

مدیریت بهینه سمت مصرف در بارهای خانگی با در نظر گرفتن درجه حساسیت مصرف در حضور سیستم‌های فتوولتایک کوچک

محمودزاده باقری

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

Ma.zadehbagheri@iau.ac.ir

رحیم ایلدرابادی

استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

r.ildar@hsu.ac.ir

چکیده

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۷/۱۳

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۱/۲۲

کلمات کلیدی:
 مدیریت بهینه،
 حساسیت مصرف،
 سیستم‌های فتوولتایک،
 روش HEM

طرح‌های مدیریت انرژی خانگی^۱ (HEM) مشتریان مسکونی را متقادع می‌سازند که در برنامه‌های پاسخ به تقاضا براساس قیمت^۲ (DR) مشارکت فعال داشته باشند. در این روش‌های HEM قیمت محور، زمان‌بندی کنترل-کننده برای مصرف انرژی دستگاه‌های خانگی در واکنش به سیگنال قیمت برق، اولویت‌های متعددی را در میان مشتریان به دنبال دارد. با وجود اینکه روش‌های مختلفی اخیراً برای استفاده از HEM پیشنهاد شده، اولویت‌گذاری عملکرد دستگاه‌های قابل کنترل از منظر مشتری در HEM قیمت محور مشخص نشده است، و این موضوع نقطه‌ی تمرکز مقاله حاضر است. در این مقاله، بدین منظور ارزش کاهش بار^۳ (VOLL) هر دستگاه به گونه‌ای تعریف می‌شود که اولویت اجرایی آن دستگاه را از منظر مشتری مطرح کند. با در نظر گرفتن VOLL دستگاه‌ها، تعرفه‌های برق و محدودیت‌های اجرایی وسائل، مسئله‌ی بهینه‌سازی برای کاهش انرژی HEM پیشنهادی زمان‌بندی بهینه‌ی تقاضا برای برق خانگی است. مطالعات عددی نشان‌گر کارایی روش HEM پیشنهادی در یک خانه‌ی هوشمند با در نظر گرفتن قیمت‌گذاری‌های متفاوت براساس زمان متغیر است.

^۱. Home Energy Management

^۲. Demand Response

^۳. Value of Lost Load

۱ - مقدمه

ξ. Shin

°·Pipattanasompon

Erick Alves

Y. 二〇〇〇年〇〇月〇〇日-二〇〇〇年〇〇月〇〇日

^ Gyamfi

14 Zipperer

—PP.—

12. Ganjei

۱۳. Alavi

14. Ganje

کنترل کننده‌ای را پیشنهاد می‌دهد که اوج مصرف را کاهش می‌دهد و هزینه‌ی برق را در حین حفظ حرارت مناسب سیستم‌های تهویه‌ی خانگی (HVAC) کم می‌کند. در (کون یوان^{۱۶} و دیگران، ۲۰۰۴) نوعی زمان‌بندی هوشمندانه بنا بر قیمت دریافتی انجام شده است. برنامه‌ریزی بهینه بنا بر روابط میان کاربران / مشتریان و شرکت در برنامه‌ی مصرف انرژی حاصل می‌گردد. در (کارلو آوارز^{۱۷} و دیگران، ۲۰۰۴) مدل‌های محاسباتی ایجاد شده تا دستگاه‌های خانگی و مصرف آن‌ها باهدف کاهش مصرف انرژی، قیمت کلی گاز و برق، تنشیات، اوج مصرف و یا ترکیبی از این عوامل بررسی گردد. به علاوه مرجع (تندمانس^{۱۸} و دیگران، ۲۰۱۹) یک HEM بهینه‌ساز را به صورت محاسباتی مشکل از مجموعه‌ای از پیمانه‌های فوتولوئیک خورشیدی، یک توربین کوچک بادی، سیستم ذخیره‌ی انرژی، چرخ الکتریکی و مجموعه‌ای از دستگاه‌های قابل کنترل ایجاد نموده است. هدف کاهش هزینه‌های انرژی در قالب برنامه‌ریزی ترکیبی خطی - انتگرال از دیدگاه مشتری است . درمجموع تحقیقاتی که در بالا عنوان شد از ایده داشتن HEM بهینه برای تسهیل اجرای برنامه‌های DR قیمت محور حمایت می‌کند. نه این تحقیقات و نه سایر تحقیقات مرتبط درزمه‌ی^{۱۹} DR قیمت محور، مدلی را که در آن اولویت دستگاه‌های خانگی درروند‌های بهینه‌سازی مطرح باشد ارائه نمی‌دهند. در این تحقیقات اهمیت تمامی دستگاه از منظر مشتریان یکسان بوده است، چیزی که همیشه نمی‌تواند واقعیت داشته باشد. در این مورد یک مدل HEM مشکل از اولویت دستگاه‌ها از منظر مشتری پیشنهادشده تا اجرای برنامه‌های DR قیمت محور را تسهیل نماید. ابتدا دسته‌بندی‌های مختلفی از دستگاه‌های قابل کنترل مطرح شد. سپس تعریفهای TOU و IBR به عنوان محبوب‌ترین برنامه‌های مسکونی DR به صورت محاسباتی عرضه شد. ازنجایی که ارزش VOLL دستگاه‌های قابل کنترل نقش مهمی درروش پیشنهادی دارد، نحوه‌ی برآورد این ارزش‌ها با استفاده از کنترل کننده بنا بر اولویت‌های مشتری در این قسمت توضیح داده شدند. درنهایت مسئله‌ی بهینه‌سازی یعنی تابع هدف و محدودیت‌ها در فرمت MILP شرح می‌گردد.

۲- بیان مسئله

طرح‌های مدیریت انرژی خانگی (HEM)، مشترکین خانگی را به مشارکت فعال در برنامه‌های پاسخ به تقاضای (DR) مبتنی بر قیمت ترغیب می‌کند. در این روش‌های HEM مبتنی بر قیمت، یک کنترل کننده، مصرف انرژی لوازم خانگی قابل کنترل را در پاسخ به سیگنال قیمت انرژی الکتریکی، با توجه به تمایلات مختلف مشتری، برنامه‌ریزی می‌کند. در این مقاله استفاده از لوازم قابل کنترل را از دید مشتری اولویت‌بندی کرده و در HEM های مبتنی بر قیمت به کارخواهیم گرفت. برای این منظور ارزش بار از دست‌ترفته‌ی (VOLL) هر دستگاه را با توجه به دیدگاه مشتری و بهمنظور اولویت‌بندی آن‌ها تعیین می‌کنیم. با در نظر گرفتن VOLL لوازم خانگی، تعرفه‌های انرژی و محدودیت‌های عملیاتی هر دستگاه از مجموعه‌ی لوازم خانگی مشتری، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی جهت کمینه نمودن هزینه‌های انرژی و هزینه‌های قابلیت اطمینان مشتری تعریف خواهد شد. خروجی این HEM پیشنهادی برنامه‌ی زمان‌بندی بهینه‌ی کارکرد لوازم خانگی الکتریکی خواهد بود. در این راستا با استفاده از انواع قیمت‌گذاری‌های متغیر بازمان در مسئله، اثربخشی روش HEM پیشنهادی سنجیده خواهد شد. همچنین در این مطالعه تأثیر حضور خودروهای الکتریکی و منابع انرژی تجدید پذیر را در برنامه مدیریت مصرف انرژی خانگی لحاظ خواهیم کرد.

۲-۱- اهداف تحقیق

۲-۱-۱- اهداف علمی

- تعیین تأثیر در نظر گرفتن اولویت‌های مشتری در برنامه‌های مدیریت انرژی خانگی.
- تعیین تأثیر در نظر گرفتن تعرفه‌های انرژی در برنامه‌های مدیریت انرژی خانگی.

۲-۱-۲- کاربردی

- کاهش هزینه‌های انرژی مشتری.
- کاهش تلفات انرژی در شبکه.
- هموارسازی منحنی بار مشتری و شبکه.
- کاهش پیک‌بار مشتری و شبکه.

۳-۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

^{۱۶}. Kun-Yuan

^{۱۷}. Carlo Alvarez

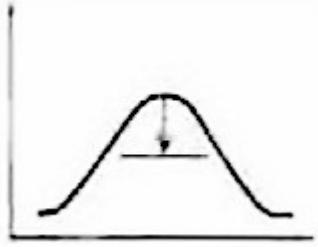
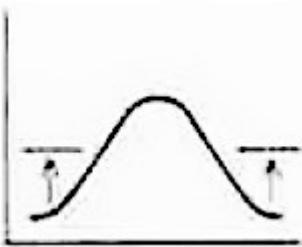
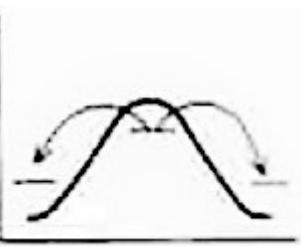
^{۱۸}. Tindemans

با رشد هر چه بیشتر مصرف انرژی الکتریکی، مسئله‌ی هزینه‌های سرمایه‌گذاری جهت تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی، هزینه‌های جاری جهت تأمین سوخت واحدهای تولیدی و هزینه‌ی های تحمیلی جاری ناشی از تلفات انتقال و توزیع انرژی هر روز حادتر می‌گردد. در این راستا برنامه‌های مدیریت مصرف انرژی خانگی و برنامه‌های پاسخ در سمت تقاضا می‌توانند تأثیر زیادی در تعییر رفتار مشتریان در جهت کاهش مصرف انرژی و مدیریت بهینه آن داشته باشند. این برنامه‌ها که در تحقیق حاضر به آن پرداخته می‌شود موجب کاهش پیک منحنی بار شبکه و درنتیجه عدم نیاز به توسعه‌ی سیستم‌های تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی و نیز کاهش تلفات انتقال و توزیع انرژی الکتریکی گردد. بر این اساس تحقیق حاضر از ضرورت تحقیقاتی برخوردار است.

۳- مدیریت بار

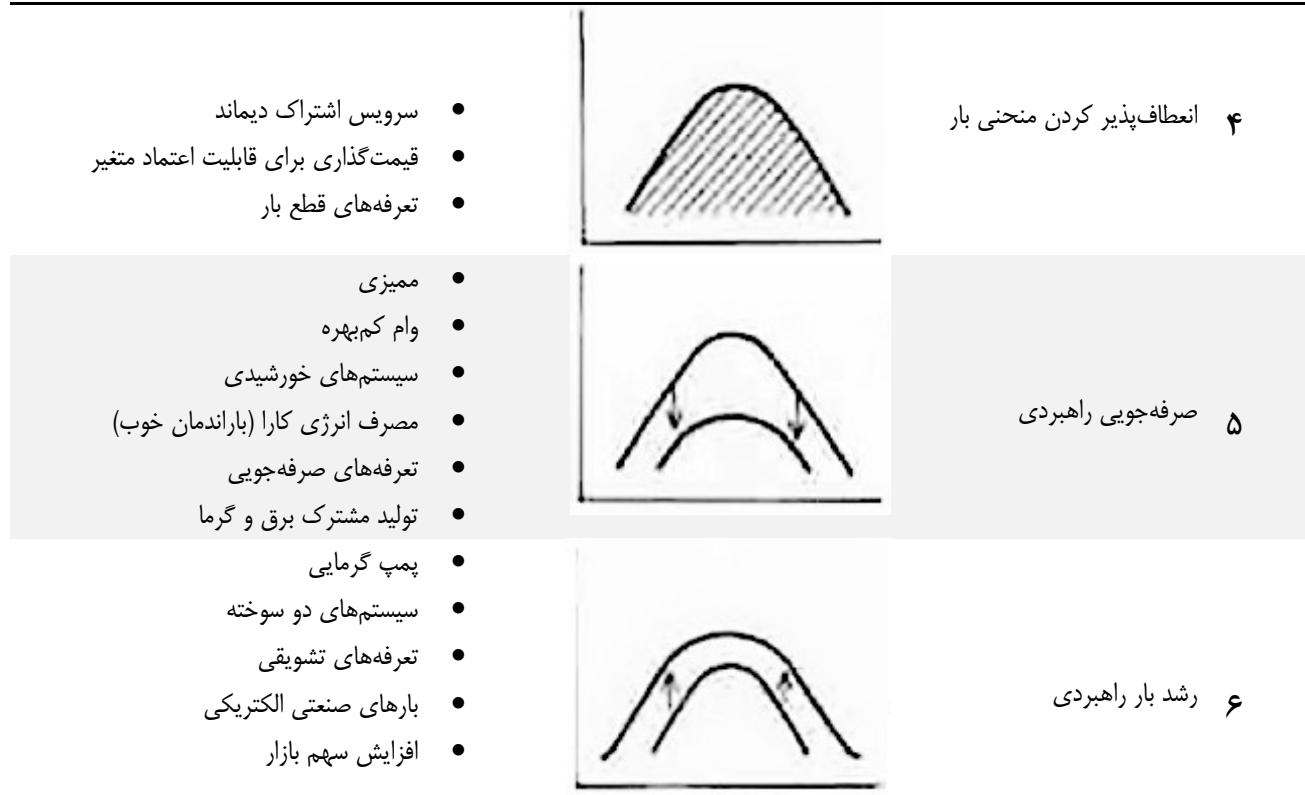
فعالیت‌های مدیریت بار که منجر به کنترل رشد بار و تعییر شکل مناسب منحنی بار می‌شود. اهداف گوناگونی را دنبال می‌کند این فعالیت ممکن است بهمنظور کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر طرف کردن محدودیت‌ها در ظرفیت تأمین انرژی الکتریکی ایجاد زمینه عرضه انرژی به صورت بهینه و اقتصادی، کاهش هزینه خدمات رسانی، بهبود ضریب بار، بهبود بازدهی و کارائی سیستم و بهبود ضریب اطمینان سیستم پایه‌ریزی شده و اجرا گردیده است (رستگار^{۱۹} و دیگران، ۲۰۱۵). مدیریت بار به عنوان زیرمجموعه‌ای از مدیریت مصرف محسوب شده و صرفاً در برگیرنده اعمالی است که توسط شرکت برق و یا توسط مشترکان در پاسخ به انگیزه‌های ایجاد شده بهمنظور برš پیک بار، پر کردن دره منحنی بار و یا جابجایی زمانی بار اجرا می‌شود. به طور کلی راهکارهای اجرایی برای حصول اهداف منحنی‌های بار در جدول (۱) آورده شده است (فرناندسا^{۲۰} و دیگران، ۲۰۱۴).

جدول ۱. راهکارهای اجرایی برای حصول اهداف منحنی‌های بار

ردیف	پیک سایی	نمونه منحنی بار	مثال اجرایی از راهکارهای سمت مصرف
۱	پیک سایی		<ul style="list-style-type: none"> قطع بار (اعمال خاموشی) کنترل مستقیم بار معرفه‌های زمانی
۲	دره زدایی		<ul style="list-style-type: none"> ذخیره انرژی گرمایی ذخیره سرما معرفه‌های فصلی معرفه‌های غیر پیک معرفه‌های زمانی
۳	جابجایی بار		<ul style="list-style-type: none"> ذخیره انرژی گرمایی ذخیره سرما معرفه‌های زمان کنترل وسایل مصرف‌کننده (چرخش زمانی)

^{۱۹.} Rastegar

^{۲۰.} Fernandes



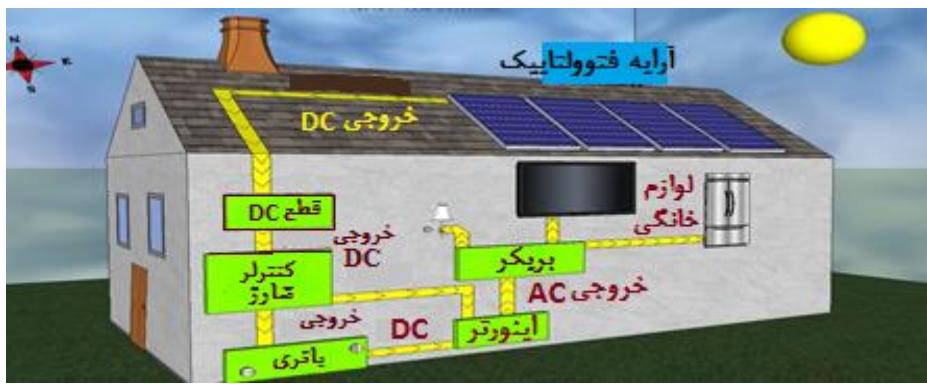
۴- حضور سیستم‌های فتوولتایک کوچک

طراحی سیستم‌های فتوولتایک مستقل از شبکه به‌گونه‌ای است که باید مستقل از شبکه برق سرا سری عمل نموده و قابلیت تغذیه بارهای مستقیم^{۲۱} (DC) و متناوب را دارا باشد(شفیعی^{۲۲} و دیگران، ۲۰۱۳)。 این واحدها مستقیماً به بار متصل می‌شوند و تمام بار را برخلاف سیستم‌های متصل به شبکه تأمین می‌نمایند. بنابراین برای طراحی این‌گونه واحدها، بایستی مدل بار و کل توان مورد نیاز بار در یک دوره شبانه‌روزی محاسبه شود و ظرفیت واحد و تعداد آرایه‌های فتوولتایک بر این اساس محاسبه گردد. همچنین به دلیل عدم وجود شبکه برق سرا سری، تمامی توان می‌بایستی از طریق سیستم فتوولتایک تأمین شود. ازانجایی که سیستم فتوولتایک قابلیت تولید پیوسته توان را ندارد (شب‌هنگام) و میزان تولید توان آن کاملاً به شرایط جوی وابسته هست (کاهش تولید در روزهای ابری و بارانی)، برای تغذیه مناسب و مطمئن بار باید واحد فتوولتایک به سیستم ذخیره ساز انرژی مجهز شود. ظرفیت ذخیره ساز انرژی به میزان مصرف بار در ساعت‌هایی که تولید وجود ندارد، بستگی دارد. زمانی که نور خورشید به سلول‌های پنل برخورد می‌کند، با یک سری فعلاً انفعالات شیمیایی انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود (شکل ۱)。 ولتاژ DC تولید شده تو سط پنل به یک کنترل‌کننده وارد می‌شود که وظیفه این کنترلر این است که ولتاژ باطری‌ها را کنترل کند و نگذارد باطری‌ها از یک ولتاژ خاص کم یا زیادتر شوند. همچنین این کنترلر وظیفه دارد که در زمان شب که پنل‌ها انرژی تولید نمی‌کنند اجازه دهد تا بار از باطری‌ها تغذیه کند. بعدازین که ولتاژ به باطری‌ها منتقل شد، برای اینکه بار یک واحد مسکونی از نوع مصرف AC است، یک اینورتر سر راه آن قرار می‌دهند تا ولتاژ DC تولید شده را به AC تبدیل کند(کون یوان^{۲۳} و دیگران، ۲۰۰۴) و در آخر هم از یک بربکر برای حفاظت بیشتر قرار می‌دهند تا در موقع اتفاق یک حادثه مدار مجموعه را به حالت جزیره در بیاورد.

^{۲۱}. Direct Current

^{۲۲}. Shafiee

^{۲۳}. Kun-Yuan



شکل ۱. مراحل نمایش داده شده تبدیل انرژی یک سیستم فتوولتاییک خانگی

۵- روش تحقیق

۵-۱- برنامه های عرضه - تقاضا در شبکه ها هوشمند

در شبکه ها هوشمند، برنامه های عرضه - تقاضا (DR) نقش مهمی در فعال کردن کاربران نهایی برای توزیع عملکرد سیستم دارند. در این برنامه ها، طرح های سیستم توزیع عملیاتی به گونه ای است که تعریفی برق یا شاخصی از مصرف کنندگان نسبت به تغییر داوطلبانه در الگوی مصرف ایجاد می شود. از آنجایی که تقاضای مسکونی بخش مهمی از کل بار سیستم است، برنامه های مسکونی DR از منظر فعال مصرف ایجاد می شوند. یکی از موانع در استفاده از برنامه های DR مسکونی نبودن اطلاع کافی مشتریان برای پاسخ به سیگنال های قیمت گذاری و محرك است. یکی از راه حل های پیشنهادی سیستم کنترلی است که به صورت خودکار به سیگنال های دریافتی با حل مسئله ای بهینه پاسخ می دهد و در کل به آن سیستم های مدیریت انرژی خانگی (HEM) می گویند. برنامه های HEM هزینه های مشتریان را کاهش می دهد و عاملی برای تغییب آن ها در راستای مشارکت ردد برنامه های DR است. برondاد حل مسئله ای بهینه سازی HEM زمان بندی مصرف انرژی دستگاه های قابل کنترل است. علاوه بر دستگاه های قابل کنترل، فناوری های خودروهای الکتریکی ترکیبی (PHEV) در خانه های هوشمند به دلیل مزایای محیطی شان نفوذ خواهند یافت. از آنجاکه این خودروهای الکتریکی دارای باتری هستند که می تواند در سطوح مختلف توسط شبکه شارژ شود و برای بازگشت انرژی به شبکه تخلیه شود (وسیله ای برای انتقال به طرفیت شبکه)، لازم است که PHEV را در روند مدیریت بار ترکیب نمود. از این رو حل مسئله HEM به برنامه های زمانی مصرف انرژی و زمان بندی شارژ و تخلیه PHEV ختم می گردد. مقالات متعددی بر روی مدل سازی و ساختار HEM متمرکز شدند. روش های پیشنهادی در این مقالات قیمت انرژی را برای مشتری در کنار حداکثر بار خانگی کاهش می دهد. به علاوه به منظور مقاعد ساختن مشتریان برای شرکت در برنامه های DR، راحتی مشتری در این برنامه ها مدنظر است. برخی تحقیقات مانند (یونا^{۳۴} و دیگران، ۲۰۱۴) مدل سازی ریاضیاتی از عدم رضایت مشتری علاوه بر قیمت انرژی ارائه کرده اند. مدل های عدم رضایت در این تحقیقات را می توان به دو دسته تقسیم کرد: عدم رضایت درنتیجه زمان بندی و عدم رضایت درنتیجه وضعیت نامساعد انرژی. در سطح ابتدایی در صورت ایجاد تأخیر در استفاده از دستگاهها به دلیل تغییر بار متحمل زیان می شوند، مانند ماشین لباسشویی و خشک کن. در دومین سطح به دلیل انحراف از وضعیت ایده آل انرژی، متحمل زیاد می شوند مانند دمای خانه. برخی تحقیقات اولویتی را برای دستگاه به مشتری معرفی می کنند تا سطح دیگری از رضایت برای اجرای برنامه DR ایجاد شود. در تحقیقات (محسنیان راد^{۲۵} و دیگران، ۲۰۱۰) طرح DR کنترل مصرف مشتری در یک محدوده ای از قبل تعیین شده است. بنابراین اولویت دستگاه های قابل کنترل هم راستا با محدوده های دمایی و اجرایی در (هوبرت^{۲۶} و دیگران، ۲۰۱۲) هماهنگ شده تا مشخص گردد کدام دستگاه ها را در صورت استفاده از DR می توان خاموش کرد. با وجود اینکه مفهوم اولویت ابزاری هم راستا با این تحقیقات است، طرح های DR پیشنهادی برنامه های DR قیمت محور را دربرنمی گیرد. در مجموع می توان گفت که با وجود اینکه مفهوم پیشنهاد برنامه های بهینه سازی برای HEM و همچنین هماهنگی اولویت های اجرایی دستگاه های خانگی در DR قبلاً عنوان شده، مدل سازی اولویت های دستگاه ها در اجرای HEM براساس برنامه های قیمت دار در بررسی های پیشین مطرح نشده است. در این مقاله چارچوب قیمتی HEM طراحی شده تا اولویت اجرایی دستگاه های مختلف در مدل

^{۲۴.} Yoona^{۲۵.} Mohsenian-Rad^{۲۶.} Hubert

بهینه‌سازی سیستم مدیریت انرژی با همانگ شود. به عنوان مثال یک خانه ممکن است دو دستگاه قابل کنترل داشته باشد و عملکرد یکی از آن‌ها برای مشتری مهم‌تر از دیگری باشد. مشتری باید میان این دستگاه‌ها در طرح HEM تمایز قائل شود. بدین منظور ارزش بار تأمین نشده^{۲۷} (VOLL) برای هر کدام بررسی می‌شود که بر طبق تعریف‌های زمانی، زمان استفاده^{۲۸} (TOU) و نرخ بلوک‌های شب^{۲۹} (IBR) خواهد بود. به عبارت دیگر با در نظر گرفتن نسبت تعریف‌های مختلف، مشتری ارزش اجرایی یک دستگاه را برآورد می‌سازد. درواقع ارزش VOLL دستگاه نشانگ اهمیت اجرای آن برای مقایسه در مقایسه با هزینه‌ی برق است. درنتیجه ارزش VOLL برای محاسبه‌ی قیمت قابلیت HEM اطمینان روز بعد بکار می‌رود. بنابراین تابع هدف به حداقل رساندن هزینه‌ی انرژی و هزینه‌های اولیه اجرایی دستگاه را بعد از برونو داد HEM پیشنهادی زمان‌بندی تقاضای روز بعد خواهد بود. بنابراین دستاورد اصلی این تحقیق در نظر گرفتن اولویت اجرایی دستگاه‌ها در مدل HEM است که برای اجرای برنامه‌های DR قیمت محور طراحی شده است. اهمیت روش پیشنهادی افزودن سطح دیگری از رضایت مشتری و انعطاف‌پذیری به مدل‌های HEM قیمت محور خواهد بود.

۵-۲- حضور مصرف کنندگان در بازار انرژی

یکی از برگسته‌ترین اهداف تجدید ساختار در سیستم قدرت، تهیه امکان نظارتی جدید برای پخش برق برای به دست آوردن مزایای بلندمدت برای مصرف کنندگان بوده است. با این وجود در بسیاری از بازارها مصرف کنندگان تأثیر کمی در طراحی بازارهای الکتریسیته داشته و کمیته‌های متشكل از تولیدکنندگان، شرکت‌های انتقال و شرکت‌های توزیع، خردهفروش‌ها و رگولاتورها در اتخاذ تصمیمات دخیل هستند. یک دلیل روشن و قابل فهم نیز برای این وضعیت وجود دارد: بسیاری از مصرف کنندگان، به جز بعضی مصارف بزرگ، انگیزه اقتصادی برای شرکت فعال در مسائل پیچیده وقت‌گیر ندارند. بسیاری از بازارهای موجود بازار برق شامل بازار روز پیش و چند بازار کوتاه‌مدت‌تری است که به بازارهای تنظیم یا تعادل مرسوم‌اند. بیشترین انرژی خریدفروش در بازار مربوط به بازار روز پیش است و تنظیم نهایی مقدار انرژی در بازارهای تنظیم انجام می‌گیرد. در بازار روز پیش تولیدکنندگان انرژی، منحنی فروش انرژی خود را برای ساعت‌های مختلف به بازار پیشنهاد می‌دهند. هم‌زمان، خردهفروش‌ها و مصرف کنندگان انرژی نیز منحنی خرید خود را به بازار ارسال می‌کنند. همه این منحنی‌ها متشكل از بلوک‌های انرژی و قیمت است. بهره‌بردار بازار، پیشنهادهای خریدفروش انرژی را از نهادهای مربوطه گرفته و بازار را تسویه می‌کند و قیمت تسویه انرژی برنامه‌ریزی شده خریداران و تولیدکنندگان انرژی اعلام می‌کند. اگر اپراتور سیستم، شبکه انتقال را در نظر نگیرد، قیمت حاصل از تسویه بازار یکسان خواهد بود ولی در صورت در نظر گرفتن شبکه، قیمت انرژی به صورت نقطه‌ای تعیین می‌شود. از ویژگی‌های مهم قیمت انرژی در خیلی از بازارها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: متوسط و میانگین متغیر، ویژگی‌های فصلی، اثربازی بودن از تقویم روزانه، بی ثباتی بالا و ... (وانگ^{۳۰} و دیگران^{۳۱}، ۲۰۱۵). با توجه به این ویژگی‌ها، پیش‌بینی دقیق قیمت انرژی سخت است. با این وجود، داشتن اطلاعات مربوط به قیمت انرژی برای همه نهادهای شرکت‌کننده در بازار، تعیین‌کننده است. به این دلیل، پیش‌بینی قیمت به عنوان یکی از موضوعات تحقیقاتی مطرح بوده (آدیکا^{۳۲} و دیگران^{۳۳}، ۲۰۱۴) و همچنان مورد توجه است. برای یک بازه میان‌مدت باید مصرف کنندگان در مورد حضورشان در بازارهای مختلف و انقاد قراردادهای دوجانبه برای مقابله با ریسک ناشی از قیمت متغیر بازار، تصمیم‌گیری کنند.

۵-۲-۱- هدف مصرف کنندگان از مشارکت در بازار

کاهش هزینه‌های پرداختی مصرف کنندگان برای انرژی الکتریکی مصرفی خود، یکی از دلایل ایجاد بازارهای رقابتی الکتریسیته است. شرکت فعال تر طرف مصرف در بازار برق، باعث می‌شود که بازارهای برق، رقابتی تر و کارآمدتر شده و هم‌چنین به جایابی بهینه متابع اقتصادی کمک می‌کند. هدف یک مصرف کننده از شرکت در بازارهای برق، کمینه کردن کل هزینه خرید انرژی است. موضوع این است که خرید را در بازارهای مختلف چگونه باید انجام داد و یا اینکه چگونه باید در بازارهای مختلف پیشنهاد خرید در عرضه نمود به طوری که با داشتن ریسک کمتر، هزینه کل خرید انرژی کمینه شود. از آنجایی که قیمت انرژی در بازارهای مختلف ممکن است تغییرات زیادی داشته باشد و هم‌چنین میزان ارائه انرژی از ارائه‌کنندگان خدمات انرژی نامعین است لذا نحوه خرید انرژی یک مسئله بهینه‌سازی با مجموعه‌ای از عدم قطعیت‌هاست (آگنتیس^{۳۴} و دیگران^{۳۵}، ۲۰۱۳). مسئله پیشنهادی از طرف مصرف کننده، درواقع یافتن مجموعه‌ای از میزان توان و هزینه

^{۲۷} Value Of Lost Load

^{۲۸} Time Of Use

^{۲۹} Inclining Block Rate

^{۳۰}. Wang

^{۳۱}. Adika

^{۳۲}. Agnetis

آن است به طوری که هزینه خرید آن مصرف کننده، مینیم شود. در مواقعي که اطلاعات مربوط به سایر بازیگران بازار نامعلوم باشد پیچیدگی های اضافی هم در آن وجود خواهد داشت (گیامفی^{۳۳} و دیگران، ۲۰۱۳).

۵-۲-۵-راهبرد تأمین انرژی الکتریکی مصرف کنندگان بزرگ

ایجاد امکان پیشنهاد خرید برای مصرف کننده، یک راه انعطاف پذیر را برای تأمین پیک بار در یک برنامه ریزی تولید فراهم می کند. در یک محیط رقابتی، همان طور که بسیاری از شرکت های تولیدی واحد های کم هزینه کمی انعطاف پذیر و یا واحد های گران قیمت ولی انعطاف پذیر را در بازار برق بهره برداری می کنند، مشتریان نیز می توانند از فرصت های موجود برای کاهش میزان انرژی مصرفی خود در ساعت های باقی میانه بالا استفاده نمایند (صمدی^{۳۴} و دیگران، ۲۰۱۳). پیشنهاددهی طرف مصرف (DSB^{۳۵}) بیشتر برای مصرف کنندگان صنایع بزرگ که می توانند میزان انرژی مصرفی خود را کاهش یا انتقال دهنده به دلیل قیمت پایین تر مفید است. DSB بر روی بازار خدمات جانبی، قراردادهای تقدیمی، بازار لحظه ای، قراردادهای دو جانبه، قیود انتقال و توزیع و بازار متعادل کننده تأثیر بسزایی دارد. پیشنهاددهی مصرف کننده در بازار می تواند به دو شکل انجام گیرد، یکی پیشنهاد برای کل تقاضا را در برمی گیرد و دیگری شامل پیشنهاد برای تغییر تقاضای موردنظر است. هر دو روش مهم است، چرا که فرصت هایی را برای طرف مصرف کننده جهت مدیریت میزان الکتریسیته مصرفی ایجاد می کند که بر روی کل مجموعه تأثیر می گذارد. پیشنهاد برای کل تقاضا به دو صورت می تواند انجام گیرد: اول اینکه مصرف کننده و ژنراتور می توانند برای مقدار مشخص انرژی باقی میانه توافق نمایند که به آن قرارداد دو جانبه گفته می شود و دوم اینکه مصرف کنندگان می توانند ژنراتورها، پیشنهاد خود برای کل تقاضا را در یک بازار یا بورس ارائه کنند. در پیشنهاد برای تغییر در میزان تقاضا، مصرف کننده میزان تغییر در تقاضای الکتریسیته خود را پیشنهاد می دهد. مثلاً می تواند جهت کمک به اپراتور سیستم انتقال در حفظ کیفیت تقدیمی، میزان تقاضای خود را کاهش دهد. در حالت کلی تغییر در میزان تقاضا می تواند هم به صورت کاهشی و هم به صورت افزایشی باشد. بلوک تقاضا ممکن است پیشنهاد یک مصرف کننده منفرد مثل مشترک صنعتی یا گروهی از مصرف کنندگان کوچک تر نظیر مشترکین خانگی باشد (محمد^{۳۶} و دیگران، ۲۰۲۱).

۶-تابع هدف مسئله

اولین معیاری که هر مشتری در نظر می گیرد کاهش قیمت انرژی است. قیمت انرژی تابعی از تعریفی کاهش یافته ای زمانی و مصرف انرژی برق در هر گام زمانی خواهد بود. تابع هزینه زمانی خطی (EC) بنا بر TOU و تعریفهای EC به ترتیب در معادلات زیر آورده شده است (هارتner^{۳۷} و دیگران، ۲۰۱۷).

$$EC = \sum_{t \in T} \gamma(t) E(t) \quad (1)$$

$$EC = \alpha \times El + \beta \times (E - \delta) , \quad E = \sum_{t \in T} E(t) \quad (2)$$

جایی که t شاخص گام زمانی، T گسترهی زمانی برنامه ریزی است که در این مقاله یک روز در نظر گرفته شده، EC تابع هزینه ای انرژی، $E(t)$ مصرف انرژی برق خانگی در واحد زمانی t ، $y(t)$ تعریفه ای t در گام زمانی t به صورتی است که در (۱) تعریف شده، E مصرف کل انرژی برق در یک روز، EI مصرف انرژی برق روزانه ای کمتر از آستانه ای ∂ و $(E - \partial)$ مصرف برق روزانه ای بیشتر از آستانه خواهد بود. مشخص است که EI باید کمتر یا برابر با آستانه ای ∂ باشد. قیمت مصرف انرژی کمتر و بیشتر از آستانه ای δ به ترتیب با تعریفه های α و β نشان داده می شود. علاوه بر هزینه ای انرژی، فرض بر این است که VOLL به عنوان شاخص اولویت اجرایی دستگاه های خانگی برای

^{۳۳}. Gyamfi

^{۳۴}. Samadi

^{۳۵}. Demand Side Bidding(DSB)

^{۳۶}. Mohammed

^{۳۷}. Hartner

مشتری در روند HEM تصور می‌گردد. کنترل کننده باید برنامه‌ریزی عملیاتی دستگاه‌ها را براساس VOLL از قبل تعیین شده‌ی دستگاه و تعریفی برق مشخص کند. از آنجایی که قیمت قابلیت اطمینان (RC) تابعی از VOLL دستگاه‌هاست، این تابع به تابع هدف افزوده می‌گردد تا اولویت دستگاه‌ها در نظر گرفته شود. تابع قیمت قابلیت اطمینان به صورت ریاضیاتی این‌گونه نشان داده می‌شود:

$$RC = \sum_{a \in A} VOLLA_a LE_a \quad (3)$$

جایی که a شاخص دستگاه‌ها و A مجموعه‌ای از دستگاه‌هاست. به علاوه $VOLLA_a$ همان VOLL دستگاه a است که توسط مشتری براساس ارزش اجرای دستگاه نشان داده می‌شود. LE_a افت انرژی دستگاه a خواهد بود. هر دستگاه قابل کنترل چه خاموش / روشن چه تنظیم گر مصرف انرژی مشخصی در روز دارد. بنابراین اگر مصرف کل انرژی دستگاه a در روز کمتر از مصرف انرژی کل از پیش تعیین شده برای آن دستگاه باشد، تمایز میان مصرف انرژی به دست آمده و مصرف انرژی از قبل تعیین شده کاهش انرژی دستگاه a یعنی LE_a خواهد بود. بنابراین تابع هدف این‌گونه است:

$$\min COST = EC + RC \quad (4)$$

جایی که COST هزینه‌ی کل مشتری در یک روز، EC قیمت انرژی مشتری و RC هزینه‌ی قابلیت اطمینان است. این بدان معنی است که نتایج HEM از حد وسط قیمت انرژی و قیمت قابلیت اطمینان مشتری به دست می‌آیند (Nicoletti^{۳۸} و DiGران، ۲۰۲۲).

۱-۶- قیود مسئله

در هر گام زمانی از مطالعات، مصرف انرژی برق خانگی مجموع مصرف دستگاه‌های قابل کنترل و غیرقابل کنترل است، که برابر با رابطه‌ی زیر هست:

$$E(t) = E^c(t) + E^{uc}(t) \quad (5)$$

جایی که $E^c(t)$ و $E^{uc}(t)$ به ترتیب تقاضای خانگی قابل کنترل و غیرقابل کنترل در گام زمانی t هستند. برآورد صحیح $E^{uc}(t)$ معمولاً مشخص فرض می‌شود. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، در هر خانه دستگاه‌های قابل کنترل مانند ماشین لباسشویی، خشک‌کن لباس و ماشین ظرف‌شویی از نوع خاموش / روشن هستند. میزان مصرف انرژی سایرین همچون سیستم‌های سرمایشی / گرمایشی و فناوری‌های خودروهای الکتریکی ترکیبی (PHEV^{۳۹}) در هر گام زمانی می‌توانند در نسبت مجاز مصرف انرژی کنترل شوند. با در نظر گرفتن J و k به عنوان مجموعه‌ی دستگاه‌های کنترل شده‌ی خاموش / روشن و دستگاه‌های تنظیم کننده، معادلات به دست آمده محدوده‌های اجرایی دستگاه‌های قابل کنترل خواهند بود و چیزی شیوه به مدل‌های موجود در (کوریل^{۴۰} و دیگران، ۲۰۲۲) ایجاد می‌گردد.

$$\sum_{j \in AI_j} I_j(t) = U_j, \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$E_j(t) = E_j I_j(t), \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$E_k^{min}(t) \leq E_k(t) \leq E_k^{max}(t), \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in AI_k \quad (8)$$

^{۳۸}. Nicoletti

^{۳۹}. Hebrid Electrical Vehicles

^{۴۰}. Curiel

$$\sum_{t \in AI_j} E_k(t) = E_k, \quad \forall k \in K \quad (9)$$

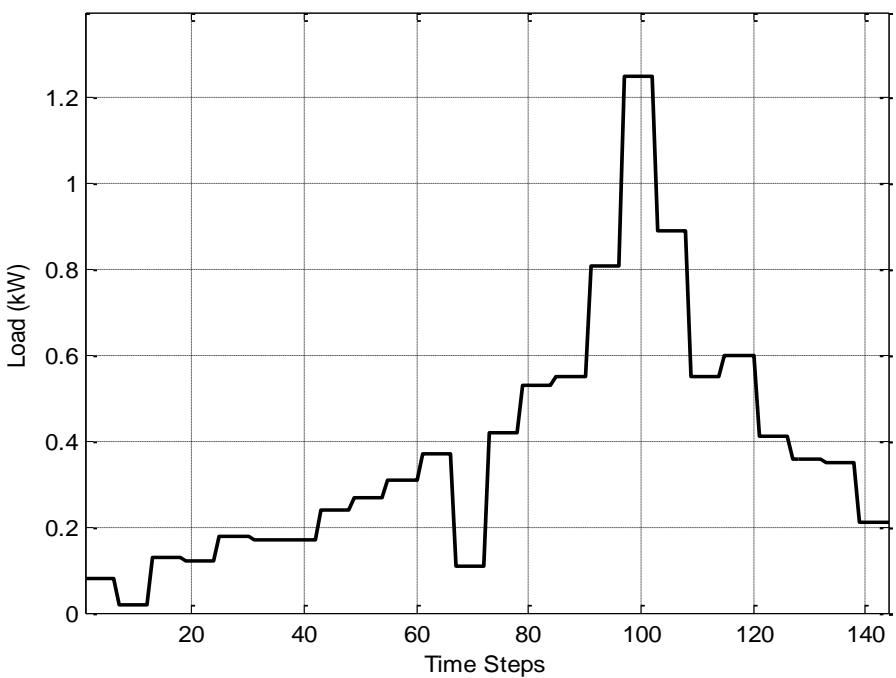
$$\sum_{k \in K} E_k(t) + \sum_{j \in J} E_j(t) = E^C(t), \quad \forall t \quad (10)$$

جایی که j و k شاخص‌های به ترتیب دستگاه‌های کنترل شده‌ی خاموش / روشن و تنظیم‌کننده هستند. $I_j(t)$ یک متغیر دوگانه است، ۱ به معنی دستگاه برقی j است که در زمان t روشن است. U_j زمان موردنیاز دستگاه j برای فعالیت مناسب خواهد بود. E_j مصرف انرژی دستگاه j در ویژگی‌های دستگاه است. AI_k به ترتیب فاصله‌ی مجاز برای عملکرد دستگاه‌های j و k می‌باشد، که هر کدام توسط مشتری تعیین می‌گرددند. $E_j(t)$ به ترتیب مصرف انرژی برق دستگاه j و دستگاه K در گام زمانی t هستند. $E^{\max}_k(t)$ و $E^{\min}_k(t)$ به ترتیب حداقل و حداکثر سطح مجاز انرژی مصرفی دستگاه k (حداقل و حداکثر میزان شارژ برای PHEV) در زمان t محسوب می‌شوند. رابطه‌ی (۶) نشان می‌دهد که دستگاه‌های کنترل شده‌ی ON/OFF نیازمند زمان اجرایی مشخص برای تکمیل وظیفه‌ی خود هستند و این زمان اجرا باید در فواصل زمانی مجاز (AI_j) اعمال شود. مصرف انرژی این نوع از دستگاه‌های قابل کنترل در هر گام زمانی در رابطه (۷) نشان داده شدن. مصرف انرژی دستگاه k در هر گام زمانی بیشتر از حداقل است و به مقدار حداکثر بنا بر (۸) نزدیک است. مقدار کلی مصرف انرژی دستگاه k در فاصله‌ی اجرایی مجاز باشد مقداری مشخص (E_k) باشد. برای مثال انرژی واردشده به باتری PHEV باید با تری کاملاً شارژ شده را در زمان جدا کردن، ارائه دهد. این محدودیت به صورت ریاضیاتی در (۹) نشان داده شد. همان‌طور که در (۱۰) عنوان شد، مصرف انرژی قابل کنترل خانگی مجموع مصرف انرژی تمامی دستگاه‌های کنترل پذیر در مجموعه‌های J و K است. درنتیجه ($E_j(t)$ و $E_k(t)$) نتایج حل مسئله‌ی بهینه‌سازی موجود در (۴)-(۱۰) هستند.

۷- شبیه‌سازی و نتایج

۷-۱- معرفی سیستم آزمون

در این بخش روش پیشنهادی HEM در خانه‌ای هوشمند با دستگاه‌های مختلف قابل کنترل و غیرقابل کنترل و یک PHEV بررسی شده است. در ابتدا، سه سطح از تعریفه‌ی TOU در HEM ترکیب می‌شود. سپس مسئله‌ی بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تعریفه‌ی IBR حل شده است. انرژی و قیمت قابلیت اطمینان به عنوان نتایج حل مسئله‌ی بهینه‌سازی گزارش شده‌اند. همچنین بار خانگی پس از حل مسئله‌ی HEM با دو تعریفه‌ی زمانی ارائه می‌گردد. در این موارد، گام زمان بهینه‌سازی برابر با ۱۰ دقیقه فرض شده است. بنابراین محدوده‌ی زمانی ۱۴۴ گام زمانی خواهد بود. تقاضای خانگی غیرقابل کنترل نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.

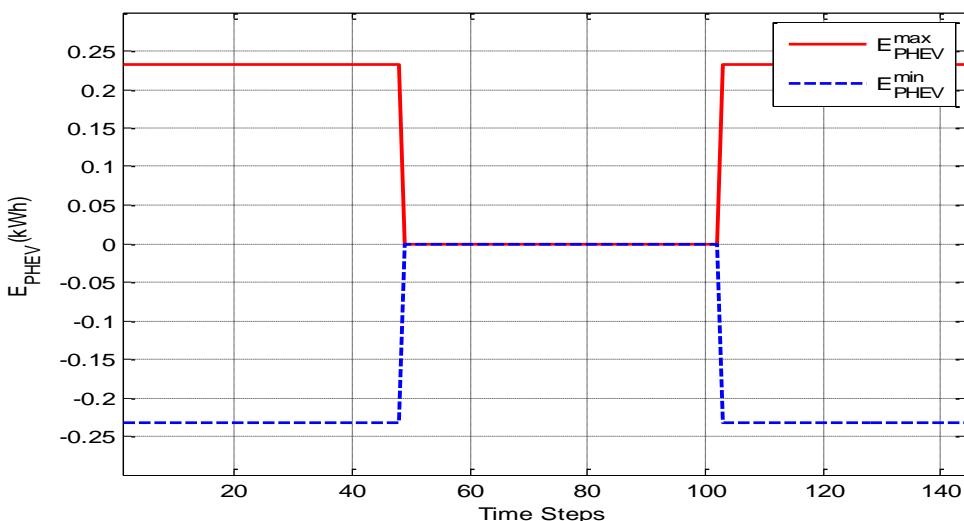


شکل ۲. تقاضای خانگی غیرقابل کنترل

خودرو PHEV به همراه ویژگی‌هایش در جدول ۲ و شکل ۳ توصیف شده است. در این جدول E_{PHEV}^{\max} حداکثر نسبت شارژ/ تخلیه باتری PHEV است. به عبارت دیگر حداکثر مجاز برای شارژ و تخلیه باتری PHEV از طریق ساختار شارژ خانگی برابر با $233/233$ کیلووات است. گنجایش ظرفیت انرژی باتری PHEV، η_{PHE} اولین حالت شارژ باتری PHEV، η_{PHEf} حالت نهایی شارژ باتری PHEV در روز و η_{dch}/η_{ch} کارایی شارژ/ تخلیه باتری PHEV هستند. توجه داشته باشید PHEV در آن فاصله‌ی زمانی که خارج از خانه قرار دارد ۵ کیلووات ساعت انرژی مصرف می‌کند. باتری PHEV باید قبل از سفر کاملاً شارژ شود.

جدول ۲ . مشخصات PHEV (سکو^{۴۱} و دیگران، ۲۰۱۱)

ردیف	شرح	واحد	مقدار
۱	توان مصرفی در هر بازه زمانی	(kW)	$233/233$
۲	ظرفیت باتری	(kWh)	$7/8$
۳	شارژ اولیه باتری	(kWh)	$3/9$
۴	شارژ نهایی باتری خودرو	(kWh)	$3/9$
۵	بازده شارژ	-	$0/88$
۶	بازده دشارژ	-	$0/88$

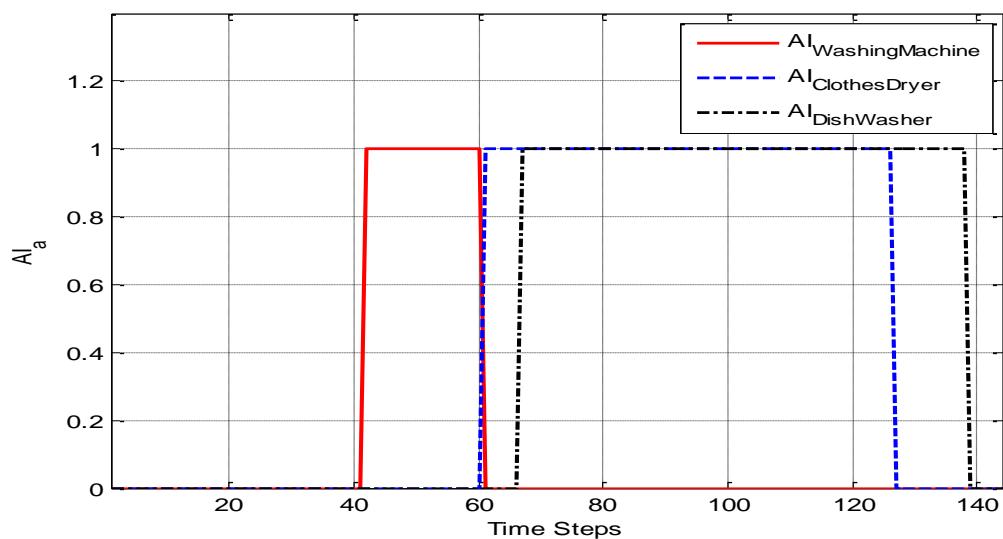


شکل ۳. مینیم و ماکزیمم PHEV

ماشین لباسشویی، ظرفشویی و خشک کن دستگاه های کنترل شده خاموش / روشن محسوب می شوند. جدول ۳ و شکل ۴ ویژگی های اجرایی این دستگاه ها را خلاصه می کند.

جدول ۳. داده های مربوط به دستگاه های کنترل شده خاموش / روشن (سکو ۳۲ و دیگران، ۱۱۰۲)

ردیف	دستگاه	مجموع بازه های کار کرد	انرژی مصرفی در هر بازه زمانی	بازه های زمانی	مجاز کار
		Ua	Ea(kWh)	زمانی	AIa
۱	ماشین لباس شویی	۳	۰/۲۰۰	[۶۰، ۴۲]	AIa
۲	ماشین خشک کن	۵	۰/۲۰۵	[۱۲۶، ۶۱]	AIa
۳	ماشین ظرف شویی	۳	۰/۰۶۲۵	[۱۳۸، ۶۷]	AIa

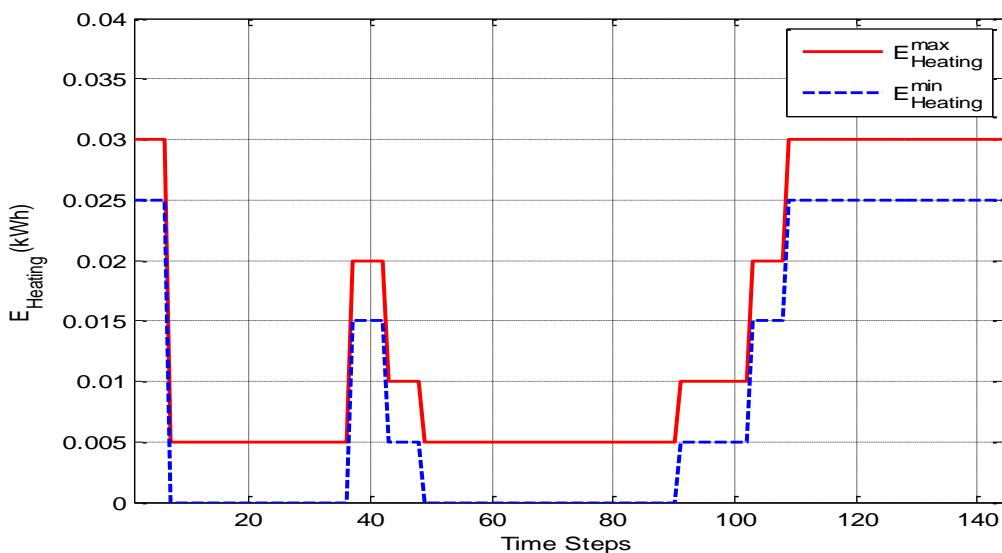


شکل ۴. مجموع بازه‌های کارکرد لازم ماشین لباسشویی، ماشین خشک کن و ماشین ظرفشویی

در مجموع میزان مصرف انرژی حرارتی در ساعت مختلف روز بعدی در جدول ۴ و شکل ۵ آورده شده‌اند. توجه داشته باشید که مصرف کلی انرژی سیستم گرمایشی برابر با ۲ کیلووات ساعت در روز فرض شده است.

جدول ۴. محدودیت‌های مصرف انرژی (kWh) سیستم گرمایشی در هر بازه زمانی

ردیف	بازه زمانی	حداکثر مصرف انرژی سیستم گرمایشی	حداقل مصرف انرژی سیستم گرمایشی
۱	[۱۴۴, ۱۰۹] و [۶, ۱]	۰/۰۳۰	۰/۰۲۵
۲	[۱۰۸, ۱۰۳] و [۴۲, ۳۷]	۰/۰۲۰	۰/۰۱۵
۳	[۱۰۲, ۹۱] و [۴۸, ۴۳]	۰/۰۱۰	۰/۰۰۵
۴	[۹۰, ۴۹] و [۳۶, ۷]	۰/۰۰۵	*



شکل ۵. ناحیه عملکرد PHEV

شاخص ترین عامل دروش پیشنهادی VOLL دستگاه‌های کنترل شده است. در اینجا فرض برآن است که اهمیت کار ماشین لباسشویی و خشک کن لباس همچون سایر دستگاه‌ها برای مشتری زیاد نبوده‌اند. ازین‌رو اولویت‌های آن‌ها متوسط فرض می‌شود. برای سایر دستگاه‌ها، اولویت بالا است.

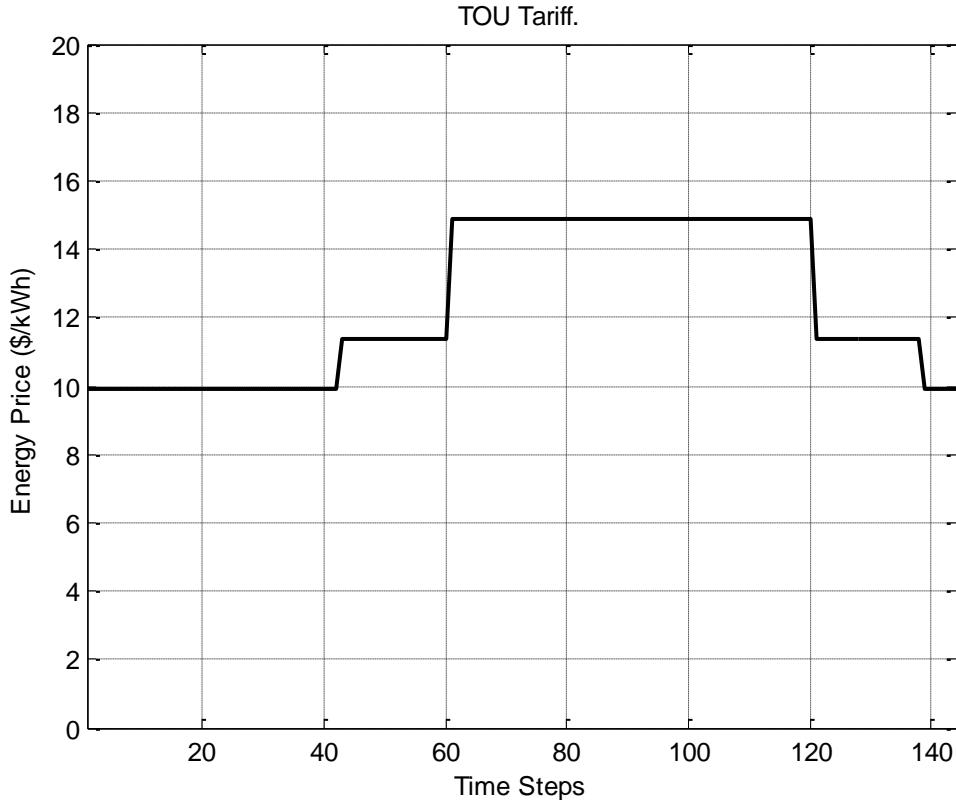
۲-۲- نمونه ۱: هماهنگی تعریفی TOU

در این مورد، قابلیت اطمینان و قیمت انرژی با در نظر گرفتن اینکه تعریفی کاهش‌یافته برای مشتری TOU سه پله مانند جدول ۵ و شکل ۶ است، به حداقل رسیده‌اند.

جدول ۵. تعریف TOU

ردیف	بازه زمانی	مقدار گاما γ
۱	[۱۴۴, ۱۳۹] و [۴۲, ۱]	۹/۹

۱۱/۴	[۱۳۸، ۱۲۱] و [۶۰، ۴۳]	۲
۱۴/۹	[۱۲۰، ۶۱]	۳



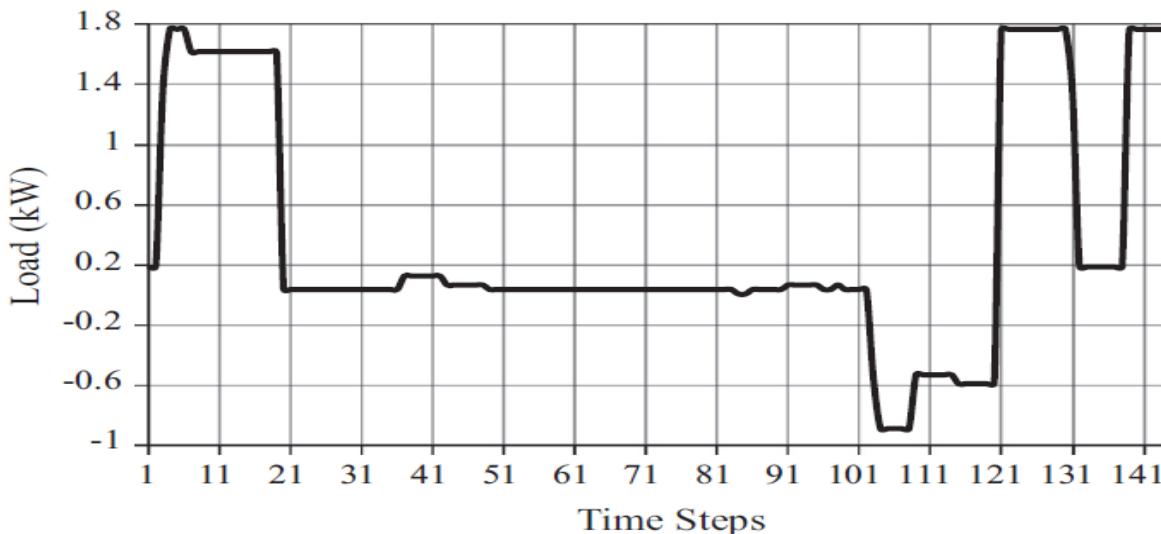
شکل ۶. نمودار TOU

قبل از استفاده از روش پیشنهادی بهتر است که مسئله‌ی بهینه‌سازی بدون قیمت قابلیت اطمینان یعنی بدون در نظر گرفتن اولویت‌های مختلف برای دستگاه از منظر مشتری، حل شود. بدین منظور مقدار VOLL دستگاه‌ها یکسان و در مقدار بالا در نظر گرفته شده است. قیمت بهدست آمده یعنی قیمت انرژی مشتری، $224/2$ در این حالت خواهد بود. با توجه به اولویت‌های اجرایی دستگاه‌ها، بر طبق تعریفهای TOU، مقدار VOLL ماشین لباسشویی و خشک کن لباس معادل 10 دلار در هر کیلووات ساعت تنظیم شده که میان y_1 و y_3 است. قیمت انرژی نهایی و قیمت قابلیت اطمینان به ترتیب $204/9$ و $14/25$ هستند. بنابراین هزینه‌ی کل مشتری که از حل مسئله‌ی بهینه‌سازی به دست می‌آید $222/2$ است. این نشان می‌دهد که هزینه‌ی کل مشتری ممکن است با در نظر گرفتن قیمت قابلیت اطمینان دروند HEM کاهش یابد. بنابراین مشخص می‌گردد که روش HEM پیشنهادی بیشتر مشتری را راضی می‌کند، نه تنها با در نظر گرفتن اولویت‌های آن‌ها در برنامه‌ریزی بلکه با کاهش قیمت برقراری تا $7/5$ درصد یعنی از $224/2$ به $207/9$. گام‌های زمانی عملکرد دستگاه قابل کنترل در جدول ۶ به همراه و بدون در نظر گرفتن قیمت قابل کنترل ارائه شده است.

جدول ۶. بازه‌های کاری مربوط به دستگاه‌های کنترل شده‌ی خاموش / روش

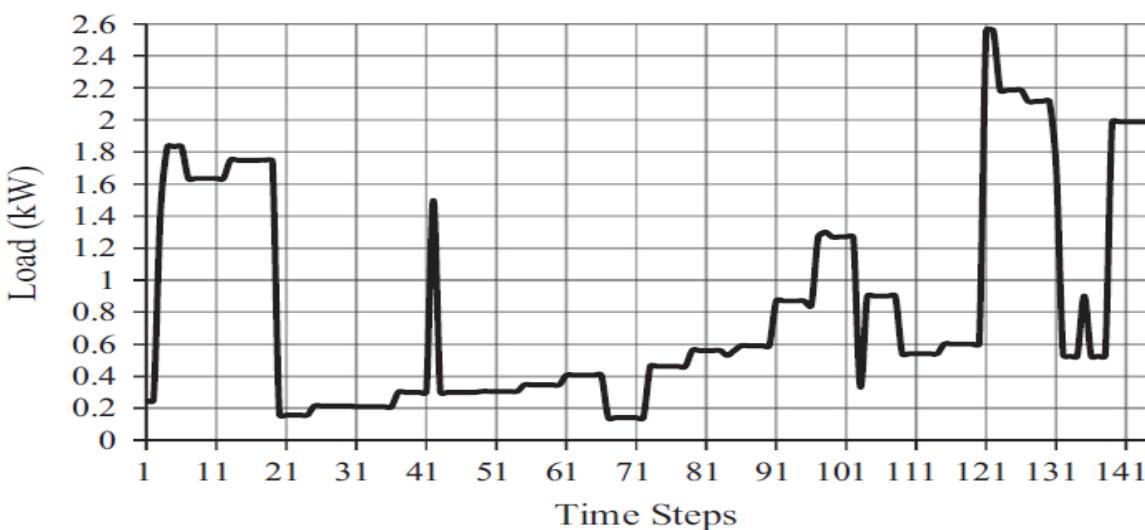
ردیف	دستگاه	بدون هزینه قابلیت اطمینان RC	با هزینه قابلیت اطمینان RC
۱	ماشین لباسشویی	42	$[44, 42]$
۲	ماشین خشک کن	$-$	$[126, 123] 121$
۳	ماشین ظرفشویی	$125, 124, 122$	$[108, 106]$

همان طور که در جدول ۶ نشان داده شده، از آنجایی که مقدار VOLL ماشین لباسشویی و خشک کن کمتر از تعرفه های متوسط و پیک است، بهتر است که این دستگاهها را در برخی زمان ها خاموش کرد. بنابراین ماشین لباسشویی تنها در زمان تعرفه های غیر پیک روشن می شود و خشک کن نیز در تمامی گام های زمانی خاموش است. این گونه می توان قیمت قابلیت اطمینانی بیشتری داشت، گرچه موجب هزینه های کلی کمتر نیز می شود. تقاضای کلی برق سیستم حرارتی و PHEV در شکل ۷ نشان داده شده است. بار منفی در این شکل ظرفیت بازگشت انرژی تخلیه شده در شبکه را نشان می دهد. این روند به صورت انتقالی به ظرفیت شبکه (V2G) طراحی می شود. از آنجایی که باتری PHEV در دو گام زمانی با تعرفه های پایین شارژ شده، و در زمان تعرفه های بالا تخلیه شده است، ظرفیت V2G تا حد زیادی قیمت انرژی مشتری را کاهش می دهد.



شکل ۷. تقاضای برق سیستم گرمایش و PHEV در مورد ۱

زمان بندی بهینه هی مصرف دستگاه های قابل کنترل با توجه به هزینه هی اعتباری موجب روند تقاضای خانوار به صورت شکل ۸ می گردد. این شکل نشان می دهد که بار پیک ۲/۵۵ کیلووات با تعرفه های TOU در روند پیشنهادی HEM هماهنگ شده است. لازم به ذکر است که اوج تقاضای برق در خانه بدون سیستم HEM می تواند بیشتر از بار پیک به دست آمده در مورد ۱ باشد. برای مثال فرض کنید که در مورد بدون سیستم HEM در گام زمانی ۱۰۰، PHEV شارژ شده باشد، خشک کن کار کند، سیستم گرمایشی حداکثر انرژی مجاز را مصرف کند. خلاصه هی مصرف انرژی این دستگاه ها و تقاضای غیرقابل کنترل به پیک ۳/۰۵ کیلووات در گام زمانی ۱۰۰ می رسد که ۲۰ درصد بیشتر از نمونه هی ۱ است.



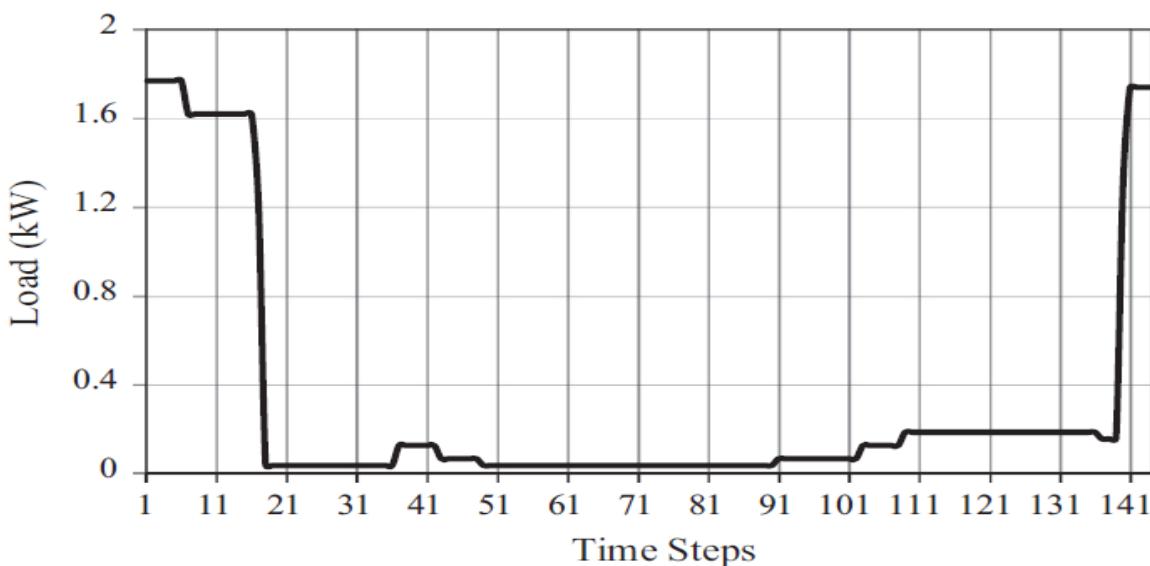
شکل ۸. تقاضای برق خانگی در مورد ۱

۳-۲- نمونه ۲: هماهنگی تعرفه‌ی IBR

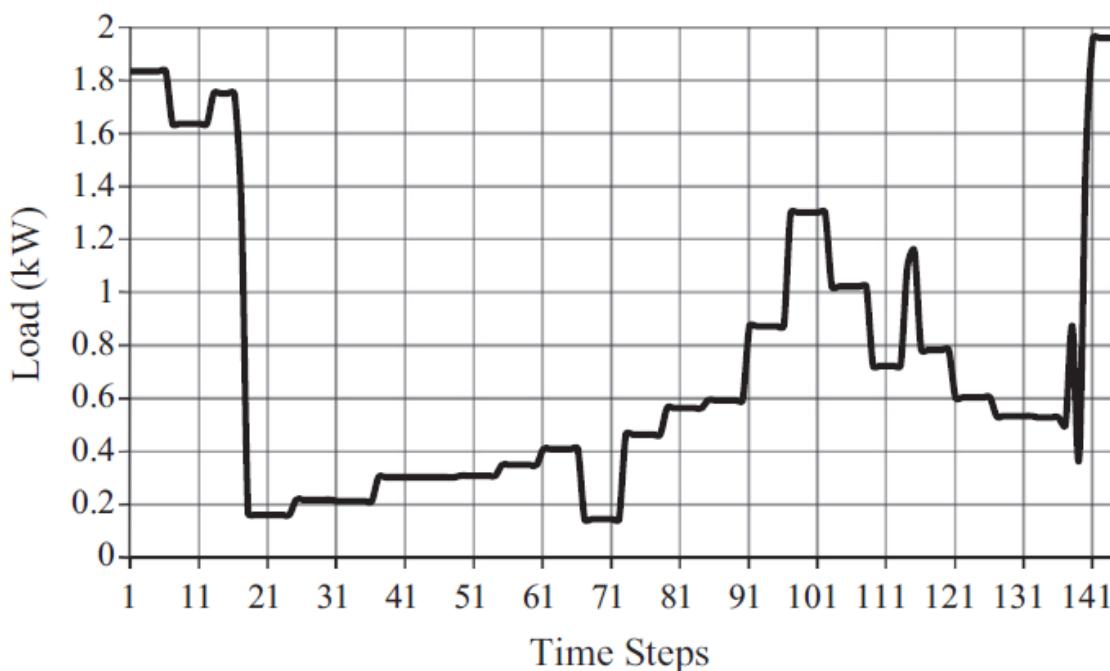
همچون مورد پیشین، این نمونه نیز در دو حالت به همراه و بدون در نظر گرفتن قیمت قابلیت اطمینان در تابع هدف مطالعه شده است. فرض بر این است که تعرفه‌ی IBR در مسئله‌ی بهینه‌سازی $\phi/kWh = ۹/۹$ و $\beta = ۱۴/۹$ است. $\delta = ۱۵ kWh$ هماهنگ شده است. به عبارت دیگر تعرفه‌های مصرف روزانه‌ی برق کمتر و بیشتر از ۱۵ کیلووات ساعت به ترتیب $۹/۹$ کیلووات ساعت (۶) و $۱۴/۹$ کیلووات ساعت (۷) هستند. از این‌رو در حالت در نظر گرفتن قیمت قابلیت اطمینان، ارزش VOLL ماشین لباسشویی و خشک‌کن لباس برابر با ۱۰ کیلووات ساعت (۶) فرض شده که میان α و β است. VOLL سایر دستگاه‌ها در مقداری بیشتر از $۱۴/۹$ کیلووات ساعت (۷) لحاظ می‌شوند. حل مسئله‌ی بهینه‌سازی نشان می‌دهد که قیمت انرژی مشتری به همراه و بدون در نظر گرفتن قیمت قابلیت اطمینان به ترتیب $۲۰/۲/۳$ و $۱۷/۸$ است. این نتیجه مشخص می‌کند که هماهنگی اولویت دستگاه‌ها می‌تواند موجب ۱۲ درصد قیمت پایین‌تر برای مشتری شود. به علاوه $۱۶/۳$ سنت به عنوان قیمت قابلیت اطمینان در این مورد به مشتری اعمال می‌شود. با این حال قیمت کلی $۱۹/۴/۳$ است که کمتر از قیمتی است که قبل از لحاظ کردن اولویت‌های دستگاه‌ها به دست آمد. بنابراین در مورد ۲ ، کاهش هزینه‌ی کل با هزینه‌ی قابلیت اطمینان ۴ درصد است که کمی بیشتر از نمونه‌ی ۱ که ۱ درصد بوده، خواهد بود. این نشانگر کارایی قیمت‌گذاری IBR در مقایسه با تعرفه‌ی TOU از منظر مشتری است. لازم به ذکر است که مصرف انرژی روزانه‌ی خانگی به همراه و بدون قیمت قابلیت اطمینان در این نمونه برابر با $۱۸/۶/۳$ کیلووات ساعت و $۱۷/۰$ کیلووات ساعت است. گام‌های زمانی اجرایی دستگاه‌های قابل کنترل و تقاضای برق مجموع سیستم گرمایشی و PHEV در مورد ۲ به ترتیب در جدول ۷ و شکل ۹ ارائه شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده، از آنجایی که ارزش VOLL ماشین لباسشویی و خشک‌کن کمتر از نسبت بالاتر (B) IBR و مصرف روزانه‌ی انرژی بیشتر از آستانه است، بهتر است که این دستگاه‌ها را در طول روز خاموش کرد. شکل ۹ مشخص می‌کند که PHEV در ساعات ابتدایی و انتهایی روز شارژ می‌شوند تا وضعیت شارژ از پیش تعیین شده را در زمان جدا کردن به دستگاه بدنه‌ند. برخلاف مورد پیشین بنا بر وجود قیمت‌گذاری IBR و به علت کارایی تبدیل باتری PHEV، نیازی نیست که باتری PHEV را در همان زمان تخلیه و مجدد شارژ کرد. بنابراین باتری PHEV در هیچ گام زمانی بنا بر شکل ۹ دشارژ نمی‌شود.

جدول ۷. بازه‌های زمانی دستگاه‌های قابل کنترل روشن/خاموش در مورد ۲

ردیف	دستگاه	با هزینه قابلیت اطمینان RC	بدون هزینه قابلیت اطمینان RC
۱	ماشین لباسشویی	-	$۶۰, ۵۴, ۵۳$
۲	ماشین خشک‌کن	-	$۱۲۶, ۱۰۶, ۱۰۵, ۱۰۴, ۱۰۲$
۳	ماشین ظرف‌شویی	$۱۳۸, ۱۱۵, ۱۱۴$	$۱۳۸, ۱۱۵, ۱۱۴$



شکل ۹. تقاضای برق مجموع سیستم گرمایش و PHEV در مورد ۲



شکل ۱۰. تقاضای برق خانگی در مورد ۲

تقاضا برای بار خانگی در مورد ۲ به همراه قیمت قابلیت اطمینان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که اوج بار خانگی ۱/۹۵ کیلووات است. مقایسه‌ی شکل‌های ۱۰ و ۲ مشخص می‌کند که در شرایط در نظر گرفتن RC، تعریفی IBR بیشتر تقاضا برای برق را در طول روز در مقایسه با تعریفی TOU نشان می‌دهد. بنابراین در مورد ۲ به اوج بار کمتری می‌رسیم. این نتیجه که ممکن است برای مشتریان جذاب نباشد، برای اپراتورهای سیستم توزیع خوش‌آیند است.

۸- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله به منظور واکنش به قیمت دوره‌ای برق از اولویت‌های عملیاتی دستگاه‌ها از منظر مشتریان در مدل مدیریت مصرف خانگی برای رضایت بیشتر نزد مشتریانش استفاده شد. بدین منظور اولویت عملیاتی یک دستگاه در ابتدا به عنوان VOLL آن دستگاه تفسیر گردید. سپس قیمت قابلیت اطمینان که تابعی از VOLL دستگاه قابل کنترل است به تابع هدف مسئله‌ی HEM افزوده شد. این تحقیق همچنین تأثیر هماهنگی تعریفهای TOU و IBR را در برنامه‌ی پیشنهادی HEM بر روی قیمت‌های مشتریان ارزیابی نمود. نتایج شبیه‌سازی در این مقاله نشان می‌دهد که هماهنگی اولویت‌های دستگاه‌ها در رویه‌ی HEM می‌تواند موجب هزینه‌ی کمتر برای مشتری شود. نتایج همچنین مشخص می‌کند که هماهنگی تعریفهای روزانه‌ی HEM در برنامه‌ی TOU با تعریفی IBR مقایسه شده و به قیمت کمتر و آستانه‌ی نزدیک‌تری می‌رسد که برای مشتریان و اپراتورهای سیستم توزیع خوش‌آیند است.

به محققینی که در آینده در مباحث مدیریت انرژی پژوهش می‌کنند پیشنهاد می‌شود:

- اثر مدیریت مصرف انرژی در عملکرد کل شبکه توزیع دیده شود.
- تأثیر مدیریت مصرف انرژی در کاهش تلفات شبکه سنجیده گردد.
- روش‌های مدیریت مصرف انرژی با روش‌های دیگر کاهش هزینه‌های جاری همچون بازارایی شبکه، توسعه و بهینه‌سازی شبکه و اتصال منابع تولید پراکنده ترکیب و مقایسه گردد.
- تأثیر مدیریت مصرف انرژی در به تعویق افتادن عملیات توسعه شبکه موردنبررسی قرار گیرد.

منابع

- [۱] Shin, Jungwoo & Park, Yuri & Lee, Daeho, (۲۰۱۸). "Who will be smart home users? An analysis of adoption and diffusion of smart homes," *Technological Forecasting and Social Change*, Elsevier, vol. ۱۳۴(C), pages ۲۴۷-۲۵۳.
- [۲] Pipattanasomporn M, Kuzlu M, Rahman S, (۲۰۱۲). " An algorithm for intelligent home energy management and demand response analysis". *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۲;۳(۴):۲۱۶۶-۷۳.
- [۳] Erick Alves, Santiago Sanchez, Danilo Brandao and Elisabetta Tedeschi , (۲۰۱۹)." Open Access Article Smart Load Management with Energy Storage for Power Quality Enhancement in Wind-Powered Oil and Gas Applications", *Energies* ۲۰۱۹, ۱۲(۱۰), ۲۹۸۰.
- [۴] Gyamfi S, Krumdieck S, Urmee T, (۲۰۱۳). "Residential peak electricity demand response highlights of some behavior". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ۲۰۱۳;۲۵:۷۱-۷.
- [۵] Zipperer A, Aloise -Young PA , (۲۰۱۳). "Electric energy management in the smart home:Perspectives on enabling technologies and consumer behavior". *Proceedings of the IEEE* ۲۰۱۳;۱۰۱(۱۱):۲۳۹۷-۴۰۸.
- [۶] Soares A, Gomes A' , Antunes CH, (۲۰۱۴). " Categorization of residential electricity consumption as a basis for the assessment of the impacts of demand response actions",*Renewable and Sustainable Energy Reviews* ۲۰۱۴;۳۰:۴۹۰-۵۰۳.
- [۷] N. Ganjei, F. Zishan, R. Alayi, H. Samadi, M. Jahangiri, (۲۰۲۲). " Designing and Sensitivity Analysis of an off-grid hybrid wind-solar power plant with diesel generator and battery backup for the Rural Area in Iran", Hindawi, Journal of Engineering, Volume ۲۰۲۲.
- [۸] R. Alayi, F. Zishan, M. Mohkam , (۲۰۲۱)."A sustainable energy distribution configuration for microgrids integrated to the national grid using back-to-back converters in a renewable power system," *Electronics*, vol. ۱۰, no. ۱۰, p. ۱۸۲۶, ۲۰۲۱.
- [۹] Kun-Yuan Huang,Yann-Chang Huang, (۲۰۰۴). "Integrating direct Load Control With Interruptible Load Management to Provide Instantaneous Reserves for Ancillary Services",*IEEE Trans on Power Systems*, Vol.19.No۳.August ۲۰۰۴.
- [۱۰] Carlo Alvarez,Antonio Gabaldon,Angel Molina, (۲۰۰۴). "Assessment and Simulation of the Responsive Demand Potential in End-User Facilities: Application to a University Customer", *IEEE TRANSACTIONS POWER SYSTEMS* ,VOL. ۱۹,NO. ۲,۲۰۰۴.
- [۱۱] Tindemans, S. H., Bhavaraju, M., Lauby, (۲۰۱۹). ۸۰۹-۲۰۱۸ - IEEE Standard Terms for Reporting and Analyzing Outage Occurrences and Outage States of Electrical Transmission Facilities. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8787400>.
- [۱۲] Rastegar M, Fotuhi-Firuzabad M, (۲۰۱۰). "Outage management in residential demand response programs" *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۰;۱(۳):۱۴۰۳-۶۲. <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2014.2338794>.
- [۱۳] Fernandes F, Moraiza H, Valea Z, Ramos C, (۲۰۱۴). " Dynamic load management in a smart home to participate in demand response events", *Energy Build* ۲۰۱۴;۸۲(October):۵۹۲-۶۰۶.
- [۱۴] Shafiee S, Fotuhi-Firuzabad M, Rastegar M, (۲۰۱۳). " Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems". *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۳;۴(۳):۱۳۰۱-۷.
- [۱۵] Zhang D, Shahb N, Papageorgiou LG, (۲۰۱۳). " Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid" ,*Energy Convers Manage* ۲۰۱۳;۷۴(October):۲۰۹-۲۲.
- [۱۶] Yoona JH, Bladicka R, Novoselac A, (۲۰۱۴). " Demand response for residential buildings based on dynamic price of electricity". *Energy Build* in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.002>.
- [۱۷] Mohsenian-Rad AH, Wong VWS, (۲۰۱۰). " Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid". *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۰;1(۳):۳۲۰-۳۱.
- [۱۸] Hubert T, Grijalva S, (۲۰۱۲). " Modeling for residential electricity optimization in dynamic pricing environments". *IEEE Trans Smart Grid Dec.* ۲۰۱۲;۳(۴):۲۲۲۴-۳۱.
- [۱۹] Wang Ch, Zhou Y, Jiao B, Wang Y, (۲۰۱۰). " Robust optimization for load scheduling of a smart home with photovoltaic system". *Energy Convers Manage* ۲۰۱۰;1۰(September):۲۴۷-۵۷.
- [۲۰] Adika CO, Wang Lingfeng, (۲۰۱۴). " Autonomous appliance scheduling for household energy management". *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۴;۵(۲):۶۷۳-۸۲.
- [۲۱] Agnetis A, de Pascale G, Detti P, Vicino A, (۲۰۱۳). " Load scheduling for household energy consumption optimization". *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۳;۴(۴):۲۳۶-۴-۷۳.
- [۲۲] Samadi P, Mohsenian-Rad H, Wong VWS, Schober R, (۲۰۱۳). " Tackling the load uncertainty challenges for energy consumption scheduling in smart grid. *IEEE Trans Smart Grid* ۲۰۱۳;۴(۲):۱۰۰۷-۱۷.
- [۲۳] Mohammed, Nooriya A., and Ammar Al-Bazi, (۲۰۲۱) . " Management of renewable energy production and distribution planning using agent-based modelling." *Renewable Energy* ۱۶۴ (۲۰۲۱): ۵۰۹-۵۲۰.
- [۲۴] S. Solaymani, S, (۲۰۲۱). " A Review on Energy and Renewable Energy Policies in Iran" *Sustainability*. ۲۰۲۱, ۱۳, ۷۳۲۸
- [۲۵] Yonghong. M and Baixuan Li, (۲۰۲۰). "Hybridized Intelligent Home Renewable Energy Management System for Smart Grids", *sustainability*, Issue ۱۰, ۱۲, ۱۱۱۷; doi:10.3390/su12002117, ۲۰۲۰.

- [۷۶] H. T. Dinh, J. Yun, D. M. Kim, (۲۰۲۰). "A Home Energy Management System With Renewable Energy and Energy Storage Utilizing Main Grid and Electricity Selling," in IEEE Access, vol. 8, pp. ۴۹۴۳۶-۴۹۴۵۰, ۲۰۲۰, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2979189.
- [۷۷] Hartner, Michael, et al, (۲۰۱۷). "Optimal sizing of residential PV-systems from a household and social cost perspective: A case study in Austria." Solar Energy 141 (2017): 49-58.
- [۷۸] Nicoletti, Francesco, Mario Antonio Cucumo, and Natale Arcuri, (۲۰۲۲). "Cost optimal sizing of photovoltaic-battery system and air-water heat pump in the Mediterranean area." Energy Conversion and Management 220 (2022): 116274.
- [۷۹] Curiel, José Adrián Rama, and Jagruti Thakur, (۲۰۲۲). "A novel approach for direct load control of residential air conditioners for demand side management in developing regions." Energy 258 (2022): 124763.
- [۸۰] SECO, (۲۰۱۱). The Infinite Power of Texas. Estimating PV system size and cost. SECO fact sheet, no. ۲۴; ۲۰۱۱, p. ۱-۴.

Optimal Management of the Consumption Side in Household Loads Considering the Degree of Consumption Sensitivity in the Presence of Small PV Systems

Mahmoud Zadehbagheri^{*}, Rahim Ildarabadi[†]

^{*} Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Yasuj Branch, Yasuj , Iran

[†]Department of Electrical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

*Corresponding Author: **Mahmoud Zadehbagheri** : Ma.zadehbagheri@iau.ac.ir

Abstract

Home Energy Management (HEM) programs convince residential customers to participate in price-based demand response (DR) programs actively. In these price-oriented HEM methods, controller timing for energy consumption of home appliances in response to the electricity price signal has multiple priorities among customers. Although, various methods have recently been proposed for the use of HEM, prioritizing the performance of controllable devices from the customer's, perspective in price-oriented HEM has not been determined, and this issue is the focus of this paper. For this purpose, the value of lost load (VOLL) of each device is defined in such a way that it raises the implementation priority of that device from the customer's, point of view. Considering, the VOLL of the devices, electricity tariffs and implementation restrictions of the devices, the optimization problem is proposed to reduce the energy consumption and reliability prices. The result of the proposed HEM is the optimal timing of demand for household electricity. Numerical, studies show the effectiveness of the proposed HEM method in an intelligent home considering different pricing based on variable time.

Keywords: Optimal Management, Consumption Sensitivity, Photovoltaic (PV) Systems, HEM Method.