

علاوه بر این برای جلوگیری از آسیب رسیدن به ذخیره‌ساز و کاهش ظرفیت آن، نرخ شارژ و دشارژ آن نباید از مقادیر حداقل و حداکثر تجاوز نماید.

$$DE_b^{\min}T_{b,t}^{y}\le y_{b,t}\le DE_b^{\max}T_{b,t}^{y} \tag{۱۳}$$

$$CE_b^{\min}T_{b,t}^{z}\le z_{b,t}\le CE_b^{\max}T_{b,t}^{z} \tag{۱۴}$$

۴-۲- قیود ذخیره‌ساز حرارتی

گرمای ذخیره شده در ذخیره‌ساز حرارتی ساختمان b در بازه t برابر است با [۱۵]:

$$St_{b,t}=St_{b,t-1}+g_{b,t}\eta_{THS}\delta-f_{b,t}\delta/\eta_{THS} \qquad \forall\ b, 1\le t\le T \tag{۱۵}$$

گرمای ذخیره شده باید در پایان دوره مطالعه به سطح اولیه خود در ابتدای برنامه‌ریزی بازگردد،

$$St_{b,0}=St_{b,T}=ISt_b \qquad \forall\ b \tag{۱۶}$$

بدیهی است که شارژ و دشارژ همزمان ذخیره‌ساز حرارتی امکان‌پذیر نیست. این موضوع در رابطه (۱۸) بیان شده است.

$$T_{b,t}^{g}+T_{b,t}^{f}\le 1 \qquad \forall\ b, 1\le t\le T \tag{۱۷}$$

خروجی ذخیره‌ساز حرارتی نباید بیش از ظرفیت طراحی شده آن باشد لذا داریم:

$$St_{b,t}\le C_b^{THS} \qquad \forall\ b, 1\le t\le T \tag{۱۸}$$

نرخ‌های شارژ و دشارژ گرما نباید بیشتر از حدود شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی باشد:

$$DT_b^{\min}T_{b,t}^{f}\le f_{b,t}\le DT_b^{\max}T_{b,t}^{f} \qquad \forall\ b, 1\le t\le T \tag{۱۹}$$

$$CT_b^{\min}T_{b,t}^{g}\le g_{g,t}\le CT_b^{\max}T_{b,t}^{g} \qquad \forall\ b, 1\le t\le T \tag{۲۰}$$

۵-۲- خروجی توربین بادی

برق خروجی از توربین‌های بادی از طریق معادله تولید توان باد محاسبه می‌شود[۱۸]:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.11.9]

$$wi_t = \frac{1}{2}\rho A \eta_w v_t^3 \quad \forall\ t \tag{۲۱}$$

۶-۲- تعادل انرژی

برق مصرف شده در هر دوره از زمان توسط ساختمان b برابر است با مجموع مصارف وسایل قابل انتقال و غیرقابل انتقال که باید با توان دریافتی از شبکه و منابع تولید انرژی برابر باشد که این تعادل توان الکتریکی در رابطه زیر مدل‌سازی شده است:

$$\sum_h \sum_k w_{b,h,k,t} C_k + L_{b,t} = wc_{b,t} + wi_{b,t} + y_{b,t} - z_{b,t} + In_{b,t} - Ex_{b,t} \quad \forall\ b, 1 \le t \le T \tag{۲۲}$$

گرمای مصرف شده توسط هر ساختمان در بازه t برابر است با:

$$H_{b,t} = wc_{b,t}\gamma + x_{b,t} + f_{b,t} - g_{b,t} \quad \forall\ b, 1 \le t \le T \tag{۲۳}$$

۷-۲- تابع هزینه پرداختی

تابع هزینه روزانه هر ساختمان در حالتی که تنها با شبکه به دادوستد انرژی بپردازد شامل: هزینه نگهداری و بهره‌برداری از CHP، توربین بادی، ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی، هزینه خرید برق از شبکه و درآمد ناشی از فروش برق به شبکه اصلی است که به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود. لذا در این حالت هدف کمینه کردن هزینه‌ای به شرح زیر می‌باشد:

$$B_b = \sum_t \left[\begin{pmatrix} wc_{b,t} n_G / \alpha + wi_{b,t} m_{WIND} + In_{b,t} a_{b,t} \\ - Ex_{b,t} n_E + x_{b,t} n_G / \beta \\ + y_{b,t} m_{ELE} + f_{b,t} m_{THS} \end{pmatrix} \delta \right] \quad \forall\ b \tag{۲۴}$$

همان طور که قبلا گفته شد در مدل پیشنهادی، ساختمان‌های هوشمند ضمن تبادل انرژی با شبکه قادر خواهند بود با یکدیگر نیز به تعامل و دادوستد انرژی بپردازند. لذا در ادامه به مدل‌سازی تعامل میان ساختمان‌های هوشمند جهت تبادل انرژی با یکدیگر می‌پردازیم. هزینه این دادوستد برای هر ساختمان‌ها به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$C_{b,t} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \ne b}}^{n} yc_{b,i,t} m_{ELE} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \ne b}}^{n} \left(yc_{i,b,t} - yc_{b,i,t} \right) n_B \quad \forall\ b, 1 \le t \le T \tag{۲۵}$$

که در آن n متغیر کمکی است که شماره ساختمان‌ها می‌باشد. $yc_{i,b,t}$ میزان توانی (بر حسب kW_e) است که ساختمان b از ذخیره‌ساز ساختمان i دریافت می‌کند. $yc_{b,i,t}$ میزان توانی (بر حسب kW_e) است که ذخیره‌ساز ساختمان b به ساختمان i داده است.

لذا تابع هزینه کل ساختمان به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$B_b = \sum_t \left[\begin{pmatrix} wc_{b,t} n_G / \alpha + wi_{b,t} m_{WIND} \\ + In_{b,t} a_t - Ex_{b,t} n_E + ys_{b,t} m_{ELE} \\ + x_{b,t} n_G / \beta + f_{b,t} m_{THS} + C_{b,t} \end{pmatrix} \delta \right] \quad \forall\ b \tag{۲۶}$$

در رابطه (۲۷) متغیر $ys_{b,t}$ بیانگر میزان توانی (بر حسب kW_e) است که در بازه t ساختمان b از ذخیره‌ساز خود دشارژ می‌کند. علاوه بر تابع هزینه برخی قیود نیز دست‌خوش تغییر می‌شوند که در ادامه آورده شده‌اند.

قیود مربوط به ذخیره‌ساز الکتریکی:

$$Se_{b,t} = Se_{b,t-1} + z_{b,t}\eta_{ELE}\delta - (ys_{b,t} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \ne b}}^{n} yc_{b,i,t})\delta / \eta_{ELE} \quad \forall\ b, 1 \le t \le T \tag{۲۷}$$

$$DE_b^{\min} T_{b,t}^y \le ys_{b,t} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \ne b}}^{n} yc_{b,i,t} \le DE_b^{\max} T_{b,t}^y \quad \forall\ b, 1 \le t \le T \tag{۲۸}$$

قید مربوط به تعادل انرژی:

$$\sum_h \sum_k w_{b,h,k,t} C_k + L_{b,t} = wc_{b,t} + wi_{b,t} + In_{b,t} + ys_{b,t} - z_{b,t} - Ex_{b,t} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \ne b}}^{n} (yc_{i,b,t} - yc_{b,i,t}) \quad \forall\ b, 1 \le t \le T \tag{۲۹}$$

سایر قیود نیز بدون تغییر باید برآورده شوند.

در این حالت تابع هدف باید به طور همزمان هزینه برق مصرفی روزانه ساختمان‌ها را کمینه نماید. لذا چندین تابع هدف وجود دارد که از روش مجموع وزنی برای تبدیل آن‌ها به یک تابع تک هدفه استفاده شده است. در این روش تمامی توابع هدف با ضرایب وزنی که به هر کدام اختصاص داده شده است، جمع شده‌اند. لذا تابع هدف به صورت زیر بازنویسی می‌شود،

$$\min \quad \sum_{i=1}^{n} B_i w_i \tag{۳۰}$$

که $w_i \ge 0$ ضرایب وزنی هستند که اهمیت نسبی توابع را نشان می‌دهند. معمولا باید فرض شود که:

$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1 \tag{۳۱}$$

۳- مطالعه موردی

برای ارزیابی مدل پیشنهادی دو ساختمان هوشمند در نظر گرفته شده است که یکی از ساختمان‌ها دارای ۳۰ واحد مسکونی (ساختمان ۱) و دیگری شامل ۹۰ واحد مسکونی (ساختمان ۲) است. هر یک از ساختمان‌های هوشمند منابع انرژی زیر را دارا می‌باشند:

یک ژنراتور CHP با ظرفیت ۶۰ kW_e در ساختمان ۱ و با ظرفیت ۱۲۰ kW_e در ساختمان ۲ که بازده الکتریکی آن ٪۳۵ می‌باشد، نسبت تبدیل گرما به برق ۳ به ۱ و قیمت گاز طبیعی ۲/۷ p/kWh است. یک مزرعه بادی برای هر یک از ساختمان‌های ۱ و ۲ که در آن هر توربین بادی دارای ظرفیت ۱۰ kW_e و هزینه نگهداری ۰/۵ p/kWh_e است. یک واحد ذخیره‌ساز الکتریکی با ظرفیت ۶۰ kWh_e در ساختمان ۱ و با ظرفیت ۳۰ kWh_e در ساختمان ۲ که حداقل ٪۲۰ از کل ظرفیت آن به دلایل فنی که در بخش ۲-۳ به آن اشاره شد در ذخیره‌ساز باقی می‌ماند. بازده شارژ و دشارژ هر دو ذخیره‌ساز ٪۹۵، حداکثر نرخ شارژ و دشارژ به ترتیب برابر ۶۰ kW_e و ۳۰ kW_e می‌باشد و هزینه نگهداری

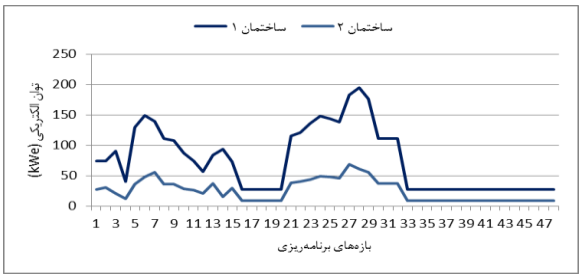
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.11.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

آن p/kWh_e ۰/۵ است. یک دیگ بخار با ظرفیت kW_{th} ۸۵ و kW_{th} ۳۰۰ به ترتیب در ساختمان ۱ و ۲ که بازده آن ٪۸۰ می‌باشد. یک سیستم ذخیره‌ساز حرارتی با ظرفیت kWh_{th} ۲۰ در هر یک از ساختمان‌های ۱ و ۲ که بازده شارژ و دشارژ آن ٪۹۵ می‌باشد و حد شارژ و دشارژ آن kW_{th} ۲۰ و هزینه نگهداری آن p/kWh_{th} ۰/۱ است.

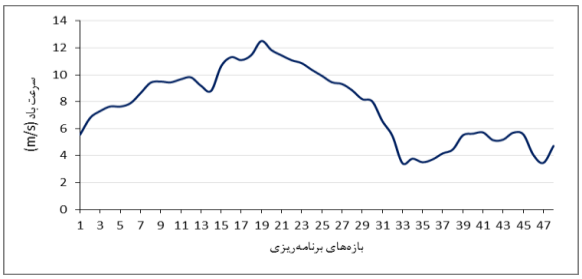
بازه‌های برنامه‌ریزی ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شده است و طول مدت برنامه‌ریزی ۲۴ ساعت آینده می‌باشد بنابراین در کل ۴۸ بازه برنامه‌ریزی وجود دارد. زمان شروع برنامه‌ریزی ساعت ۸ صبح است و زمان پایان برنامه‌ریزی ساعت ۸ صبح روز بعد می‌باشد. در برنامه‌ریزی بارهای خانگی، تعداد ۱۲ بار اصلی برای هر خانه هوشمند در نظر گرفته شده است، که این وسایل به دو دسته غیرقابل انتقال و قابل انتقال تقسیم‌بندی شده‌اند. دسته‌بندی و مشخصات هر یک از بارهای مذکور در جدول (۱) در قسمت ضمایم آورده شده است [۱۷,۱۶].

همان طور که قبلا نیز ذکر شد بارهای غیرقابل انتقال در برنامه‌ریزی کاهش مصرف عموما شرکت‌پذیر نیستند اما داخل کردن داده‌های آن‌ها برای مدل‌سازی بهتر تاثیرگذار خواهد بود؛ لذا برای هر یک از ساختمان‌های مورد مطالعه پروفیل باری ناشی از بارهای غیرقابل انتقال بر اساس زودترین زمان شروع، دیرترین زمان پایان، مدت زمان عملکرد هر وسیله و تعداد دفعات استفاده از آن‌ها، به صورت تصادفی و با در نظر گرفتن موارد ذکر شده در بخش ۲-۱-۱ ایجاد شده است (شکل ۲). پروفیل گرمای مصرفی برای ساختمان ۱ همان پروفیل فرض شده در مرجع [۱۸] می‌باشد و برای ساختمان ۲ نیز فرض شده است ۳ برابر ساختمان ۱ باشد. پروفیل گرمای مصرفی ساختمان‌ها تا انتهای شبیه‌سازی‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شوند.

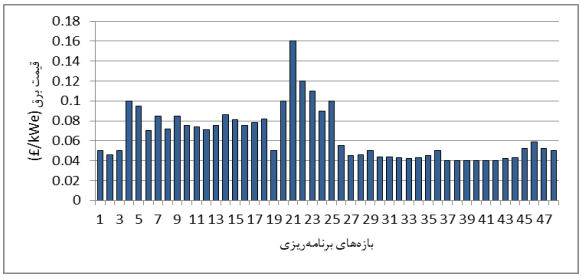
در این مطالعه مزرعه بادی شامل ۲۰ توربین بادی مجزا با بازده ٪۴۷ برای هر ساختمان است. قطر پره‌ها ۱/۶ m و سرعت باد مطابق شکل (۳) فرض شده است [۱۹]. $V_{cut\text{-}in}$ و $V_{cut\text{-}out}$ باد به ترتیب m/s ۵ و m/s ۲۵ می‌باشد و سرعت نامی باد m/s ۱۲ است. به ازای سرعت باد کمتر از m/s ۵ و بیشتر از m/s ۲۵ توان تولیدی توربین صفر و به ازای سرعت باد بین m/s ۱۲ تا m/s ۲۵ ثابت و برابر با توان خروجی در سرعت نامی باد می‌باشد. در سرعت‌های بین m/s ۵ و m/s ۱۲ خروجی توربین بادی بر اساس رابطه (۲۱) تغییر می‌کند. برنامه بهینه-سازی باید زمان دقیق عملکرد یا به عبارت دیگر وضعیت روشن و خاموش بودن وسایل در هر بازه را برای هر وسیله قابل انتقال بر اساس تعرفه‌های اعلام شده تعیین نماید. تعرفه‌ها به صورت زمان واقعی طبق آنچه که در شکل (۴) داده شده است به مشتری اعلام می‌شود [۱۵]. قیمت فروش برق به شبکه ثابت و برابر با p/kWh_e ۳ در نظر گرفته شده است.



شکل (۲): پروفیل بار ناشی از بارهای غیرقابل انتقال



شکل (۳): سرعت وزش باد [۱۹]



شکل (۴): تعرفه برق

۴- شبیه‌سازی

زمان‌بندی مصرف بارهای قابل انتقال از طریق حل مسئله بهینه‌سازی خطی که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، صورت می‌گیرد. مسائل بهینه‌سازی مذکور توسط CPLEX 11.2.1 تحت GAMS و توسط مدل MILP حل می‌شوند. در ادامه جهت ارزیابی مدل پیشنهادی ۳ سناریو متفاوت برای هر ساختمان بررسی می‌شود.

۴-۱- سناریو ۱: عدم برنامه‌ریزی بارهای قابل انتقال و عدم فروش برق

در این سناریو جهت مقایسه، به یک نمونه از الگوی مصرف بدون برنامه‌ریزی اشاره می‌شود لذا فرض می‌گردد تمام وسایل قابل انتقال در زودترین زمان شروع خود آغاز می‌شوند و ساختمان‌ها نمی‌توانند برق مازاد خود را به شبکه و یا ساختمان‌های دیگر بفروشند. تعادل توان الکتریکی به دست آمده در این سناریو برای ساختمان‌های ۱ و ۲ به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) آورده شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود اوج مصرف در ساعات اولیه شب که اوج بار شبکه نیز می‌باشد

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.11.9]

اتفاق افتاده است که این امر به دلیل عدم برنامه‌ریزی بهینه وسایل قابل انتقال می‌باشد. تعادل توان حرارتی نیز برای ساختمان‌های ۱ و ۲ به ترتیب در نمودارهای (۷) و (۸) نمایش داده شده‌اند. شکل‌های (۹) و (۱۰) سطح انرژی موجود در ذخیره‌سازها را به ترتیب برای ساختمان‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد. همان طور که می‌توان دید سطح شارژ هر دو ذخیره‌ساز در ابتدای برنامه‌ریزی حداکثر می‌باشد. اوج بار منحنی در ساعات اوج بار شبکه به وسیله دشارژ ذخیره‌سازها کاهش می‌یابد که موجب جذب توان کمتری از شبکه در این ساعات می‌شود. هر دو ذخیره‌ساز در پایان دوره مطالعه به سطح شارژ اولیه خود در ابتدای برنامه‌ریزی رسیده‌اند. در این سناریو کل هزینه ساختمان ۱، ۱۲۵/۱ £ و برای ساختمان ۲، ۴۳۷/۲ £ است. میزان توان الکتریکی گرفته شده از شبکه توسط ساختمان ۱، ۴۵۷ kW_e و توسط ساختمان ۲، ۳۱۵۸ kW_e می‌باشد. ژنراتور CHP، ۶۶٪ از توان الکتریکی و ۴۲٪ از توان حرارتی ساختمان ۱ را تامین می‌کند. در ساختمان ۲ نیز ژنراتور CHP، به ترتیب ۴۹٪ و ۳۲٪ از توان الکتریکی و حرارتی را تامین می‌نماید.

۲-۴- سناریو ۲: مشارکت بارهای قابل انتقال و فروش برق به شبکه

در این سناریو فرض می‌شود بارهای قابل انتقال نیز می‌توانند جهت کاهش اوج بار و نیز کاهش میزان برق گرفته شده از شبکه تا جایی که امکان دارد جابجا شوند و در بهینه‌سازی هزینه مصرف برق ساختمان مشارکت داشته باشند. همچنین فرض می‌شود ساختمان‌ها توان مازاد خود را تنها به شبکه تحویل دهند.

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) تعادل توان الکتریکی را به ترتیب برای ساختمان‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهند. در این سناریو کل هزینه تمام شده برای ساختمان ۱، ۱۱۴/۵ £ و برای ساختمان ۲، ۳۵۹/۸ £ می‌باشد که نسبت به سناریو قبل کاهش یافته است. علاوه بر این اوج مصرف از ساعات اولیه شب که قیمت برق نیز گران‌تر می‌باشد به ساعات اولیه روز منتقل شده است که این امر موجب کاهش خرید توان از شبکه در ساعات اوج بار شبکه و صرفه‌جویی در هزینه مصرف انرژی شده است. ساختمان ۱ به میزان ۱۱ kW_e از شبکه، توان خریداری می‌نماید که نسبت به سناریو قبل کاهش چشمگیری داشته است. همچنین، ۹۸۱ kW_e از توان الکتریکی مصرف شده در ساختمان ۲ از شبکه دریافت می‌شود که نسبت به سناریو قبل کاهش یافته است. تعادل توان حرارتی برای ساختمان‌های ۱ و ۲ به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده‌اند. ژنراتور CHP نیز ۹۲٪ از توان الکتریکی و ۵۹٪ از توان حرارتی ساختمان ۱ را تامین می‌کند و در ساختمان ۲، ۸۳٪ از توان الکتریکی و ۵۳/۶٪ از توان حرارتی به وسیله CHP تامین شده است. شکل (۱۵) سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان ۱ را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ملاحظه می‌گردد بر خلاف سناریو قبل سطح شارژ اولیه ذخیره‌ساز ساختمان ۱ در ابتدای برنامه‌ریزی بسیار کم می‌باشد که به دلیل جابجایی بارهای قابل انتقال از ساعات گران‌قیمت به ساعات با قیمت برق ارزان‌تر نیاز به استفاده از ذخیره‌ساز کاهش یافته است. سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان ۲ نیز در شکل (۱۶) نشان داده شده است.

۳-۴- سناریو ۳: سناریو ۲ و تعامل میان ساختمان‌ها

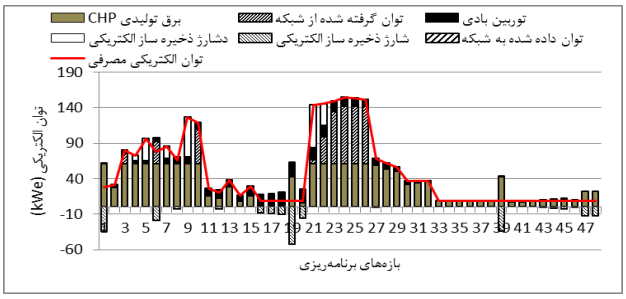
در این سناریو علاوه بر مشارکت بارهای قابل انتقال و دادوستد انرژی با شبکه، تعامل میان ساختمان‌های هوشمند نیز در نظر گرفته شده است. این تعامل موجب می‌شود تا ساختمان‌ها بتوانند در صورت نیاز از ظرفیت مازاد شارژ موجود در ذخیره‌سازهای الکتریکی سایر ساختمان‌های دیگر استفاده کنند. قیمت فروش برق مبادله‌ای میان ساختمان‌ها ۶ p/kWh_e فرض می‌شود. تابع هدف طبق رابطه (۳۱) باید به طور همزمان هزینه ساختمان‌ها را کمینه نماید. از آنجا که هیچ یک از ساختمان‌ها نسبت به دیگری ارجحیتی ندارد لذا ضرایب وزنی که به هر یک از دو ساختمان اختصاص داده شده است ۰/۵ خواهد بود.

پروفیل بار و تعادل توان الکتریکی برای ساختمان‌های ۱ و ۲ به ترتیب در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده است. در این سناریو مشارکت میان ساختمان‌ها باعث شده است تا ساختمان ۲ در برخی ساعات که قیمت خرید برق از شبکه گران‌تر از قیمت برق فروخته شده توسط ساختمان ۱ است توان مورد نیاز خود را از طریق ساختمان ۱ تامین نماید. به طوری که در این سناریو ساختمان ۲ در کل دوره مطالعه ۲۲۶/۷ kW_e از توان الکتریکی مورد نیاز خود را از ساختمان ۱، ۵۷۴ kW_e را از شبکه و مابقی را به وسیله منابع تولید انرژی خود تامین نموده است. در مقایسه با سناریو قبل میزان توان دریافتی از شبکه توسط ساختمان ۲ باز هم کاهش یافته است. ساختمان ۱ نیز ۸ kW_e از توان الکتریکی مورد نیاز خود را از شبکه و مابقی را از منابع تولید انرژی محلی خود دریافت نموده است. تعادل بهینه توان حرارتی ساختمان‌های ۱ و ۲ به ترتیب در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده‌اند. در این سناریو ژنراتور CHP، ۶۱/۴٪ از توان حرارتی مورد نیاز ساختمان ۱ و ۵۳/۶٪ از توان حرارتی مصرفی ساختمان ۲ را فراهم نموده است. شکل‌های (۲۱) و (۲۲) به ترتیب سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان‌های ۱ و ۲ را نشان می‌دهند. همان طور که در شکل‌های مربوطه مشاهده می‌شود سطح شارژ اولیه در ابتدای برنامه‌ریزی برای هر دو ساختمان بیش‌ترین ظرفیت ذخیره‌ساز می‌باشد و در انتهای دوره مطالعه به سطح شارژ اولیه خود رسیده‌اند.

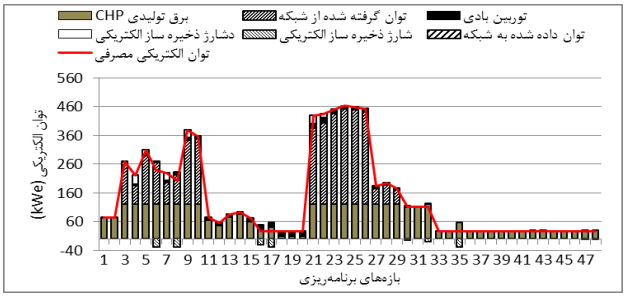
با مقایسه شکل‌های (۱۸) و (۲۲) می‌توان دریافت که ساختمان ۲ در بازه‌هایی که ذخیره‌ساز آن خالی می‌باشد در صورت نیاز از ذخیره‌ساز ساختمان ۱ استفاده نموده است. در این سناریو مشارکت میان ساختمان‌ها موجب کاهش هزینه‌های هر دو ساختمان شده است. به طوری که کل هزینه ساختمان ۱ (۱۰۹/۸ £) نسبت به سناریوهای ۱ و ۲ به ترتیب ۱۲/۲٪ و ۴/۱٪ کاهش یافته است. همچنین در هزینه ساختمان ۲ که ۳۵۴ £ است نسبت به سناریوهای ۱ و ۲ به ترتیب

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.11.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

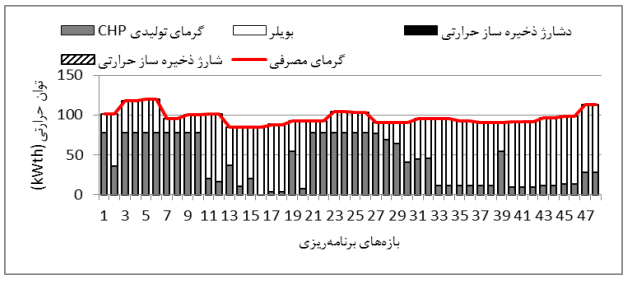
۱۹٪ و ۱/۶٪ صرفه‌جویی شده است. توان تولیدی توسط ژنراتور CHP در این سناریو برای ساختمان ۱ نسبت به سناریوهای ۱ و ۲ به ترتیب به میزان ۳۰/۹٪ و ۳/۷٪ افزایش یافته است. برای ساختمان ۲ میزان توان تولیدی ژنراتور CHP از ۳۳۹۷/۹ kW_e در سناریو ۱ به kW_e ۵۷۴۹ افزایش یافته است و نسبت به سناریو ۲ بدون تغییر مانده است. نتایج عددی سناریوهای مورد بررسی جهت مقایسه برای ساختمان‌های ۱ و ۲ به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده‌اند.



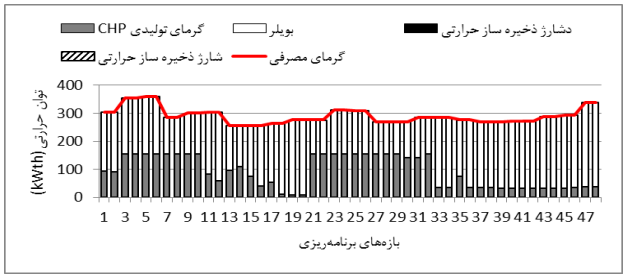
شکل (۵): سناریو ۱: تعادل توان الکتریکی در ساختمان ۱



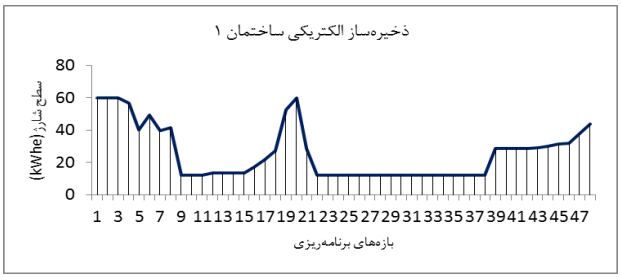
شکل (۶): سناریو ۱: تعادل توان الکتریکی در ساختمان ۲



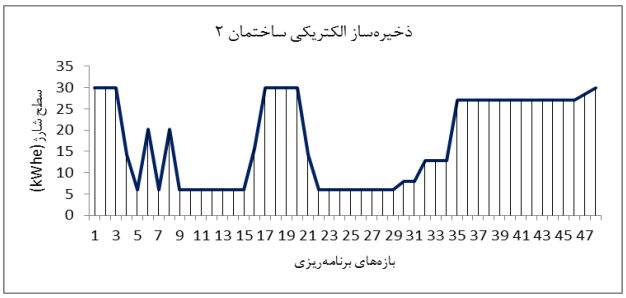
شکل (۷): سناریو ۱: تعادل توان حرارتی در ساختمان ۱



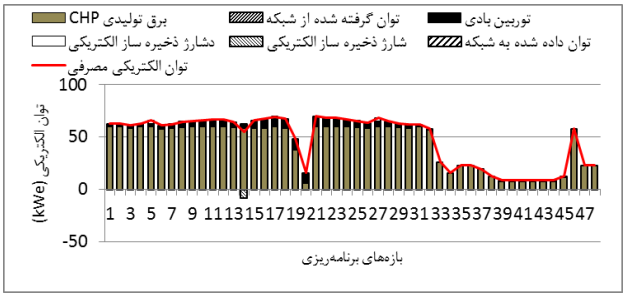
شکل (۸): سناریو ۱: تعادل توان حرارتی در ساختمان ۲



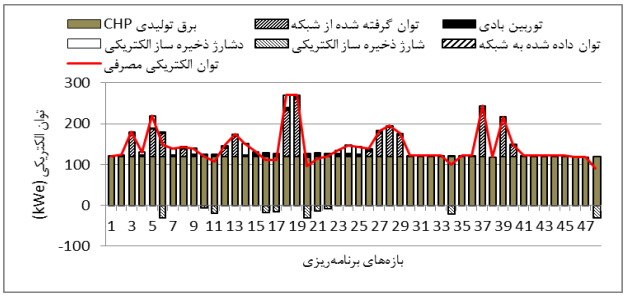
شکل (۹): سناریو ۱: سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان ۱



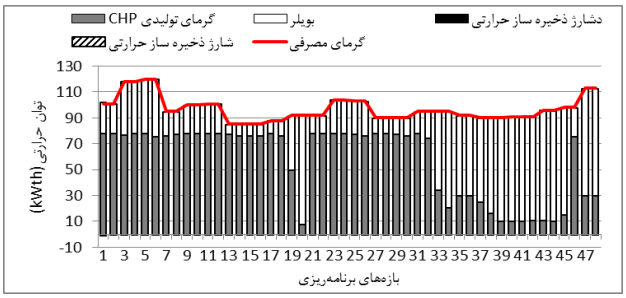
شکل (۱۰): سناریو ۱: سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان ۲



شکل (۱۱): سناریو ۲: تعادل توان الکتریکی در ساختمان ۱



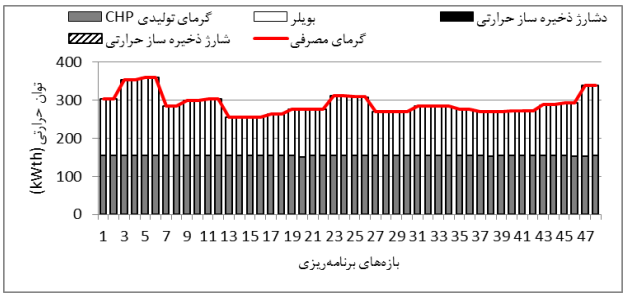
شکل (۱۲): سناریو ۲: تعادل توان الکتریکی در ساختمان ۲



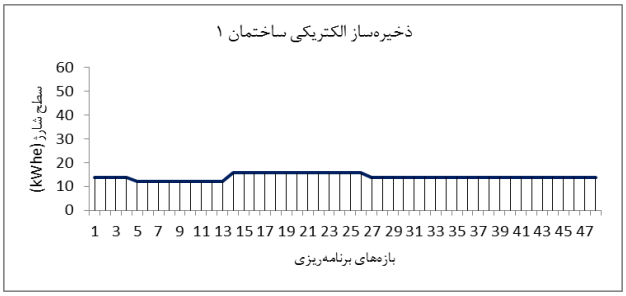
شکل (۱۳): سناریو ۲: تعادل توان حرارتی در ساختمان ۱

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

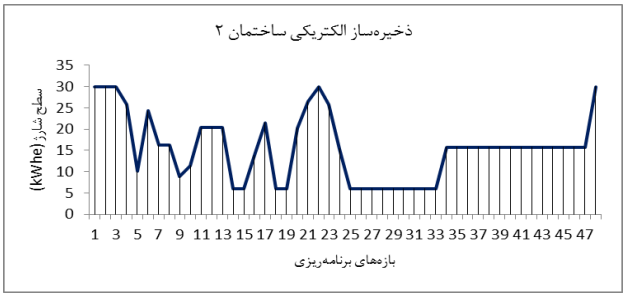
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.11.9]



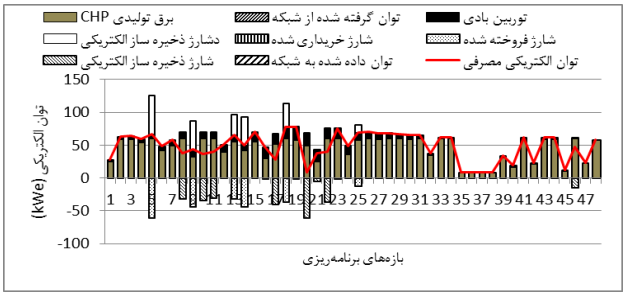
شکل (۱۴): سناریو ۲: تعادل توان حرارتی در ساختمان ۲



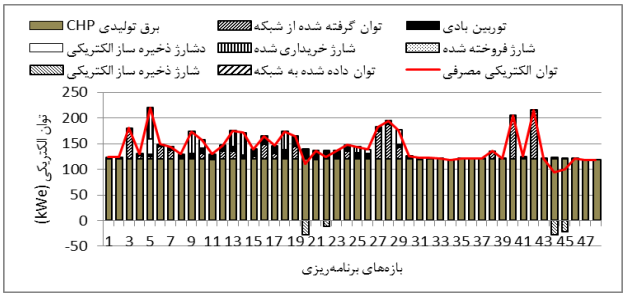
شکل (۱۵): سناریو ۲: سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان ۱



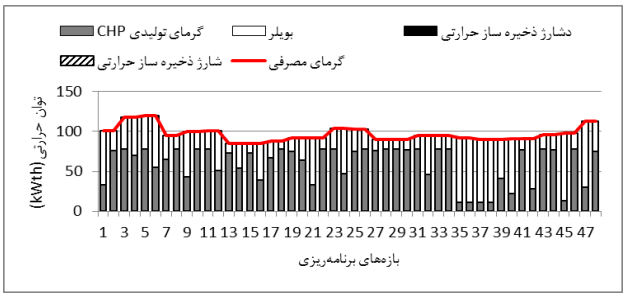
شکل (۱۶): سناریو ۲: سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان ۲



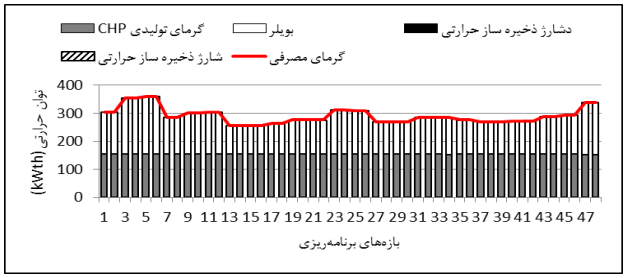
شکل (۱۷): سناریو ۳: تعادل توان الکتریکی در ساختمان ۱



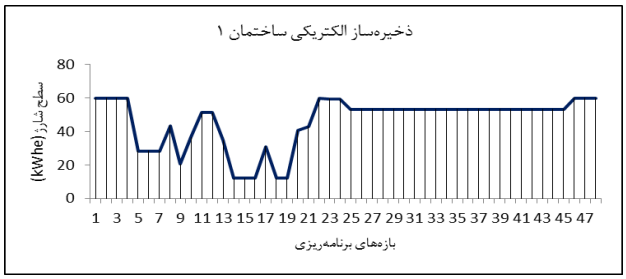
شکل (۱۸): سناریو ۳: تعادل توان الکتریکی در ساختمان ۲



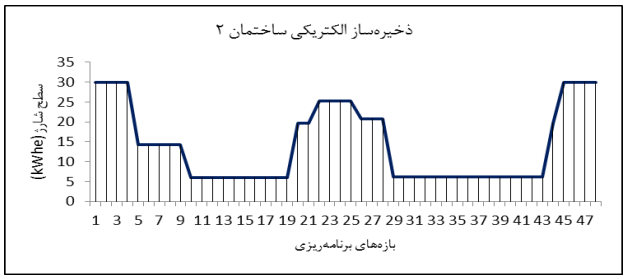
شکل (۱۹): سناریو ۳: تعادل توان حرارتی در ساختمان ۱



شکل (۲۰): سناریو ۳: تعادل توان حرارتی در ساختمان ۲



شکل (۲۱): سناریو ۳: سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان ۱



شکل (۲۲): سناریو ۳: سطح شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان ۲

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل خطی آمیخته با عدد صحیح جهت برنامه‌ریزی بارهای خانگی و بهره‌برداری بهینه از منابع تولید انرژی با در نظر گرفتن تعامل میان ساختمان‌های هوشمند ارائه گردید. این تعامل میان دو ساختمان هوشمند ۳۰ و ۹۰ واحدی برقرار گردید به نحوی که ساختمان‌ها ضمن تبادل اطلاعات به دادوستد انرژی با یکدیگر نیز می‌پردازند. نتایج شبیه‌سازی مدل پیشنهادی برای سه سناریو متفاوت حاکی از آن است که در صورتی که ساختمان‌ها ضمن دادوستد انرژی با شبکه بتوانند با ساختمان‌های مجاور خود نیز به تبادل انرژی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.11.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

بپردازند قادر خواهند بود در هزینه‌های خود صرفه‌جویی بیشتری نمایند. نشان داده شد که ایجاد تعامل میان ساختمان‌ها باعث افزایش میزان تولید ژنراتور CHP، افزایش حق انتخاب در خرید و فروش برق و همچنین افزایش مشارکت مصرف‌کنندگان در امر مدیریت مصرف انرژی می‌گردد. کمک به تعادل عرضه و تقاضا یکی دیگر از مزایای این تعامل به شمار می‌رود. در ساعات اوج بار شبکه که معمولا قیمت برق نیز بالا می‌باشد ساختمان‌ها می‌توانند با اشتراک ذخایر و تولیدات مازاد خود با سایر مصرف‌کنندگان به بهره‌برداران شبکه جهت تعادل عرضه و تقاضا کمک نمایند. این امر باعث کاهش مشکلات بهره‌برداری در ساعات اوج بار و کاهش تولید نیروگاه‌های با سوخت فسیلی در این ساعات می‌شود.

جدول (۱): مشخصات و دسته‌بندی وسایل خانگی [۱۷,۱۶]

ردیف	بار مصرفی	نوع بار	توان مصرفی (kW_e)	مدت عملکرد (h)	[زودترین زمان شروع و دیرترین زمان پایان]
۱	یخچال	غیرقابل انتقال	۰/۳	۲۴	[۰ و ۲۴]
۲	مایکروویو	غیرقابل انتقال	۱/۷	۰/۵	[۸ و۱۰]، [۱۰و ۱۲]، [۱۴ و ۱۶]،[۲۱ و ۲۳]
۳	تلویزیون	غیرقابل انتقال	۰/۳	۴	[۹ و ۱۵]، [۱۸ و ۲۴]
۴	لامپ رشته‌ای	غیرقابل انتقال	۰/۸۴	۶	[۱۸ و ۲۴]
۵	لامپ مهتابی	غیرقابل انتقال	۰/۱	۶	[۱۸ و ۲۴]
۶	جاروبرقی	غیرقابل انتقال	۱/۲	۰/۵	[۱۰ و ۱۳]
۷	رایانه	غیرقابل انتقال	۰/۳	۳	[۱۰ و ۱۵]،[۱۹ و ۲۳]
۸	رایانه قابل‌حمل	غیرقابل انتقال	۰/۱	۲	[۱۰ و ۱۵]، [۱۸ و ۲۱]
۹	لباس‌شویی	قابل انتقال وقفه‌ناپذیر	۱	۱/۵	[۹ و ۱۲]
۱۰	ظرف‌شویی	قابل انتقال وقفه‌ناپذیر	۱	۳	[۹ و ۱۷]
۱۱	لباس خشک‌کن	قابل انتقال وقفه‌ناپذیر	۳	۱	[۱۲ و ۱۸]
۱۲	خودرو الکتریکی	قابل انتقال وقفه‌پذیر	۳/۵	۳	[۱۸ و ۸]

جدول (۲): نتایج عددی سناریوهای مورد بررسی برای ساختمان هوشمند ۱

	هزینه مصرف انرژی (£)	توان خریداری شده از شبکه (kW_e)	توان تولیدی *CHP* (kW_e)	خرید توان از ساختمان دیگر (kW_e)	فروش توان به ساختمان دیگر (kW_e)
سناریو ۱	۱۲۵/۱	۴۵۷	۱۵۱۶/۲۳	۰	۰
سناریو ۲	۱۱۴/۵	۱۱	۲۱۱۲/۷۷	۰	۰
سناریو ۳	۱۰۹/۸	۸/۴۸	۲۱۹۴/۳۴	۰	۲۲۶/۷

جدول (۳): نتایج عددی سناریوهای مورد بررسی برای ساختمان هوشمند ۲

	هزینه مصرف انرژی (£)	توان خریداری شده از شبکه (kW_e)	توان تولیدی *CHP* (kW_e)	خرید توان از ساختمان دیگر (kW_e)	فروش توان به ساختمان دیگر (kW_e)
سناریو ۱	۴۳۷/۲	۳۱۵۸	۳۳۹۷/۹۲	۰	۰
سناریو ۲	۳۵۹/۸	۹۸۱	۵۷۴۸/۹۶	۰	۰
سناریو ۳	۳۵۴	۵۷۳/۸۶	۵۷۴۸/۶۸	۲۲۶/۷	۰

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.11.9]

اندیس‌ها

K	بارهای مصرفی در هر خانه
B	تعداد ساختمان‌های هوشمند
H	تعداد خانه‌ها در هر ساختمان هوشمند
T	بازه زمانی

پارامترها

a_t	قیمت خرید برق از شبکه در بازه t (£/kWh$_e$)
A	مساحت پره توربین بادی (m^2)
C_k	میزان توان مصرفی بار kام (kW$_e$)
C_b^{CHP}	ظرفیت ژنراتور CHP ساختمان b (kW$_e$)
C_b^{Boiler}	ظرفیت دیگ بخار ساختمان b (kW$_{th}$)
$E_{h,k}$	دیرترین زمان مجاز پایان بار k در خانه h
$S_{h,k}$	زودترین زمان مجاز شروع بار k در خانه h
$H_{b,t}$	گرمای مصرفی در ساختمان b در بازه t (kW$_{th}$)
m_{ELE}	هزینه نگهداری ذخیره‌ساز الکتریکی (£/kWh$_e$)
n_E	قیمت فروش برق به شبکه (£/kWh$_e$)
n_B	قیمت فروش برق به ساختمان‌های دیگر (£/kWh$_e$)
m_{THS}	هزینه نگهداری ذخیره‌ساز حرارتی (£/kWh$_{th}$)
n_G	قیمت گاز طبیعی (£/kWh)
$D_{h,k}$	زمان عملکرد بار k در خانه h
α	بازده الکتریکی ژنراتور CHP
β	بازده دیگ بخار
Γ	نسبت تبدیل گرما به برق CHP
Δ	مدت زمان هر بازه (h)
η_{ELE}	بازده شارژ/دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
η_{THS}	بازده شارژ/دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی
$L_{b,t}$	توان مصرفی بارهای غیرقابل انتقال در ساختمان b در بازه t (kW$_e$)
$Se_b^{\min}$	حداقل ظرفیت ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان b kWh$_e$)
$Se_b^{\max}$	حداکثر ظرفیت ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان b (kWh$_e$)
$DE_b^{\max}$	حداکثر نرخ دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان b (kW$_e$)
$DE_b^{\min}$	حداقل نرخ دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان b (kW$_e$)
$CE_b^{\min}$	حداقل نرخ شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان b (kW$_e$)
$CE_b^{\max}$	حداکثر نرخ شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان b (kW$_e$)
C_b^{THS}	ظرفیت ذخیره‌ساز حرارتی ساختمان b (kWh$_{th}$)
$DT_b^{\min}$	حداقل نرخ دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی ساختمان b (kW$_{th}$)
$DT_b^{\max}$	حداکثر نرخ دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی ساختمان b (kW$_{th}$)
$CT_b^{\min}$	حداقل نرخ شارژ ذخیره‌ساز حرارتی ساختمان b (kW$_{th}$)
$CT_b^{\max}$	حداکثر نرخ شارژ ذخیره‌ساز حرارتی ساختمان b (kW$_{th}$)

متغیرهای مثبت

$Ex_{b,t}$	برق تحویلی به شبکه توسط ساختمان b در بازه t (kW$_e$)
$f_{b,t}$	دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی ساختمان b در بازه t (kW$_{th}$)
$g_{b,t}$	شارژ ذخیره‌ساز حرارتی ساختمان b در بازه t (kW$_{th}$)
$In_{b,t}$	برق دریافتی از شبکه توسط ساختمان b در بازه t (kWh$_e$)
ISe_b	حالت اولیه ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان b (kWh$_e$)
ISt_b	حالت اولیه ذخیره‌ساز حرارتی ساختمان b (kWh$_{th}$)
B_b	هزینه برق روزانه ساختمان b (£)
$Se_{b,t}$	برق موجود در ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان b در بازه t (kWh$_e$)
$St_{b,t}$	گرمای موجود در ذخیره‌ساز حرارتی ساختمان b در بازه t (kWh$_{th}$)
$wc_{b,t}$	خروجی ژنراتور CHP ساختمان b در بازه t (kW$_e$)
$x_{b,t}$	خروجی دیگ بخار ساختمان b در بازه t (kW$_{th}$)
$y_{b,t}$	دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان b در بازه t (kW$_e$)
$z_{b,t}$	شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان b در بازه t (kW$_e$)

متغیرهای باینری

$Te_{b,h,k,t}$	اگر بار k در ساختمان b در خانه h در بازه t خاتمه یابد ۱ است، در غیر این صورت صفر است.
$Ts_{b,h,k,t}$	اگر بار k در ساختمان b در خانه h در بازه t آغاز شود ۱ است، در غیر این صورت صفر است.
$w_{b,h,k,t}$	اگر بار k در ساختمان b در خانه h در بازه t در حال انجام باشد ۱ است، در غیر این صورت صفر است.
$T_{b,t}^z$	اگر ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان b در بازه t در حال شارژ باشد ۱ است، در غیر این صورت صفر است.
$T_{b,t}^y$	اگر ذخیره‌ساز الکتریکی ساختمان b در بازه t در حال دشارژ باشد ۱ است، در غیر این صورت صفر است.
$T_{b,t}^g$	اگر ذخیره‌ساز حرارتی ساختمان b در بازه t در حال شارژ باشد ۱ است، در غیر این صورت صفر است.
$T_{b,t}^f$	اگر ذخیره‌ساز حرارتی ساختمان b در بازه t در حال دشارژ باشد ۱ است، در غیر این صورت صفر است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.11.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

مراجع

[۱] مهدی پرویزی مساعد، فرید فرمانی، امجد انوری مقدم، اشکان رحیمی کیان، حسن منصف "جایابی و تعیین اندازه بهینه و چند هدفه مولدهای انرژی تجدیدپذیر در یک شبکه توزیع با در نظر گرفتن مدل بار"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۲، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۴.

[۲] بهنام نامور بهرغانی، محمد آقا شفیعی، معین ابوالقاسمی، محمد مرادی دالوند، محمد احمدیان "تعیین اندازه بهینه منابع تولید پراکنده ریز شبکه مستقل از شبکه جهت تامین بارهای الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن تاثیر هزینه های سرمایه گذاری، بهره برداری و زیست محیطی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۲، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۴.

[3] M. Tasdighi, P. J. Salamati, A. Rahimikian, H. Ghasemi, "*Energy Management in a Smart Residential Building*," Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 128-133, May 2012.

[4] X. Hao, Y. Wang, Ch. Wu, A. Y. Wang, L. Song, Ch. Hu, L. Yu, "*Smart Meter Deployment Optimization for Efficient Electrical Appliance State Monitoring*," Smart Grid Communications, Tainan, pp, 25-30, November 2012.

[5] Y. Agarwal, T. Weng, R. K. Gupta, "*Understanding the Role of Buildings in a Smart Microgrid*," Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), pp. 1-6, March 2011.

[6] Z. Xu, X. Guan, Q. ShanJia, J. Wu, D. Wang, S. Chen, "*Performance Analysis and Comparison on Energy Storage Devices for Smart Building Energy Management*," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 4, pp. 2136-2147, December 2012.

[7] P. Stluka, D. Godbole, T. Samad, "*Energy Management for Buildings and Microgrids*," 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC) Orlando, FL, USA, December 2011.

[8] X. Guan. Z. Xu, Q.S. Jia, "*Energy-Efficient Buildings Facilitated by Microgrid*," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, Issue. 3, December 2010.

[9] H. M. Lugo-Cordero, A.Fuentes-Rivera, R. K. Guha, E. I. Ortiz-Rivera "*Particle Swarm Optimization for Load Balancing in Green Smart Homes*," IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), New Orleans, pp. 715-720, June 2011.

[10] Z. Zhu, J. Tang, S. Lambotharan, W. H. Chin, Zh. Fan, "*An Integer Linear Programming Based Optimization for Home Demand-side Management in Smart Grid*," IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington, DC. pp. 1-5, Jan 2012.

[11] J. Hyung-Ghul, S. Kim, J. Sung-Kwan, "*Smart Heating and Air Conditioning Scheduling Method Incorporating Customer Convenience for Home Energy Management System*," IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 59, Issue. 2, pp. 316-322, May 2013.

[12] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, "*Load Commitment in a Smart Home*," Applied Energy, Vol. 96, pp. 45-54, January 2012.

[13] S. Z. Althaher, J. Mutale, "*Management and Control of Residential Energy through Implementation of Real Time Pricing and Demand Response*," Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE, pp. 1-7, July 2012.

[14] F. D. Angelis, M. Boara, D. Fuselli, S. Squartini, "*Optimal Home Energy Management under Dynamic Electrical and Thermal Constraints*," IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 9, Issue. 3, pp. 1518-1527, August 2013.

[15] D. Zhang, N. Shah, L. G. Papageorgiou, "*Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid*," Energy Conversion and Management, vol. 74, pp. 209-222, October 2013.

[16] M. Vasirani, S. Ossowski, "*A Collaborative Model for Participatory Load Management in the Smart Grid*," CEUR Workshop Proceedings, Vol. 918, pp. 57-70, 2012.

[17] Domestic Electrical Energy Usage. <http://www.mpoweruk.com/electricity_demand.htm>

[18] D. Zhang, L. G. Papageorgiou, N. J. Samsatli ,N. Shah, "*Optimal Scheduling of Smart Homes Energy Consumption with Microgrid*," ENERGY 2011, The First International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies.

[19] Online available at: http://www.berthon.co.uk/lymington-marina/lymington-wind-speed-weather.html.

زیرنویس‌ها

[1] Combined Cooling, Heating, and Power

[2] Combined Heating and Power

[3] Particle Swarm Optimization

[4] Integer Linear Programming

[5] Time Of Use

[6] Real Time Pricing

[7] Building Energy Management System

[8] Distributed Generation

[9] Mixed Integer Linear Programming

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.11.9]