

تأثیر خانه‌های هوشمند در مدیریت و کاهش مصرف انرژی الکتریکی

محمدعلی تقی‌خانی^{۱*}، محسن ماندگارنیک^۲

^۱دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
taghikhani@eng.ikiu.ac.ir

^۲دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
mohsen.mandegar007@gmail.com

چکیده: امروزه مبحث شبکه‌های هوشمند یکی از مباحث پر اهمیت در علم مهندسی برق است. در این مقاله، بعد از شناخت لایه‌های ارتباطی بین اجزای یک خانه هوشمند در مقدمه، به بررسی اجمالی بعضی از مهم‌ترین پروتکل‌های ارتباطی حاکم بر خانه‌های هوشمند پرداخته خواهد شد. سپس با اعمال برنامه‌ی مدیریت مصرف بار خانگی توسط خانه هوشمند، میزان تأثیرگذاری این روش در اصلاح مصرف برق، مخصوصاً در ساعات اوج بار نشان داده خواهد شد. برای روشن شدن این موضوع، خانه‌ای با تعداد وسایل الکتریکی مشخص در سه حالت مختلف مورد مطالعه قرار گرفته که در یکی از این سه حالت تأثیر قطعی بار نیز لحاظ شده است. بدین ترتیب، به کمک مدل‌سازی دقیق مسئله مبتنی بر مدیریت بار خانگی و انجام شبیه‌سازی توسط نرم افزار گمز (GAMS)، بررسی و ارزیابی نتایج حاصل شده صورت می‌پذیرد و در این راستا تأثیر در نظرگرفتن تعرفه‌گذاری‌های مختلف برق بر نتایج روش ارائه شده نیز مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی: بار خانگی، تعرفه، شبکه‌های هوشمند، مدیریت مصرف، خودرو الکتریکی.

* نویسنده مسئول

شرکت‌های توزیع و حتی تولیدکنندگان علاقه‌مند هستند که مصرف برق در ساعت‌هایی که با پیک بار روبرو می‌باشد، کاهش یابد. بنابراین اگر بر اساس پیش بینی بار، قیمت در ساعت‌هایی که با پیک بار روبروست گرانتر قرار داده شود و این قیمت‌ها به مشترک اعلام شود، برای مصرف‌کننده نیز می‌ارزد که مصرف خود را حتی‌الامکان به ساعت‌های ارزان‌تر منتقل کند. اما مانع اصلی بر سر راه اجرای کامل برنامه پاسخگویی بار و یا هر برنامه‌ای که نیاز به حضور و واکنش مصرف‌کننده دارد این است که بسیاری از مشترکین نمی‌توانند و وقت کافی برای پاسخگویی دستی به قیمت را ندارند یا روش آن را نمی‌دانند، بدین معنا که مشترک توانایی و حوصله پیش لحظه به لحظه رفتار بار و قیمت را ندارد و در نتیجه واکنش مورد نظر بهره‌بردار میسر نمی‌شود [۸، ۹].

تاکنون الگوریتم‌های متفاوتی برای مدیریت انرژی خانه هوشمند و به ویژه برای مدیریت وسایل خانگی دارای مصرف بالای انرژی ارائه شده‌اند که با توجه به الگوی پاسخگویی بار، انرژی مصرفی کل را در زیر سطح معینی تضمین می‌نمایند [۱۰]. این الگوریتم‌ها همچنین به مشترکین این اجازه را خواهند داد که بر اساس هزینه‌های مختلف و به صورت خودکار، برنامه بهینه‌ای برای بار انتخاب نمایند [۱۱]. راه‌حل پیشنهادی در این مقاله نیز طراحی برنامه‌ای خودکار برای برنامه‌ریزی بار است به گونه‌ای که منافع مشترک مدنظر قرار گیرد. نکته مهم در طراحی این برنامه در نظر گرفتن منافع مشترک است به گونه‌ای که او راغب به شرکت در این برنامه شود. بنابراین طرح ارائه شده باید از دیدگاه مشترک باشد. رعایت منافع مشترک شامل حداقل‌سازی هزینه‌های او و همچنین رعایت محدودیت‌های بهره‌بردار از وسایل خانگی است [۱۲، ۱۳]. مهم‌ترین هزینه مشترک، هزینه پرداختی است که بایستی در برنامه‌های مدیریت بار خانگی مدنظر قرار گیرد. از دیگر هزینه‌هایی که در کارهای انجام شده در این زمینه در نظر گرفته نشده هزینه بار از دست رفته است که با مدیریت بار خانگی می‌توان آن را به حداقل رساند.

استفاده از خودرو الکتریکی ترکیبی قابل اتصال به شبکه^۱ (PHEV)، که در زمان شارژ و دشارژ خانگی نقش ذخیره‌ساز و تولیدکننده انرژی الکتریکی را ایفا می‌کند، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در مقالات متعدد خودرو الکتریکی هیبرید قابل اتصال به شبکه و تأثیرات آن بر سیستم‌های توزیع برای بهبود منحنی بار شبکه مورد بررسی قرار گرفته [۱۴]، همچنین اهمیت آن در توسعه مدل پاسخگویی بار با درنظر گرفتن سناریوهای متفاوت برای شارژ ارزیابی

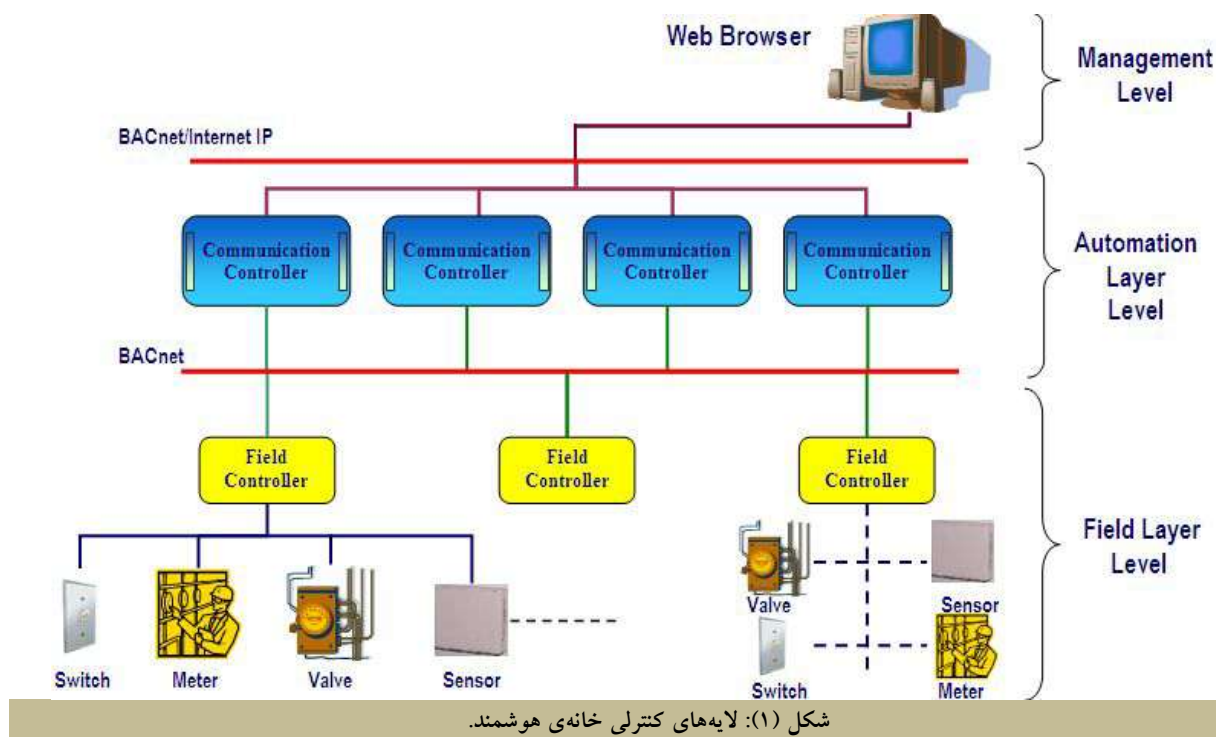
تمام تجهیزات و لایه‌های یک سیستم هوشمند باید با یک زبان مشترک با یکدیگر در ارتباط باشند. این زبان مشترک توسط موسسات و کمپانی‌های مختلف در طول زمان به وجود آمدن سیستم‌های هوشمند به شکل‌های مختلف پیشنهاد شده است که هر یک مورد تأیید بعضی از موسسات استاندارد قرار گرفته‌اند [۱-۴]. خانه هوشمند دارای سیستمی است که با استفاده از یک کامپیوتر مرکزی (سرور)، کلیه تجهیزات کنترلی که به صورت مستقل وجود دارد را به صورت متمرکز و یکپارچه مدیریت می‌کند. کنترل و پایش^۱ تجهیزاتی از قبیل فن کویل‌ها، پمپ‌ها، انواع سنسورها، سیستم‌های روشنایی، سیستم‌های صوتی و تصویری، سیستم‌های امنیتی، سیستم‌های اعلام و اطفای حریق و ... در یک خانه هوشمند توسط این سیستم انجام می‌پذیرد. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌گردد، در پایین‌ترین قسمت، لایه فیلد قرار دارد که سنسورها و عملگرها در این لایه قرار دارند. در بالا دست آن‌ها کنترلرها به صورت گسترده پخش شده‌اند به طوری که هر کنترلر وظیفه کنترل و پایش تعدادی از ورودی‌ها و خروجی‌های لایه فیلد را بر عهده دارد.

ارتباط بین سنسورها و عملگرهای لایه اصلی با کنترلرهایشان ممکن است به شکل ستاره‌ای یا زنجیره‌ای باشد. در بالا دست کنترلرها که به نوعی لایه سوم می‌شود کامپیوترهای جانبی و کنترلرهای محلی قرار دارند که به وسیله ی کابل‌های شبکه به رابط‌های شبکه (سوئیچ، مبدل، روتر و ...) متصل شده و سپس این رابط‌ها به صورت بی‌سیم یا به وسیله ی کابل‌های فیبر نوری و یا کابل‌های شبکه به یکدیگر متصل می‌شوند. در بالاترین سطح هم، کامپیوتر مرکزی قرار دارد که در واقع سطح اطلاعات مدیریتی است. اما یکی از مهم‌ترین اهداف هوشمندسازی شبکه، فعال‌سازی مصرف‌کنندگان در راستای بهره‌برداری بهتر از شبکه توزیع قدرت است. از این رو اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار نقش مهمی در هوشمندسازی شبکه ایفا می‌کند.

بهره‌بردار شبکه با اجرای برنامه پاسخگویی بار، درصدد است که منحنی بار شبکه را مسطح نماید تا هزینه‌های بهره‌برداری کاهش یابد [۵، ۶]. از آنجا که بخش عمده‌ای از بار شبکه مصارف خانگی هستند، اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار خانگی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۷]. در این برنامه‌ها مشتری در ساعات مختلف با قیمت‌های متفاوت برق روبروست و خود مسئول تصمیم‌گیری در مورد میزان مصرف برق خود است. قیمت‌گذاری باید به نحوی باشد که مصرف‌کننده را مجاب کند در زمان‌هایی مصرف کند که بهره‌بردار می‌خواهد. بدیهی است بهره‌بردار یا

سیستم‌های قدرت خواهد شد، بدین ترتیب که مشارکت آن در مسأله مدیریت منابع انرژی در نظر گرفته می‌شود [۱۸].

شده، که روش‌های ارائه شده برای شارژ و دشارژ آن، کاهش هزینه‌های مصرفی را در پی خواهد داشت [۱۵-۱۷]. از طرفی نقش ویژه PHEV در تغییر الگوی پاسخگویی بار، سبب بهبود عملکرد



شکل (۱): لایه‌های کنترلی خانه‌ی هوشمند.

۲. دسته‌بندی وسایل الکتریکی خانگی

وسایل خانگی با توجه به قابلیت خود در برنامه پاسخگویی بار، به دو دسته بارهای پاسخگو و غیرپاسخگو تقسیم می‌شوند. بارهای پاسخگو همچون ماشین لباسشویی و آب‌گرم‌کن در پاسخ به تعرفه دریافتی، می‌توانند مصرف خود را از زمانی به زمان دیگر منتقل کنند. وسایلی همچون تلویزیون و کامپیوتر شخصی که معمولاً زمان مصرفشان بدون توجه به تعرفه و با توجه به خواست مشتری تعیین می‌شود به نام وسایل غیرپاسخگو خوانده می‌شوند. اگرچه زمان و میزان مصرف این وسایل قابل کنترل نیست، اما می‌توان چند بازه زمانی را به‌عنوان زمان‌های مناسب عملکرد به صاحبان این وسایل پیشنهاد نمود.

در اینجا فرض می‌شود که مشترک در یکی از زمان‌های پیشنهادی وسیله خود را روشن می‌کند. وسایل پاسخگو بر دو قسم‌اند: وسایلی که تنها وضعیت روشن/خاموش بودنشان در هر بازه زمانی توسط برنامه ارائه‌شده تعیین می‌شود، مانند ماشین لباسشویی. این وسایل میزان مصرف انرژی‌شان در هر بازه‌ای که روشن باشند، مشخص است. زمان مجاز عملکرد برای این وسایل توسط مشترک تعیین می‌گردد. بازه‌های عملکرد

در این مقاله، علاوه بر ارائه طرحی برای برنامه‌ریزی بار، از PHEV به‌عنوان الگویی توسعه یافته و راه‌حلی مناسب برای مسائل از نظر اقتصادی استفاده شده است. با توجه به اهمیت حضور PHEV در خانه‌های هوشمند به سبب کاهش هزینه‌های مشترک و از طرفی امکان دشارژ آن (برای تأمین بار خانگی در زمان تعرفه بالا)، و همچنین از آنجا که به موضوع قابلیت تأمین بار توسط PHEV در مسأله مدیریت بار خانگی کمتر پرداخته شده است، در این مقاله، سعی بر آن است تا با اعمال برنامه بهینه‌سازی مناسب این مهم تحقق یابد.

علاوه بر این، در مراجع و مقالات مرتبط، مسأله قطعی بار در فرآیند مدیریت بار خانگی در نظر گرفته نشده است. از سوی دیگر، بررسی وسایل خانگی جهت مدل‌سازی دقیق آن‌ها در برنامه مدیریت بار خانگی مهم است، که این موضوع در بخش‌های آتی و پیش از مدل‌سازی ریاضی مدیریت بار خانگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین، در این مقاله دسته‌بندی وسایل الکتریکی خانگی در بخش دوم آورده شده، فرآیند مدیریت بار خانگی در بخش سوم مورد بحث قرار خواهد گرفت. نتایج شبیه‌سازی در قسمت چهارم مقاله ارائه خواهند شد. در پایان، نتیجه‌گیری از مباحث مطرح شده در مقاله، در بخش پنجم آورده می‌شود.

ارزش بار از دست رفته در میزان بار از دست رفته است. ارزش بار از دست رفته برای هر مشترک و حتی برای هر وسیله می‌تواند متغیر باشد. این ارزش توسط مشترک تعیین می‌گردد. در طول زمان قطعی، باتری خودرو الکتریکی با توجه به ارزش بار از دست رفته هر وسیله، بخشی از بار خانگی را تأمین می‌کند. این موضوع به کاهش هزینه بار از دست رفته مشترک می‌انجامد. در حقیقت با استفاده از حضور خودرو الکتریکی، جهت کاهش هزینه بار از دست رفته مشترک، مدیریت قطعی بار صورت می‌گیرد. زمانی که بار خانگی قطع می‌گردد، مدت زمان قطعی توسط اطلاعات موجود تخمین زده شده و برنامه‌ریزی بار برای این مدت زمان، توسط کمینه‌سازی بار از دست رفته صورت می‌گیرد. اگر قطعی بیش از زمان تخمین زده شده ادامه یافت، برنامه‌ریزی برای یک بازه‌ی دیگر ادامه می‌یابد و این روند ادامه می‌یابد تا قطعی پایان پذیرد. پس از پایان قطعی، اطلاعات به روز شده و برای مدت زمان باقیمانده از روز، مدیریت بار خانگی مجدداً بر اساس هزینه پرداختی صورت می‌گیرد.

در این بخش، ابتدا هزینه‌های مشتری به صورت ریاضی مدل‌سازی می‌گردد. سپس، محدودیت‌های عملیاتی وسایل و تجهیزات خانه مدل‌سازی شده و مدیریت بار خانگی طی یک فرایند بهینه‌سازی ارائه می‌گردد. همانگونه که پیشتر ذکر شد هزینه پرداختی مطابق رابطه (۱) تابع تعرفه و انرژی مصرفی در هر بازه است:

$$PC = \sum_{t \in T} P(t) \quad (1)$$

$$P(t) = \lambda(t) \cdot E(t) \quad (2)$$

که در آن T کل بازه برنامه‌ریزی، PC تابع هزینه پرداختی در یک روز، $P(t)$ هزینه پرداختی در هر پله برنامه‌ریزی، $E(t)$ انرژی الکتریکی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت در هر پله زمانی و $\lambda(t)$ تعرفه در همان پله زمانی است [۱۹-۲۲]. یکی از مرسوم‌ترین و ساده‌ترین روش‌های قیمت‌گذاری، قیمت‌گذاری زمان استفاده^۱ (TOU) است [۲۳]. قیمت‌گذاری در این روش به صورت پله‌ای است. در بازه‌ای مشخص که معمولاً مصرف، بالاتر است قیمت نیز بالاتر اعلام می‌شود. همچنین، امکان چندپله‌ای شدن قیمت وجود دارد، یعنی چند سطح مختلف قیمت برای ساعت‌های مختلف تعیین می‌شود و به مصرف‌کننده اعلام می‌شود. در قیمت‌گذاری نرخ‌های بلوک شیب^۲ (IBR)، قیمت حاشیه‌ای متناسب با مجموع انرژی مصرف‌شده افزایش می‌یابد. بدین صورت که فراتر از یک

این وسایل برای برخی باید به صورت پشت‌سرهم و برای برخی، می‌تواند به صورت نامتوالی باشد. به‌عنوان نمونه، ماشین‌لباسشویی باید ساعت عملکردش پشت‌سرهم باشد تا بتواند لباس‌ها را به صورت مناسب بشوید. اما، خشک‌کن لباس‌ها می‌تواند در بازه‌های غیرمتوالی وظیفه خود را انجام دهد. دسته دیگری از وسایل پاسخگو، وسایلی هستند که سطح مصرفشان در هر بازه مجاز عملکرد توسط اجرای برنامه مشخص می‌گردد. این وسایل در هر بازه، محدوده مجاز مصرف انرژی دارند. همچنین مشتری سطح مصرف مطلوب وسیله را در هر بازه می‌تواند تعیین کند. جهت تأمین رفاه حال مشترک، مجموع انحراف از این میزان مطلوب مشترک می‌تواند به مقدار مشخصی محدود گردد. از جمله وسایل این دسته می‌توان سیستم سرمایش/گرمایش الکتریکی را نام برد.

۳. فرایند مدیریت بار خانگی

همانگونه که پیش از این اشاره شد در مدیریت بار خانگی پیشنهاد شده در این مقاله، تلاش می‌شود که کلیه نگرانی‌های مشترک پاسخ داده شود. مهم‌ترین عاملی که مشتری جهت شرکت در برنامه به آن می‌نگرد، هزینه پرداختی قبل و بعد از اجرای برنامه است. بنابراین در وهله اول، مدیریت بار بر اساس کمینه‌سازی هزینه پرداختی مشترک صورت می‌گیرد. هزینه پرداختی، حاصل ضرب قیمت برق و میزان مصرف انرژی در هر بازه است. بنابراین، کمینه‌سازی هزینه پرداختی موجب جابه‌جایی مصرف وسایل پاسخگو از زمان‌های قیمت بالا به قیمت پایین است. با توجه به حضور خودرو الکتریکی هیبرید قابل اتصال به شبکه، در خانه‌های هوشمند و امکان تأمین بار توسط این خودروها، انتظار کاهش بیشتری در هزینه پرداختی می‌باشد. زیرا خودرو الکتریکی هیبرید قابل اتصال به شبکه، می‌تواند در زمان‌های تعرفه پایین شارژ و در زمان‌های تعرفه بالا دشارژ شده و بار خانه را تأمین کند.

اگر تأمین بار خانگی با قطعی روبرو نشود، مدیریت بار خانگی به صورت کمینه‌سازی هزینه پرداختی مدل می‌شود. اگر بار خانه قطع شود، هزینه پرداختی در مدت زمان قطعی صفر خواهد بود و هزینه بار قطع شده به‌عنوان نگرانی مشترک در این مدت زمان مطرح می‌گردد. لازم به ذکر است که قطعی بار خانگی بر برنامه از پیش طراحی شده بر اساس هزینه پرداختی نیز، تأثیر می‌گذارد. بنابراین، ضروری است که با وقوع قطعی برنامه مدیریت بار خانگی نیز به روز شود. همانگونه که اشاره شد، در مدت زمان قطعی کمینه‌سازی هزینه قطع بار برای مشترک، برنامه مصرف را تعیین می‌کند. هزینه قطعی، حاصل ضرب

1. Time of Use
2. Inclining Block Rate

وسيله غيرپاسخگو مدت زمان مشخصی برای انجام وظیفه خود نیاز دارد. همانگونه که بیشتر اشاره شد، می‌توان چند بازه مختلف را به‌عنوان مدت زمان مناسب عملکرد وسیله غيرپاسخگو به مشترک پیشنهاد نمود. رابطه (۹) کل مصرف انرژی وسایل پاسخگو را در زمان t نشان می‌دهد:

$$RE(t) = \sum_{m \in M} E_m(t) + \sum_{k \in K} E_k(t) \quad (9)$$

k به مجموعه Y وسایل پاسخگویی اطلاق می‌شود که سطح انرژی مصرفی آنها در هر بازه تعیین می‌گردند. همچنین m مجموعه‌ی وسایل پاسخگویی هستند که تنها زمان روشن/خاموش بودنشان توسط برنامه‌ریزی پیشنهادی تعیین می‌گردد. $E_m(t)$ و $E_k(t)$ به ترتیب انرژی مصرفی وسیله m و k در زمان t است.

$$E_m(t) = I_m(t)E_m \quad (10)$$

همچنین محدودیت بهره‌برداری وسیله m به‌صورت زیر ذکر می‌گردد:

$$\sum_{t \in AI_m} I_m(t) = U_m \quad (11)$$

برای وسیله k که سطح مصرف آن در زمان‌های مختلف تعیین می‌گردد دو محدودیت وجود دارد. اول، محدودیت مصرف که بر اساس تنظیمات وسیله و همچنین خواست مشترک تعیین می‌گردد و دیگری محدودیت انحراف از میزان مطلوبی که مشترک برای مصرف وسیله در هر بازه تعیین نموده است:

$$E_k^{\min}(t) \leq E_k(t) \leq E_k^{\max}(t) \quad (12)$$

$$\sum_{t \in T} |E_k^{des}(t) - E_k(t)| \leq D_k \quad (13)$$

که در این روابط، $E_k^{\min}(t)$ و $E_k^{\max}(t)$ به ترتیب کمینه و بیشینه سطح مجاز مصرف وسیله k است که توسط مشترک تعیین می‌گردد. همچنین، $E_k^{des}(t)$ میزان مطلوب مصرف انرژی توسط وسیله k است که توسط مشترک تعیین می‌گردد. به‌علاوه، D_k ماکزیمم انحراف مجاز از میزان مطلوب در زمان‌های مختلف است. با توجه به اهمیت بررسی قیود باتری شامل نرخ شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی [۲۵]، لازم به ذکر است که $PHE(t)$ از دو بخش شارژ خانگی در زمان t ($ch(t)$) و دشارژ خانگی در زمان t ($dch(t)$) تشکیل می‌شود.

$$PHE(t) = \frac{1}{\eta_{ch}} ch(t) - \eta_{dch} dch(t) \quad (14)$$

که η_{dch} و η_{ch} بازده شارژ و دشارژ باتری خودرو را نشان می‌دهد. علامت منفی پشت دشارژ جریان انرژی در جهت غیر معمول، یعنی قابلیت تأمین بار خانگی را نشان می‌دهد. فرض می‌شود که، PHEV در

آستانه معین برای مجموع بار مصرفی خانگی به صورت ماهانه یا روزانه و یا ساعتی، قیمت برق به یک سطح بالاتر افزایش می‌یابد. این نوع قیمت‌گذاری، این انگیزه را در مصرف‌کننده ایجاد می‌کند که جهت اجتناب از پرداخت هزینه برق با نرخ بالاتر، بارهای خود را در ساعات مختلف روز توزیع کند [۲۴]. با ترکیب قیمت‌گذاری IBR به‌صورت بازه‌ای با TOU، مصرف‌کننده علاوه بر در نظر گرفتن زمان استفاده از وسایل، به سطح مصرف انرژی نیز حساس می‌شود. برای مثال به جای استفاده از دو وسیله به طور هم‌زمان، زمان استفاده از آنها را در طول ساعاتی که قیمت یکسان است توزیع می‌کند تا از پرداخت هزینه اضافی ناشی از رفتن به سطح دوم مصرف انرژی در IBR جلوگیری کند. هزینه بار قطع شده در رابطه (۳) و (۴) تابع میزان بار قطع شده و ارزش بار از دست رفته است:

$$IC = \sum_{t \in T} IC(t) \quad (3)$$

$$IC(t) = \sum_{a \in A} \mu_a LE_a(t) \quad (4)$$

که در این روابط، a نشانگر وسایل خانگی، μ_a ارزش بار از دست رفته وسیله و $LE_a(t)$ انرژی از دست رفته وسیله در زمان t می‌باشد که وقتی برق وسیله توسط شبکه یا باتری خودرو تأمین گردد، مقدار آن صفر خواهد بود. تابع هدف مسئله بهینه‌سازی پیشنهاد شده پیش از وقوع قطعی و پس از اتمام آن، هزینه پرداختی مشترک و در حین قطعی و هزینه بار از دست رفته می‌باشد. بنابراین، تابع هدف طبق رابطه (۵) به این قرار است:

$$Cost = \sum_{t \in T} [O(t)IC(t) + (1-O(t))P(t)] \quad (5)$$

که در آن $O(t)$ نشانگر باینری خروج در زمان t است، به این ترتیب که یک بودن آن نشان می‌دهد که در زمان t بار خانگی قطع است. مصرف انرژی در زمان t شامل مصرف انرژی وسایل غيرپاسخگو $NRE(t)$ ، مصرف انرژی وسایل پاسخگو $RE(t)$ و مصرف انرژی خودرو الکتریکی هیبرید قابل اتصال به شبکه $PHE(t)$ می‌شود.

$$E(t) = NRE(t) + RE(t) + PHE(t) \quad (6)$$

اگر وسیله غيرپاسخگو باشد با شاخص j و مجموعه J نمایش داده می‌شود:

$$NRE(t) = \sum_{j \in J} E_j(t) \quad (7)$$

$$E_j(t) = I_j(t)E_j \quad (8)$$

که در این رابطه، $I_j(t)$ نشانگر باینری وضعیت روشن خاموش بودن وسیله غيرپاسخگویی j ، E_j میزان مصرف انرژی وسیله j در هر بازه زمانی عملکرد و $E_j(t)$ میزان مصرف انرژی وسیله j در هر پله زمانی است. هر

(۲۱) محاسبه می‌گردد.

$$LE_a(t) = E_a(t)\{[1 - bin_a^{dch}(t)] + sw [1 - bin_a^{dch}(t-1)]bin_a^{dch}(t)\}O(t) \quad (21)$$

که در این رابطه، $E_a(t)$ انرژی مصرفی وسیله a در زمان t ، $bin_a^{dch}(t)$ متغیر باینری است که ۱ بودن آن نشان‌دهنده تأمین بار وسیله a در زمان t توسط PHEV است. همچنین، sw بر حسب پله زمانی، مدت زمان سوئیچینگ بین شبکه و PHEV در لحظه وقوع قطعی است. $O(t)$ نیز همانگونه که قبلاً ذکر شد باینری نشان‌دهنده قطعی در زمان t است. بر اساس آنچه در این رابطه آمده است، اگر وسیله a توسط PHEV در زمان $t-1$ تأمین نمی‌شود و در زمان t تأمین می‌شود، یعنی $bin_a^{dch}(t-1)=0$ و $bin_a^{dch}(t)=1$ ، بنابراین $LE_a(t)=swE_a(t)$. اگر PHEV وسیله a را در زمان $t-1$ و t تأمین کند، $LE_a(t)$ برابر صفر خواهد بود. لازم به ذکر است، مجموع $E_a(t)bin_a^{dch}(t)$ در مدت زمان قطعی روی کل وسایل، میزان انرژی دشارژ شده باتری PHEV در زمان t را می‌دهد،

$$\sum_{a \in A} bin_a^{dch}(t)E_a(t) = dch(t) \quad (22)$$

بنابراین با در نظر گرفتن قابلیت تأمین بار خانگی توسط PHEV می‌توان خاموشی را مدیریت و با تأمین احتمالی وسایلی که پیش از این بر اساس کمینه‌سازی هزینه پرداختی برای روشن بودن برنامه‌ریزی شده بودند، هزینه قطعی مشترک را به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. فرمول‌بندی ارائه شده در قالب برنامه‌ریزی خطی است که توسط تحلیل کننده CPLEX در محیط GAMS حل می‌گردد.

۴. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، روش ارائه شده در حالت‌های مختلف در یک خانه هوشمند با وسایل پاسخگو و غیرپاسخگو و یک PHEV مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در ادامه، پس از ذکر فرضیات مورد نیاز برای شبیه‌سازی مسئله مدیریت بار خانگی، سه حالت زیر در نظر گرفته می‌شوند: حالت اول خانه‌ای بدون اعمال مدیریت بار خانگی، حالت دوم همان حالت قبلی با اعمال مدیریت بار و بدون وقوع قطعی و حالت سوم، حالت دوم با وقوع قطعی بار. در این حالات، تعرفه TOU به‌عنوان قیمت برق در نظر گرفته می‌شود اما تأثیر قیمت‌گذاری IBR و همچنین ترکیب TOU و IBR نیز در انتها بر نتایج حاصل از مدیریت بار بررسی می‌گردد. روش ارائه‌شده برای مدیریت بار خانگی برای روز بعد (۲۴ ساعت) در زمستان پیشنهاد می‌گردد. هر پله زمانی ۱۰ دقیقه و بنابراین تعداد پله‌های زمانی در

بازه $[u, v]$ خارج از خانه است و در این بازه، باتری خودرو E_{out} کیلووات ساعت انرژی مصرف می‌کند. پرواضح است که $ch(t)$ و $dch(t)$ در این بازه صفر خواهند بود. بعلاوه، صاحب خودرو انتظار دارد که خودرو در زمان خروج از خانه، یعنی زمان u باتری با شارژ کامل داشته باشد. بنابراین:

$$\sum_{t=1}^{u-1} (ch(t) - dch(t)) + PHE_{in} = c_{bat} \quad (15)$$

که در این رابطه، PHE_{in} شارژ اولیه باتری خودرو و c_{bat} ظرفیت باتری خودرو است. همچنین با توجه به ویژگی‌های باتری خودرو، نرخ شارژ و دشارژ باتری باید به سطح معینی محدود گردد.

$$ch(t) \leq ch_{max} \quad (16)$$

$$dch(t) \leq dch_{max} \quad (17)$$

که ch_{max} و dch_{max} بیشینه نرخ مجاز شارژ و دشارژ در هر پله زمانی است. همچنین میزان دشارژ در هر پله زمانی بایستی از سطح شارژ موجود باتری خودرو کمتر باشد. این موضوع در رابطه (۱۸) محقق می‌گردد.

$$dch(t) \leq PHE_{in} + \sum_{y=1}^{t-1} (ch(y) - dch(y)) - bin(t)E_{out} \quad (18)$$

که در این رابطه، $bin(t)$ باینری است که ۱ بودن آن نشان‌دهنده بازگشت خودرو به خانه پس از سفر روزانه است. سمت راست نامساوی در حقیقت، سطح شارژ باتری در هر لحظه را نشان می‌دهد. این سطح شارژ باتری همواره بایستی کمتر از ظرفیت باتری باشد که این مهم در رابطه (۱۹) تحقق می‌یابد.

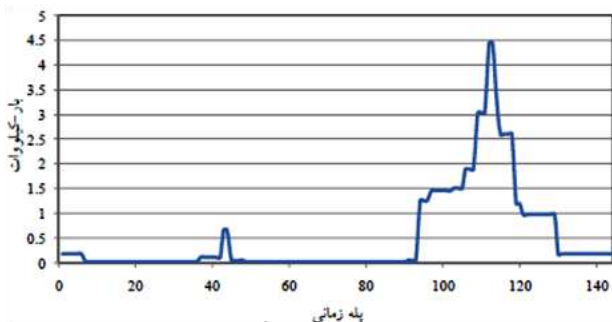
$$PHE_{in} + \sum_{y=1}^{t-1} (ch(y) - dch(y)) - bin(t)E_{out} \leq c_{bat} \quad (19)$$

همچنین، سطح شارژ باتری در انتهای روز بایستی میزانی باشد که توسط مشترک تعیین می‌گردد. این میزان با PHE_{cus} نمایش داده می‌شود و از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$\sum_{t \in T} (ch(t) - dch(t)) - bin(num)E_{out} + PHE_{in} = PHE_{cus} \quad (20)$$

که num تعداد پله‌های زمانی در بازه برنامه‌ریزی است. بدین ترتیب تابع هزینه پرداختی و محدودیت‌های مربوطه ارائه گردید. در ادامه محدودیت‌های مربوط به تابع هزینه قطع بار بررسی می‌شود. همانگونه که پیش از این اشاره شد، $IC(t)$ تابع انرژی از دست رفته وسایل در پله زمانی t ، و همچنین ارزش انرژی از دست رفته می‌باشد. انرژی از دست رفته وسیله a در طول زمان قطعی بار خانگی از شبکه در زمان t توسط رابطه

حالت اول: در این حالت، فرض می‌شود که سیستم گرمایشی همواره به میزان مطلوب مشترک مصرف می‌کند، PHEV با بیشینه حد مجاز خود از لحظه اتصال به شارژ، شارژ می‌گردد و هر وسیله پاسخگو در بازه مجاز عملکرد خود روشن می‌شود. با توجه به غیر قابل کنترل بودن بار، امکان تأمین بار خانگی توسط PHEV در این حالت وجود ندارد. نمودار بار خانگی در این حالت در شکل (۲) نمایش داده می‌شود.



شکل (۲): نمودار بار خانگی در حالت اول.

اگر مشترک همانند شکل (۲) در یک روز انرژی مصرف کند، بر اساس تعرفه TOU ارائه شده هزینه پرداختی برق مصرفی در آن روز ۱۷۳/۹۹ سنت خواهد بود. همچنین بیک بار مصرفی ۴/۴۳۵ کیلو وات می‌باشد. فرض می‌گردد، برق خانه در همین روز در پله‌های زمانی ۱۱۵-۱۲۶ قطع شود. تلویزیون و کامپیوتر شخصی به ترتیب ۱۰ و ۶ پله زمانی در این زمان قطعی به اجبار خاموش شده‌اند.

همچنین، سیستم گرمایشی نیز که ۰/۰۳ کیلووات ساعت در هر پله زمانی برق مصرف کرده است به اجبار خاموش می‌گردد. این ارقام موجب تحمیل هزینه قطعی ۳۸/۳۶ سنت برای مشترک می‌گردد. حالت دوم: در این حالت، بار خانه قطع نمی‌شود بنابراین، برنامه‌ریزی بار تنها با کمینه‌سازی هزینه پرداختی مشترک در طی روز صورت می‌گیرد. بازه‌های عملکرد برای وسایل پاسخگو، بازه‌های عملکرد پیشنهادی برای وسایل غیرپاسخگو، و سطح مصرف سیستم گرمایش در هر بازه حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی با و بدون در نظر گرفتن قابلیت تأمین بار خانگی توسط PHEV. در جداول (۳) و (۴) قابل مشاهده است.

جدول (۳): بازه‌های عملکرد وسایل در حالت اول بدون قابلیت تأمین بار

توسط PHEV	
وسيله	بازه‌های عملکرد
جاروبرقی	۳۸-۴۲ و ۱۴۱-۱۴۴
تلویزیون	۷۴-۹۲ و ۱۱۰-۱۴۴
کامپیوتر شخصی	۹۸-۱۰۹ و ۱۲۱-۱۴۴
خشک‌کن لباس‌ها	۱۲۲، ۱۲۳-۱۲۶ و ۱۳۲
ماشین لباسشویی	۹۶-۹۸
ماشین ظرفشویی	۱۰۶-۱۰۸
قهوه‌ساز	۴۱-۴۲

روز ۱۴۴ پله است. فرض می‌شود که خانه شامل سه وسیله غیرپاسخگوی جاروبرقی، تلویزیون، و کامپیوتر شخصی است. همچنین ماشین لباسشویی، ماشین ظرفشویی، خشک‌کن لباس‌ها، و قهوه‌ساز به‌عنوان وسایل پاسخگویی هستند که تنها زمان مصرفشان توسط برنامه مدیریت بار خانگی تعیین می‌شود. اطلاعات این وسایل در جدول (۱) مشاهده می‌گردد که داده‌های مربوط به وسایل الکتریکی خانه در یک روز عادی را نشان می‌دهد. مصرف انرژی در هر بازه زمانی عملکرد (E_a)، تعداد بازه‌های زمانی عملکرد (num_a)، پریودهای شروع (sta_a)، و پایان (fin_a) بازه مجاز عملکرد برای هر وسیله را بازگو می‌کنند. علاوه بر این وسایل، سیستم گرمایشی خانه به‌عنوان وسیله‌ای پاسخگو که مصرف انرژی آن در هر زمان قابل تنظیم است، در این مطالعات در نظر گرفته می‌شود. بازه مجاز مصرف انرژی سیستم گرمایشی مطابق [۱۶] در نظر گرفته شده و میزان مطلوب مصرف انرژی همان بیشینه مجاز مصرف فرض می‌شود.

همچنین میزان انحراف مجاز ۰/۳۶ کیلووات ساعت فرض می‌شود. علاوه بر این، ۳ بازه مجاز به‌عنوان پیشنهاد برای وسایل غیرپاسخگو به مشترک پیشنهاد می‌گردد و در اعلام نتایج فرض می‌شود مشترک یکی از این سه بازه را می‌پذیرد. هزینه بار از دست رفته، ۲۰ سنت بر کیلووات ساعت برای همه وسایل یکسان در نظر گرفته می‌شود. شارژ پایان روز PHEV، برابر شارژ ابتدای روز و مساوی ۳/۹ کیلووات ساعت در نظر گرفته می‌شود. سطوح تعرفه TOU در جدول (۲) آمده است.

جدول (۱): اطلاعات وسایل پاسخگو و غیرپاسخگو.

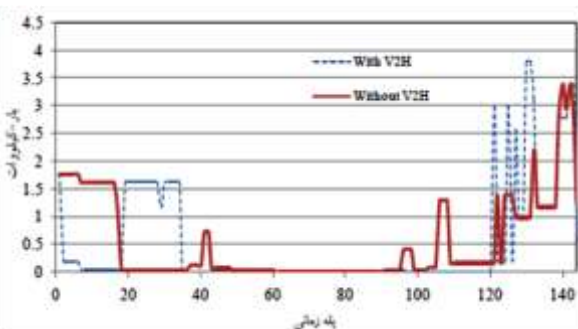
وسيله	num_a	E_a	sta_a	fin_a
جاروبرقی	۳	۰/۱۰۰	۷۲	۱۳۲
تلویزیون	۱۸	۰/۱۳۳۳	۶۰	۸۴
کامپیوتر شخصی	۱۲	۰/۰۳۷۵	۱	۱۴۴
خشک‌کن لباس‌ها	۵	۰/۲۰۵	۱۰۹	۱۳۲
ماشین لباسشویی	۳	۰/۰۶۲۵	۷۳	۱۰۸
ماشین ظرفشویی	۳	۰/۲۰۰	۹۱	۱۱۴
قهوه‌ساز	۲	۰/۱۰۰	۴۰	۴۵

جدول (۲): سطوح تعرفه TOU.

λ_1	λ_2	λ_3	T_1	T_2	T_3
			پله‌های زمانی	پله‌های زمانی	پله‌های زمانی
۹/۸۷	۱۱/۴۵	۱۴/۹۵	۱-۴۲ و	۴۳-۶۰ و	۶۱-۱۲۰
			۱۳۹-۱۴۴	۱۲۱-۱۳۸	

شارژ باتری ۲/۸ کیلووات ساعت است. بنابراین، PHEV در ساعات پایانی روز شارژ می‌شود تا سطح شارژ باتری را به ۳/۹ کیلووات ساعت از پیش تعیین‌شده برساند. همان‌گونه که در جدول (۶) آمده است با در نظر گرفتن قابلیت تأمین بار خانگی توسط PHEV، باتری علاوه بر شارژ در ساعات تعرفه پایین، در زمان‌های تعرفه بالا دشارژ می‌شود. این موضوع به کاهش هزینه پرداختی خواهد انجامید. هزینه پرداختی مشترک بدون قابلیت تأمین بار و با قابلیت تأمین بار توسط PHEV، به ترتیب، ۱۳۵/۳۲ و ۱۳۲/۹۸ سنت در روز است که در مقایسه با حالت اول کاهش یافته است.

همچنین، بار خانگی با قابلیت تأمین بار و بدون قابلیت تأمین بار توسط PHEV در شکل (۳) نمایش داده شده است. پیک بار خانگی بدون و با قابلیت تأمین بار توسط PHEV به ترتیب ۳/۴ و ۳/۸ کیلووات است که در هر دو مورد کمتر از حالت اول است. در حالتی که قابلیت تأمین بار خانگی توسط PHEV وجود دارد، در ساعات تعرفه بالا دشارژ می‌شود و برای جبران در ساعات‌های تعرفه پایین، بیشتر نسبت به حالتی که قابلیت تأمین بار وجود ندارد شارژ می‌گردد که این مهم، به بیشتر شدن پیک بار در ساعات پایانی شب می‌انجامد.



شکل (۳): نمودار بار خانگی در حالت دوم.

حالت سوم: در این حالت فرض می‌شود که بار خانه از پله زمانی ۱۱۵ به مدت ۲ ساعت، ۱۲ پله زمانی، تا پله ۱۲۶ قطع شود. نتایج اعمال مدیریت بار خانگی تا پله ۱۱۴ همانند حالت پیش است. در پله ۱۱۵، برنامه‌ریزی به روز می‌شود. همچنین پس از اتمام قطعی بار در بازه ۱۲۶، مجدداً بار خانگی بر اساس اطلاعات به‌روز شده از عملکرد وسایل به‌روز می‌شود. با توجه به اینکه، ارزش انرژی از دست‌رفته وسایل، ۲۰ سنت به ازای هر کیلووات ساعت است و از تعرفه برق در هر زمانی بیشتر است، PHEV تلاش می‌کند که تا حد ممکن برق وسایلی را که در حالت دوم پیش‌بینی شده بودند در بازه ۱۱۵-۱۲۶ روشن باشند، تأمین کند. با توجه به زمان سوئیچینگ برابر با ۰/۰۵ یک پله زمانی هزینه قطعی بار برابر با ۱/۲ سنت حاصل می‌شود. این میزان هزینه قطعی با مقایسه با هزینه محاسبه‌شده در حالت ۱ (۳۸/۳۶ سنت)، تأثیر مدیریت بار خانگی پیشنهادشده بر کاهش هزینه قطعی را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۴)

جدول (۴): بازه‌های عملکرد وسایل در حالت دوم با قابلیت تأمین بار

توسط PHEV	
وسيله	بازه‌های عملکرد
جاروبرقی	۴۰-۳۸ و ۱۳۹-۱۴۴
تلویزیون	۱۱۴-۸۱ و ۱۱۸-۱۴۴
کامپیوتر شخصی	۱۱۲-۱۰۱ و ۱۲۱-۱۴۴
خشک‌کن لباس‌ها	۱۲۱، ۱۲۵ و ۱۳۰-۱۳۲
ماشین لباسشویی	۹۷-۹۹
ماشین ظرف‌شویی	۱۰۰-۱۰۲
قهوه ساز	۴۱-۴۲

همان‌گونه که از نتایج برمی‌آید، عملکرد وسایل در زمان‌هایی با تعرفه‌های پایین‌تر در بازه‌های زمانی مجاز عملکردشان است. برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ PHEV در جداول (۵) و (۶) نشان داده شده است.

جدول (۵): شارژ/دشارژ PHEV در حالت اول بدون قابلیت تأمین بار

خانگی توسط PHEV	
شارژ خودرو الکتریکی (kW)	بازه‌های عملکرد
۱/۴	۱-۱۷
۱	۱۸
۰	۱۹-۱۳۸
۱/۴	۱۳۹ و ۱۴۴
۱	۱۴۱
۱/۴	۱۴۲ و ۱۴۳

جدول (۶): شارژ/دشارژ PHEV در حالت دوم با قابلیت تأمین بار

خانگی توسط PHEV	
شارژ خودرو الکتریکی (kW)	بازه‌های عملکرد
۱/۴	۱
۱/۴	۲۰-۲۹
۱	۳۰
۱/۴	۳۱-۳۵
-۰/۴	۹۸-۱۰۰
-۱/۴	۱۰۱-۱۰۳
-۰/۱	۱۰۴-۱۰۹
-۰/۲	۱۱۰-۱۲۱
۱/۴	۱۲۲، ۱۲۶، ۱۲۸، ۱۳۱ و ۱۳۲
۰/۸	۱۳۳
۱/۴	۱۴۰-۱۴۴

در حالتی که قابلیت تأمین بار توسط PHEV وجود ندارد، PHEV در پله‌های زمانی ۱-۱۷ شارژ می‌شود تا باتری خودرو برای خروج از خانه شارژ کامل داشته باشد. این پله‌های زمانی همگی از زمان‌های تعرفه پایین‌تر هستند. همچنین، پس از ورود PHEV به خانه در پله زمانی ۹۶،

پرداختی و پیک بار با در نظر گرفتن تعرفه‌های مختلف جهت مقایسه در جدول (۸) خلاصه می‌گردد.

جدول (۸): نتایج اجرای مدیریت بار خانگی با در نظر گرفتن تعرفه‌های مختلف برق.

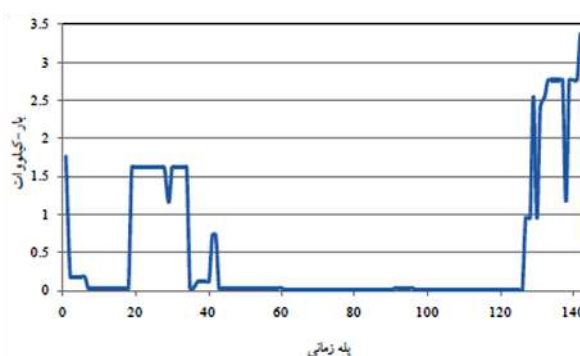
تعرفه	هزینه پرداختی (€/day)	پیک بار (kW)
TOU	۱۳۲/۹۸	۳/۸
IBR	۱۳۸/۷۷۵	۲/۸
TOU+IBR	۱۱۸/۵۳۱	۳

نتایج نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن IBR، بار در طی روز پخش می‌شود و همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد پیک بار نیز به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. متعاقباً، هزینه پرداختی و پیک بار نسبت به حالتی که تعرفه TOU در نظر گرفته می‌شود به ترتیب، ۱۰/۵٪ و ۲۱٪ کاهش می‌یابد.

برای جمع‌بندی نتایج شبیه‌سازی به‌طور خلاصه می‌توان گفت که در حالت اول با توجه به وجود قطعی برق و وقوع زمان قطعی برای وسایل مختلف، همچنین غیرقابل کنترل بودن بار و عدم امکان تأمین بار خانگی توسط PHEV، حالتی بدون اعمال مدیریت بار خانگی در نظر گرفته می‌شود که علیرغم به‌کارگیری روش قیمت‌گذاری TOU، منجر به تحمیل هزینه‌ای بالا برای مشترک می‌گردد. در حالت دوم برخلاف حالت اول، قطعی صورت نمی‌گیرد که در نتیجه برنامه‌ریزی برای مدیریت بار با تعریف بازه‌های عملکرد برای تمامی وسایل انجام گرفته و همچنین شرایط قابلیت و عدم قابلیت تأمین بار خانگی توسط PHEV بررسی شده که نشان از بهینه بودن قابلیت تأمین بار توسط PHEV در این حالت دارد.

از طرفی این نتیجه حاصل می‌شود که هزینه پرداختی مشترک با تعرفه TOU، حتی در حالت عدم قابلیت تأمین بار خانگی توسط PHEV، در مقایسه با حالت اول کاهش یافته است. پیک بار خانگی نیز نسبت به حالت اول کمتر شده است. در حالت سوم قطعی در نظر گرفته می‌شود، اما برخلاف حالت اول برنامه‌ریزی بهینه‌ای برای مدیریت بار با حضور PHEV وجود دارد که این امر را میسر می‌سازد که میزان هزینه قطعی در مقایسه با حالت اول کاهش یابد. به‌علاوه، در این حالت پیک بار خانگی و هزینه پرداختی با تعرفه TOU نسبت به حالت اول کاهش یافته است. اما باید توجه داشت که علیرغم وجود قطعی بار در این حالت، هزینه پرداختی تنها اندکی بیش از حالت دوم است که دلیل آن تأثیر مدیریت بار خانگی پیشنهاد شده می‌باشد. در قسمت آخر که به‌صورت مجزا بیان شده، هدف مقایسه

نمودار بار خانگی در حالت سوم را نشان می‌دهد. بر این اساس پیک بار خانگی برابر ۳/۳۶ کیلووات است که برحسب انتظار کمتر از حالت اول می‌باشد. همچنین هزینه پرداختی برابر ۱۳۷/۷۸ سنت بوده که اندکی بیش از هزینه پرداختی در حالت دوم است. این نتیجه نشان می‌دهد با وجود وقوع قطعی بار و انحراف از برنامه بهینه از نظر هزینه پرداختی در حالت دوم، مدیریت بار خانگی در حالت سوم مانع از افزایش بیش از اندازه‌ی هزینه پرداختی شده است. بدین ترتیب مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای سه حالت ارائه‌شده مسئله مدیریت بار خانگی، در جدول (۷) نشان داده شده است.

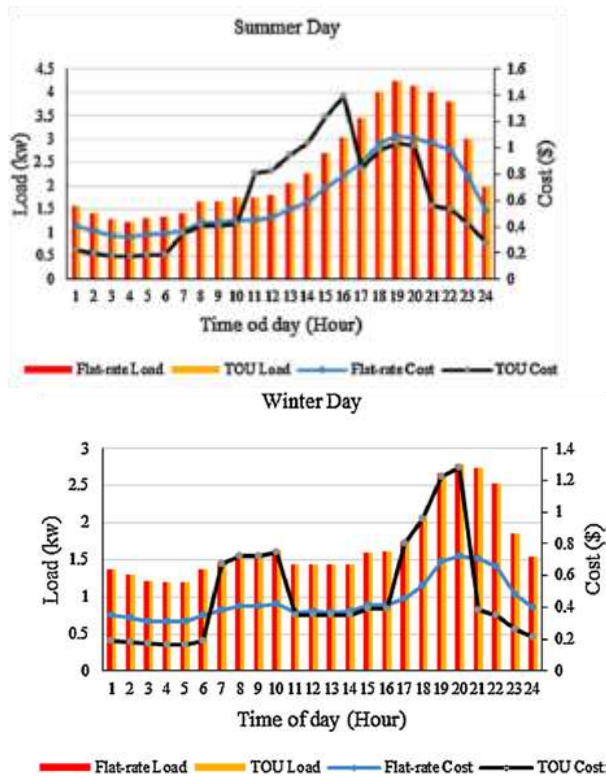


شکل (۴): نمودار بار خانگی در حالت سوم.

جدول (۷): مقایسه سه سناریو.

حالات مسئله	تعرفه	قطعی بار	قابلیت تأمین بار	هزینه پرداختی (€/day)	پیک بار (kW)
۱	TOU	پله زمانی ۱۱۵-۱۲۶	عدم حضور PHEV	۱۷۳/۹۹	۴/۴۳۵
۲	TOU	ندارد	عدم حضور PHEV	۱۳۵/۳۲	۳/۴
			حضور PHEV	۱۳۲/۹۸	۳/۸
۳	TOU	پله زمانی ۱۱۵-۱۲۶	حضور PHEV	۱۳۷/۷۸	۳/۳۶

در این بخش، تلاش می‌شود که تأثیر به‌کارگیری قیمت‌گذاری IBR و همچنین ترکیب IBR و TOU که در مراجع پیشین نیز مورد توجه بوده است، بر نتایج مدیریت بار خانگی مورد مطالعه قرار گیرد. نتایج هزینه



شکل (۵): تأثیر استفاده از تعرفه TOU روی مصرف و هزینه برق.

در [۲۶] در سناریوی دوم، برای قیمت‌گذاری زمان واقعی^۱ (RTP) دو حالت در نظر گرفته شده است. در هر دو حالت بارهای قابل کنترل شامل ماشین ظرف‌شویی، خشک‌کن لباس، پمپ آب، آب‌گرم‌کن، PHEV و تهویه در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه جهت مقایسه حالت دوم لحاظ می‌گردد. در این حالت، دو روش مدیریت تقاضا شامل خاموش کردن و شیفت بار به همراه مدل‌های تعرفه RTP و IBR آورده می‌شوند. با توجه به قیمت‌گذاری RTP، قیمت برق می‌تواند در زمانه‌ای کوتاه تغییر کند که این موضوع قیمت‌گذاری را نسبت به مدل TOU انعطاف‌پذیرتر خواهد کرد. بنابراین وقتی از RTP + IBR استفاده می‌شود، بر اساس مصرف انرژی کل، قیمت‌های برق داخل همان دوره^۳ متفاوت می‌باشند. وقتی انرژی مصرفی کل از ۱/۵ کیلو وات بین ساعات ۶ تا ۱۲ بعد از ظهر در هر دو فصل تابستان و زمستان فراتر رود، یک سطح از تعرفه IBR بکار می‌رود. بنابراین کنترل‌کننده^۴، مشترکین را بر اساس شرایط تعریف‌شده در الگوریتم MULP خاموش خواهد کرد. شکل (۶) تأثیر این الگوریتم با روش مدیریت تقاضا به همراه قیمت‌گذاری توسط RTP + IBR جهت حداقل کردن مصرف (و هزینه) روزانه انرژی را نشان می‌دهد.

قیمت‌گذاری‌های مختلف بر برنامه‌ریزی مدیریت بار خانگی می‌باشد که نشان می‌دهد، ترکیب IBR و TOU منجر به کاهش هزینه پرداختی و بیک بار نسبت به روش قیمت‌گذاری TOU، می‌گردد.

در این بخش، جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل از تعرفه‌های مختلف، مقایسه‌ای کیفی با نتایج [۲۶] انجام می‌شود. در [۲۶] دو سناریو متفاوت جهت مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم چند مشترک با اولویت بار^۱ (MULP) ارائه می‌گردد. در سناریوی اول تعرفه TOU در نظر گرفته می‌شود که جزئیات آن در [۲۶] ارائه گردیده است. در حالت اول این سناریو تعرفه TOU (بدون کنترل مصرف انرژی) با تعرفه نرخ ثابت مقایسه می‌شود. در شکل (۵) قسمت بالا، تغییرات در یک روز تابستانی و قسمت پائین، تغییرات در یک روز زمستانی را نشان می‌دهد. نمودارهای میله‌ای زرد و قرمز رنگ نشانگر میزان بار برای هر دو تعرفه نرخ ثابت و TOU بوده، در صورتی که منحنی آبی‌رنگ مربوط به هزینه پرداختی با تعرفه ثابت و منحنی مشکی‌رنگ مربوط به هزینه پرداختی با تعرفه TOU می‌باشند.

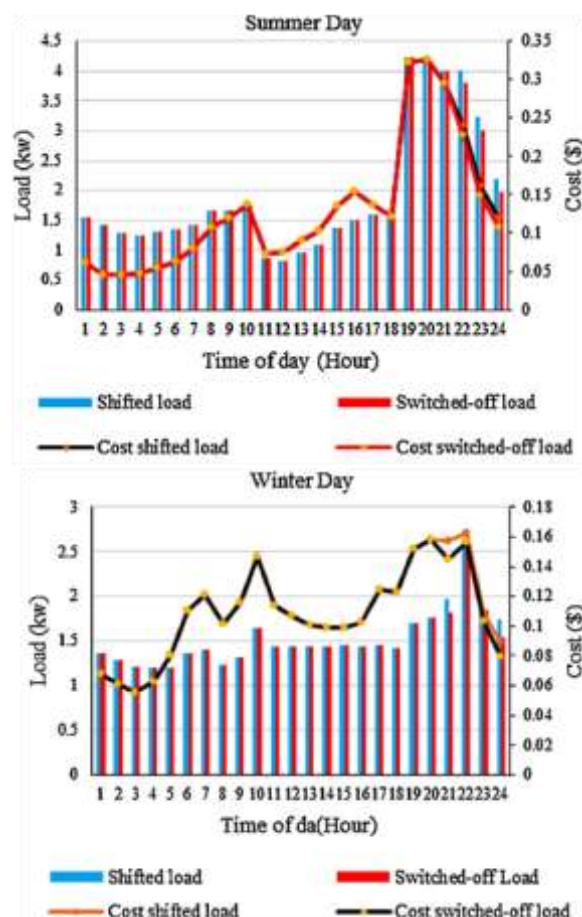
شکل (۵) نشان می‌دهد استفاده از تعرفه TOU در فصل تابستان باعث کاهش ۷/۰ درصدی هزینه پرداختی نسبت به تعرفه نرخ ثابت خواهد شد. برعکس، در فصل زمستان تعرفه نرخ ثابت باعث کاهش ۹ درصدی هزینه پرداختی نسبت به تعرفه TOU خواهد گردید. از طرفی میزان مصرف انرژی در تمام زمان‌ها یکی است و هیچ اقدامی در جهت انتقال بارهای غیر ضروری به زمانه‌ای ارزان‌تر صورت نمی‌گیرد. هرچند، قیمت برق در ساعات اوج مصرف در تعرفه TOU به میزان قابل توجهی بیشتر از تعرفه نرخ ثابت در همان زمان است که این موضوع نیازمند ارائه روش کنترل مصرف برق در ساعات اوج مصرف می‌باشد.

در این سناریو الگوریتم مدیریت انرژی خانه بارهای غیر ضروری را در ساعات اوج مصرف به ساعات کم‌هزینه‌تر شیفت داده تا هزینه برق و مجموع میزان مصرف را کاهش دهد. بدین منظور حد تقاضای ۱/۵ کیلووات در ساعات اوج مصرف برای هر دو فصل ثابت فرض می‌گردد [۲۶]. طراحی انعطاف‌پذیر الگوریتم مدیریت انرژی خانه این امکان را به مشترکین می‌دهد تا برای کاهش مصرف انرژی روزانه و کاهش هزینه برق خود انتخاب‌های گوناگونی داشته باشند.

باعث خواهد شد تا مشترکین از طریق یک روش بهینه‌تر میزان مصرف انرژی خود را مدیریت نمایند.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، برنامه بهینه‌سازی مدیریت بار خانگی ارائه می‌شود به طوری که، زمان‌بندی بهینه عملکرد وسایل الکتریکی و شارژ و دشارژ PHEV را با در نظر گرفتن کلیه ترجیحات مشترک خانگی تعیین می‌کند. نگرانی‌های مشترک برق همچون هزینه پرداختی و هزینه قطع بار در این برنامه در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، قابلیت تأمین بار خانگی توسط PHEV در برنامه‌ریزی بار جهت مدیریت قطعی بار به کار گرفته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که اعمال برنامه بهینه‌سازی ارائه شده تا ۲۲٪ می‌تواند هزینه پرداختی مشترک را با کنترل زمان مصرف وسایل کاهش دهد. علاوه بر این، قابلیت تأمین بار خانگی توسط PHEV هزینه پرداختی و هزینه قطع بار را کاهش می‌دهد. نتایج به دست آمده حاکی از آن می‌باشند که پیک بار نیز با اعمال روش ارائه شده کاهش یافته که از دیدگاه بهره‌بردار شبکه سودمند است. به علاوه، تأثیر در نظر گرفتن تعرفه‌گذاری‌های مختلف نشان می‌دهد که افزودن تعرفه IBR بر TOU موجود نه تنها هزینه پرداختی را کاهش می‌دهد، بلکه پیک بار را نیز محدود می‌کند. در ادامه این پژوهش می‌توان وسایل خانه هوشمند را به دو دسته قابل تغذیه و نیز پرمصرف‌های غیرقابل تغذیه توسط باتری خودرو، در زمان قطعی بار تقسیم‌بندی نمود که نویسندگان این مقاله سعی در بهبود این امر در پژوهش‌ها و مقالات آتی دارند تا با افزودن شرایط جدید و ارائه راه‌حلی برای مسأله فوق‌الذکر، مدل‌سازی‌های مربوطه انجام گیرد.



شکل (۶): تأثیر استفاده از تعرفه‌های RTP+ IBR روی مصرف و هزینه برق.

با توجه به مطالب ذکر شده (شبیه‌سازی و مقایسه با نتایج [۲۶]) می‌توان نشان داد که ترکیب TOU+IBR یا RTP+ IBR باعث کاهش قابل توجهی در میزان مصرف انرژی (مخصوصاً در زمانه‌ای اوج تقاضا و مصرف) و هزینه پرداختی خواهد شد. همچنین این قضیه

۶. مراجع

- [1] Chunduru, V., Subramanian, N., "Effects of Power Lines on Performance of Home Control System," International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, New Delhi, India, pp.1-6, 12-15 Dec. 2006.
- [2] Neugschwandtner, G., Kastner, W., "Congestion Control in Building Automation Networks: Considerations for KNX," 35th Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics, Porto, Portugal, pp.4149-4154, 3-5 Nov. 2009.
- [3] Vega, A. M., Santamaria, F., Rivas, E., "Modeling for Home Electric Energy Management: A Review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 52, pp. 948-959, 2015.
- [4] Heo, J., Seon, C., Bong, S., Soo, S., "Design and Implementation of Control Mechanism for Standby Power Reduction," IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 54, No. 1, pp. 179-185, 2008.
- [5] Jiang, B., Fei, Y., "Smart Home in Smart Microgrid: A Cost-Effective Energy Ecosystem with Intelligent Hierarchical Agents," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 1, pp. 3-13, 2014.
- [6] Xiong, G., Chen, C., Kishore, S., Yener, A., "Smart (in-home) Power Scheduling for Demand Response on the Smart Grid," IEEE Conference on Innovative Smart Grid Technologies, Anaheim, CA, USA, pp.1-7, 17-19 Jan. 2011.
- [7] Ipakchi, A., Albuyeh, F., "Grid of the Future," IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 7, No. 2, pp. 52-62, 2009.
- [8] Erol-Kantarci, M., Mouftah, H. T., "TOU-Aware Energy Management and Wireless Sensor Networks

- for Reducing Peak Load in Smart Grids," 72nd IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, ON, Canada, pp.1-5, 6-9 Sep. 2010.
- [9] Conejo, A. J., Morales, J. M., Baringo, L., "Real-Time Demand Response Model," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 3, pp. 236-242, 2010.
- [10] Pipattanasomporn, M., Kuzlu, M., Rahman, S., "An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 4, pp. 2166-2173, 2012.
- [11] Du, P., Lu, N., "Appliance Commitment for Household Load Scheduling," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 2, pp. 411-419, 2011.
- [12] Chen, X., Wei, T., Hu, S., "Uncertainty-Aware Household Appliance Scheduling Considering Dynamic Electricity Pricing in Smart Home," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 2, pp. 932-941, 2013.
- [13] Arghira, N., Hawarah, L., Ploix, S., Jacomino, M., "Prediction of Appliances Energy Use in Smart Homes," Energy, Vol. 48, No. 1, pp. 128-134, 2012.
- [14] Shafiee, S., Fotuhi-Firuzabad, M., Rastegar, M., "Investigating the Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Power Distribution Systems," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 3, pp. 1351-1360, 2013.
- [15] Shao, S., Zhang, T., Pipattanasomporn, M., Rahman, S., "Impact of TOU Rates on Distribution Load Shapes in a Smart Grid with PHEV Penetration," IEEE Transmission and Distribution Conference and Exhibition, New Orleans, LA, USA, pp. 1-6, 19-22 April 2010.
- [16] Rastegar, M., Fotuhi-Firuzabad, M., "Outage Management in Residential Demand Response Programs," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 3, pp. 1453-1462, 2015.
- [17] Morais, H., Sousa, T., Soares, J., Faria, P., Vale, Z., "Distributed Energy Resources Management Using Plug-in Hybrid Electric Vehicles as a Fuel-shifting Demand Response Resource," Energy Conversion and Management, Vol. 97, pp. 78-93, 2015.
- [18] Zakariazadeh, A., Jadid, S., Siano, P., "Multi-objective Scheduling of Electric Vehicles in Smart Distribution System," Energy Conversion and Management, Vol. 79, pp. 43-53, 2014.
- [19] Clement-Nyns, K., Haesen, E., Driesen, J., "The Impact of Charging Plug-in Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No. 1, pp. 371-380, 2010.
- [20] Pedrasa, M. A. A., Spooner, T. D., MacGill, I. F., "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, 2010.
- [21] Erol-Kantarci, M., Mouftah, H. T., "Wireless Sensor Networks for Cost-Efficient Residential Energy Management in the Smart Grid," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 2, pp. 314-325, 2011.
- [22] Mohsenian-Rad, A. H., Wong, V. W. S, Jatskevich, J., Schober, R., "Optimal and Autonomous Incentive-based Energy Consumption Scheduling Algorithm for Smart Grid," IEEE Conference on Innovative Smart Grid Technologies, pp. 1-6, Gothenburg, Sweden, 19-21 Jan. 2010.
- [23] Ogwumike, C., Short, M., "Evaluation of a Heuristic Approach for Efficient Scheduling of Residential Smart Home Appliances," IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, pp. 2017-2022, Rome, Italy, 10-13 June 2015.
- [24] Zhang, D., Shah, N., Papageorgiou, L. G., "Efficient Energy Consumption and Operation Management in a Smart Building with Microgrid," Energy Conversion and Management, Vol. 74, pp. 209-222, 2013.
- [25] کیا، محسن؛ ستایش‌نظر، مهرداد؛ سپاسیان، محمد صادق، «برنامه‌ریزی بهینه مدیریت بارهای کنترل‌پذیر و مشارکت واحدهای تولید همزمان برق و حرارت در حضور ذخیره ساز الکتریکی»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، جلد ۷، شماره ۲، صفحه ۲-۱۳، ۱۳۹۶.
- [26] Abushnaf, J., Rassau, A., Górniewicz, W., "Impact of Dynamic Energy Pricing Schemes on a Novel Multi- User Home Energy Management System," Electric Power Systems Research, Vol. 125, pp. 124-132, 2015.