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

محمود زاده 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

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۷/۱۳

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۱/۲۲

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

چکیده

طرح‌های مدیریت انرژی خانگی [۱] (HEM) مشتریان مسکونی را متقاعد 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. باوجوداینکه روش‌های مختلفی اخیراً برای استفاده از HEM پیشنهادشده، اولویت‌گذاری عملکرد دستگاه‌های قابل‌کنترل 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 به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که اولویت اجرایی آن دستگاه را از منظر مشتری مطرح کند. با در نظر گرفتن VOLL دستگاه‌ها، تعرفه‌های برق و محدودیت‌های اجرایی وسایل، مسئله‌ی بهینه‌سازی برای کاهش انرژی مصرفی و قیمت‌های قابلیت اطمینان پیشنهادشده است. نتیجه‌ی HEM پیشنهادی زمان‌بندی بهینه‌ی تقاضا برای برق خانگی است. مطالعات عددی نشانگر کارایی روش HEM پیشنهادی در یک‌خانه‌ی هوشمند با در نظر گرفتن قیمت‌گذاری‌های متفاوت براساس زمان متغیر است.

۱. Home Energy Management

۲. Demand Response

۳. Value of Lost Load

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

۱- مقدمه

مدیریت مصرف انرژی شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌های به‌هم‌پیوسته بین صنعت برق و مشترکین آن به‌منظور کاهش پیک‌بار شبکه و انرژی مصرفی مشترک و نیز تسطیح منحنی بار مصرفی شبکه است تا بتوان با کارآئی بیشتر و هزینه کمتر به تأمین نیاز مصرف‌کنندگان دست‌یافت در آغاز مدیریت مصرف به‌منظور کاهش میزان مصرف پیک و درواقع تحت عنوان مدیریت بار مطرح گردید (شین [۴] و دیگران،۲۰۱۸).
به‌طورکلی از اهداف مدیریت بار در سمت مصرف برای صنعت برق می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود: کاهش هزینه تولید با افزایش ضریب بار و بهینه کردن مصرف برقی – آزاد کردن سرمایه‌های صنعت برق به‌منظور افزایش کارآئی و بهبود کیفی امکانات موجود – کاستن از آلودگی محیطزیست از طریق کاهش تولید انرژی الکتریکی – حفظ و نگهداری منابع زیرزمینی انرژی – کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در توسعه شبکه قدرت با کاهش میزان بار پیک شبکه . مدیریت مصرف انرژی اعم از الکتریکی و حرارتی، برای صنایع کشور نیز دارای منافع بسیاری هست که در ذیل به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌گردد(پیپاتاناسومپورن [۵] و دیگران،۲۰۱۲) . درزمینه‌ی HEM تحقیقات زیادی روشی را برای به حداقل رساندن هزینه‌های مشتری، رضایت از محدوده‌های اجرایی دستگاه‌ها پیشنهاد نموده‌اند. برای مثال در (اریک آلوز [۶] و دیگران،۲۰۱۹) برنامه‌ریزی بهینه‌ی مصرف انرژی خانه‌های هوشمند با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی خطی- انتگرال [۷] (MILP) بررسی گردید. مدل بهینه‌ساز برای کاهش مخارج روزانه در مصرف انرژی خانه‌ی هوشمند پیشنهاد شد. مرجع (گیامفی [۸] و دیگران،۲۰۱۳) کنترل-کننده‌ای را پیشنهاد می‌دهد که اوج مصرف را کاهش می‌دهد و هزینه‌ی برق را در حین حفظ حرارت مناسب سیستم‌های تهویه‌ی خانگی [۹] (HVAC) کم می‌کند. در مرجع (زیپ گیر [۱۰] و دیگران،۲۰۱۳) نوعی زمان‌بندی هوشمندانه بنا بر قیمت دریافتی انجام‌شده است. برنامه‌ریزی بهینه بنا بر روابط میان کاربران/ مشتریان و شرکت در برنامه‌ی مصرف انرژی حاصل می‌گردد. در (سوارس [۱۱] و دیگران،۲۰۱۴) مدل‌های محاسباتی ایجادشده تا دستگاه‌های خانگی و مصرف آن‌ها باهدف کاهش مصرف انرژی، قیمت کلی گاز و برق، تشعشات، اوج مصرف و یا ترکیبی از این عوامل بررسی گردد. به‌علاوه مرجع(گنجی [۱۲] و دیگران،۲۰۲۲) یک HEM بهینه‌ساز را به‌صورت محاسباتی متشکل از مجموعه‌ای از پیمانه‌های فوتوولتائیک خورشیدی، یک توربین کوچک بادی، سیستم ذخیره‌ی انرژی، چرخ الکتریکی و مجموعه‌ای از دستگاه-های قابل‌کنترل ایجاد نموده است. هدف کاهش هزینه‌های انرژی در قالب برنامه‌ریزی ترکیبی خطی- انتگرال از دیدگاه مشتری است. در این مقاله استفاده از لوازم قابل‌کنترل را از دید مشتری اولویت‌بندی کرده و در HEM های مبتنی بر قیمت به کارخواهیم گرفت. برای این منظور ارزش بار ازدست‌رفته‌ی (VOLL) هر دستگاه را با توجه به دیدگاه مشتری و به‌منظور اولویت‌بندی آن‌ها تعیین می‌کنیم. با در نظر گرفتن VOLL لوازم‌خانگی، تعرفه‌های انرژی و محدودیت‌های عملیاتی هر دستگاه از مجموعه‌ی لوازم‌خانگی 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 لوازم‌خانگی 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(علایی [۱۳] و دیگران،۲۰۲۱). درزمینهٔ ی HEM تحقیقات زیادی روشی را برای به حداقل رساندن هزینه‌های مشتری، رضایت از محدوده‌های اجرایی دستگاه‌ها پیشنهاد نموده‌اند. برای مثال در (گنجی [۱۴] و دیگران،۲۰۲۲) برنامه‌ریزی بهینه‌ی مصرف انرژی خانه‌های هوشمند با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی خطی- انتگرال (MILP) بررسی گردید. مدل بهینه‌ساز برای کاهش مخارج روزانه در مصرف انرژی خانه‌ی هوشمند پیشنهاد شد. مرجع (علایی [۱۵] و دیگران،۲۰۱۸)

---

۴. Shin
۵. Pipattanasomporn
۶. Erick Alves
۷. □□□□□ □□□□□□-□□□□□□□□ □□□□□□□□□□□
۸. Gyamfi
۶. □□□□□□□, □□□□□□□□□□□ □□□ □□□ □□□□□□□□□□□□
۱۰. Zipperer
۱۱. Soares
۱۲. Ganjei
۱۳. Alayi
۱۴. Ganjei
۱۵. Alayi

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

کنترل‌کننده‌ای 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 انجام‌شده است. برنامه‌ریزی بهینه بنا بر روابط میان کاربران/ مشتریان و شرکت در برنامه‌ی مصرف انرژی حاصل می‌گردد. در (کارلو آلوارز [۱۷] و دیگران،۲۰۰۴) مدل‌های محاسباتی ایجادشده تا دستگاه‌های خانگی و مصرف آن‌ها باهدف کاهش مصرف انرژی، قیمت کلی گاز و برق، تشعشات، اوج مصرف و یا ترکیبی از این عوامل بررسی گردد. به‌علاوه مرجع (تندمانس [۱۸] و دیگران،۲۰۱۹) یک HEM بهینه‌ساز را به‌صورت محاسباتی متشکل از مجموعه‌ای از پیمانه‌های فوتوولتائیک خورشیدی، یک توربین کوچک بادی، سیستم ذخیره‌ی انرژی، چرخ الکتریکی و مجموعه‌ای از دستگاه‌های قابل‌کنترل ایجاد نموده است. هدف کاهش هزینه‌های انرژی در قالب برنامه-ریزی ترکیبی خطی- انتگرال از دیدگاه مشتری است . درمجموع تحقیقاتی که در بالا عنوان شد از ایده‌ی داشتن HEM بهینه برای تسهیل اجرای برنامه‌های DR قیمت محور حمایت می‌کند. نه این تحقیقات و نه سایر تحقیقات مرتبط درزمینهٔ ی برنامه‌های 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 متشکل از اولویت دستگاه‌ها از منظر مشتری پیشنهادشده تا اجرای برنامه‌های DR قیمت محور را تسهیل نماید. ابتدا دسته‌بندی‌های مختلفی از دستگاه‌های قابل‌کنترل مطرح شد. سپس تعرفه‌های TOU و IBR به‌عنوان محبوب‌ترین برنامه‌های مسکونی DR به‌صورت محاسباتی عرضه شد. ازآنجایی‌که ارزش VOLL دستگاه‌های قابل‌کنترل نقش مهمی درروش پیشنهادی دارد، نحوه‌ی برآورد این ارزش‌ها با استفاده از کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده، مصرف انرژی لوازم‌خانگی قابل‌کنترل را در پاسخ به سیگنال قیمت انرژی الکتریکی، با توجه به تمایلات مختلف مشتری، برنامه‌ریزی می‌کند. در این مقاله استفاده از لوازم قابل‌کنترل را از دید مشتری اولویت‌بندی کرده و در HEM های مبتنی بر قیمت به کارخواهیم گرفت. برای این منظور ارزش بار ازدست‌رفته‌ی (VOLL) هر دستگاه را با توجه به دیدگاه مشتری و به‌منظور اولویت‌بندی آن‌ها تعیین می‌کنیم. با در نظر گرفتن VOLL لوازم‌خانگی، تعرفه‌های انرژی و محدودیت‌های عملیاتی هر دستگاه از مجموعه‌ی لوازم‌خانگی 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 لوازم‌خانگی 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.

۲-۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

[۱۶] Kun-Yuan

[۱۷] Carlo Alvarez

[۱۸] Tindemans

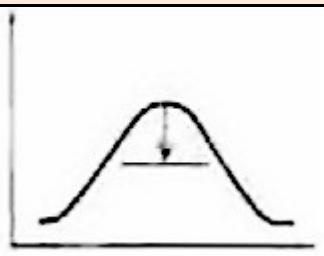
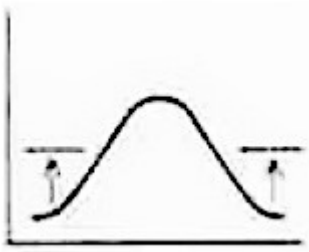
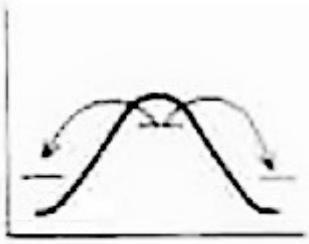
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

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 هرروز حادتر می‌گردد. در این راستا برنامه‌های مدیریت مصرف انرژی خانگی و برنامه‌های پاسخ در سمت تقاضا می‌توانند تأثیر زیادی در تغییر رفتار مشتریان در جهت کاهش مصرف انرژی و مدیریت بهینه‌ی 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 تغییر شکل مناسب منحنی بار می‌شود . اهداف گوناگونی را دنبال می‌کند این فعالیت ممکن است به‌منظور کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری برطرف کردن محدودیت‌ها در ظرفیت تأمین انرژی الکتریکی ایجاد زمینه عرضه انرژی به‌صورت بهینه و اقتصادی ، کاهش هزینه خدمات‌رسانی ، بهبود ضریب بار ، بهبود بازدهی و کارآئی سیستم و بهبود ضریب اطمینان سیستم پایه‌ریزی شده و اجرا گردیده است (رستگار [۱۹] و دیگران،۲۰۱۵). مدیریت بار به‌عنوان زیرمجموعه‌ای از مدیریت مصرف محسوب شده و صرفاً دربرگیرنده اعمالی است که توسط شرکت برق و یا توسط مشترکان در پاسخ به انگیزه‌های ایجادشده به‌منظور برش پیک‌بار ، پر کردن دره منحنی بار و یا جابجایی زمانی بار اجرا می‌شود. به‌طورکلی 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		• قطع بار (اعمال خاموشی) • کنترل مستقیم بار • تعرفه‌های زمانی
۲	دره زدایی		• ذخیره انرژی گرمایی • ذخیره سرما • تعرفه‌های فصلی • تعرفه‌های غیر پیک • تعرفه‌های زمانی
۳	جابجایی بار		• ذخیره انرژی گرمایی • ذخیره سرما • تعرفه‌های زمان • کنترل وسایل مصرف‌کننده (چرخش زمانی)

[۱۹]. Rastegar

[۲۰]. Fernandesa

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

۴	انعطاف‌پذیر کردن منحنی بار		• سرویس اشتراک دیماند • قیمت‌گذاری برای قابلیت اعتماد متغیر • تعرفه‌های قطع بار
۵	صرفه‌جویی راهبردی		• ممیزی • وام کم‌بهره • سیستم‌های خورشیدی • مصرف انرژی کارا (باراندمان خوب) • تعرفه‌های صرفه‌جویی • تولید مشترک برق و گرما
۶	رشد بار راهبردی		• پمپ گرمایی • سیستم‌های دو سوخته • تعرفه‌های تشویقی • بارهای صنعتی الکتریکی • افزایش سهم بازار

٤- حضور سیستم‌های فتوولتاییک کوچک

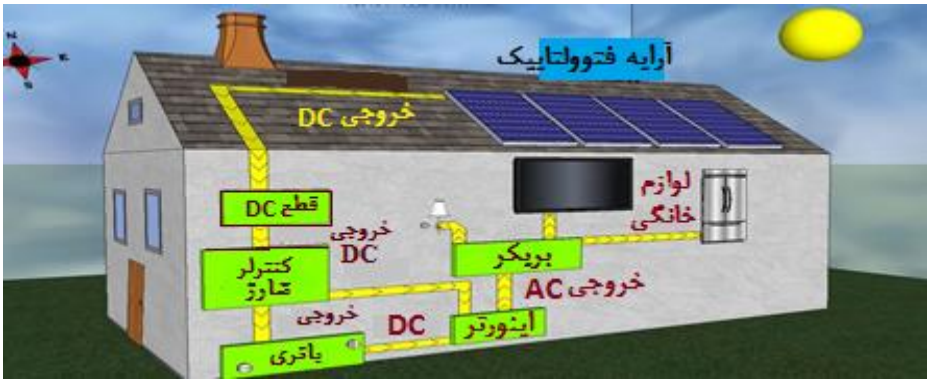
طراحی سیستم‌های فتوولتاییک مستقل از شبکه به‌گونه‌ای است که باید مستقل از شبکه برق سرا سری عمل نموده و قابلیت تغذیه بارهای مستقیم [۲۱] (DC) و متناوب را دارا باشد(شفیعی [۲۲] و دیگران،۲۰۱۳). این واحدها مستقیماً به بار متصل می‌شوند و تمام بار را برخلاف سیستم‌های متصل به شبکه تأمین می‌نمایند. بنابراین برای طراحی این‌گونه واحدها، بایستی مدل بار و کل توان موردنیاز بار در یک دوره شبانه‌روزی محاسبه شود و ظرفیت واحد و تعداد آرایه‌های فتوولتاییک بر این اساس محاسبه گردد. همچنین به دلیل عدم وجود شبکه برق سرا سری، تمامی توان می‌بایستی از طریق سیستم فتوولتاییک تأمین شود. ازآنجایی‌که سیستم فتوولتاییک 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 فتوولتاییک به سیستم ذخیره‌ساز انرژی مجهز شود. ظرفیت ذخیره‌ساز 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 خور شیدی به انرژی الکتریکی تبدیل می شود (شکل ۱). ولتاژ DC تولید شده تو سط پنل به یک کنترل‌کننده وارد می شود که وظیفه این کنترلر این ا ست 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 پنل ها انرژی تولید نمی‌کنند اجازه دهد تا بار از باطری‌ها تغذیه کند. بعدازاین 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 تولیدشده را به AC تبدیل کند(کون یوان [۲۳] و دیگران،۲۰۰۴) و در آخر هم از یک بریکر برای حفاظت بیشتر قرار می‌دهند تا در مواقع اتفاق یک حادثه مدار مجموعه را به حالت جزیره دربیاورد.

[۲۱]. Direct Current

[۲۲]. Shafiee

[۲۳]. Kun-Yuan

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



شکل ۱. مراحل نمایش داده‌شده تبدیل انرژی یک سیستم فتوولتایک خانگی

۵- روش تحقیق

۵-۱- برنامه‌های عرضه- تقاضا در شبکه‌ها هوشمند

در شبکه‌ها هوشمند، برنامه‌های عرضه- تقاضا (DR) نقش مهمی در فعال کردن کاربران نهایی برای توزیع عملکرد سیستم دارند. در این برنامه‌ها، طرح‌های سیستم توزیع عملیاتی به‌گونه‌ای است که تعرفه‌ی برق یا شاخصی از مصرف‌کنندگان نسبت به تغییر داوطلبانه در الگوی مصرف ایجاد می‌شود. ازآنجایی‌که تقاضای مسکونی بخش مهمی از کل بار سیستم است، برنامه‌های مسکونی DR از منظر فعال سیستم مهم هستند. یکی از موانع در استفاده از برنامه‌های DR مسکونی نبودن اطلاع کافی مشتریان برای پاسخ به سیگنال‌های قیمت‌گذاری و محرک است. یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی سیستم کنترلی است که به‌صورت خودکار به سیگنال‌های دریافتی با حل مسئله‌ی بهینه پاسخ می‌دهد و در کل به آن سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی (HEM) می‌گویند. برنامه‌ی HEM هزینه‌های مشتریان را کاهش می‌دهد و عاملی برای ترغیب آن‌ها در راستای مشارکت رد برنامه‌های DR است. برونداد حل مسئله‌ی بهینه‌سازی HEM زمان‌بندی مصرف انرژی دستگاه‌های قابل‌کنترل است. علاوه بر دستگاه‌های قابل‌کنترل، فناوری‌های خودروهای الکتریکی ترکیبی (PHEV) در خانه‌های هوشمند به دلیل مزایای محیطی‌شان نفوذ خواهند یافت. ازآنجاکه این خودروهای الکتریکی دارای باتری هستند که می‌تواند در سطوح مختلف توسط شبکه شارژ شود و برای بازگشت انرژی به شبکه تخلیه شود (وسیله‌ای برای انتقال به ظرفیت شبکه)، لازم است که PHEV را درروند مدیریت بار ترکیب نمود. ازاین‌رو حل مسئله‌ی HEM به برنامه‌های زمانی مصرف انرژی و زمان‌بندی شارژ و تخلیه‌ی PHEV ختم می‌گردد. مقالات متعددی بر روی مدل‌سازی و ساختار HEM متمرکز شدند. روش‌های پیشنهادی در این مقالات قیمت انرژی را برای مشتری در کنار حداکثر بار خانگی کاهش می‌دهد. به‌علاوه به‌منظور متقاعد ساختن مشتریان برای شرکت در برنامه‌های DR، راحتی مشتری در این برنامه‌ها مدنظر است. برخی تحقیقات مانند (یونا [۲۴] و دیگران،۲۰۱۴) مدل‌سازی ریاضیاتی از عدم رضایت مشتری علاوه بر قیمت انرژی ارائه کرده‌اند. مدل‌های عدم رضایت در این تحقیقات را می‌توان به دودسته تقسیم کرد: عدم رضایت درنتیجه‌ی زمان‌بندی و عدم رضایت درنتیجه‌ی وضعیت نامساعد انرژی. در سطح ابتدایی در صورت ایجاد تأخیر در استفاده از دستگاه‌ها به دلیل تغییر بار متحمل زیان می‌شوند، مانند ماشین لباسشویی و خشک‌کن. در دومین سطح به دلیل انحراف از وضعیت ایده آل انرژی، متحمل زیاد می‌شوند مانند دمای خانه. برخی تحقیقات اولویتی را برای دستگاه به مشتری معرفی می‌کنند تا سطح دیگری از رضایت برای اجرای برنامه‌ی DR ایجاد شود. در تحقیقات(محسنیان راد [۲۵] و دیگران،۲۰۱۰) طرح DR کنترل مصرف مشتری در یک محدوده‌ی از قبل تعیین‌شده است. بنابراین اولویت دستگاه‌های قابل‌کنترل هم‌راستا با محدوده‌های دمایی و اجرایی در(هوبرت [۲۶] و دیگران،۲۰۱۲) هماهنگ شده تا مشخص گردد کدام دستگاه‌ها را در صورت استفاده از DR می‌توان خاموش کرد. باوجوداینکه مفهوم اولویت ابزاری هم‌راستا با این تحقیقات است، طرح‌های DR پیشنهادی برنامه‌های DR قیمت محور را دربرنمی‌گیرد. درمجموع می‌توان گفت که باوجوداینکه مفهوم پیشنهاد برنامه‌های بهینه‌سازی برای HEM و همچنین هماهنگی اولویت‌های اجرایی دستگاه‌های خانگی در DR قبلاً عنوان‌شده، مدل‌سازی اولویت‌های دستگاه‌ها در اجرای HEM براساس برنامه‌های قیمت دار در بررسی‌های پیشین مطرح نشده است. در این مقاله چارچوب قیمتی HEM طراحی‌شده تا اولویت اجرایی دستگاه‌های مختلف در مدل

[۲۴] Yoona
[۲۵] Mohsenian-Rad
[۲۶] Hubert

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

بهینه‌سازی سیستم مدیریت انرژی باهم هماهنگ شود. به‌عنوان‌مثال یک‌خانه ممکن است دو دستگاه قابل‌کنترل 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 هرکدام بررسی می‌شود که بر طبق تعرفه‌های زمانی، زمان استفاده[۲۸] (TOU) و نرخ بلوک‌های شیب[۲۹] (IBR) خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر با در نظر گرفتن نسبت تعرفه‌های مختلف، مشتری ارزش اجرایی یک دستگاه را برآورد می‌سازد. درواقع ارزش VOLL دستگاه نشانگر اهمیت اجرای آن برای مقایسه در مقایسه با هزینه‌ی برق است. درنتیجه ارزش VOLL برای محاسبه‌ی قیمت قابلیت اطمینان روز بعد بکار می‌رود. بنابراین تابع هدف به حداقل رساندن هزینه‌ی انرژی و هزینه‌های قابلیت اطمینان روز بعد است. برون‌داد 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 طراحی‌شده است. اهمیت روش پیشنهادی افزودن سطح دیگری از رضایت مشتری و انعطاف‌پذیری به مدل‌های HEM قیمت محور خواهد بود.

۲-۵- حضور مصرف‌کنندگان در بازار انرژی

یکی از برجسته‌ترین اهداف تجدید ساختار در سیستم قدرت، تهیه امکان نظارتی جدید برای پخش برق برای به دست آوردن مزایای بلندمدت برای مصرف‌کنندگان بوده است . بااین‌وجود در بسیاری از بازارها مصرف‌کنندگان تأثیر کمی در طراحی بازارهای الکتریسیته داشته و کمیته‌های متشکل از تولیدکنندگان،شرکت‌های انتقال و شرکت‌های توزیع، خرده‌فروش‌ها و رگولاتورها در اتخاذ تصمیمات دخیل هستند. یک دلیل روشن و قابل‌فهم نیز برای این وضعیت وجود دارد: بسیاری از مصرف‌کنندگان، به‌جز بعضی مصارف بزرگ، انگیزه اقتصادی برای شرکت فعال در مسائل پیچیده و 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 خریدوفروش 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 مصرف‌کنندگان انرژی نیز منحنی خرید خود را به بازار ارسال می‌کنند. همه این منحنی‌ها متشکل از بلوک‌های انرژی و قیمت است . بهره‌بردار بازار ،پیشنهادهای خریدوفروش انرژی را از نهادهای مربوطه گرفته و بازار را تسویه می‌کند و قیمت تسویه انرژی برنامه‌ریزی‌شده 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 به‌صورت نقطه‌ای تعیین می‌شود. از ویژگی‌های مهم قیمت انرژی در خیلی از بازارها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: متوسط و میانگین متغیر، ویژگی‌های فصلی، اثرپذیر بودن از تقویم روزانه، بی‌ثباتی بالا و ... (وانگ [۳۰] و دیگران،۲۰۱۵). با توجه به این ویژگی‌ها ،پیش‌بینی دقیق قیمت انرژی سخت است. بااین‌وجود، داشتن اطلاعات مربوط به قیمت انرژی برای همه نهادهای شرکت‌کننده در بازار، تعیین‌کننده است . به این دلیل، پیش‌بینی قیمت به‌عنوان یکی از موضوعات تحقیقاتی مطرح بوده(آدیکا [۳۱] و دیگران،۲۰۱۴) و همچنان موردتوجه است. برای یک بازه میان‌مدت باید مصرف‌کنندگان در مورد حضورشان در بازارهای مختلف و انعقاد قراردادهای دوجانبه برای مقابله با ریسک ناشی از قیمت متغیر بازار، تصمیم‌گیری کنند.

۵-۲-۱- هدف مصرف‌کنندگان از مشارکت در بازار

کاهش هزینه‌های پرداختی مصرف‌کنندگان برای انرژی الکتریکی مصرفی خود، یکی از دلایل ایجاد بازارهای رقابتی الکتریسیته است . شرکت فعال‌تر طرف مصرف در بازار برق ، باعث می‌شود که بازارهای برق، رقابتی‌تر و کارآمدتر شده و هم‌چنین به جایابی بهینه منابع اقتصادی کمک می‌کند. هدف یک مصرف‌کننده 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 به‌طوری‌که با داشتن ریسک کمتر، هزینه کل خرید انرژی کمینه شود. ازآنجایی‌که 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 قطعیت‌ها ست(آگنتیس [۳۲] و دیگران،۲۰۱۳). مسئله پیشنهادی از طرف مصرف‌کننده، 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

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

آن اســت به‌طوری‌که هزینه خرید آن مصــرف‌کننده، مینیم شــود. در مواقعی که اطلاعات مربوط به ســایر بازیگران بازار نامعلوم باشــد پیچیدگی‌های اضافی هم در آن وجود خواهد داشت (گیامفی [۳۳] و دیگران،۲۰۱۳).

۵-۲-۲- راهبرد تأمین انرژی الکتریکی مصرف‌کنندگان بزرگ

ایجاد امکان پیشنهاد خرید برای مصرف‌کننده، یک‌راه انعطاف‌پذیر را برای تأمین پیک‌بار در یک برنامه‌ریزی تولید فراهم می‌کند. در یک محیط رقابتی، همان‌طور که بسیاری از شرکت‌های تولیدی واحدهای کم‌هزینه ولی کمی انعطاف‌ناپذیر و یا واحدهای گران‌قیمت ولی انعطاف‌پذیر را در بازار برق بهره‌برداری می‌کنند، مشتریان نیز می‌توانند از فرصت‌های موجود برای کاهش میزان انرژی مصرفی خود در ساعت‌های باقیمت بالا استفاده نمایند(صمدی [۳۴] و دیگران،۲۰۱۳). پیشنهاددهی طرف مصرف (DSB[۳۵]) بیشتر برای مصرف‌کنندگان صنایع بزرگ که می‌توانند میزان انرژی مصرفی خود را کاهش یا انتقال دهند به دلیل قیمت پایین‌تر مفید است. DSB بر روی بازار خدمات جانبی، قراردادهای تغذیه، بازار لحظه‌ای، قراردادهای دوجانبه، قیود انتقال و توزیع و بازار متعادل‌کننده تأثیر بسزایی دارد. پیشنهاددهی مصرف‌کننده در بازار می‌تواند به دو شکل انجام گیرد، یکی پیشنهاد برای کل تقاضا را در برمی‌گیرد و دیگری شامل پیشنهاد برای تغییر تقاضای موردنظر است. هر دو روش مهم است، چراکه فرصت‌هایی را برای طرف مصرف‌کننده جهت مدیریت میزان الکتریسیته مصرفی ایجاد می‌کند که بر روی کل مجموعه تأثیر می‌گذارد. پیشنهاد برای کل تقاضا به دو صورت می‌تواند انجام گیرد: اول اینکه مصرف‌کننده و ژنراتور می‌توانند برای مقدار مشخص انرژی باقیمت مشخص توافق نمایند که به آن قرارداد دوجانبه گفته می‌شود و دوم اینکه مصرف‌کنندگان می‌توانند مانند ژنراتورها،پیشنهاد خود برای کل تقاضا را در یک بازار یا بورس ارائه کنند. در پیشنهاد برای تغییر در میزان تقاضا، مصرف‌کننده میزان تغییر در تقاضای الکتریسیته خود را پیشنهاد می‌دهد. مثلاً می‌تواند جهت کمک به اپراتور سیستم انتقال در حفظ کیفیت تغذیه، میزان تقاضای خود را کاهش دهد. در حالت کلی تغییر در میزان تقاضا می‌تواند هم به‌صورت کاهشی و هم به‌صورت افزایشی باشد. بلوک تقاضا ممکن است پیشنهاد یک مصرف‌کننده منفرد مثل مشترک صنعتی یا گروهی از مصرف‌کنندگان کوچک‌تر نظیر مشترکین خانگی باشد(محمد [۳۶] و دیگران،۲۰۲۱).

٦- تابع هدف مسئله

اولین معیاری که هر مشتری در نظر می‌گیرد کاهش قیمت انرژی است. قیمت انرژی تابعی از تعرفه‌ی کاهش‌یافته‌ی زمانی و مصرف انرژی برق در هر گام زمانی خواهد بود. تابع هزینه‌ی زمانی خطی (EC) بنا بر TOU و تعرفه‌های IBR به ترتیب در معادلات زیر آورده شده است(هارتنر [۳۷] و دیگران،۲۰۱۷).

$$EC = \sum_{t\in T} \gamma(t)E(t) \qquad (۱)$$

$$EC = \alpha \times El + \beta \times (E - \delta)\ , \qquad E = \sum_{t\in T} E(t) \qquad (۲)$$

جایی که t شاخص گام زمانی، T گستره‌ی زمانی برنامه‌ریزی است که در این مقاله یک روز در نظر گرفته‌شده، EC تابع هزینه‌ی انرژی، E(t) مصرف انرژی برق خانگی در واحد زمانی t، y(t) تعرفه‌ی TOU در گام زمانی t به صورتی است که در (۱) تعریف‌شده، E مصرف کل انرژی برق در یک روز، EI مصرف انرژی برق روزانه‌ی کمتر از آستانه‌ی ∂ و $(E-\partial)$ مصرف برق روزانه‌ی بیشتر از آستانه خواهد بود. مشخص است که EI باید کمتر یا برابر با آستانه‌ی ∂ باشد. قیمت مصرف انرژی کمتر و بیشتر از آستانه ی δ به ترتیب با تعرفه های α و β نشان داده می شود. علاوه بر هزینه‌ی انرژی، فرض بر این است که VOLL به‌عنوان شاخص اولویت اجرایی دستگاه‌های خانگی برای

[۳۳] Gyamfi
[۳۴] Samadi
[۳۵] Demand Side Bidding(DSB)
[۳۶] Mohammed
[۳۷] Hartner

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

مشتری درروند HEM تصور می‌گردد. کنترل‌کننده باید برنامه‌ریزی عملیاتی دستگاه‌ها را براساس VOLL از قبل تعیین‌شده‌ی دستگاه و تعرفه‌ی برق مشخص کند. ازآنجایی‌که 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 به‌صورت ریاضیاتی این‌گونه نشان داده می‌شود:

$$RC = \sum_{a \in A} VOLL_a LE_a \qquad (۳)$$

جایی که a شاخص دستگاه‌ها و A مجموعه‌ای از دستگاه‌هاست. به‌علاوه $VOLL_a$ 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 قابل‌کنترل چه خاموش/ روشن چه تنظیم‌گر مصرف انرژی مشخصی در روز دارد. بنابراین اگر مصرف کل انرژی دستگاه a در روز کمتر از مصرف انرژی کل از پیش تعیین‌شده برای آن دستگاه باشد، تمایز میان مصرف انرژی به‌دست‌آمده و مصرف انرژی از قبل تعیین‌شده کاهش انرژی دستگاه a یعنی LE_a خواهد بود. بنابراین تابع هدف این‌گونه است:

$$\min COST = EC + RC \qquad (۴)$$

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(نیکولتی [۳۸] و دیگران،۲۰۲۲).

٦-۱- قیود مسئله

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

$$E(t) = E^c(t) + E^{uc}(t) \qquad (۵)$$

جایی که $E^c(t)$ و$E^{uc}(t)$ به ترتیب تقاضای خانگی قابل‌کنترل و غیرقابل‌کنترل در گام زمانی t هستند. برآورد صحیح $E^{uc}(t)$ معمولاً مشخص فرض می‌شود. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، در هر خانه دستگاه‌های قابل‌کنترل 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 به‌عنوان مجموعه‌ی دستگاه‌های کنترل‌شده‌ی خاموش/ روشن و دستگاه‌های تنظیم‌کننده، معادلات به‌دست‌آمده محدوده‌های اجرایی دستگاه‌های قابل‌کنترل خواهند بود و چیزی شبیه به مدل‌های موجود در (کوریل [۴۰] و دیگران،۲۰۲۲) ایجاد می‌گردد.

$$\sum_{t \in AI_j} I_j(t) = U_j, \quad \forall j \in J \qquad (۶)$$

$$E_j(t) = E_j I_j(t), \quad \forall j \in J \qquad (۷)$$

$$E_k^{min}(t) \le E_k(t) \le E_k^{max}(t), \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in AI_k \qquad (۸)$$

[۳۸] Nicoletti

[۳۹] Hebrid Electrical Vehicles

[۴۰] Curiel

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

$$\sum_{t \in AI_j} E_k(t) = E_k, \quad \forall k \in K \tag{۹}$$

$$\sum_{k \in K} E_k(t) + \sum_{j \in J} E_j(t) = E^C(t), \qquad \forall t \tag{۱۰}$$

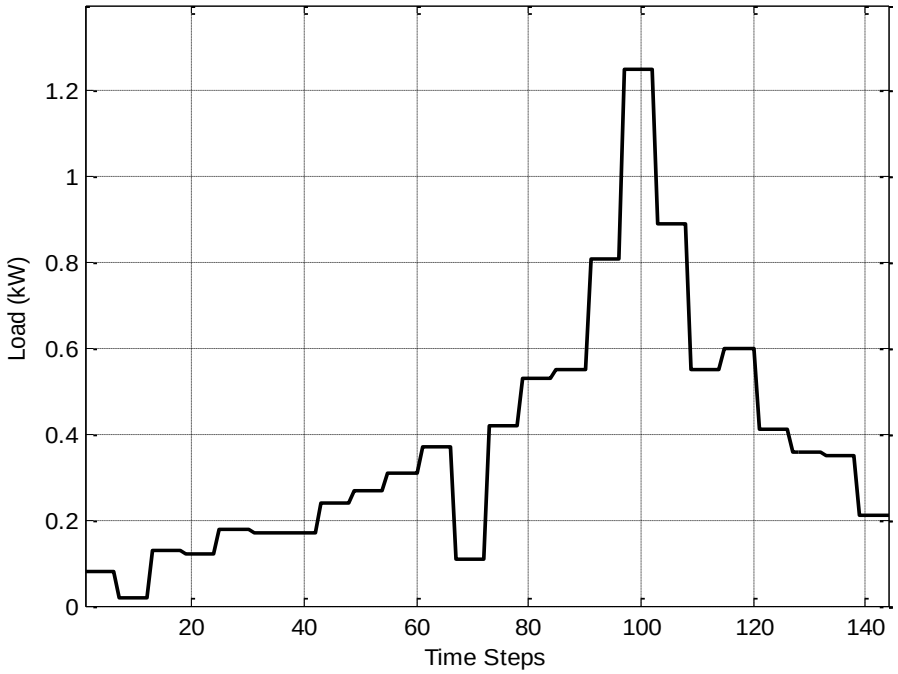
جایی که j و k شاخص‌های به ترتیب دستگاه‌های کنترل‌شده‌ی خاموش/ روشن و تنظیم‌کننده هستند. $I_j(t)$ یک متغیر دوگانه است، ۱ به معنی دستگاه برقی jام است که در زمان t روشن است. U_j زمان موردنیاز دستگاه j برای فعالیت مناسب خواهد بود. E_j مصرف انرژی دستگاه j در ویژگی‌های دستگاه است. AI_j و AI_k به ترتیب فاصله‌ی مجاز برای عملکرد دستگاه‌های j و k می‌باشد، که هرکدام توسط مشتری تعیین می‌گردند. $E_j(t)$ و $E_k(t)$ به ترتیب مصرف انرژی برق دستگاه j و دستگاه k در گام زمانی t هستند. $E^{min}_k(t)$ و $E^{max}_k(t)$ به ترتیب حداقل و حداکثر سطح مجاز انرژی مصرفی دستگاه k (حداقل و حداکثر میزان شارژ برایPHEV) در زمان t محسوب می‌شوند. رابطه‌ی (۶) نشان می‌دهد که دستگاه‌های کنترل‌شده‌ی 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 قابل‌کنترل در هر گام زمانی در رابطه (۷) نشان داده شدند. 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 باید مقداری مشخص (E_k) باشد. برای مثال انرژی واردشده به باتری PHEV باید باتری کاملاً شارژ شده را در زمان جدا کردن، ارائه دهد. این محدودیت به‌صورت ریاضیاتی در (۹) نشان داده شد. همان‌طور که در (۱۰) عنوان شد، مصرف انرژی قابل‌کنترل خانگی مجموع مصرف انرژی تمامی دستگاه‌های کنترل‌پذیر 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 قابل‌کنترل و غیرقابل‌کنترل و یک PHEV بررسی‌شده است. در ابتدا، سه سطح از تعرفه‌ی TOU در HEM ترکیب می‌شود. سپس مسئله‌ی بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تعرفه‌ی IBR حل‌شده است. انرژی و قیمت قابلیت اطمینان به‌عنوان نتایج حل مسئله‌ی بهینه‌سازی گزارش‌شده‌اند. همچنین بار خانگی پس از حل مسئله‌ی HEM با دو تعرفه‌ی زمانی ارائه می‌گردد. در این موارد، گام زمان بهینه‌سازی برابر با ۱۰دقیقه فرض شده است. بنابراین محدوده‌ی زمانی ۱۴۴ گام زمانی خواهد بود. تقاضای خانگی غیرقابل‌کنترل نیز در شکل ۲ نشان داده‌شده است.

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



شکل۲. تقاضای خانگی غیرقابل‌کنترل

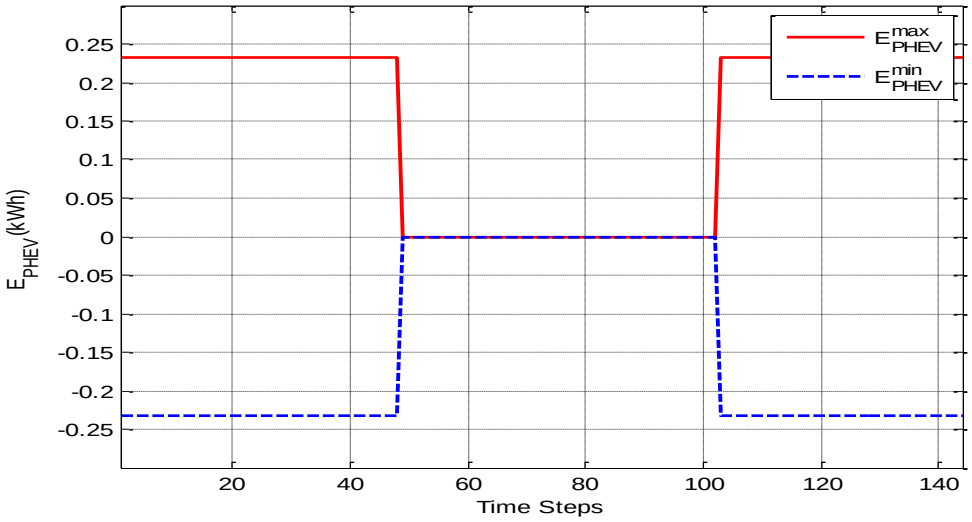
خودرو PHEV به همراه ویژگی‌هایش در جدول۲ و شکل ۳ توصیف‌شده است. در این جدول $E_{PHEV}^{\max}$ حداکثر نسبت شارژ/ تخلیه‌ی باتری PHEV است. به‌عبارت‌دیگر حداکثر مجاز برای شارژ و تخلیه‌ی باتری PHEV از طریق ساختار شارژ خانگی برابر با ۰/۲۳۳کیلووات است. گنجایش ظرفیت انرژی باتری PHEV، PHE۰ اولین حالت شارژ باتری PHEV، PHEf حالت نهایی شارژ باتری PHEV در روز و η_{ch}/η_{dch} کارایی شارژ/ تخلیه‌ی باتری PHEV هستند. توجه داشته باشید PHEV در آن فاصله‌ی زمانی که خارج از خانه قرار دارد ۵کیلو وات 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)	۰/۲۳۳
۲	ظرفیت باتری	(kWh)	۷/۸
۳	شارژ اولیه باتری	(kWh)	۳/۹
٤	شارژ نهایی باتری خودرو	(kWh)	۳/۹
٥	بازده شارژ	-	۰/۸۸
٦	بازده دشارژ	-	۰/۸۸

[۴۱]. SECO

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

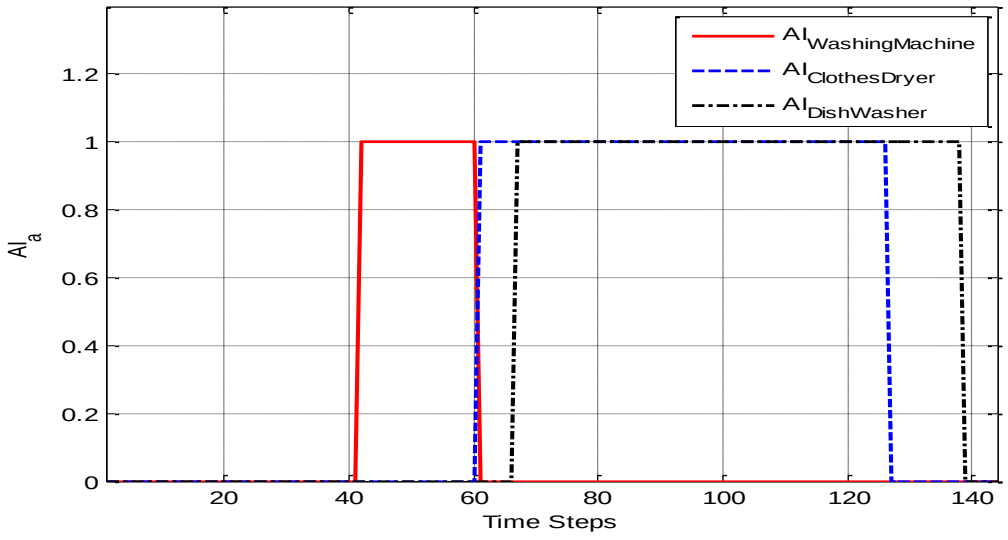


شکل۳. مینیم و ماکزیمم PHEV

ماشین لباسشویی، ظرف‌شویی و خشک‌کن دستگاه‌های کنترل‌شده‌ی خاموش/ روشن محسوب می‌شوند. جدول **۳**و شکل **۴** ویژگی‌های اجرایی این دستگاه‌ها را خلاصه می‌کند.

جدول ۳. داده‌های مربوط به دستگاه‌های کنترل‌شده‌ی خاموش/ روشن (سکو [۴۲] و دیگران،۲۰۱۱)

ردیف	دستگاه	مجموع بازه‌های کارکرد لازم Ua	انرژی مصرفی در هر بازه زمانی E_a(kWh)	بازه‌های زمانی مجاز کار AI_a
۱	ماشین لباس‌شویی	۳	۰/۲۰۰	[۶۰ ,۴۲]
۲	ماشین خشک‌کن	۵	۰/۲۰۵	[۱۲۶ ,۶۱]
۳	ماشین ظرف‌شویی	۳	۰/۰۶۲۵	[۱۳۸ ,۶۷]



[۴۲] SECO

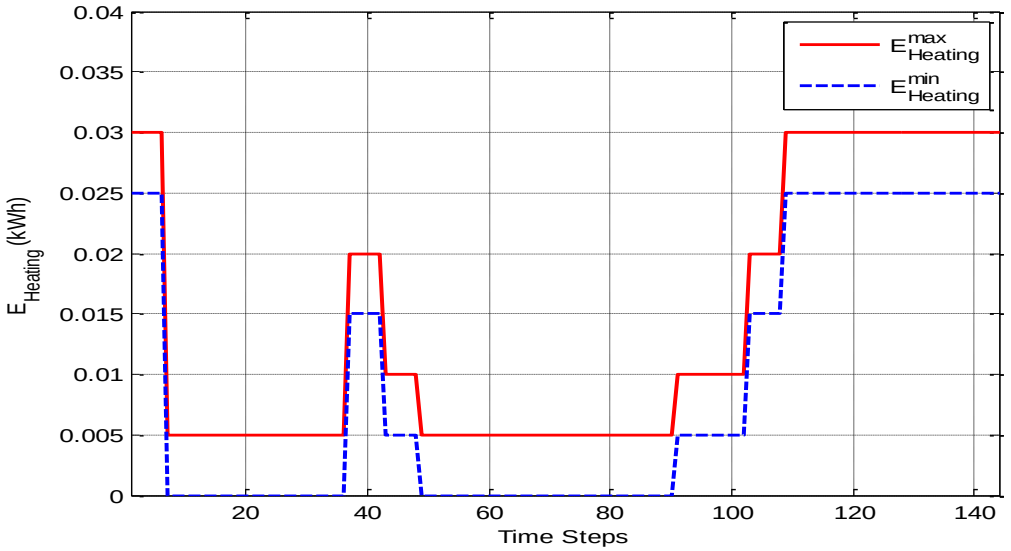
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

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

درمجموع میزان مصرف انرژی حرارتی در ساعات مختلف روز بعدی در جدول۴ 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 $E_{heating}^{max}$	حداقل مصرف انرژی سیستم گرمایشی $E_{heating}^{min}$
۱	[۱, ۶] و [۱۰۹, ۱۴۴]	۰/۰۳۰	۰/۰۲۵
۲	[۳۷, ۴۲] و [۱۰۳, ۱۰۸]	۰/۰۲۰	۰/۰۱۵
۳	[۴۳, ۴۸] و [۹۱, ۱۰۲]	۰/۰۱۰	۰/۰۰۵
۴	[۷, ۳۶] و [۴۹, ۹۰]	۰/۰۰۵	۰



شکل۵. ناحیه عملکردPHEV

شاخص‌ترین عامل درروش پیشنهادی VOLL دستگاه‌های کنترل‌شده است. در اینجا فرض بر آن است که اهمیت کار ماشین لباسشویی و خشک‌کن لباس همچون سایر دستگاه‌ها برای مشتری زیاد نبوده‌اند. ازاین‌رو اولویت‌های آن‌ها متوسط فرض می‌شود. برای سایر دستگاه‌ها، اولویت بالا است.

۷-۲- نمونه‌ی ۱: هماهنگی تعرفه‌ی TOU

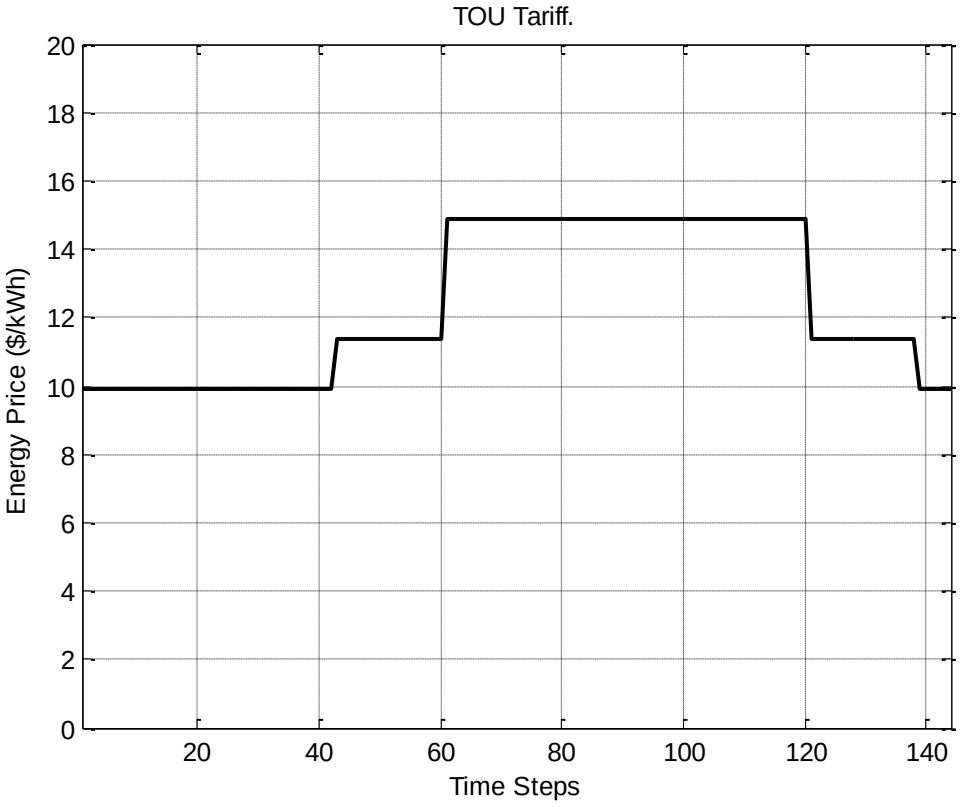
در این مورد، قابلیت اطمینان و قیمت انرژی با در نظر گرفتن اینکه تعرفه‌ی کاهش‌یافته برای مشتری TOU سه پله مانند جدول ۵ و شکل ۶ است، به حداقل رسیده‌اند.

جدول۵. تعرفه TOU

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

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

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



شکل ۶. نمودار TOU

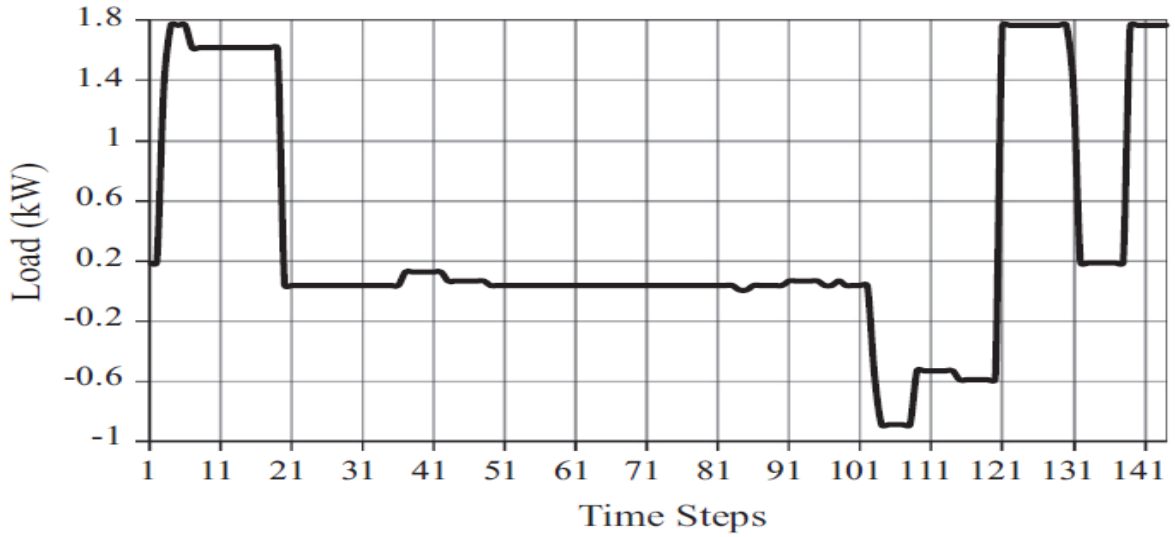
قبل از استفاده از روش پیشنهادی بهتر است که مسئله‌ی بهینه‌سازی بدون قیمت قابلیت اطمینان یعنی بدون در نظر گرفتن اولویت‌های مختلف برای دستگاه از منظر مشتری، حل شود. بدین منظور مقدار VOLL دستگاه‌ها یکسان و در مقدار بالا در نظر گرفته‌شده است. قیمت به‌دست‌آمده یعنی قیمت انرژی مشتری، ۲۲۴/۲ در این حالت خواهد بود. با توجه به اولویت‌های اجرایی دستگاه‌ها، بر طبق تعرفه‌ی TOU، مقدار VOLL ماشین لباسشویی و خشک‌کن لباس معادل ۱۰دلار در هر کیلووات ساعت تنظیم‌شده که میان y_1 و y_3 است. قیمت انرژی نهایی و قیمت قابلیت اطمینان به ترتیب ۲۰۴/۹ و ۱۴/۲۵ هستند. بنابراین هزینه‌ی کل مشتری که از حل مسئله‌ی بهینه‌سازی به دست می‌آید ۲۲۲/۲ است. این نشان می‌دهد که هزینه‌ی کل مشتری ممکن است با در نظر گرفتن قیمت قابلیت اطمینان درروندHEM کاهش یابد. بنابراین مشخص می‌گردد که روش HEM پیشنهادی بیشتر مشتری را راضی می‌کند، نه‌تنها با در نظر گرفتن اولویت‌های آن‌ها در برنامه‌ریزی بلکه با کاهش قیمت برقشان تا ۷/۵ درصد یعنی از ۲۲۴/۲ به ۲۰۷/۹ . گام‌های زمانی عملکرد دستگاه قابل‌کنترل در جدول۶ به همراه و بدون در نظر گرفتن قیمت قابل‌کنترل ارائه‌شده است.

جدول ۶. بازه‌های کاری مربوط به دستگاه‌های کنترل‌شده‌ی خاموش/ روشن

ردیف	دستگاه	با هزینه قابلیت اطمینان RC	بدون هزینه قابلیت اطمینان RC
۱	ماشین لباس‌شویی	۴۲	[۴۲, ۴۴]
۲	ماشین خشک‌کن	–	۱۲۱ [۱۲۳, ۱۲۶]
۳	ماشین ظرف‌شویی	۱۲۲, ۱۲۴, ۱۲۵	[۱۰۶, ۱۰۸]

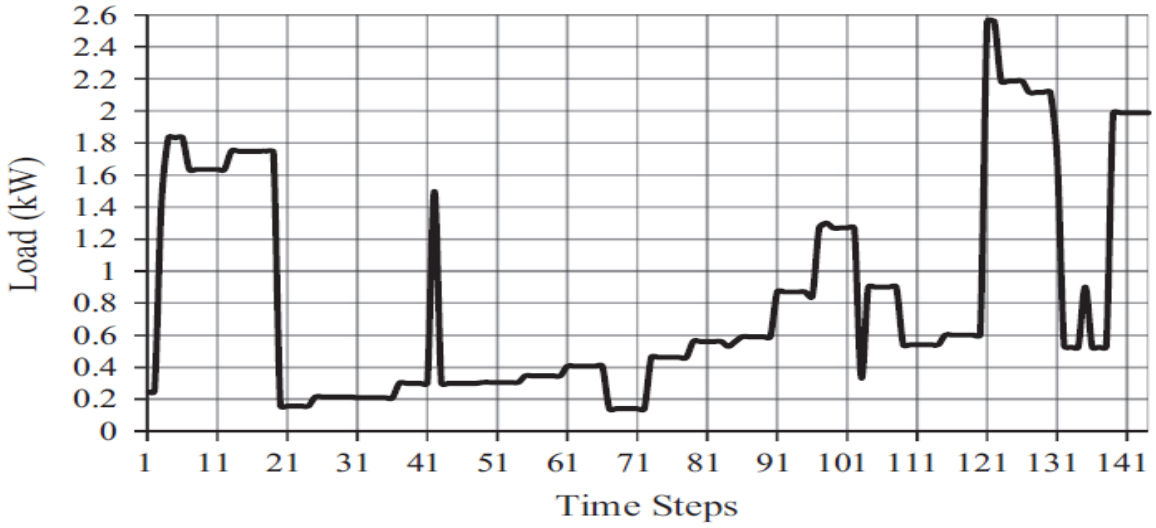
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده‌شده، ازآنجایی‌که مقدار VOLL ماشین لباسشویی و خشک‌کن کمتر از تعرفه‌های متوسط و پیک است، بهتر است که این دستگاه‌ها را در برخی زمان‌ها خاموش کرد. بنابراین ماشین لباسشویی تنها در زمان تعرفه‌ی غیر پیک روشن می‌شود و خشک‌کن نیز در تمامی گام‌های زمانی خاموش است. این‌گونه می‌توان قیمت قابلیت اطمینانی بیشتری داشت، گرچه موجب هزینه‌ی کلی کمتر نیز می‌شود. تقاضای کلی برق سیستم حرارتی و PHEV در شکل ۷ نشان داده‌شده است. بار منفی در این شکل ظرفیت بازگشت انرژی تخلیه‌شده در شبکه را نشان می‌دهد. این روند به‌صورت انتقالی به ظرفیت شبکه (V۲G) طراحی می‌شود. ازآنجایی‌که باتری PHEV در دو گام زمانی با تعرفه‌ی پایین شارژ شده، و در زمان تعرفه‌ی بالا تخلیه‌شده است، ظرفیت V۲G تا حد زیادی قیمت انرژی مشتری را کاهش می‌دهد.



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

زمان‌بندی بهینه‌ی مصرف دستگاه‌های قابل‌کنترل با توجه به هزینه‌ی اعتباری موجب روند تقاضای خانوار به‌صورت شکل۸ می‌گردد. این شکل نشان می‌دهد که بار پیک ۲/۵۵ کیلووات با تعرفه‌ی TOU درروند پیشنهادی HEM هماهنگ شده است. لازم به ذکر است که اوج تقاضای برق در خانه بدون سیستم HEM می‌تواند بیشتر از بار پیک به‌دست‌آمده در مورد ۱باشد. برای مثال فرض کنید که در مورد بدون سیستم HEM در گام زمانی ۱۰۰، PHEV شارژ شده باشد، خشک‌کن کار کند، سیستم گرمایشی حداکثر انرژی مجاز را مصرف کند. خلاصه‌ی مصرف انرژی این دستگاه‌ها و تقاضای غیرقابل‌کنترل به پیک ۳/۰۵ کیلووات در گام زمانی ۱۰۰می‌رسد که ۲۰ درصد بیشتر از نمونه‌ی ۱ است.



شکل ۸. تقاضای برق خانگی در مورد ۱

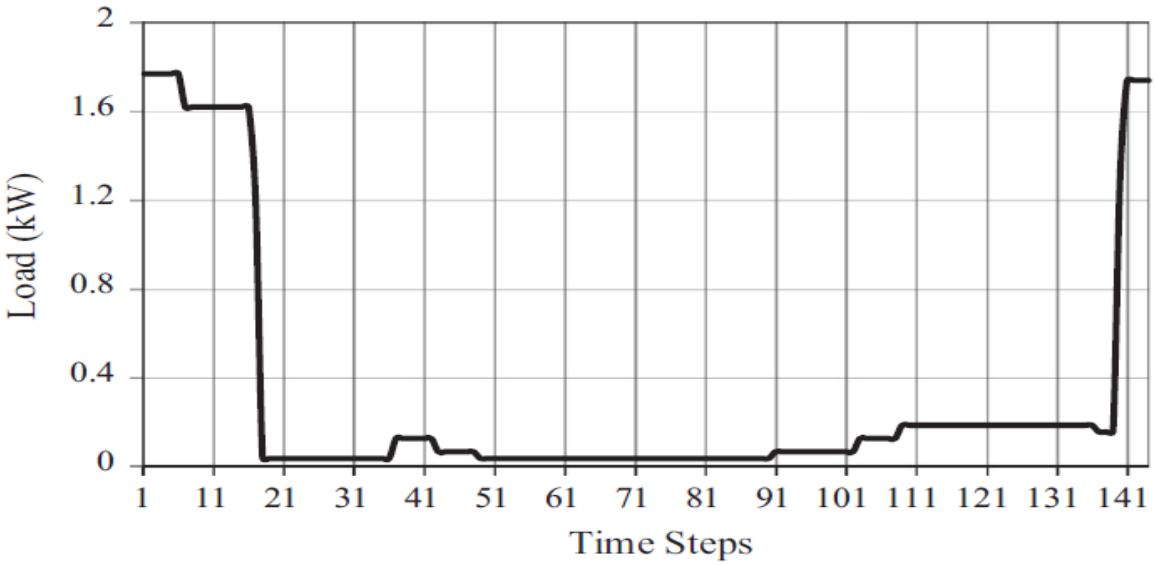
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

۷-۳- 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 α = ۹/۹ ¢/kWh، β = ۱۴/۹ ¢/kWh و δ = ۱۵ kWh هماهنگ شده است. به‌عبارت‌دیگر تعرفه‌های مصرف روزانه‌ی برق کمتر و بیشتر از ۱۵کیلووات ساعت به ترتیب۹/۹ کیلووات ساعت(¢)و ۱۴/۹ کیلووات ساعت(¢)هستند. ازاین‌رو در حالت در نظر گرفتن قیمت قابلیت اطمینان، ارزش VOLL ماشین لباسشویی و خشک‌کن لباس برابر با ۱۰کیلووات ساعت(¢) فرض شده که میان α و β است. VOLL سایر دستگاه‌ها در مقداری بیشتر از ۱۴/۹ کیلووات ساعت(¢)لحاظ می‌شوند. حل مسئله‌ی بهینه‌سازی نشان می‌دهد که قیمت انرژی مشتری به همراه و بدون در نظر گرفتن قیمت قابلیت اطمینان به ترتیب ۲۰۲/۳و ۱۷۸ است. این نتیجه مشخص می‌کند که هماهنگی اولویت دستگاه‌ها می‌تواند موجب ۱۲درصد قیمت پایین‌تر برای مشتری شود. به‌علاوه ۱۶/۳ سنت به‌عنوان قیمت قابلیت اطمینان در این مورد به مشتری اعمال می‌شود. بااین‌حال قیمت کلی ۱۹۴/۳است که کمتر از قیمتی است که قبل ازلحاظ کردن اولویت‌های دستگاه‌ها به دست آمد. بنابراین در مورد ۲، کاهش هزینه‌ی کل با هزینه‌ی قابلیت اطمینان۴درصد است که کمی بیشتر از نمونه‌ی ۱ که ۱درصد 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 ۱۸/۶۳کیلووات ساعت و۱۷/۰۱کیلووات ساعت است. گام‌های زمانی اجرایی دستگاه‌های قابل‌کنترل و تقاضای برق مجموع سیستم گرمایشی و PHEV در مورد ۲، به ترتیب در جدول ۷ و شکل ۹ ارائه‌شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده‌شده، ازآنجایی‌که ارزش VOLL ماشین لباسشویی و خشک‌کن کمتر از نسبت بالاتر IBR (B) و مصرف روزانه‌ی انرژی بیشتر از آستانه است، بهتر است که این دستگاه‌ها را در طول روز خاموش کرد. شکل۹مشخص می‌کند که PHEV در ساعات ابتدایی و انتهایی روز شارژ می‌شوند تا وضعیت شارژ از پیش تعیین‌شده را در زمان جدا کردن به دستگاه بدهند. 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 مجدداً شارژ کرد. بنابراین باتری PHEV در هیچ گام زمانی بنا بر شکل ۹ دشارژ نمی‌شود.

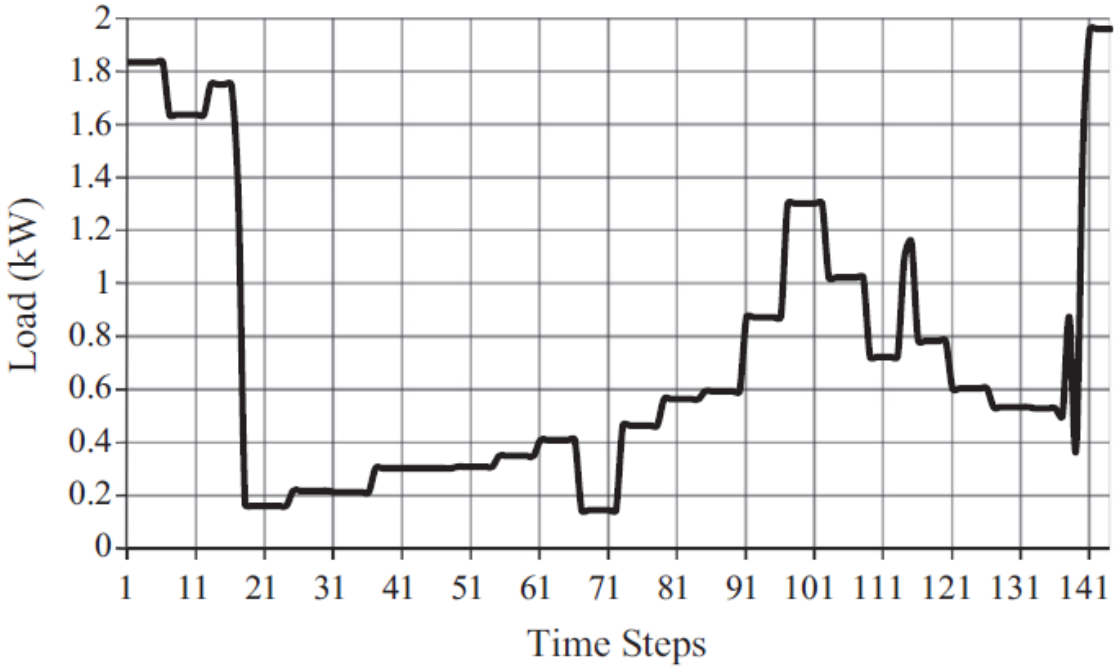
جدول ۷. بازه‌های زمانی دستگاه‌های قابل‌کنترل روشن/خاموش در مورد ۲

ردیف	دستگاه	با هزینه قابلیت اطمینان RC	بدون هزینه قابلیت اطمینان RC
۱	ماشین لباس‌شویی	-	٥٣, ٥٤, ٦٠
۲	ماشین خشک‌کن	-	١٠٢, ١٠٤, ١٠٥, ١٠٦, ١٢٦
۳	ماشین ظرف‌شویی	١١٤, ١١٥, ١٣٨	١١٤, ١١٥, ١٣٨



شکل۹. تقاضای برق مجموع سیستم گرمایش و PHEV در مورد ۲

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



شکل ۱۰. تقاضای برق خانگی در مورد ۲

تقاضا برای بار خانگی در مورد ۲به همراه قیمت قابلیت اطمینان در شکل ۱۰نشان داده‌شده است. این شکل نشان می‌دهد که اوج بار خانگی ۱/۹۵ کیلووات است. مقایسه‌ی شکل‌های ۸و۱۰ مشخص می‌کند که در شرایط در نظر گرفتن RC، تعرفه‌ی IBR بیشتر تقاضا برای برق را در طول روز در مقایسه با تعرفه‌ی TOU نشان می‌دهد. بنابراین در مورد ۲به 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 به‌منظور 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 به‌عنوان VOLL آن دستگاه تفسیر گردید. سپس قیمت قابلیت اطمینان که تابعی از VOLL دستگاه قابل‌کنترل است به تابع هدف مسئله‌ی HEM افزوده شد. این تحقیق همچنین تأثیر هماهنگی تعرفه‌های 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 تعرفه‌ی روزانه‌ی IBR در برنامه‌ی HEM با تعرفه‌ی TOU 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 بازآرایی 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 موردبررسی قرار گیرد.

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

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. ۱۳٤(C), pages ۲٤٦-۲٥۳.

[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(٤):۲۱٦٦–۷۳.

[۳] **Erick Alves, Santiago Sanchez, Danilo Brandao and Elisabetta Tedeschi** , (۲۰۱۹).'' Open AccessArticle Smart Load Management with Energy Storage for Power Quality Enhancement in Wind-Powered Oil and Gas Applications'', Energies ۲۰۱۹, ۱۲(۱٥), ۲۹۸٥.

[٤] **Gyamfi S, Krumdieck S, Urmee T**, (۲۰۱۳). "Residential peak electricity demand response highlights of some behavior". Renewable and Sustainable Energy Reviews ۲۰۱۳;۲٥:۷۱–۷.

[٥] **Zipperer A, Aloise -Young PA** , (۲۰۱۳). "Electric energy management in the smart home:Perspectives on enabling technologies and consumer behavior". Proceedingsof the IEEE ۲۰۱۳;۱۰۱(۱۱):۲۳۹۷–٤۰۸.

[٦] **Soares A, Gomes A´ , Antunes CH**, (۲۰۱٤). " Categorization of residential electricity consumption as a basis for the assessment of the impacts of demand response actions" ,Renewable and Sustainable Energy Reviews ۲۰۱٤;۳۰:٤۹۰–٥۰۳.

[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 configurationformicrogridsintegratedtothenationalgridusing back-to-back converters in a renewable power system," Electronics, vol. ۱۰, no. ۱٥, p. ۱۸۲٦, ۲۰۲۱.

[۹] **Kun-Yuan Huang,Yann-Chang Huang**, (۲۰۰٤). "Integrating direct Load Control With Interruptible Load Management to Provide Instantaneous Reserves for Ancillary Services",IEEE Trans on Power Systems,Vol.۱۹.No۳.August ۲۰۰٤.

[۱۰] **Carlo Alvarez,Antonio Gabaldon,Angel Molina**, (۲۰۰٤). "Assessment and Simulation of the Responsive Demand Potential in End-User Facilities: Application to a University Customer", IEEE TRANSACTIONS POWER SYSTEMS ,VOL.۱۹,NO.۲,۲۰۰٤.

[۱۱] **Tindemans, S. H., Bhavaraju, M., Lauby**, (۲۰۱۹). ۸٥۹-۲۰۱۸ - IEEE Standard Terms for Reporting and Analyzing Outage Occurrences and Outage States of Electrical Transmission Facilities. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/IEEESTD.۲۰۱۹,۸٦۸٦٤۰٥.

[۱۲] **Rastegar M, Fotuhi-Firuzabad M**. (۲۰۱٥). "Outage management in residential demand response programs"IEEE Trans Smart Grid ۲۰۱٥;٦(۳):۱٤٥۳–٦۲. http:// dx.doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TSG.۲۰۱٤,۲۳۳۸۷۹٤.

[۱۳] **Fernandesa F, Moraisa H, Valea Z, Ramos C,** (۲۰۱٤). " Dynamic load management in a smart home to participate in demand response events", Energy Build ۲۰۱٤;۸۲(October):٥۹۲–٦۰٦.

[۱٤] **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;٤(۳):۱۳٥۱–٦۰.

[۱٥] **Zhanga D, Shahb N, Papageorgiou LG**, (۲۰۱۳). " Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid" ,Energy Convers Manage ۲۰۱۳;۷٤(October):۲۰۹–۲۲.

[۱٦] **Yoona JH, Bladicka R, Novoselac A**, (۲۰۱٤). " Demand response for residential buildings based on dynamic price of electricity". Energy Build in press, http://dx.doi.org/ ۱۰,۱۰۱٦/j.enbuild.۲۰۱٤,۰٥,۰۰۲.

[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;۱(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(٤):۲۲۲٤–۳۱.

[۱۹] **Wang Ch, Zhou Y, Jiao B, Wang Y**, (۲۰۱٥). " Robust optimization for load scheduling of a smart home with photovoltaic system". Energy Convers Manage ۲۰۱٥;۱۰۲(September):۲٤۷–٥۷.

[۲۰] **Adika CO, Wang Lingfeng**, (۲۰۱٤). " Autonomous appliance scheduling for household energy management" . IEEE Trans Smart Grid ۲۰۱٤;٥(۲):٦۷۳–۸۲.

[۲۱] **Agnetis A, de Pascale G, Detti P, Vicino A**, (۲۰۱۳). " Load scheduling for household energy consumption optimization" . IEEE Trans Smart Grid ۲۰۱۳;٤(٤):۲۳٦٤–۷۳.

[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;٤(۲):۱۰۰۷–۱٦.

[۲۳] **Mohammed, Nooriya A., and Ammar Al-Bazi**, (۲۰۲۱) . " Management of renewable energy production and distribution planning using agent-based modelling." Renewable Energy ۱٦٤ (۲۰۲۱): ٥۰۹-٥۲۰.

[۲٤] **S. Solaymani, S**, (۲۰۲۱). " A Review on Energy and Renewable Energy Policies in Iran" Sustainability. ۲۰۲۱, ۱۳, ۷۳۲۸

[۲٥] **Yonghong. M and Baixuan Li**, (۲۰۲۰). "Hybridized Intelligent Home Renewable Energy Management System for Smart Grids", sustainability, Issue ۱۰, ۱۲, ۲۱۱۷; doi:۱۰,۳۳۹۰/su۱۲۰٥۲۱۱۷,۲۰۲۰.

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

[۲۶] **H. T. Dinh, J. Yun, D. M. Kim**, (۲۰۲۰). "A Home Energy Management System With Renewable Energy and Energy Storage Utilizing Main Grid and Electricity Selling," in IEEE Access, vol. ۸, pp. ٤٩٤٣٦-٤٩٤٥٠, ۲۰۲۰, doi: ۱۰,۱۱۰۹/ACCESS.۲۰۲۰,۲۹۷۹۱۸۹.
[۲۷] **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 ۱٤۱ (۲۰۱۷): ٤۹-٥۸.
[۲۸] **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 ۲۷۰ (۲۰۲۲): ۱۱٦۲۷٤.
[۲۹] **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 ۲٥۸ (۲۰۲۲): ۱۲٤۷٦۳.
[۳۰] **SECO,** (۲۰۱۱). The Infinite Power of Texas. Estimating PV system size and cost. SECO fact sheet, no. ۲٤; ۲۰۱۱. p. ۱–٤.

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

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

Mahmoud Zadehbagheri[۱*], Rahim Ildarabadi[۲]

[۱] Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Yasuj Branch, Yasuj , Iran

[۲]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.

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