

ارائه چارچوبی برای مدیریت انرژی خانه هوشمند: برنامه‌ریزی بهینه تجهیزات خانگی و برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر

عباس محمدویسی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، علیرضا حاتمی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران - a.mohammadveisi@basu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا - همدان - ایران - hatamisharif@basu.ac.ir

چکیده: سهم عمده مصرف بخش خانگی از یک طرف و پیشرفت‌های تکنولوژی صورت گرفته از طرف دیگر توجه محققان را به مدیریت مصرف و پاسخ‌گویی بار در بخش خانگی جلب نموده است. در این مقاله یک خانه هوشمند در نظر گرفته شده است که دارای تجهیزات خانگی قابل کنترل و برنامه‌ریزی بوده و هم‌چنین مجهز به منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز انرژی (مانند باتری و خودرو الکتریکی) است. خانه مذکور قادر به مبادله توان با قیمت زمان - حقیقی با شبکه است. در این مقاله روشی برای حداقل کردن هزینه برق خانه هوشمند پیشنهاد شده است. هدف ارائه چارچوبی جدید برای برنامه‌ریزی زمان استفاده از تجهیزات خانگی، تعیین زمان شارژ و دشارژ منابع ذخیره‌ساز و بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر، با رعایت قیود بهره‌برداری و کارکرد تجهیزات خانگی، منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز انرژی است، به طوری که هزینه برق مصرفی حداقل گردد. مدل ریاضی مسئله از نوع برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح است که با نرم‌افزار GAMS حل شده است. مطالعات عددی بیانگر کارایی روش پیشنهادی در برنامه‌ریزی خانه هوشمند است.

واژه‌های کلیدی: خانه هوشمند، مدیریت مصرف انرژی الکتریکی، قیمت زمان - حقیقی، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح.

An energy management framework for a smart home: optimal appliances scheduling and operational planning of renewable energy resources

A. Mohammadveisi¹, A. Hatami²

1, 2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran

Abstract: Within the next years, energy demand at the residential sector has been increased as a result of economic developments. On the other hand, intelligent and programmable household appliances and smart metering have been widely used. This paper proposes an energy management system for residential consumer to minimize its electricity cost. A framework is presented to determine i) the optimal operation and scheduling of household appliances; ii) charging/discharging cycles of battery storage and plug-in hybrid electric vehicles; and iii) optimal operation of distributed resources renewable (small wind turbines and photoVoltaic systems). The smart home is connected to the grid and the power consumption can be balanced by exchanging the electricity between them at real time pricing. The problem is formulated as a mixed integer linear programming (MILP) and solved by commercial software (GAMS). A realistic case study is presented to verify the efficiency and usefulness of the developed models.

Keywords: Smart home, Energy management, Real time pricing, Mixed Integer Linear Programming (MILP).

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۷/۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۲/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۳/۱۸

نام نویسنده مسئول: علیرضا حاتمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - همدان - خیابان مهدیه - دانشگاه بوعلی سینا - دانشکده مهندسی - گروه برق

۱- مقدمه

بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد، بخش خانگی، قسمت عمده‌ای از مصرف انرژی را به خود اختصاص داده است [۱]. برای مثال در کشورهای عضو اتحادیه اروپا بیش از ۲۸٪ مصرف برق، مربوط به بخش خانگی است [۲]. در نتیجه، طی سالیان اخیر، توجه بسیاری از محققین معطوف به مدیریت انرژی در بخش خانگی شده و تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده است. تحقیقات صورت گرفته را می‌توان در سه بخش شامل: (۱) افزایش بازدهی تجهیزات خانگی؛ (۲) اتوماسیون تجهیزات خانگی و برنامه‌ریزی زمان استفاده از تجهیزات و (۳) استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی و تجدیدپذیر، تقسیم نمود [۳].

در بخش اول، فعالیت‌های گسترده‌ای از ابتدای دهه ۹۰ میلادی صورت گرفته است. این فعالیت‌ها شامل وضع استانداردهای اختیاری و اجباری برای طراحی و ساخت تجهیزات و مقدار انرژی مصرفی آن‌ها و ... است. در نتیجه اقدامات صورت گرفته، تجهیزات خانگی با بازدهی بسیار بالا ساخته شده است [۴].

در بخش دوم، با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در تکنولوژی شبکه‌های کامپیوتری و مخابراتی، پیدایش تجهیزات اندازه‌گیری هوشمند و تجهیزات کنترل اتوماتیک، مفهوم خانه هوشمند در تحقیقات صورت گرفته معرفی شده است [۵-۶]. در خانه هوشمند، اتوماسیون تجهیزات خانگی و برنامه‌ریزی بهینه زمان استفاده از تجهیزات طی چند سال اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. با استفاده از تجهیزات هوشمند خانگی امکان برنامه‌ریزی بهینه تجهیزات خانگی فراهم شده و می‌توان زمان استفاده برخی از تجهیزات را از زمان‌های اوج مصرف به زمان‌های کم‌باری یا میان‌باری تغییر داد و در نتیجه به کاهش پیک بار شبکه کمک نمود [۷-۱۶].

در [۷] روشی برای برنامه‌ریزی تجهیزات سرمایشی و گرمایشی، با توجه به قیمت برق، پیش‌بینی دمای محیط و سطح رفاه افراد ارائه شده است که به دنبال حداقل کردن هزینه پرداختی است. مرجع [۸]، به شبیه‌سازی الگوریتم‌هایی برای کاهش پیک بار خانگی به‌روشن جابجایی بارهای قابل برنامه‌ریزی، با در نظر گرفتن تعامل بین فن‌آوری‌های اتوماسیون خانگی و نحوه رفتار انسانی پرداخته است. در مرجع [۹]، از مدل برنامه‌ریزی خطی (LP) برای بهینه‌سازی مقدار کاهش پیک بار سیستم از طریق دوره‌های کنترلی در برنامه‌های کنترل بار خانگی و صنعتی استفاده شده است. مرجع [۱۰] اثر مدیریت سمت مصرف بر کاهش پیک بار یک فیدر، با تغییر زمان استفاده از لوازم (بارهای) توان بالای بارهای خانگی خانه‌های متصل به آن را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این تحقیق اثرات منفی جابجایی بار بر آسایش و راحتی مصرف‌کنندگان و نیز پذیرش اقدامات مدیریت مصرف از سوی مشتریان نیز در نظر گرفته شده است. در مراجع [۱۱-۱۷]، به بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی کار تجهیزات هوشمند خانگی به‌منظور حداقل کردن هزینه برق پرداخته شده است. مدل ریاضی مسئله، بهینه‌سازی از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی بوده که بر اساس آن

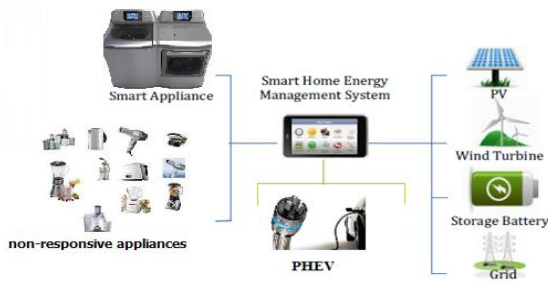
جابجایی بهینه زمان کارکرد تجهیزات خانگی از دوره‌های زمانی اوج بار شبکه به دوره‌های زمانی کم‌باری شبکه تعیین شده است، مسئله بهینه‌سازی بررسی شده، از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی [۱۵، ۱۲-۱۱]، الگوریتم ژنتیک [۱۳] و تئوری بازی [۱۴] است. در [۱۱] از روش قیمت‌گذاری زمان-استفاده در محاسبه هزینه برق استفاده شده است؛ در حالی که در [۱۵-۱۲]، روش قیمت‌گذاری زمان-حقیقی مورد استفاده قرار گرفته است. در [۱۶]، به بحث در مورد صرفه اقتصادی استفاده از تجهیزات هوشمند خانگی، با توجه به تعرفه‌های مختلف بر هزینه برق مشترکین و هم‌چنین میزان سرمایه‌گذاری لازم برای تهیه تجهیزات هوشمند خانگی پرداخته شده است.

در ارتباط با استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی و هم‌چنین منابع انرژی تجدیدپذیر برای مدیریت مصرف در بخش خانگی نیز کارهای متنوع و گسترده‌ای صورت گرفته است [۲۲-۱۷]. در [۱۷] به بحث استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی شامل باتری‌ها و خودروهای الکتریکی در مدیریت بارهای خانگی اشاره شده است. در [۲۰-۱۸] به مبحث استفاده از انرژی خورشیدی و باتری‌ها برای تامین بخشی از انرژی ساختمان‌های بزرگ اشاره شده است. هدف کاهش پیک بار شبکه با توجه به قیود بهره‌برداری است. در [۲۱] روشی برای پایش و کنترل نیروگاه‌های خورشیدی و بادی با استفاده از تکنولوژی زیگ-بی در مبحث مدیریت انرژی خانگی ارائه شده است. مرجع [۲۲] به بررسی طراحی ظرفیت مناسب منابع انرژی تجدیدپذیر برای ساختمان‌های بزرگ پرداخته است. در مرجع [۲۳] به مدیریت انرژی و بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز با تاکید بر خودروهای الکتریکی در سیستم‌های انرژی کوچک پرداخته شده است. در [۲۴] الگوریتمی مبتنی بر روش مرتب‌سازی (Regularization technique) برای برنامه‌ریزی تجهیزات خانگی در ابعاد بزرگ ارائه شده است. الگوریتم مذکور که مبتنی بر تکرار است برای برنامه‌ریزی تجهیزات خانگی با تعداد زیاد مناسب می‌باشد و پاسخ‌های به‌دست آمده بهینه نسبی می‌باشند. در مرجع مذکور، قیمت‌های زمان-حقیقی مورد استفاده قرار گرفته و تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی نیز در دسترس بوده و قابل برنامه‌ریزی است اما سیستم‌های فتوولتائیک و انرژی بادی مدل نشده‌اند. در [۲۵-۲۶] به برنامه‌ریزی هوشمند تجهیزات تهویه مطبوع خانگی با در نظر گرفتن رفاه و آسایش ساکنین پرداخته شده است و زیرساخت نرم‌افزاری لازم توسعه داده شده است. در [۲۷] الگوریتمی برای بهبود برنامه‌ریزی تجهیزات خانگی با در نظر گرفتن ویژگی‌های رفتار انسانی ارائه شده است. مرجع [۲۸] به برنامه‌ریزی هم‌زمان تجهیزات خانگی و منابع انرژی تجدیدپذیر (شامل خودروی الکتریکی و سیستم فتوولتائیک) با الگوریتم هوشمند بهینه‌سازی تجمعی ذرات (PSO) پرداخته است. در مرجع مذکور از قیمت‌های پیک بحرانی مبتنی بر زمان-استفاده برای خرید برق از شبکه استفاده شده است. مرجع [۲۹] به برنامه‌ریزی هم‌زمان تجهیزات خانگی و خودروی

۲- مدل سازی مسئله

۲-۱- فرضیات

در این مقاله یک خانه هوشمند مجهز به سیستم مدیریت انرژی، توربین بادی، مولد فتوولتائیک (PV)، ذخیره ساز انرژی الکتریکی (باتری)، خودروی الکتریکی (PHEV) و لوازم هوشمند همانند شکل (۱) در نظر گرفته می شود. لوازم الکتریکی خانگی به دو دسته تقسیم می شوند: دسته اول غیرقابل برنامه ریزی اند و بنابراین پاسخگو به قیمت های زمان متغیر نیستند همانند تلویزیون، کامپیوتر، روشنایی و ... دسته دوم لوازم هوشمند بوده و زمان عملکرد آن ها قابل جابجایی هستند (مانند ماشین لباسشویی، ماشین ظرفشویی و خشک کن لباس). خانه هوشمند متصل به شبکه بوده و می تواند با آن به مبادله انرژی الکتریکی تحت قیمت زمان - حقیقی بپردازد. سیستم مدیریت انرژی با توجه به قیمت های زمان - حقیقی (پیش بینی شده) به برنامه ریزی زمان استفاده از تجهیزات خانگی، زمان شارژ و دشارژ منابع ذخیره ساز و بهره برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر با رعایت قیود بهره برداری و کارکرد تجهیزات خانگی، منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره ساز انرژی می پردازد به طوری که هزینه برق مصرفی حداقل شود.



شکل (۱): نمایی از سیستم مورد مطالعه

۲-۲- مدل سازی لوازم هوشمند

با توجه به فرضیات بیان شده، مجموعه ای از لوازم هوشمند می تواند طوری برنامه ریزی شوند که هزینه پرداختی مصرف کننده به حداقل برسد. سیستم مدیریت انرژی، زمان های بهره برداری که لوازم هوشمند $(X_{i,j,t})$ باید روشن شوند و هزینه انرژی الکتریکی را بهینه کنند را برمیگزیند. تابع هدف به حداقل رساندن هزینه انرژی الکتریکی روزانه یک خانه هوشمند با قیمت های زمان - حقیقی همانند زیر بیان می شود:

$$\min \text{cost} = \sum_{t \in T} C_t \cdot \Delta t \cdot \left(Pn_{r,t} + \sum_i \sum_j Pr_{i,j,t} \cdot X_{i,j,t} \right) \quad (1)$$

در اینجا T به بازه زمانی برنامه ریزی، که در این مقاله روز پیش فرض شده است، اشاره دارد. بازه زمانی برنامه ریزی را می توان بر اساس بازه زمانی اعلام قیمت برق به بازه های کوچک تری تقسیم کرد. با در نظر گرفتن دوره زمان بندی ۱۵ دقیقه ای ($\Delta t = 1/4 \text{ hr}$)، تعداد

الکتریکی با روش برنامه ریزی خطی عدد صحیح پرداخته است. در [۳۰] سیستم عامل توزیع شده ای برای مدیریت تجهیزات خانگی از طریق یک شبکه بی سیم ارائه شده است. در [۳۱-۳۲] به برنامه ریزی تجهیزات خانگی با در نظر گرفتن ترکیب قیمتی زمان - حقیقی و تعرفه بلوکی برای کاهش نسبت متوسط به پیک مصرف پرداخته شده است. مرجع [۳۳] به کنترل بهینه سیستم های تهویه مطبوع با در نظر گرفتن قیمت زمان - حقیقی و پیش بینی دمای محیط بیرون می پردازد. همان طور که ملاحظه می شود، در تحقیقات بررسی شده، به برنامه ریزی هم زمان تجهیزات خانگی هم زمان با در نظر گرفتن منابع متعدد انرژی تجدیدپذیر (مشمول بر باتری، خودروی الکتریکی، توربین بادی کوچک و سیستم فتوولتائیک به طور هم زمان) پرداخته نشده است. به علاوه مراجع متعدد (مانند [۲۴] و [۲۸-۳۱]) از روش ارائه شده در [۱۴] برای مدل سازی تجهیزات هوشمند استفاده کرده اند؛ در حالی که مقاله حاضر روشی جدید برای مدل سازی تجهیزات هوشمند ارائه داده است که ساده تر از مدل ارائه شده در [۱۴] بوده و قابلیت پوشش انواع تجهیزات هوشمند را نیز داراست.

در این مقاله یک خانه هوشمند، دارای تجهیزات خانگی قابل کنترل و برنامه ریزی در نظر گرفته می شود که مجهز به منابع ذخیره ساز انرژی (مانند باتری و خودرو الکتریکی) و منابع انرژی تجدیدپذیر (انرژی خورشیدی و باد) است. خانه هوشمند فرض شده مجاز به خرید و یا فروش برق با قیمت های زمان - حقیقی است. هدف، برنامه ریزی زمان استفاده از تجهیزات خانگی، تعیین زمان شارژ و دشارژ منابع ذخیره ساز انرژی و استفاده حداکثری از منابع انرژی تجدیدپذیر است، به طوری که ضمن رعایت قیود بهره برداری منابع ذخیره ساز و تجدیدپذیر و هم چنین قیود مربوط به بهره برداری و استفاده از تجهیزات خانگی، هزینه برق مشتری حداقل مقدار ممکن گردد. مدل ریاضی مسئله از نوع برنامه ریزی خطی عدد صحیح است که توسط نرم افزار GAMS حل شده است.

نوآوری های مقاله حاضر عبارتند از:

الف- مدل سازی ریاضی فرآیندهای تجهیزات هوشمند (به منظور بهینه سازی هزینه برق مصرفی آن ها)؛

ب- ارائه چارچوبی برای برنامه ریزی هم زمان تجهیزات خانگی، ذخیره سازهای انرژی (شامل باتری و خودروی الکتریکی) و بهره برداری بهینه منابع انرژی پراکنده (بادی و خورشیدی) به منظور حداقل کردن هزینه برق.

ساختار مقاله بدین صورت تدوین شده است: در بخش دوم به بیان فرضیات، قیود بهره برداری تجهیزات مختلف خانگی و مدل سازی منابع انرژی ذخیره ساز و تجدیدپذیر پرداخته شده است. بخش سوم به معرفی حالت های بررسی شده، معرفی داده های مسئله و نتایج شبیه سازی می پردازد و بخش چهارم به نتیجه گیری پرداخته است. در انتها نیز به معرفی نمادها و سمبل های استفاده شده پرداخته است.

۳-۲- محدودیت‌های بهره‌برداری لوازم هوشمند

محدودیت‌های بهره‌برداری لوازم هوشمند به شرح زیر است:
 معادله (۳) بیانگر محدودیت زمانی بهره‌برداری وسیله j است که توسط بهره‌بردار مشخص می‌شود، که در آن بازه $[t_j^{st}, t_j^{et}]$ بیانگر بازه‌ای است که بهره‌بردار مایل است تجهیز j در آن بازه زمانی بهره‌برداری شود بدون اینکه آسایش وی تحت تاثیر قرار گیرد (t_j^{st} : زمان شروع و t_j^{et} : زمان پایان کارکرد تجهیز است). واضح است که افزایش بازه مذکور منجر به پاسخ بهتری از حل مسئله (از دید کاهش هزینه) می‌شود اما می‌تواند آسایش بهره‌بردار را تحت تاثیر قرار دهد.

$$\sum_{t=t_j^{st}}^{t_j^{et}} x_{i,j,t} = 1 \quad \forall i, j \quad (3)$$

برای عملکرد صحیح وسیله هوشمند لازم است ترتیب فرآیندهای مجازی هر تجهیز هوشمند مطابق پروفیل بار آن صورت گیرد. بنابراین اگر فرآیند i تجهیز هوشمند j در بازه زمانی t_1 انجام شود ($x_{i,j,t_1} = 1$)، فرآیند بعدی باید در بازه زمانی بزرگ‌تر از t_1 انجام شود ($x_{i+1,j,t_2} = 1, t_2 > t_1$). معادله (۴) این محدودیت را بیان می‌کند.

$$\left(\sum_{t_2=t_1+1}^T t_2 \cdot x_{i+1,j,t_2} - \sum_{t_1=1}^T t_1 \cdot x_{i,j,t_1} \right) \geq \Delta t \quad \forall i, j \quad (4)$$

معادله (۵) حداکثر زمان وقفه مجاز بین فرآیندهای مجازی متوالی تجهیز هوشمند را مدل می‌کند. پارامتر $T_{Off-Pr_{i,j}}$ حداکثر وقفه مجاز بین فرآیند مجازی i و $i+1$ مربوط به تجهیز هوشمند j را نشان می‌دهد. این پارامتر می‌تواند برای فرآیندهای مختلف هر تجهیز هوشمند، مقادیر متفاوتی داشته باشد.

$$\left(\sum_{t_2=t_1+1}^T t_2 \cdot x_{i+1,j,t_2} - \sum_{t_1=1}^T t_1 \cdot x_{i,j,t_1} \right) \cdot \Delta t \leq T_{Off-Pr_{i,j}} \quad \forall i, j \quad (5)$$

برای جلوگیری از تراکم سیستم توزیع، حداکثر توان جذب‌شده از شبکه را می‌توان محدود نمود. محدودیت مذکور با توجه به قرارداد مشتری و شرکت خرده‌فروش برق، تنظیم می‌شود و عموماً به صورت متغیر با زمان در نظر گرفته می‌شود. مطابق این محدودیت (که با رابطه (۶) مدل شده است)، مجموع توان مصرفی تجهیزات هوشمند و غیرهوشمند در هر بازه زمانی باید از مقدار توان ماکزیمم مجاز جذب‌شده از شبکه بیش تر نشود.

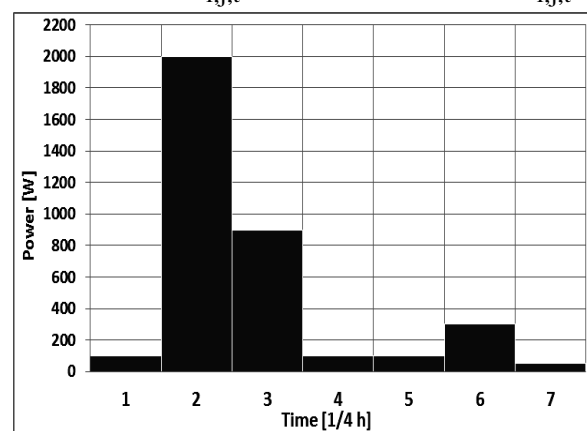
$$\left(Pnr_t + \sum_i \sum_j Pr_{i,j,t} \cdot x_{i,j,t} \right) \leq P_t^{\max}, \quad \forall t \quad (6)$$

کل دوره‌ها برای روز پیش $24 \times 4 = 96$ دوره خواهد بود. بنابراین $t \in \{1, 2, \dots, 96\}, T = 96$

در معادله (۱)، $Pr_{i,j,t}, Pnr_t, c_t$ و به ترتیب قیمت برق زمان-حقیقی، توان مصرفی لوازم غیرپاسخگو و توان مصرفی لوازم پاسخگو در دوره زمانی t است. که در آن i نشان‌دهنده فرآیند مجازی مجموعه لوازم هوشمند و اندیس j اشاره به نوع تجهیز (مانند ماشین ظرف‌شوئی، ماشین لباس‌شوئی و خشک‌کن) دارد. پروفیل توان مصرفی لوازم خانگی هوشمند در مرجع [۱۵] داده شده است. پروفیل بار هر تجهیز هوشمند را می‌توان با تعدادی خطوط شکسته مدل نمود؛ درواقع پروفیل بار از تعدادی فرآیند با سطوح توان تقریباً ثابت تشکیل شده است. به‌عنوان مثال در شکل (۲) پروفیل توان مصرفی یک ماشین لباس‌شوئی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ماشین لباس‌شوئی ۷ فرآیند با توان مصرفی ثابت دارد. بنابراین فرض شده است که ماشین لباس‌شوئی ترکیبی از هفت وسیله مجازی (فرآیند) است که هر فرآیند در ربع ساعت انجام می‌شود. بهره‌برداری از لوازم را می‌توان بین فرآیندها (در فرآیندهای مرزی)، بدون به خطر انداختن کیفیت خدمات لوازم به‌طور قابل قبولی به تاخیر انداخت. یکی از مزایای این روش سطح کنترلی بالای آن است که می‌توان در لوازم اعمال کرد و به جابجایی بار از زمان متناظر با پیک به زمان‌های متناظر با غیر پیک پرداخت. پارامتر $T_{Off-Pr_{i,j}}$ نشان‌دهنده ماکزیمم وقفه بین یک فرآیند Pr و فرآیند بعدی آن معرفی می‌شود. نتیجه برنامه‌ریزی، تعیین وضعیت‌های خاموش و روشن شدن لوازم هوشمند است. اگر عملکرد تجهیز هوشمند j را بتوان به i فرآیند مجزا تقسیم نمود، بردار $X_{i,j,t}$ (بیانگر وضعیت عملکرد) را به‌صورت زیر می‌توان تعریف کرد:

$$X_{i,j,t} = [x_{i,j,1}, x_{i,j,2}, \dots, x_{i,j,t}, \dots, x_{i,j,T}] \quad \forall i, j \quad (2)$$

در صورتی‌که وسیله مجازی در بازه زمانی t روشن باشد، $x_{i,j,t} = 1$ ؛ در صورت خاموش بودن $x_{i,j,t} = 0$



شکل (۲): پروفیل بار یک ماشین لباس‌شوئی

۲-۴- مدل سازی خودروی الکتریکی

$$\begin{cases} E_0^P \leq E_0^P + \sum_{t=1}^m (E^{Pp} x_t^{Pp} - E^{Pn} x_t^{Pn}) \leq E^{\max,P}, \forall m \leq g^P \\ E_0^P \leq E_0^P + \sum_{t=1}^m (E^{Pp} x_t^{Pp} - E^{Pn} x_t^{Pn}) - E^P \leq E^{\max,P}, \forall m \geq c^P \end{cases} \quad (9)$$

خودروی الکتریکی باید قبل از g^P با اندازه موردنیاز شارژ شود. بنابراین سطح شارژ خالص باتری خودروی الکتریکی باید معادل یا بزرگتر از مقدار مصرف انرژی بیرون از خانه، قبل از ترک خانه باشد. این نیاز به صورت زیر بیان می شود:

$$E_t^P \leq E_0^P + \sum_{m=1}^{g^P-1} (E^{Pp} x_m^{Pp} - E^{Pn} x_m^{Pn}) \quad (10)$$

باتری خودروی الکتریکی نمی تواند در بازه بیرون از خانه شارژ یا دشارژ شود، این محدودیت به صورت زیر بیان می شود:

$$x_t^{Pn}, x_t^{Pp} = 0, \quad \forall g^P \leq t \leq c^P \quad (11)$$

در حالتی که انرژی دشارژ شده خودروی الکتریکی، بیش از مصرف خود خانه باشد، انرژی ممکن است به شبکه فروخته شود. تحویل انرژی به شبکه در دوره t معادل با مصرف خودروی الکتریکی منهای مجموع شارژ خودروی الکتریکی و مصرف لوازم است، که به صورت زیر بیان می شود:

$$E_t^S = \eta^{P'} (E^{Pn} x_t^{Pn}) - (1/\eta^P) (E^{Pp} x_t^{Pp}) - Pn r_t - \sum_i \sum_j Pr_{i,j,t} x_{i,j,t} \quad \forall t \quad (12)$$

فروش انرژی را می توان به یک سطح حداکثر محدود کرد:

$$E_t^S \leq E^{\max,s}, \quad \forall t \quad (13)$$

معادله (۶) با در نظر گرفتن خودروی الکتریکی به صورت زیر بیان می شود:

$$\left((1/\eta^P) (E^{Pp} x_t^{Pp}) - \eta^{P'} (E^{Pn} x_t^{Pn}) + Pn r_t + \sum_i \sum_j Pr_{i,j,t} x_{i,j,t} \right) \leq P_t^{\max}, \quad \forall t \quad (14)$$

در نهایت تابع هدف با در نظر گرفتن خودروی الکتریکی به صورت زیر بیان می شود:

$$\min \text{ cost} = \sum_{t \in T} c_t \cdot \Delta t \cdot \left((1/\eta^P) (E^{Pp} x_t^{Pp}) - \eta^{P'} (E^{Pn} x_t^{Pn}) + Pn r_t + \sum_i \sum_j Pr_{i,j,t} x_{i,j,t} \right) \quad (15)$$

با پیشرفت تکنولوژی و تحول در ساخت باتری های پرقدرت از یک طرف و همچنین مشکلات زیست محیطی ناشی از آلودگی هوا از طرف دیگر، سبب توجه به خودروهای الکتریکی شده است و پیش بینی می شود سهم قابل توجهی از حمل و نقل در آینده توسط این نوع خودروها صورت گیرد [۱۷ و ۳۴]. خودروهای الکتریکی دارای باتری های قابل شارژ بوده و در صورت مدیریت صحیح می توانند در کاهش پیک شبکه مورد استفاده قرار گیرند. از طرف دیگر زمان شارژ باتری را نیز باید تنظیم نمود به طوری که در ساعات پیک صورت نگیرد [۳۴].

شکل (۳) توزیع سفرهای یک نمونه خودروی الکتریکی در ساعات یک روز از هفته را نشان می دهد [۱۷]. از این شکل به نظر می رسد که اکثر وسایل نقلیه در ساعات ۲۴ تا ۶ استفاده نمی شوند؛ در حالی که این ساعات برای شارژ باتری ها زمان مناسبی است، باتری خودروی الکتریکی معمولاً تنها بعد از بازگشت به خانه شارژ می شوند، به عنوان مثال بین ساعات ۱۸ تا ۲۱. این بازه معمولاً هم زمان با پیک بار خانگی است و بحث تراکم شبکه توزیع باید در نظر گرفته شود. بنابراین شارژ خودروی الکتریکی باید با توجه به برنامه های پاسخگویی بار صورت گیرد.

برای یک خودروی الکتریکی، بازه بیرون از خانه $[g^P, c^P]$ توسط کاربر تعیین می شود. باتری های خودروی الکتریکی در این بازه در شارژ نیستند و همچنین انرژی بازگشتی آن ها در طول این بازه نیز در دسترس نیست. برای خودروی الکتریکی دو مد تعریف می شود: P_p و P_n ، که به ترتیب نشان دهنده مد شارژ و مد دشارژ است و E^{Pp} و E^{Pn} به ترتیب نشان دهنده انرژی شیمیایی مصرف شده یا تولید شده در باتری است. انرژی الکتریکی واقعی با توجه به انرژی شیمیایی و راندمان محاسبه می شود. معادله (۷) را می توان برای جلوگیری از شارژ و دشارژ همزمان خودروی الکتریکی استفاده کرد.

$$x_t^{Pn} + x_t^{Pp} \leq 1 \quad \forall t, \quad (7)$$

باتری خودروی الکتریکی در مدت t که قرار است دشارژ شود، باید شارژ کافی داشته باشد. این محدودیت قبل و بعد از بازه بیرون از خانه خودروی الکتریکی کمی متفاوت بوده و به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{cases} E^{Pn} x_t^{Pn} \leq E_0^P + \sum_{m=1}^{t-1} (E^{Pp} x_m^{Pp} - E^{Pn} x_m^{Pn}), \quad \forall t \leq g^P \\ E^{Pn} x_t^{Pn} \leq E_0^P + \sum_{m=1}^{t-1} (E^{Pp} x_m^{Pp} - E^{Pn} x_m^{Pn}) - E^P, \quad \forall t \geq c^P \end{cases} \quad (8)$$

در سمت راست معادله (۸)، E^{Pn} با علامت منفی ظاهر شده که جهت مخالف عبور انرژی دشارژ را نشان می دهد.

محدودیت ظرفیت باتری خودروی الکتریکی قبل و بعد از بازه بیرون از خانه به ترتیب با معادله (۹) مطابق زیر بیان می شود:

تابع هدف مسئله با اضافه کردن سیستم ذخیره‌سازی به صورت

زیر بیان می‌شود:

$$\min \text{cost} = \sum_{t \in T} c_t \cdot \Delta t \cdot \left(\begin{aligned} &(1/\eta^P)(E^{Pp} x_t^{Pp}) + (1/\eta^B)(E^{Bp} x_t^{Bp}) \\ &- \eta^{P'}(E^{Pn} x_t^{Pn}) - \eta^{B'}(E^{Bn} x_t^{Bn}) \\ &+ Pnr_t + \sum_i \sum_j Pr_{i,j,t} x_{i,j,t} \end{aligned} \right) \quad (21)$$

۲-۶- مدل‌سازی توربین بادی

برای مدل‌کردن توربین بادی، باید منحنی در دسترس بودن باد و منحنی توان توربین بادی مشخص باشد. رابطه زیر مدلی را برای محاسبه توان خروجی ژنراتور توربین بادی، به صورت تابعی از سرعت باد نشان می‌دهد [۳۵]:

$$\begin{cases} R_{WT_t} = 0, & v_t < v_{ci} \text{ and } v_t > v_{co} \\ R_{WT_t} = a \cdot v_t^2 + b \cdot v_t + c, & v_{ci} \leq v_t < v_r \\ R_{WT_t} = 130, & v_r \leq v_t \leq v_{co} \end{cases} \quad (22)$$

۲-۷- مدل‌سازی مولد فتوولتائیک

مولد فتوولتائیک سیستمی است که نور خورشید را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. توان الکتریکی مولد، تابعی از شدت تابش خورشید و دمای محیط است. برای این منظور توان ماژول‌های مولد را در شرایط آزمایش استاندارد ($10000 \text{ w/m}^2, 25^\circ\text{C}$) اندازه‌گیری نموده؛ سپس به کمک رابطه زیر توان مولد را در شرایط مختلف محاسبه می‌کنند [۳۶ و ۳۷].

$$P_{PV_t} = P_{STC} \frac{G_{INC_t}}{G_{STC}} [1 + K (T_{c_t} - T_r)] \quad (23)$$

فروش انرژی با اضافه کردن تاثیر مولد توربین بادی و فتوولتائیک

به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} E_t^S = &\eta^{B'}(E^{Bn} x_t^{Bn}) + \eta^{P'}(E^{Pn} x_t^{Pn}) \\ &- (1/\eta^B)(E^{Bp} x_t^{Bp}) - (1/\eta^P)(E^{Pp} x_t^{Pp}) \\ &+ R_{WT_t} + P_{PV_t} - Pnr_t - \sum_i \sum_j Pr_{i,j,t} x_{i,j,t} \end{aligned} \quad (24)$$

معادله (۱۳) با اضافه کردن مولد توربین بادی و فتوولتائیک

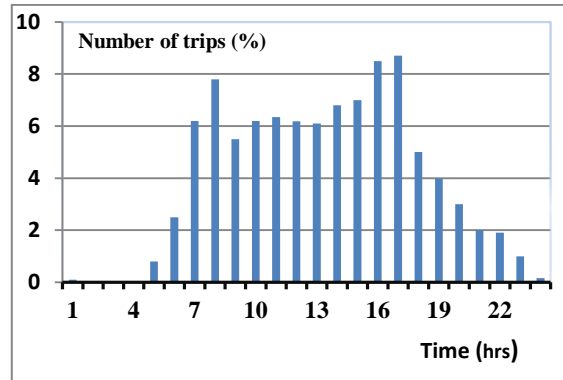
به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\left(\begin{aligned} &(1/\eta^B)(E^{Bp} x_t^{Bp}) + (1/\eta^P)(E^{Pp} x_t^{Pp}) \\ &- \eta^{B'}(E^{Bn} x_t^{Bn}) - \eta^{P'}(E^{Pn} x_t^{Pn}) \\ &- R_{WT_t} - P_{PV_t} + Pnr_t + \sum_i \sum_j Pr_{i,j,t} x_{i,j,t} \end{aligned} \right) \leq P_t^{\max}, \forall t \quad (25)$$

در نهایت تابع هدف مسئله با در نظر گرفتن منابع انرژی

تجدیدپذیر (مولد توربین بادی و فتوولتائیک) به صورت زیر بیان

می‌شود:



شکل (۳): توزیع سفرهای یک خودروی الکتریکی در هر ساعت

۲-۵- مدل‌سازی سیستم ذخیره‌سازی (باتری)

در اینجا سیستم ذخیره‌سازی اشاره به یک پکیج باتری است که می‌تواند انرژی را ذخیره کند و به وسایل دیگر یا حتی به شبکه اصلی هنگامی که نیاز باشد بازگرداند. در یک خانه هوشمند که در آن دوره‌های بهره‌برداری برنامه‌ریزی شده‌اند، چرخه‌های شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌سازی نیز توسط سیستم مدیریت انرژی تعیین می‌شود. در اینجا بهینه‌سازی علاوه بر در نظر گرفتن خودروی الکتریکی، سیستم ذخیره‌سازی را نیز در برمی‌گیرد. B_p و B_n به ترتیب نشان‌دهنده مد شارژ و دشارژ باتری است.

بدیهی است که باتری نمی‌تواند به صورت هم‌زمان در مد شارژ و

دشارژ باشد؛ بنابراین:

$$x_t^{Bn} + x_t^{Bp} \leq 1, \forall t \quad (16)$$

مقدار دشارژ در هر دوره باید کم‌تر از شارژ باتری در دسترس باشد.

$$E^{Bn} x_t^{Bn} \leq E_0^B + \sum_{m=1}^{t-1} (E^{Bp} x_m^{Bp} - E^{Bn} x_m^{Bn}), \forall t \quad (17)$$

محدودیت ظرفیت باتری با معادله (۱۸) بیان می‌شود.

$$E_0^B \leq E_0^B + \sum_{m=1}^{t-1} (E^{Bp} x_m^{Bp} - E^{Bn} x_m^{Bn}) \leq E^{\max,B}, \forall t \quad (18)$$

علاوه بر این، E_t^S با ترکیب خودروی الکتریکی و سیستم

ذخیره‌سازی به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$\begin{aligned} E_t^S = &\eta^{B'}(E^{Bn} x_t^{Bn}) + \eta^{P'}(E^{Pn} x_t^{Pn}) \\ &- (1/\eta^B)(E^{Bp} x_t^{Bp}) - (1/\eta^P)(E^{Pp} x_t^{Pp}) \\ &- Pnr_t - \sum_i \sum_j Pr_{i,j,t} x_{i,j,t} \end{aligned} \quad (19)$$

معادله (۱۳) با اضافه کردن تاثیر باتری تغییر می‌یابد، که به صورت

زیر بیان می‌شود:

$$\left(\begin{aligned} &Pnr_t + \sum_i \sum_j Pr_{i,j,t} x_{i,j,t} \\ &+ (1/\eta^B)(E^{Bp} x_t^{Bp}) + (1/\eta^P)(E^{Pp} x_t^{Pp}) \\ &- \eta^{B'}(E^{Bn} x_t^{Bn}) - \eta^{P'}(E^{Pn} x_t^{Pn}) \end{aligned} \right) \leq P_t^{\max}, \forall t \quad (20)$$

ب- حالت ۲

این حالت شبیه‌سازی یک خانه هوشمند با حضور یک خودروی الکتریکی است. باتری خودرو ظرفیت ذخیره‌سازی ۱۱ kWh دارد. تنها ۸۰٪ از ظرفیت باتری برای بهینه‌کردن طول عمر آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ظرفیت موجود $8.8/12=0.733$ kWh/period (E^{Pp}) را می‌دهد [۱۷] و فرض بر این است که ظرفیت باتری حداقل از شارژ اولیه آن نباید کم‌تر شود، راندمان AC به DC و DC به AC تبدیل انرژی هر دو معادل $\eta = \eta' = 88\%$ فرض شده است [۱۷].

باتری می‌تواند در سه ساعت شارژ شود (۱۲ دوره) [۱۱]. بنابراین $E^{Pp} = E^{Pn} = 8.8/12 = 0.733$ kWh/period. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مصرف انرژی باتری خودرو در بازه زمانی بیرون از خانه از پیش تعیین شده است. در [۳۴] تخمین زده که مصرف خودروی الکتریکی یک نوع خاص حدود ۱۶ kWh برای پیمایش مسیری در حدود ۴۰ مایل است.

ج- حالت ۳

این حالت شبیه‌سازی یک خانه هوشمند با حضور سیستم ذخیره‌سازی است. کارایی، ظرفیت و میزان شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌سازی مرتبط با باتری خودرو یکسان در نظر گرفته شده است.

د- حالت ۴

در این حالت، خانه هوشمند با خودروی الکتریکی به همراه سیستم ذخیره‌سازی شبیه‌سازی شده است.

ه- حالت ۵

در این حالت خانه هوشمند با خودروی الکتریکی و سیستم ذخیره‌سازی و منابع انرژی تجدیدپذیر (مولد توربین بادی و فتوولتائیک) شبیه‌سازی شده است. در این مقاله از ماژول‌های مولد فتوولتائیک SOLAREX MSX-83 و از مدل توربین بادی AIR 403 استفاده شده است [۳۹].

۲-۲- داده‌های مسئله

اطلاعات لوازم غیرپاسخگو [۳۷] و لوازم هوشمند (پاسخگو) [۱۵] به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. شکل (۴) منحنی بار لوازم غیرپاسخگو [۱۱] و شکل (۵) قیمت زمان-حقیقی پیش‌بینی‌شده [۳۸] را نشان می‌دهد. در هر شبیه‌سازی، یک باتری خودرو با شارژ موردنیاز کافی برای ۱۰ مایل در دوره‌های ۶۳-۷۲ در نظر گرفته شده است. بنابراین، $E^P = 4$ kWh، $g^P = 63$ و $c^P = 7$. شارژ اولیه باتری خودرو، $1/466$ kWh در نظر گرفته شده است.

$$\min \text{cost} = \sum_{t \in T} c_t \cdot \Delta t \cdot \left(\begin{array}{l} (1/\eta^p)(E^{Pp} x_t^{Pp}) + (1/\eta^B)(E^{Bp} x_t^{Bp}) \\ -\eta^{p'}(E^{Pn} x_t^{Pn}) - \eta^{B'}(E^{Bn} x_t^{Bn}) \\ -R_{WT_t} - P_{PV_t} + P_{nr_t} + \sum_i \sum_j P_{r_{i,j,t}} x_{i,j,t} \end{array} \right) \quad (26)$$

همان‌طور که قبلاً بیان شد، هدف حداقل‌کردن هزینه برق پرداختی است. بهینه‌سازی روی متغیرهای دودویی $x_{i,j,t}^{Pp}, x_{i,j,t}^{Bp}, x_{i,j,t}^{Pn}, x_{i,j,t}^{Bn}$ صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است نرخ شارژ و دشارژ باتری ثابت در نظر گرفته می‌شود. مسئله بهینه‌سازی از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی (MILP) است که برای حل آن از نرم‌افزار GAMS، زیر برنامه CPLEX 12.4.0.0 استفاده شده است.

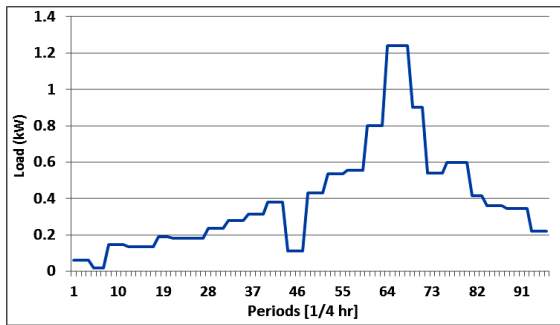
۳- مطالعات عددی**۳-۱- معرفی حالت‌های بررسی‌شده**

در این بخش برای تجزیه و تحلیل مسئله برنامه‌ریزی دوره‌های بهره‌برداری لوازم خانگی یک خانه هوشمند، پنج مطالعه موردی انجام می‌شود که عبارت‌اند از:

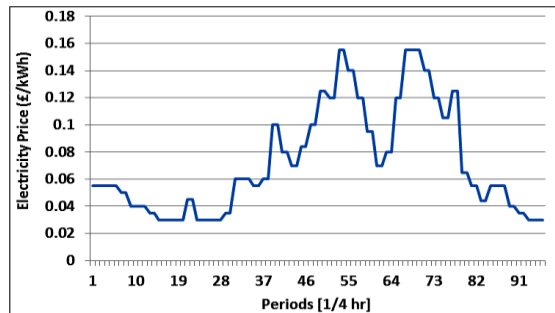
- حالت ۱: خانه هوشمند مجهز به لوازم هوشمند الکتریکی
 - حالت ۲: خانه هوشمند مجهز به لوازم هوشمند با خودروی الکتریکی
 - حالت ۳: خانه هوشمند مجهز به لوازم هوشمند با سیستم ذخیره‌سازی
 - حالت ۴: خانه هوشمند مجهز به لوازم هوشمند با خودروی الکتریکی و سیستم ذخیره‌سازی
 - حالت ۵: خانه هوشمند مجهز به لوازم هوشمند با خودروی الکتریکی، سیستم ذخیره‌سازی و منابع انرژی تجدیدپذیر
- بازه زمانی برنامه‌ریزی مانند اغلب کارهای صورت‌گرفته در این زمینه، ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. زمان اجرای برنامه‌ها در کلیه مطالعات موردی کم‌تر از یک ثانیه بوده است؛ بنابراین از ذکر آن خودداری شده است.

الف- حالت ۱

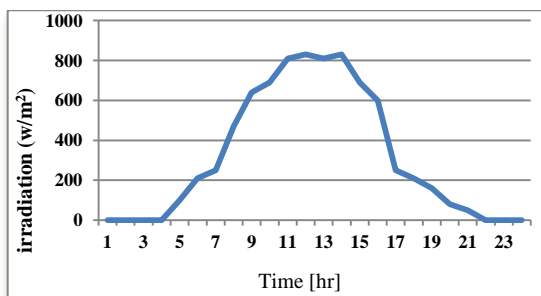
در این حالت یک خانه با سه وسیله قابل‌برنامه‌ریزی شامل ماشین لباس‌شوئی، ماشین ظرف‌شوئی و خشک‌کن لباس مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ماشین لباس‌شوئی و ظرف‌شوئی محدودیت زمانی بهره‌برداری دارند و خشک‌کن لباس محدودیت زمانی بهره‌برداری ندارد. ماشین ظرف‌شوئی $T_{off} - P_{r_{i,j}}$ ، ۶۰ دقیقه دارد یعنی ۴ دوره. در این حالت و نیز دیگر حالت‌ها، محدودیتی روی خریدوفروش و انتقال انرژی در نظر گرفته نشده است.



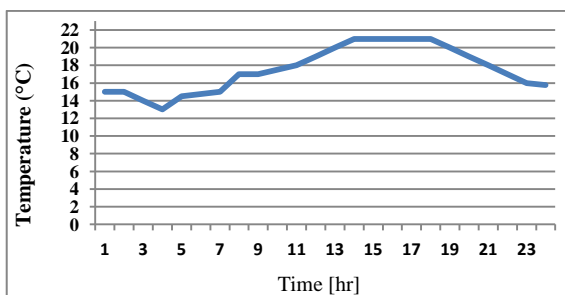
شکل (۴): منحنی بار لوازم غیرپاسخگو



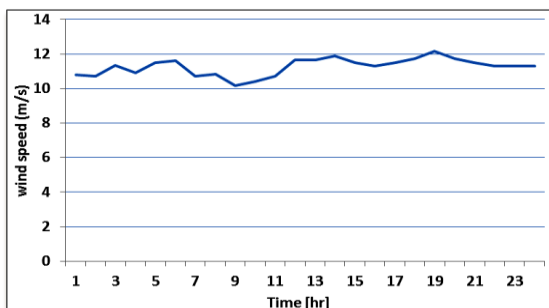
شکل (۵): قیمت زمان - حقیقی برق



شکل (۶): تابش خورشید



شکل (۷): دمای محیط



شکل (۸): سرعت باد

جدول (۱): اطلاعات لوازم غیرپاسخگو

لوازم	ساعات استفاده شده در روز	توان مصرفی (W)
فن سقفی	۸	۱۰۰ W
قهوه ساز	۰.۳	۳۶۰ W
کامپیوتر	۲	۷۵ W
مانیتور کامپیوتر	۲	۱۵۰ W
روشنایی، ۴ لامپ فلورسنتی	۵	۶۰ W
مایکروویو	۰.۵	۱۳۰۰ W
رادیو	۴	۸۰ W
یخچال	۹	۶۰۰ W
تلویزیون	۸	۳۰۰ W
جاروبرقی	۰.۲	۲۶۰ W
ویدئو	۸	۲۵ W

جدول (۲): اطلاعات لوازم هوشمند

	ماشین لباس شوئی (Load1)	ماشین ظرفشویی (Load2)	خشک کن (Load3)
زمان شروع	۰۲:۴۵	۱۳:۳۰	۰۰:۰۰
زمان پایان	۰۶:۳۰	۱۸:۴۵	۲۴:۰۰
T _{off}	۰	۶۰ دقیقه (۴ دوره)	۰
P1	۱۰۰ W	۸۰ W	۲۰۰۰ W
P2	۲۰۰۰ W	۲۰۰۰ W	۲۰۰۰ W
P3	۹۰۰ W	۸۰ W	۲۰۰۰ W
P4	۱۰۰ W	۸۰ W	۲۰۰۰ W
P5	۱۰۰ W	۸۰ W	۲۰۰۰ W
P6	۳۰۰ W	۲۰۰۰ W	۲۰۰۰ W
P7	۵۰ W	۳۰۰ W	-
P8	-	۱۵۰ W	-

جدول (۳): اطلاعات مولد توربین بادی و فتوولتائیک

$v_{ci}=3.5m/s$	$v_{co} = 18m / s$	$v_r=17.5m/s$
$a=3.4$	$b= -12$	$c=9.2$
$P_{WT,r}=130W$	$T_c = 25^\circ C$	
$G_{stc}= 10000W/m^2$	$P_{STC}=83W$	

در این مقاله از ۱۲ مازول SOLAREX MSX-83 و مدل توربین بادی AIR 403 استفاده شده است. مشخصات خروجی مازولهای SOLAREX MSX-83 و پارامترهای استفاده شده برای منحنی توان مولد توربین بادی [۳۹] در جدول (۳) داده شده است. شکل (۶) و (۷) و (۸) به ترتیب اطلاعات تابش خورشید و دمای محیط و سرعت باد را نشان می‌دهد [۳۹].

۳-۳- نتایج شبیه‌سازی

فروش انرژی به شبکه در این حالت نسبت به حالت ۲ افزایش یافته است. مجموعه عوامل ذکر شده سبب شده است که هزینه پرداختی مصرف‌کننده در این حالت (برابر $£0/368$) نسبت به حالت ۲ کم‌تر شود. در این حالت پیک‌بار و بار متوسط به ترتیب برابر با $3/572 \text{ kW}$ و $0/665 \text{ kW}$ است که ملاحظه می‌شود پیک‌بار شبکه و هم‌چنین متوسط آن نسبت به حالت ۲ کاهش یافته اما نسبت به حالت ۱ افزایش یافته است.

نتایج حاصل از برنامه‌ریزی در حالت ۴ در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در این حالت، خانه هوشمند با خودروی الکتریکی به همراه سیستم ذخیره‌سازی باتری شبیه‌سازی شده است. در حالت ۴ به دلیل استفاده هم‌زمان از باتری خودرو و سیستم ذخیره‌سازی (باتری) هزینه پرداختی برابر $£0/325$ است که نسبت به سه حالت قبل کم‌تر است. مقدار پیک‌بار و بار متوسط نیز به ترتیب برابر با $3/572 \text{ kW}$ و $0/972 \text{ kW}$ است. ملاحظه می‌شود متوسط توان جذب‌شده نسبت به حالت‌های قبلی افزایش یافته است. علت این مسئله، استفاده از باتری خودرو و سیستم ذخیره‌سازی (باتری) و افزایش تلفات توان است. در این حالت نیز فروش انرژی نسبت به حالت‌های قبلی افزایش یافته است.

نتایج وضعیت‌های بهره‌برداری از لوازم هوشمند به همراه منحنی بار لوازم غیرپاسخگو، نحوه شارژ/دشارژ باتری ذخیره‌سازی و باتری خودرو و توان تولیدشده مولد فتوولتائیک و توربین بادی در حالت ۵ در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در این حالت علاوه بر استفاده از سیستم ذخیره‌سازی انرژی، از مولدهای انرژی تجدیدپذیر نیز استفاده شده است. در شکل (۱۳) انرژی تولیدی این نوع مولدها منفی در نظر گرفته شده است. با توجه به تولید توان توسط مولد فتوولتائیک و توربین بادی، هزینه پرداختی در این حالت برابر $£0/317$ است. در واقع مشتری، به علت فروش انرژی بیش‌تر از توان مصرفی‌اش درآمد کسب می‌کند. در این حالت، پیک‌بار و بار متوسط به ترتیب برابر با $2/744 \text{ kW}$ و $0/238 \text{ kW}$ است.

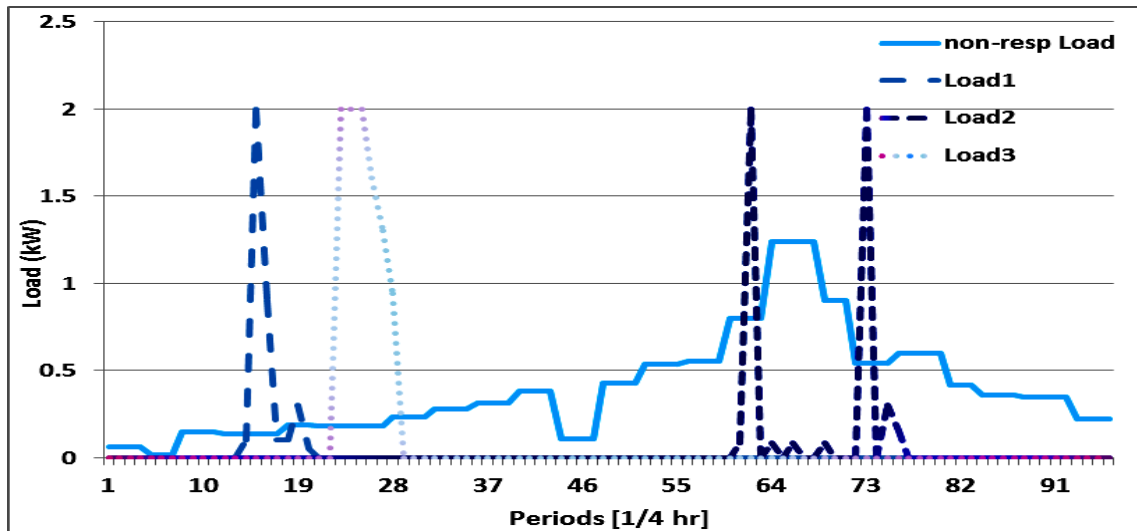
همان‌طور که ملاحظه می‌شود توان جذب‌شده در این حالت نسبت به دیگر حالت‌ها کم‌تر است که به علت تولید توان توسط منابع انرژی تجدیدپذیر است. هم‌چنین، مطابق با جدول (۵)، در این حالت فروش انرژی نسبت به دیگر حالت‌ها افزایش یافته است. با توجه به جدول (۴) واضح است که باتری خودروی الکتریکی بیش‌تر در دوره‌های غیر پیک شارژ شده و در دوره‌های ۵۶-۵۳ دشارژ شده است. منبع ذخیره‌سازی همانند باتری خودروی الکتریکی در ساعات غیرپیک شارژ شده و بیش‌تر در دوره‌های ۵۶-۵۳ و ۷۲-۶۷ دشارژ شده است.

هدف تعیین وضعیت‌های بهره‌برداری (on/off) از لوازم هوشمند در روز بعد در پاسخ به قیمت‌های زمان-حقیقی برای به حداقل رساندن هزینه‌های پرداختی مصرف‌کننده است. نتایج وضعیت‌های بهره‌برداری از لوازم هوشمند به همراه منحنی بار لوازم غیرپاسخگو در هر حالت‌های ۱ تا ۵ به ترتیب در شکل‌های (۹) تا (۱۳) نشان داده شده است.

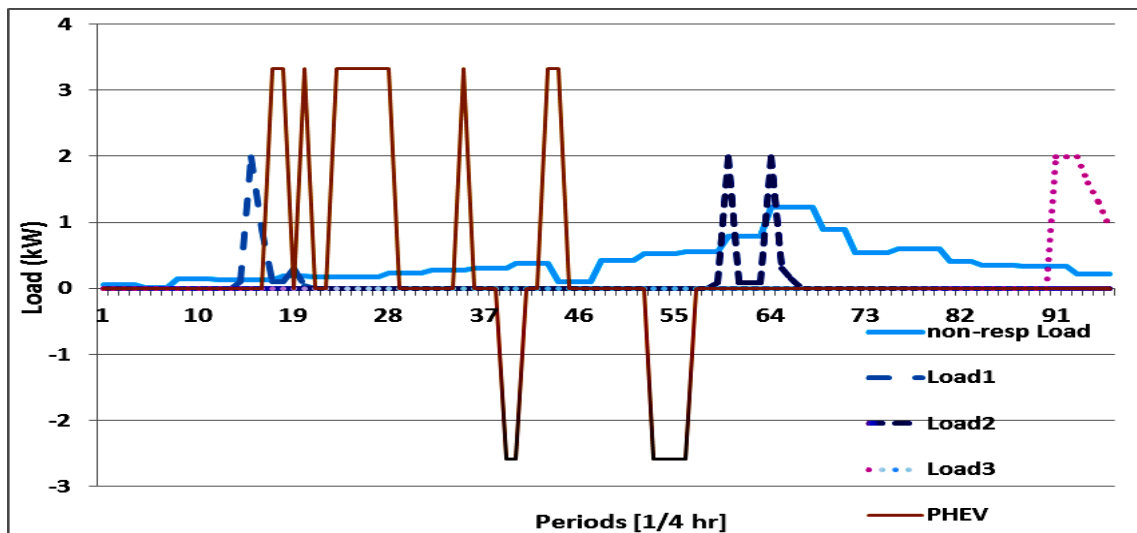
شکل (۹) نتایج برنامه‌ریزی را در حالت ۱ نشان می‌دهد؛ همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ماشین لباس‌شوئی و خشک‌کن در بازه‌های زمانی متناظر با قیمت زمان-حقیقی پائین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما ماشین ظرف‌شوئی با توجه به محدودیت زمانی بهره‌برداری آن در دوره‌های نسبتاً غیرپیک مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق جدول (۴)، هزینه مصرف‌کننده در حالت ۱، $1/086£$ و پیک بار و متوسط بار به ترتیب $2/8 \text{ kW}$ و $0/579 \text{ kW}$ است. با توجه به شکل (۱) و جدول (۴) واضح است که ماشین لباس‌شوئی تقریباً در دوره‌های ۲۰-۱۲، ماشین ظرف‌شوئی در دوره‌های ۶۶-۵۹ و خشک‌کن لباس با توجه به عدم محدودیت زمانی در بهره‌برداری از آن در بیش‌تر ساعات انتهائی شب یا در ساعات ابتدائی روز بهره‌برداری می‌شود.

نتایج برنامه‌ریزی در حالت ۲ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این حالت از باتری خودروی الکتریکی نیز به‌عنوان ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود باتری حداکثر توان $3/33 \text{ kW}$ را هنگام شارژ جذب و در هنگام دشارژ حداکثر توان $2/58 \text{ kW}$ را به شبکه تحویل داده است. از آنجاکه باتری در دوره‌های زمانی متناظر با تعرفه پایین شارژ شده و در بازه‌های زمانی متناظر با تعرفه بالا دشارژ شده و مورد استفاده قرار گرفته است، هزینه پرداختی در حالت ۲ ($£0/96$) نسبت به حالت ۱ کاهش یافته است. درحالی‌که مصرف انرژی نسبت به حالت ۱ افزایش یافته است (به علت بازدهی کم‌تر از یک باتری خودرو و هم‌چنین به علت استفاده از خودرو در حمل‌ونقل). به‌علاوه در برخی بازه‌ها توان دشارژ باتری بیش از بار مصرفی بوده و انرژی مازاد به شبکه فروخته می‌شود. در این حالت پیک‌بار و متوسط بار به ترتیب برابر با $3/712 \text{ kW}$ و $0/834$ است.

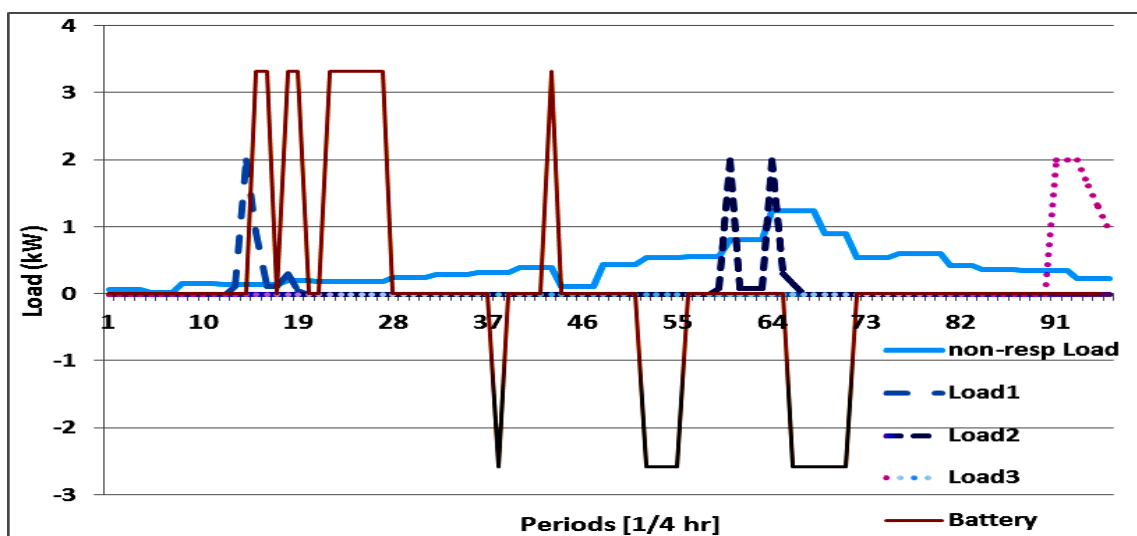
نتایج حاصل از برنامه‌ریزی در حالت ۳ در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. در این حالت بهینه‌سازی هزینه پرداختی یک خانه هوشمند با حضور یک سیستم ذخیره‌ساز مطالعه شده است. در این حالت شارژ و دشارژ باتری برخی محدودیت‌های حالت ۲ را ندارد، به‌علاوه از آن فقط به‌عنوان یک سیستم ذخیره‌ساز استفاده شده است؛ هم‌چنین



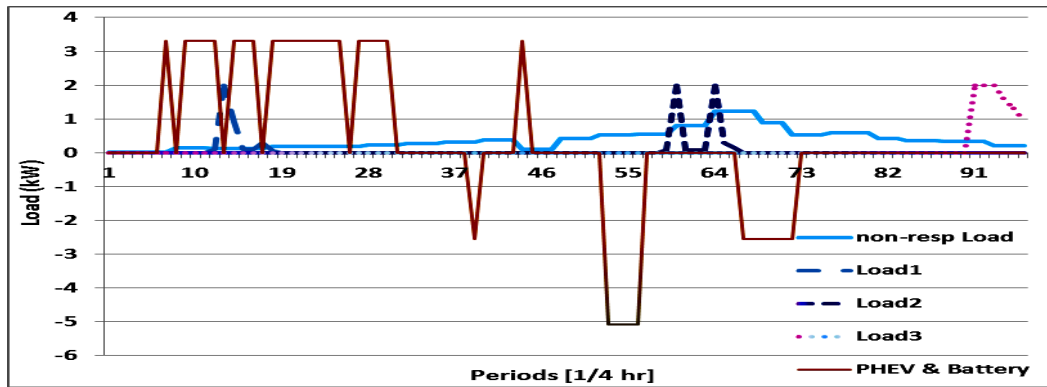
شکل (۹): نتایج برنامه‌ریزی در حالت ۱



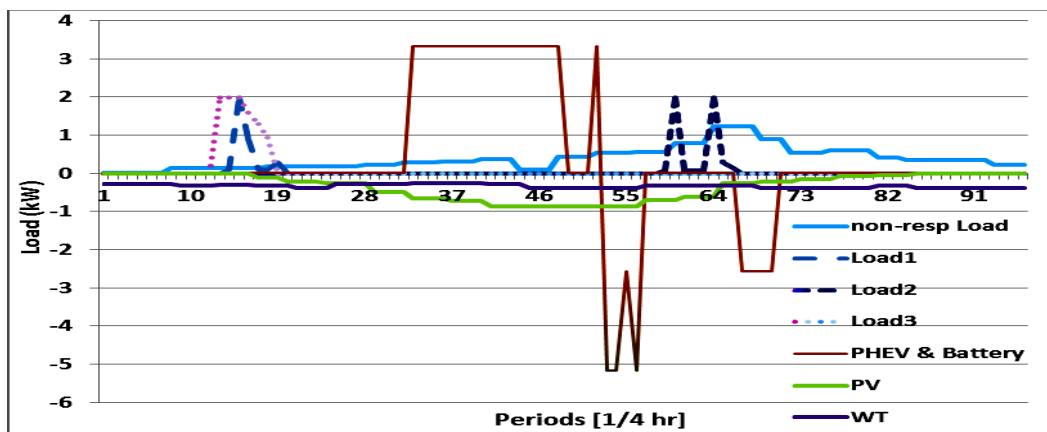
شکل (۱۰): نتایج برنامه‌ریزی در حالت ۲



شکل (۱۱): نتایج برنامه‌ریزی در حالت ۳



شکل (۱۲): نتایج برنامه‌ریزی در حالت ۴



شکل (۱۳): نتایج برنامه‌ریزی در حالت ۵

جدول (۴): دوره زمانی‌های بهره‌برداری از لوازم هوشمند و منابع ذخیره‌ساز

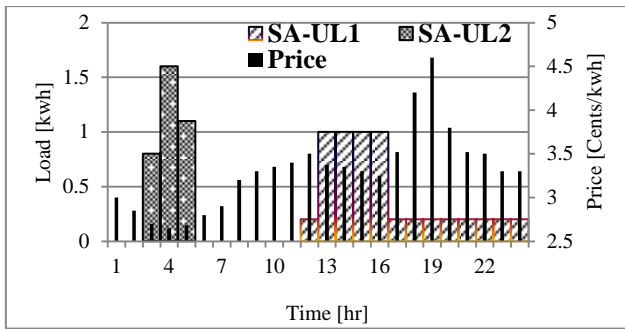
حالت	دوره‌های بهره‌برداری ماشین لباس شویی	دوره‌های بهره‌برداری ماشین ظرف شویی	دوره‌های بهره‌برداری خشک‌کن	دوره‌های خودروی الکتریکی	دوره‌های شارژ خودروی الکتریکی	دوره‌های شارژ منبع ذخیره‌سازی	دوره‌های دشارژ منبع ذخیره‌سازی
۱	۱۴-۲۰	۶۱، ۶۲، ۶۴، ۶۶، ۶۹، ۷۳، ۷۵، ۷۶	۲۳-۲۸	-	-	-	-
۲	۱۴-۲۰	۵۹-۶۶	۹۱-۹۶	۱۷، ۱۸، ۲۰، ۲۳-۲۳	۲۸، ۳۵، ۴۳، ۴۴	-	-
۳	۱۳-۱۹	۵۹-۶۶	۹۱-۹۶	-	-	۱۶، ۱۷، ۱۹، ۲۰	۲۹، ۵۶-۵۳، ۷۲-۶۷
۴	۱۲-۱۸	۵۹-۶۶	۹۱-۹۶	۹، ۱۲، ۱۴، ۲۴	۲۷، ۲۹، ۳۰، ۴۴	۷، ۱۵، ۱۶، ۲۳-۱۸	۲۹، ۵۶-۵۳، ۷۲-۶۷
۵	۱۴-۲۰	۵۹-۶۶	۱۳-۱۸	۳۳، ۳۸-۳۶	۴۶-۴۱	۳۴، ۳۵، ۳۹، ۴۰، ۴۷	۵۳، ۵۴، ۵۶، ۷۰-۶۷

۴-۳- مقایسه و بررسی کارایی روش پیشنهادی

در انتها به منظور مقایسه و بررسی کارایی روش پیشنهادی، نتایج روش پیشنهادی با نتایج مرجع [۲۴] در برخی حالت‌ها مقایسه می‌شود. برای این منظور از داده‌های ارائه‌شده در [۲۴] استفاده شده است. در اولین حالت بررسی‌شده، برنامه‌ریزی یک تجهیز پاسخگو مدنظر قرار گرفته است. نتایج حاصل از روش ارائه‌شده در [۲۴] و روش پیشنهادی به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.

جدول (۵): اطلاعات به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف

حالت	حداکثر توان جذب‌شده از شبکه (kW)	میزان انرژی جذب‌شده از شبکه (kWh)	میزان فروش انرژی به شبکه (kWh)	حداکثر توان داده‌شده به شبکه (kW)	هزینه برق مصرفی (£)
۱	۲.۸	۱۳.۹	-	-	۱.۰۸۶
۲	۳.۵۶۷	۲۱.۰۶۵	۲.۰۴۵	۲.۰۴۵	۰.۹۶
۳	۳.۵۷۲	۲۱.۰۱۳	۵.۰۴۵	۲.۲۶۵	۰.۳۶۸
۴	۳.۵۶۷	۲۹.۵۳	۷.۶۳	۴.۶۲۵	۰.۳۲۵
۵	۲.۷۰۹	۱۵.۲۵	۹.۵۶۵	۵.۸۲	-۰.۳۱۷



شکل (۱۷): نتایج بهره‌برداری از لوازم هوشمند با استفاده از روش پیشنهادی

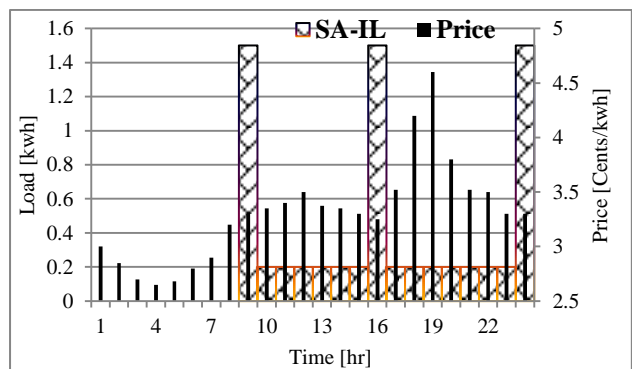
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی مدیریت مصرف و پاسخ‌گویی بار یک خانه هوشمند، با ملاحظه قیمت زمان-حقیقی پرداخته شده است. خانه هوشمند مجهز به وسایل خانگی قابل برنامه‌ریزی، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی (باتری و خودروی الکتریکی) و منابع انرژی تجدیدپذیر (باد و خورشید) است. هدف، برنامه‌ریزی تجهیزات خانگی، تعیین زمان شارژ و دشارژ تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی است. به طوری که هزینه انرژی الکتریکی خانه هوشمند حداقل ممکن شود. خانه هوشمند می‌تواند (با قیمت‌های زمان-حقیقی) با شبکه تبادل انرژی داشته باشد. تابع هدف مسئله، از نوع برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح بوده که با نرم‌افزار GAMS حل شده است. مطالعات عددی در حالت‌های مختلف انجام شده است. نتایج بیانگر تاثیر قابل‌ملاحظه تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی و مولدهای منابع انرژی تجدیدپذیر بر هزینه برق مصرفی و مقدار پیک توان مصرفی خانه است.

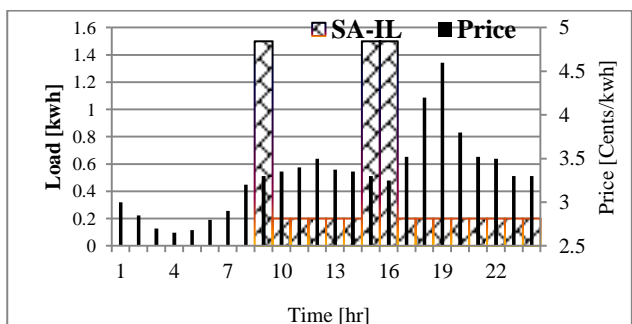
فهرست علائم

اندیس‌ها	
i	نشان‌دهنده تعداد فرآیند وسیله هوشمند
j	نشان‌دهنده تعداد وسیله هوشمند
t	شاخص دوره
T	مجموعه دوره‌ها
پارامترها	
a	ثابت نوع توربین بادی
b	ثابت نوع توربین بادی
c	ثابت نوع توربین بادی
c_t	قیمت برق در دوره t
c^p	انتهای دوره بیرون از خانه خودروی الکتریکی
$[t_j^{st} \ t_j^{et}]$	بازه تعیین‌شده توسط بهره‌بردار برای تنظیم زمان کارکرد تجهیز j
e_j	آخرین دوره ممکن برای عملکرد وسیله هوشمند j
E_0^B	انرژی اولیه ذخیره‌شده در سیستم ذخیره‌سازی
E^{Bn}	میزان شارژ باتری ذخیره‌سازی
E^{Bp}	میزان دشارژ باتری ذخیره‌سازی
$E^{B, max}$	ظرفیت سیستم ذخیره‌سازی

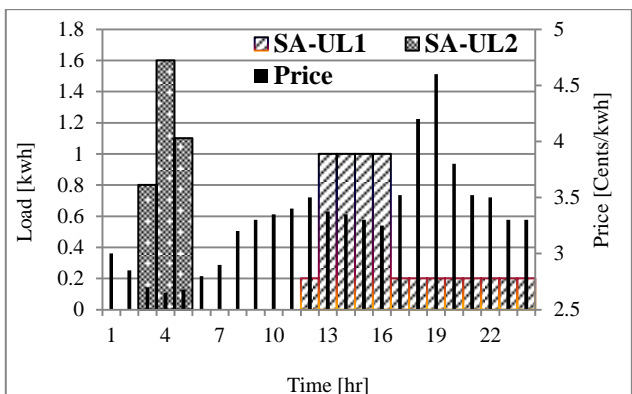
همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج با یکدیگر متفاوت است. علت این مسئله استفاده از روش بهینه‌سازی مبتنی بر مرتب‌سازی است که منجر به پاسخ‌های بهینه نسبی می‌شود؛ در واقع روش ارائه‌شده در [۲۴] روشی تقریبی برای حل مسائل با ابعاد بزرگ برنامه‌ریزی تجهیزات خانگی است. در حالی که روش پیشنهادی نقطه بهینه مطلق را پیدا می‌کند (متأسفانه مقدار هزینه برق مصرفی برای حالت بررسی‌شده در [۲۴] داده نشده است). در حالت دوم نتایج برنامه‌ریزی برای دو تجهیز غیرپاسخگو با استفاده از روش ارائه‌شده در [۲۴] و روش پیشنهادی به ترتیب در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج برنامه‌ریزی دو روش یکسان است.



شکل (۱۴): نتایج بهره‌برداری از لوازم هوشمند [۲۴]



شکل (۱۵): نتایج بهره‌برداری از لوازم هوشمند با استفاده از روش پیشنهادی



شکل (۱۶): نتایج بهره‌برداری از لوازم هوشمند [۳۰]

مراجع

- [1] P. Bertoldi and B. Atanasiu, *Electricity consumption and efficiency trends in the enlarged European Union*. Technical Report EUR 22753EN, Institute for Environment and Sustainability, 2007.
- [2] EEA Report No 6/2008. Energy and environment report. (http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_6).
- [3] A. Brophy Haney, T. Jamasb, L. M. Platchkov and M. G. Pollitt, "Demand-side management strategies and the residential sector: lessons from international experience," Cambridge Working Paper in Economics 1060, 2010.
- [4] J. F. Suter and R. Shammin. "Residential energy efficiency and conservation measures: A field experiment," *Energy Policy*, Vol. 59, pp. 551-561, Aug. 2013.
- [5] L. C. De Silva, C. Morikawa and I. M. Petra. "State of the art of smart homes," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 25, pp. 1313-1321, 2012.
- [6] T. J. Lui, W. Stirling and H. O. Marcy, "Get smart," *IEEE Power Energy Magazine*, Vol. 8, No. 3, pp. 66-78. 2010.
- [7] D. Pengwei and L. Ning. "Appliance commitment for household load scheduling," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 2, pp.411-419, Jun. 2011.
- [8] N. G. Dlamini and F. Cromieres, "Implementing peak load reduction algorithms for household electrical appliances," *Energy Policy*, Vol. 44, pp. 280-290, 2012.
- [9] C. N. Kurucz, D Brandt and S. Sim, "A linear programming model for reducing system peak through customer load control programs," *IEEE Transactions on power system*, Vol. 11, No 4. 1996.
- [10] N. Zhang, L. F. Ochoa and D. S. Kirschen. "Investigating the impact of demand side management on residential customers". *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe)*, 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition, pp.1,6, 5-7 Dec. 2011
- [11] M. Rastegar and M. Fotuhi-Firuzabad and F. Aminfar, "Load commitment in a smart home," *Applied Energy*, Vol. 96, pp. 45-54, 2012.
- [12] K. C. Sou, J. Weimer, H. Sandberg and K. H. Johansson, "Scheduling smart home appliances using mixed integer linear programming," 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC) Orlando, FL, USA, Dec. 12-15, 2011.
- [13] J. M. Lujano-Rojas and C. Monteiro, et al. "Optimum residential load management strategy for real time pricing (RTP) demand response programs," *Energy Policy*, Vol. 45, pp. 671-679, 2012.
- [14] A. H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia. "Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 2, pp. 120-133, Sep. 2010.
- [15] S. Nistor, Wu. Jianzhong, M. Sooriyabandara and J. Ekanayake. "Cost optimization of smart appliances," *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe)*, 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition, pp. 1-5, Dec. 5-7, 2011.
- [16] C. Block, J. Collins and S. Gottwalt. "Demand side management – A simulation of household behavior under variable prices," *Energy Policy*, Vol. 39, No. 12, pp. 8163-8174, 2011.
- [17] K. Clement-Nyns, E. Haesen and J. Driesen. "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid," *IEEE Transactions on Power System management*, Vol. 25, pp. 371-380, 2010.

	$E^{\max,s}$
حداکثر انرژی فروخته شده	E^P
انرژی مصرفی خودروی الکتریکی در بازه بیرون از خانه	E_0^P
انرژی اولیه ذخیره شده در باتری خودروی الکتریکی	E^{Pn}
میزان شارژ باتری خودروی الکتریکی	E^{Pp}
میزان دشارژ باتری خودروی الکتریکی	$E^{P,max}$
ظرفیت باتری خودروی الکتریکی	g^P
ابتدای دوره بیرون از خانه خودروی الکتریکی	G_{INC}
میزان تابش خورشید در دوره t	G_{STC}
میزان تابش خورشید در شرایط استاندارد آزمایش	k
ضریب دمای توان مولد فتوولتائیک	P_t^{\max}
حداکثر توان دریافت شده از شبکه در دوره t	$Pnrt$
انرژی مصرفی لوازم غیرپاسخگو در دوره t	$P_{i,j,t}$
انرژی مصرفی فرآیند ا و وسیله هوشمند ز در دوره t	P_{STC}
حداکثر توان مولد فتوولتائیک در شرایط استاندارد آزمایش	T_c
دمای محیط	$T_{off-p_{i,j}}$
ماکزیمم وقفه بین فرآیند ا و فرآیند بعدی وسیله ز	T_r
دمای مرجع مولد فتوولتائیک	v
سرعت واقعی باد	v_{ci}
سرعت وصل	v_{co}
سرعت قطع	v_r
سرعت نامی	s_j
نخستین دوره ممکن برای عملکرد وسیله هوشمند ز	η^B
راندمان تبدیل AC به DC سیستم ذخیره سازی	$\eta^{B'}$
راندمان تبدیل DC به AC سیستم ذخیره سازی	η^p
راندمان تبدیل AC به DC باتری خودروی الکتریکی	$\eta^{p'}$
راندمان تبدیل DC به AC باتری خودروی الکتریکی	متغیرها
هزینه انرژی الکتریکی در T	cost
فروش انرژی در دوره t	E_t^s
توان تولیدی مولد فتوولتائیک در دوره t	P_{PV_t}
توان تولیدی WT در دوره t	P_{WT_t}
متغیرهای باینری	
بردار باینری فرآیند ا و وسیله هوشمند ز در دوره t	$x_{i,j,t}$
شاخص باینری شارژ سیستم ذخیره سازی	x_t^{Bn}
شاخص باینری دشارژ سیستم ذخیره سازی	x_t^{Bp}
شاخص باینری شارژ باتری خودروی الکتریکی	x_t^{Pn}
شاخص باینری دشارژ باتری خودروی الکتریکی	x_t^{Pp}

- Applications (BWCCA), 2013 Eighth International Conference, pp. 545-550, Oct. 28-30, 2013.
- [33] Y. Hong, J. Lin, C. Wu and C. Chuang, "Multi-objective air-conditioning control considering fuzzy parameters using immune clonal selection programming," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 4, pp. 1603-1610, Dec. 2012.
- [34] A. Ipakchi and F. Albuyeh, "Grid of the future," *IEEE Power Energy Magazine*, Vol. 7, No. 4, pp. 52-62, 2009.
- [35] R. Chedid, H. Akiki and S. Rahman. "A decision support technique for the design of hybrid solar-wind power system management," *IEEE Transactions on Energy Convers*, Vol. 13, No. 1, pp. 76-83, 1998.
- [36] E. S. Gavanidou and A. G. Bakirtzis. "Design of a standalone system with renewable energy sources using trade off methods," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 7, No. 1, pp. 42-48, 1992.
- [37] F. Lasnier and T. G. Ang, *PhotoVoltaic Engineering Handbook*. IOP Publishing Ltd., 1990.
- [38] D. Zhang, L. G. Papageorgiou, N. J. Samsatli and N. Shah. "Optimal scheduling of smart homes energy consumption with microgrid," 1st International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies, Energy, May 22-27, Venice/Mestre, Italy, 2011.
- [39] F. A. Mohamed and H. N. Koivo. "System modelling and online optimal management of MicroGrid using Mesh Adaptive Direct Search," *Electrical Power and Energy system management*, Vol. 32, pp. 398-407, 2010.
- [18] M. Sechilariu, B. Wang and F. Locment, "Building-integrated microgrid: advanced local energy management for forthcoming smart power grid communication," *Energy and Buildings*, Vol. 59, pp. 236-243, Apr. 2013.
- [19] B. C. Wang, M. Sechilariu and F. Locment. "Power flow Petri Net modelling for building integrated multi-source power system with smart grid interaction," *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 91, pp. 119-133, May 2013.
- [20] X. Guan, Z. Xu and Q. S. Jia. "Energy-efficient buildings facilitated by microgrid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 3, pp. 243-252, Dec. 2010.
- [21] N. C. Batista, R. Melício, J. C. O. Matias and Catalão J.P.S. "Photovoltaic and wind energy system management monitoring and building/home energy management using ZigBee devices within a smart grid," *Energy*, Vol. 49, pp. 306-315, Jan. 2013.
- [22] Z. Zeng, R. Zhao and H. Yang. "Micro-sources design of an intelligent building integrated with micro-grid," *Energy and Buildings*, Vol. 57, pp. 261-267, Feb. 2013.
- [23] C. Battistelli, L. Baringo and A. J. Conejo. "Optimal energy management of small electric energy system management including V2G facilities and renewable energy sources," *Electric Power Systems Research*, Vol. 92, pp. 50-59, Nov. 2012.
- [24] K. M. Tsui and S. C. Chan. "Demand response optimization for smart home scheduling under real-time pricing," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 4, 2012.
- [25] J. Hyung-Chul, K. Sangwon and 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, No. 2, pp. 316-322, May 2013.
- [26] B. Liu and Q. ei, "Home energy control algorithm research based on demand response programs and user comfort," 2013 International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC), Vol. 2, pp. 995-999, Aug. 16-18, 2013.
- [27] Z. Hong, P. Li and W. Jingxiao, "Context-aware scheduling algorithm in smart home system," *Communications, China*, Vol. 10, No. 11, pp. 155-164, Nov. 2013.
- [28] M. A. A. Pedrasa, T. D. Spooner and I. F. MacGill, "Coordinated scheduling of residential distributed energy resources to optimize smart home energy services," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 2, pp. 134-143, Sep. 2010.
- [29] M. H. K. Tushar, C. Assi, M. Maier and M. F. Uddin, "Smart microgrids: optimal joint scheduling for electric vehicles and home appliances," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 1, pp. 239-250, Jan. 2014.
- [30] A. Sleman and R. Moeller, "SOA distributed operating system for managing embedded devices in home and building automation," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 57, No. 2, pp. 945-952, May. 2011.
- [31] Z. Zhao, W. C. Lee, Y. Shin and K. Song, "An optimal power scheduling method for demand response in home energy management system," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 3, pp. 1391-1400, Sep. 2013.
- [32] M. N. Ullah, N. Javaid, I. Khan, A. Mahmood and M. U. Farooq, "Residential energy consumption controlling techniques to enable autonomous demand side management in future smart grid communications," *Broadband and Wireless Computing Communication and*