

مدل سازی و بهینه سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخ گویی بار

محمد علیزاده^{۱*}، میثم جعفری نوکندی^۲ و یامین سلطان مرادی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۰۷ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۱	
واژگان کلیدی: مدیریت انرژی خانه هوشمند، برنامه ریزی تصادفی، پاسخ گویی بار، خودروی الکتریکی، سیستم ذخیره ساز انرژی.	در یک خانه هوشمند، کلیه اجزای داخلی آن به واسطه سیستمی یکپارچه و ایجاد منطقی سازگار با محیط در تعامل با یکدیگرند. در چنین خانه‌ای، سیستم مدیریت انرژی (EMS) می‌تواند نقش زیادی در کاهش هزینه مصرف انرژی داشته باشد لذا در این مقاله با توجه به اهمیت فزاینده این بحث، عملکرد یک خانه هوشمند در حضور خودروهای الکتریکی دارای قابلیت تبادل دوطرفه توان با شبکه قدرت، سیستم ذخیره انرژی و نیز پنل‌های خورشیدی در چارچوب یک برنامه ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح، مدل سازی و ارزیابی شده است. موارد مطالعاتی گوناگونی شامل فروش انرژی الکتریکی حاصل از توان تولیدی پنل‌های خورشیدی به شبکه قدرت، بارهای با قابلیت جابجایی زمان مصرف مانند ماشین لباسشویی و همچنین استراتژی‌های مختلف پاسخگویی تقاضا بر پایه تغییرات قیمت انرژی در نظر گرفته شده تا اثرات اقتصادی و فنی خودروهای الکتریکی، باتری ذخیره ساز انرژی و پنل‌های خورشیدی ارزیابی گردد. در ارزیابی عملکرد پنل‌های خورشیدی، عدم قطعیت مربوط به پیش بینی توان خورشیدی در نظر گرفته شده و مدل خطی آمیخته با عدد صحیح با در نظر گرفتن معیار ارزش در خطر شرطی (CVAR) تحلیل شده است. مدل پیشنهادی در برنامه GAMS پیاده سازی شده و نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های اضافی برای تأمین انرژی به طور قابل توجهی موجب کاهش هزینه برق خانه هوشمند خواهد شد.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، به دلایل متعددی از جمله محدود بودن منابع سوخت فسیلی، اثرات روزافزون گرمایش جهانی، ماهیت تصادفی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و تأثیرات سیاسی وابستگی انرژی، بهبود روش‌های بهره‌وری مصرف انرژی الکتریکی مورد توجه فراوانی قرار گرفته است [۱،۲]. نیروگاه‌های حرارتی با هزینه بالا باید در مدت اوج مصرف روزانه و فصلی وارد مدار شوند و این پیک‌های بار احتمالاً نیاز به ساخت نیروگاه‌های جدید و ارتقاء ظرفیت تجهیزات موجود را نیز موجب

می‌شوند [۳]. برای جلوگیری از ضرورت سرمایه‌گذاری‌های جدی در بحث ساخت و توسعه تجهیزات، چشم‌انداز شبکه هوشمند با مشارکت مصرف‌کنندگان در سمت تقاضا می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. بنابراین خانه‌های هوشمندی که بتوانند اقدامات لازم را برای مصرف بهینه انرژی و در نتیجه کاهش صورت حساب برق خود انجام دهند اهمیت خاصی می‌یابند. به طور کلی خانه‌های هوشمند بر روی استراتژی‌های پاسخگویی بار^۲ (DR) و تعامل بین شرکت‌های تولیدی و مصرف‌کنندگان متمرکز شده‌اند [۴،۵].

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.jafari@nit.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳. کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، موسسه علوم و فناوری آریان

^۲ Demand response

گزینه‌های دیگری برای مدیریت بهینه مصرف انرژی در خانه‌های هوشمند هستند. در [۱۷] الگوی بهینه شارژ و دشارژ و نیز ظرفیت باتری ذخیره انرژی در مدیریت انرژی خانه هوشمند دارای سیستم خورشیدی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری^۹ و برنامه‌ریزی تصادفی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح^{۱۰} (MINLP) با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی توان تولیدی خورشیدی تعیین شده است. در [۱۸] یک روش مدیریت خانه هوشمند برای خانه‌های دارای سیستم تولید انرژی خورشیدی و ذخیره‌سازی انرژی پیشنهاد شده است که با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی به پیش‌بینی انرژی مصرفی خانه پرداخته است. در [۱۹-۲۱] استراتژی عملکرد بهینه با توجه به متغیر بودن قیمت انرژی با هدف به دست آوردن کمترین هزینه روزانه، صرف‌نظر از محدودیت توان دریافتی از شبکه در دوره‌های خاص ارائه شده است. در [۲۲] الگوریتم شبکه‌های عصبی برای مدیریت انرژی یک خانه هوشمند شامل سیستم خورشیدی و سیستم ذخیره انرژی استفاده شده است. با این حال تأثیر تغییرات قیمت و استراتژی‌های پاسخ‌گویی بار مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در [۲۳] یک استراتژی مدیریت انرژی خانه هوشمند با هدف حداقل کردن هزینه مصرف انرژی مبتنی بر تغییرات قیمت انرژی و قیودی مانند الزامات رفاه مشترک^{۱۱} با قابلیت بهینه‌سازی مصالحه^{۱۲} بین رفاه مشترک و هزینه مصرف انرژی ارائه شده است.

از سوی دیگر، خودروهای الکتریکی^{۱۳} (EV) با قابلیت اتصال شبکه به خودرو^{۱۴} (G2V) و خودرو به شبکه^{۱۵} (V2G) می‌تواند به عملکرد کارآمد سیستم مدیریت انرژی در خانه هوشمند کمک زیادی کنند [۲۴]. شارژ باتری خودرو در حالت کم باری شبکه که معمولاً قیمت‌ها پایین است و سپس استفاده از این انرژی ذخیره‌شده در ساعات اوج قیمت از طریق حالت خودرو به خانه می‌تواند یک استراتژی مناسب برای اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار باشد. در این راستا، انواع مختلف سیستم‌های ذخیره انرژی نیز می‌توانند باعث کاهش اوج مصرف و شوند [۳، ۶]. در [۲۵] مدیریت مصرف انرژی یک خانه هوشمند شامل تأسیسات تولید انرژی خورشیدی و حضور خودروی الکتریکی و سیستم ذخیره انرژی انجام شده است. با این حال،

اصطلاح پاسخ‌گویی بار به معنی تغییر در مصرف انرژی الکتریکی از سوی مصرف‌کنندگان در پاسخ به تغییر قیمت برق و یا هزینه‌های تشویقی تعیین‌شده برای کاهش مصرف برق در ساعات پیک مصرف برق است [۹-۶]. به‌طور کلی هدف از پاسخ‌گویی بار، کاهش مصرف برق در ساعات پیک مصرف است که در آن‌ها قیمت خرید انرژی در بازار، بسیار بالا و یا سطح ذخیره سیستم به دلیل وقوع پیشامدهای احتمالی، پائین است. سیستم‌های مدیریت انرژی خانه^۱ (HEMS) (و زیرساخت‌های اندازه‌گیری هوشمند، نقش حیاتی در مؤثر بودن استراتژی‌های پاسخ‌گویی بار در مناطق مسکونی بازی می‌کنند.

یکی از روش‌های مؤثر در مدیریت انرژی مصرفی در خانه، برنامه‌ریزی بهینه وسایل خانگی^۲ برقی است که می‌تواند هزینه انرژی مصرفی و تقاضای ساعات پیک^۳ را کاهش دهد [۹]. برنامه‌ریزی بهینه این تجهیزات در مقالات مختلف با در نظر گرفتن اهداف متفاوتی مانند برنامه‌ریزی هم‌زمان مصرف‌کننده‌های خانگی و سیستم ذخیره انرژی^۴ (ESS) [۱۰]، برنامه‌ریزی هم‌زمان مصرف‌کننده‌های الکتریکی و گرمایی [۱۱]، در نظر گرفتن اولویت عملکرد برای وسایل برقی^۵ [۱۲]، در نظر گرفتن قیمت‌گذاری پویا^۶ برای برنامه‌ریزی دستگاه‌ها [۱۳]، برنامه‌ریزی دستگاه‌ها با قیمت‌های زمان واقعی [۱۴] و برنامه‌ریزی زمان حقیقی^۷ وسایل برقی خانگی [۱۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۳] یک استراتژی پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت پیش‌بینی‌شده^۸ برای خانه هوشمند دارای سیستم ذخیره انرژی با هدف حداقل کردن هزینه مصرف انرژی پیشنهاد شده است. در [۱۶] یک روش نوین مدیریت سمت تقاضا برای برنامه‌ریزی عملکرد وسایل برقی خانه با هدف حداقل کردن هزینه تأمین انرژی و با در نظر گرفتن قیمت‌های متغیر با زمان برای انرژی پیشنهاد شده است. با توجه به وجود عدم قطعیت در پیش‌بینی عملکرد وسایل برقی خانه و تولید منابع تجدیدپذیر خورشیدی از برنامه‌ریزی تصادفی با در نظر گرفتن متغیر تنظیم انرژی β برای مدل‌سازی عدم قطعیت در پارامترهای زمان و میزان مصرف انرژی وسایل برقی خانه استفاده شده است. سیستم‌های ذخیره انرژی و منابع تولید انرژی تجدیدپذیر،

^۸ User-expected price^۹ Meta-heuristic optimization^{۱۰} stochastic mixed integer nonlinear programming^{۱۱} user comfort^{۱۲} compromise^{۱۳} Electric vehicle^{۱۴} Grid to Vehicle^{۱۵} Vehicle to Grid^۱ Home Energy Management System^۲ household appliances^۳ peak-hours demand^۴ Energy storage system^۵ operational priority of appliances^۶ dynamic pricing^۷ real-time scheduling

خورشیدی و ذخیره‌ساز انرژی با نظر گرفتن عدم قطعیت

توان تولیدی خورشیدی

- در نظر گرفتن معیار ارزش در معرض خطر شرطی^۳ (CVAR) برای مدیریت و کاهش ریسک هزینه تأمین

انرژی خانه هوشمند

ساختار مقاله حاضر در ادامه به شرح زیر است: بخش دوم، تابع هدف و قیود به‌کاررفته برای مدل‌سازی احتمالاتی سیستم مدیریت انرژی خانه هوشمند را ارائه می‌دهد. در بخش سوم، مطالعات موردی برای ارزیابی استراتژی پاسخ‌گویی بار روزانه با در نظر گرفتن بارهای با قابلیت جابجایی زمان مصرف، خودروی الکتریکی، سیستم ذخیره‌ساز انرژی و پنل‌های خورشیدی صورت گرفته است و در آخر نتیجه‌گیری در بخش چهارم ارائه شده است.

۲- توصیف سیستم و روش

هدف از استراتژی مدیریت انرژی خانه هوشمند، به حداقل رساندن هزینه روزانه مصرف انرژی با رعایت همه قیود در نظر گرفته‌شده برای سیستم است. هزینه کل به‌صورت اختلاف بین هزینه انرژی خریداری‌شده از شبکه و درآمد حاصل از انرژی فروخته‌شده به شبکه تعریف می‌شود که در رابطه (۱) نشان داده شده است، همچنین برای محدود کردن میزان تغییرات هزینه در سناریوهای مختلف، از معیار ریسک ارزش در خطر شرطی استفاده شده است.

$$Cost = (1 - \beta) \sum_t \sum_s \rho_s \left[\frac{P_{ts}^{grid}}{\Delta T} \lambda_t^{buy} - \frac{P_{ts}^{sold}}{\Delta T} \lambda_t^{sell} \right] + \beta CVAR \quad (1)$$

که $Cost$ میزان هزینه روزانه مصرف انرژی ساختمان، ρ_s احتمال وقوع سناریوی s ام، ΔT بازه زمانی برنامه‌ریزی، $CVAR$ معیار ارزش در خطر شرطی و β ضریب وزنی برای معیار ریسک است. مقدار $CVAR$ در روابط (۲) و (۳) تعریف شده است:

$$CVAR = \eta + \frac{1}{1 - \alpha} \sum_s \rho_s \zeta_s \quad (2)$$

$$\sum_t \left[\frac{P_{ts}^{grid}}{\Delta T} \lambda_t^{buy} - \frac{P_{ts}^{sold}}{\Delta T} \lambda_t^{sell} \right] - \eta \leq \zeta(s) \quad (3)$$

که α ، η و ζ متغیرهای کمکی برای محاسبه معیار ریسک $CVAR$ هستند. تابع هدف باید نسبت به قیود زیر بهینه شود:

۲-۱- تعادل توان

در هر سیستم الکتریکی، تعادل بین توان تولیدی و مصرفی باید

عملکرد خودرو به شبکه در آن لحاظ نشده است. در [۲۶] یک برنامه‌ریزی خطی دو مرحله‌ای بر پایه الگوریتم ابتکاری برای برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی با هدف حداقل کردن تقاضای پیک با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی تقاضای شارژ و نیز زمان خروج^۱ خودرو از خانه پیشنهاد شده است ولی قابلیت پاسخگویی بار در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته است. در [۲۷] با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح^۲ (MILP) به بررسی تأثیر قیمت انرژی و استراتژی پاسخ‌گویی بار در یک خانه هوشمند دارای سیستم تولید انرژی خورشیدی، خودروی الکتریکی و سیستم ذخیره انرژی پرداخته شده است ولی در آن، عدم قطعیت پیش‌بینی توان خورشیدی در نظر گرفته نشده است.

آنچه مسلم است پیش‌بینی غیردقیق توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، منجر به مدیریت غیربهینه انرژی خانه (برنامه‌ریزی ذخیره انرژی، مدیریت شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی، میزان خرید و فروش انرژی با شبکه، برنامه‌ریزی روشن و خاموش کردن وسایل برقی خانگی و ...) خواهد شد. مدیریت و برنامه‌ریزی غیربهینه انرژی نیز منجر به افزایش هزینه برق خانه خواهد گردید که مزایای هوشمندسازی خانه را کاهش می‌دهد. لذا با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود، می‌توان به برنامه‌ریزی بهتری دست یافت. از سوی دیگر، با استفاده از معیار ریسک می‌توان تغییرات زیاد هزینه تأمین انرژی خانه در سناریوهای مختلف را نیز مدیریت کرد تا مصرف‌کننده ضمن کاهش مقدار مورد انتظار هزینه‌های خود، با تغییرات زیاد هزینه نیز مواجه نشود.

با توجه اینکه هیچ‌یک از مقالات مرور شده، به‌طور جامع، مدل خطی مقید به ریسک هزینه تأمین انرژی را برای مدیریت انرژی خانه هوشمند با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی، برنامه پاسخگویی بار، منبع تجدیدپذیر خورشیدی و سیستم ذخیره انرژی با وجود عدم قطعیت در پیش‌بینی توان تولیدی خورشیدی ارائه نداده است، هدف این مقاله، ارائه مدلی برای در نظر گرفتن موارد فوق بوده است. با توجه به مطالب بیان شده، نوآوری مقاله حاضر به شرح زیر است:

- ارائه یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی خطی آمیخته با عدد صحیح برای حداقل کردن هزینه انرژی مصرفی خانه هوشمند در حضور برنامه پاسخگویی بار، خودروهای الکتریکی دارای قابلیت $G2V$ و $V2G$ ، منبع تجدیدپذیر

^۱ departure time

^۲ Mixed-integer linear programming

^۳ Conditional value at risk

الکتریکی تا حدود زیادی مشابه سیستم ذخیره‌ساز انرژی است با این تفاوت که خودروی الکتریکی در زمان‌های محدود و مشخصی در پارکینگ خانه قرار دارد در صورتی که باتری ذخیره‌ساز به‌طور دائمی در برنامه مدیریت انرژی خانه شرکت می‌کند. همچنین در این مقاله فرض شده که با توجه به اینکه صاحب‌خانه، مالک خودرو نیز است و برنامه بهینه‌سازی برای ۲۴ ساعت آینده حل شده است لذا مالک خودرو از برنامه استفاده روزانه از خودرو در ۲۴ ساعت آینده نسبتاً دقیقی دارد و لذا عدم قطعیت در پیش‌بینی زمان‌های حضور خودرو در پارکینگ خانه در نظر گرفته نشده است. در ادامه قیود مربوط به مدل‌سازی خودروی الکتریکی توصیف می‌شوند [۲۷، ۲۹].

$$P_{ts}^{EV, ch} \leq CR^{EV} u_t^{EV} Z_t^{EV} \quad \forall t, s \quad (10)$$

$$P_{ts}^{EV, dis} \leq DR^{EV} (1 - u_t^{EV}) Z_t^{EV} \quad \forall t, s \quad (11)$$

$$SOE_{ts}^{EV} = SOE_{t-1s}^{EV} + CE^{EV} \frac{P_{ts}^{EV, ch}}{\Delta T} - \frac{P_{ts}^{EV, dis}}{\Delta T} \quad \forall t \neq t_{ent}, s \quad (12)$$

$$SOE_{t_{em}s}^{EV} = SOE^{EV, ini} \quad \forall s \quad (13)$$

$$Z_t^{EV} SOE^{EV, min} \leq SOE_{ts}^{EV} \leq Z_t^{EV} SOE^{EV, max} \quad \forall t, s \quad (14)$$

$$SOE_{t_{dep}s}^{EV} \geq M SOE^{EV, max} \quad \forall s \quad (15)$$

در روابط (۱۰) و (۱۱) میزان توان شارژ و دشارژ باتری خودرو در ساعاتی که خودرو در پارکینگ خانه قرار دارد محدود می‌شود. در رابطه (۱۲) سطح شارژ باتری خودرو در ساعاتی که خودرو در پارکینگ حضور دارد محاسبه شده است. با توجه به رابطه (۱۳) زمانی که خودرو وارد پارکینگ خانه می‌شود دارای سطح انرژی مشخصی خواهد بود. قید (۱۴) حداقل و حداکثر سطح مجاز انرژی باتری خودرو را مشخص می‌کند. قید (۱۵) به‌عنوان گزینه‌ای برای صاحب‌خانه جهت تعیین مقدار دلخواه سطح شارژ خودرو در هنگام خروج از خانه در نظر گرفته شده است.

۲-۴-مدل پنل خورشیدی

توان تولیدشده توسط پنل خورشیدی می‌تواند صرف تأمین نیازهای داخلی ساختمان شده و در صورت وجود توان مازاد، به شبکه بالادست فروخته شود [۲۷]:

$$P_{ts}^{PV} = P_{ts}^{PV, used} + P_{ts}^{PV, sold} \quad \forall t, s \quad (16)$$

$$P_{ts}^{sold} = P_{ts}^{pv, sold} \quad \forall t, s \quad (17)$$

برقرار باشد که رابطه آن به‌صورت زیر تعریف شده است [۲۷]:

$$P_{ts}^{grid} + P_{ts}^{PV, used} + P_{ts}^{EV, dis} + P_{ts}^{ESS, dis} = P_{ts}^{EV, ch} + P_{ts}^{ESS, ch} + P_t^{other} + \sum_m P_{mts}^{sh} \quad \forall t, s \quad (4)$$

در بخش توان‌های تولیدی، توان خریداری‌شده از شبکه، توان خورشیدی، توان دشارژ خودرو و توان ذخیره‌ساز انرژی وجود دارند. در بخش توان مصرفی نیز، تقاضای بارهای ثابت، توان شارژ خودرو، میزان شارژ سیستم ذخیره‌ساز و توان مصرف‌شده توسط بارهای قابل جابجایی وجود دارند. به‌ازای تمام بازه‌های زمانی و سناریوها، این قید باید برقرار باشد.

۲-۲-مدل‌سازی سیستم ذخیره‌ساز انرژی

ذخیره‌ساز انرژی یا همان باتری، محدودیت‌هایی به لحاظ فنی دارد. میزان انرژی ذخیره‌شده در آن و توان شارژ و یا دشارژ آن توسط روابط زیر به هم مربوط و مقید هستند [۲۷، ۲۸].

$$P_{ts}^{ESS, ch} \leq CR^{ESS} u_t^{ESS} \quad \forall t, s \quad (5)$$

$$P_{ts}^{ESS, dis} \leq DR^{ESS} (1 - u_t^{ESS}) \quad \forall t, s \quad (6)$$

$$SOE_{ts}^{ESS} = SOE_{t-1s}^{ESS} + CE^{ESS} \frac{P_{ts}^{ESS, ch}}{\Delta T} - \frac{P_{ts}^{ESS, dis}}{\Delta T} \quad \forall t \geq 1, s \quad (7)$$

$$SOE_{1s}^{ESS} = SOE^{ESS, ini} \quad \forall s \quad (8)$$

$$SOE^{ESS, min} \leq SOE_{ts}^{ESS} \leq SOE^{ESS, max} \quad \forall t, s \quad (9)$$

روابط (۵) و (۶) توان شارژ و دشارژ باتری را محدود می‌کنند. در هر لحظه از زمان باتری می‌تواند یکی از حالت‌های شارژ و دشارژ را داشته باشد که این شرط توسط متغیر باینری u_t^{ESS} مشخص شده است. روابط (۷) تا (۹)، قیود مربوط به سطح انرژی ذخیره‌شده در باتری هستند. با توجه به رابطه (۷) سطح انرژی باتری در هر دوره زمانی برابر با مقدار انرژی ذخیره‌شده در بازه قبلی به‌علاوه میزان انرژی واردشده به آن از طریق شارژ و یا انرژی خارج‌شده از طریق دشارژ خواهد بود. رابطه (۸) سطح انرژی اولیه ذخیره‌ساز در ابتدای بازه برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. بر اساس رابطه (۹) نیز سطح انرژی ذخیره‌شده در باتری در هر زمان از دوره برنامه‌ریزی باید محدود به مقادیر حداقل و حداکثر ظرفیت باتری باشد.

۲-۳-مدل‌سازی خودروی الکتریکی

خودروهای الکتریکی نیز از یک باتری با ظرفیت نسبتاً قابل توجه بهره می‌برند بنابراین در این مقاله، مدل الکتریکی خودرو همانند مدل باتری در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی ریاضی خودروی

بار در طول شبانه‌روز روشن می‌شود که این شرط توسط قیده‌های (۲۱) و (۲۲) تعریف شده است. رابطه (۲۳) نیز بیان می‌دارد که هر کدام از بارهای قابل جابجایی، به محض روشن شدن باید تا پایان دوره کاری روشن بمانند. این قید، شبیه قید حداقل زمان روشن بودن در مسئله مشارکت واحدهای نیروگاهی حرارتی است.

به منظور پیش‌بینی توان خورشیدی از تابع چگالی احتمال Beta استفاده شده است [۳۰، ۳۱]:

$$PDF(x) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} & 0 \leq x \leq 1, 0 \leq \alpha, 0 \leq \beta \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (24)$$

$$\beta = (1-\mu) \left(\frac{\mu(1+\mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (25)$$

$$\alpha = \frac{\mu \cdot \beta}{1-\mu} \quad (26)$$

که α و β پارامترهای تابع Beta، μ مقدار متوسط و σ انحراف استاندارد توان خورشیدی هستند.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به بارهای خانگی

تجهیز	توان نامی (وات)	دوره کاری (ساعت)
بارهای قابل جابجایی زمان استفاده		
ماشین لباسشویی	۱۴۰۰	۱
ماشین ظرفشویی	۱۳۲۰	۰/۵
بارهای غیر قابل جابجایی زمان استفاده		
یخچال	۱۲۰۰	۲۴
سشوار	۱۸۰۰	۰/۵
تلفن	۵	۲۴
تلویزیون	۸۳	۶/۵
کامپیوتر	۱۵۰	۲/۱۵
کولر	۱۱۴۰	۷/۱۵
روشنایی	۱۰۰	۶/۱۵
اجاق گاز	۲۴۰۰	۰/۵
هود آشپزی	۲۲۵	۰/۵
اتو	۲۴۰۰	۰/۵
کتری	۲۰۰۰	۰/۵

۳-آزمون و نتایج

برای ارزیابی تأثیر کلی تجهیزات مختلف خانه هوشمند بر صورت حساب هزینه برق مصرف‌کننده، مدل MIP معرفی شده برای مدیریت انرژی خانه در نرم‌افزار GAMS با استفاده از CPLEX تست شده است و نتایج به دست آمده در این بخش

مطابق رابطه (۱۶)، توان خورشیدی می‌تواند هم صرف تأمین انرژی مصارف داخلی خانه شود و هم به شبکه فروخته شود. در این مقاله، مقدار مازاد بر مصرف توان تولیدشده توسط پنل‌های خورشیدی، قابل فروختن به شبکه بالادست است که این قید در رابطه (۱۷) بیان شده است.

۲-۵-تبادل توان با شبکه بالادست

ساختمان هوشمند، از طریق یک فیدر با محدودیت‌های حرارتی به شبکه بالادست متصل است بنابراین توان خریداری شده و فروخته شده به شبکه بالادست نباید از حد حرارتی فیدر و یا مقدار قیدشده در قرارداد دوطرفه تجاوز کند [۲۷].

$$P_{ts}^{grid} \leq N_1 u_t^{grid} \quad \forall t, s \quad (18)$$

$$P_{ts}^{sold} \leq N_2 (1 - u_t^{grid}) \quad \forall t, s \quad (19)$$

قیود (۱۸) و (۱۹) نشان می‌دهند که اگر ساختمان در حال دریافت توان از شبکه بالادست است، میزان توان فروخته شده باید صفر باشد. به طور مشابه، اگر در حال فروختن توان باشد، میزان توان واردشده از شبکه باید صفر باشد. مقادیر پارامترهای N_2 و N_1 ، توسط چارچوب‌های مشخص شده بین تأمین‌کننده انرژی ساختمان و مالک آن تعیین می‌شود.

۲-۶-مدل بارهای دارای قابلیت جابجایی زمان فعالیت

در بحث مدیریت مصرف انرژی در یک خانه هوشمند می‌توان وسایل برقی موجود را از نظر امکان تغییر زمان استفاده به دو دسته وسایل قابل جابجایی و غیرقابل جابجایی تقسیم کرد. تقاضای انرژی وسایل قابل جابجایی می‌تواند از ساعت پیک به ساعات غیر پیک انتقال یابد.

بارهای قابل جابجایی از قبیل ماشین لباسشویی و ماشین ظرفشویی، معمولاً یک بار در طول روز مورد استفاده قرار می‌گیرند. این بارها از نوع انرژی ثابت هستند، یعنی با وارد شدن آن‌ها به مدار تا پایان دوره کاری باید در مدار بمانند؛ بنابراین می‌توان آن‌ها را با استفاده از روابط زیر مدل‌سازی نمود:

$$P_{ms}^{sh} = P_m^{sh, rated} u_{mt}^{sh} \quad \forall t, s, m \quad (20)$$

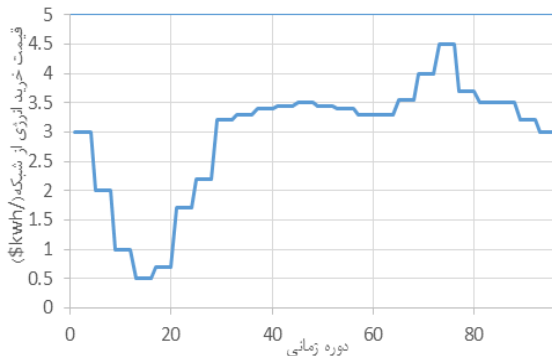
$$u_{mt}^{sh} - u_{mt-1}^{sh} \leq v_{mt}^{sh} \quad \forall m, t \quad (21)$$

$$\sum_t v_{mt}^{sh} = 1 \quad \forall m \quad (22)$$

$$\sum_{i=t+k_m-1}^{i=t} u_{mi}^{sh} \geq k_m v_{mt}^{sh} \quad \forall m, t \quad (23)$$

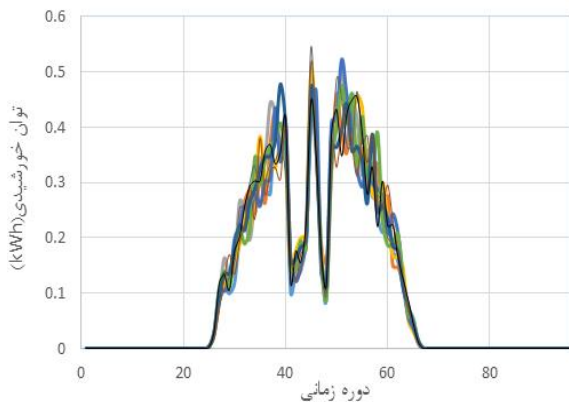
رابطه (۲۰) تصریح می‌کند که توان مصرفی بار قابل جابجایی در هر بازه، باید با مقدار نامی آن برابر باشد. هر وسیله فقط یک

تا حد ماکزیمم شارژ شود تا خودرو برای شروع سفر، مهیا باشد. قیمت خرید برق از شبکه بالادست، توسط شرکت توزیع مشخص می شود. این قیمت می تواند به صورت تعرفه های مختلف در بلوک های زمانی تعریف شود. در این مقاله، قیمت خرید انرژی به صورت ساعتی مطابق شکل (۲) در نظر گرفته شده است. در این مقاله مدت هر دوره زمانی برابر ۱۵ دقیقه و برنامه ریزی برای یک شبانه روز (۹۶ دوره زمانی) انجام شده است.



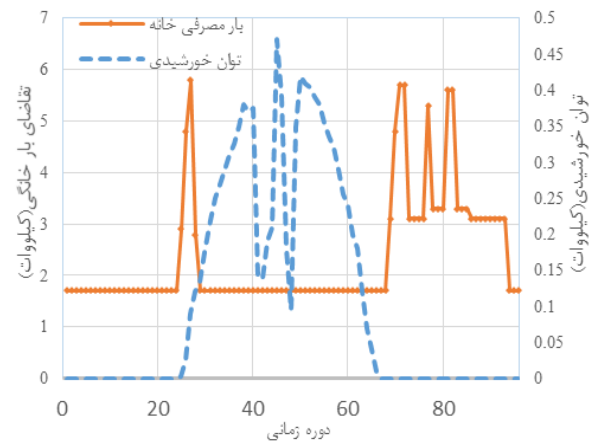
شکل ۲: قیمت خرید انرژی از شبکه [۲۷]

قیمت فروش انرژی برای حالتی که توان به شبکه تزریق می شود به صورت ثابت برابر ۴ سنت برای هر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است. به منظور پیش بینی توان خورشیدی تعداد ۱۰۰ سناریو ساخته شد که برای افزایش سرعت و کاهش زمان محاسبات با استفاده از نظریه فاصله احتمالاتی^۱ به تعداد ۱۰ سناریو کاهش یافت [۳۳]. سناریوهای مربوط به پیش بینی توان خورشیدی و احتمال وقوع هر کدام به ترتیب در شکل (۳) و جدول ۳ نشان داده شده است. برای تولید سناریوهای مربوط به توان خورشیدی، مقدار انحراف استاندارد برابر ۲۰ درصد مقدار پیش بینی شده در هر ساعت در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: سناریوهای مربوط به پیش بینی توان خورشیدی
جدول ۳: احتمال مربوط به هر سناریو توان خورشیدی

مورد بحث قرار گرفته اند. جهت افزایش دقت مدل برنامه ریزی، هر ساعت به چهار بازه زمانی ۱۵ دقیقه ای تقسیم شده است. داده های مربوط به دستگاه های قابل جابه جایی و نیز غیر قابل جابه جایی زمان مصرف در جدول ۱ نشان داده شده است. البته می توان به منظور مدل سازی واقعی تر از فضای انرژی خانه، از اطلاعات تجهیزات برقی بیشتری نیز استفاده کرد [۳۲].
منحنی تقاضای ساعتی وسایل برقی خانه بدون قابلیت جابه جایی زمان استفاده و منحنی توان خورشیدی تولیدی توسط یک پنل ۵۰۰ وات نصب شده روی سقف خانه در شکل (۱) داده شده است [۲۶].



شکل ۱: تقاضای بار و توان تولید خورشیدی [۲۷]

پارامترهای فنی و رفتاری خودروی الکتریکی و ذخیره ساز انرژی در جدول ۲ قابل مشاهده است.

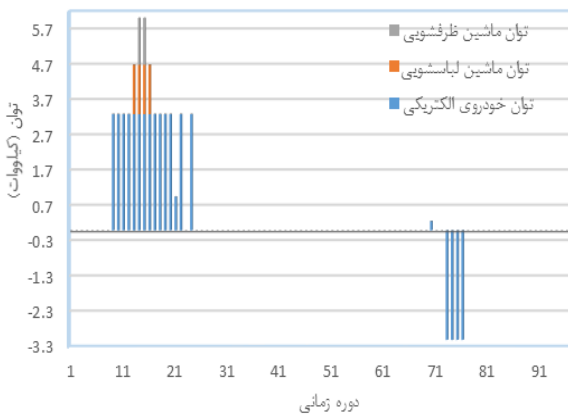
جدول ۲: مشخصات باتری خودروی الکتریکی و ذخیره ساز انرژی [۲۷]

واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر
kWh	۸	$SOE^{EV,ini}$		٪۹۵	CE^{EV}
kWh	۱۶	$SOE^{EV,max}$		٪۹۵	DE^{EV}
kWh	۴/۸	$SOE^{EV,min}$	kWh	۳/۳	CR^{EV}
			kWh	۳/۳	DR^{EV}
kWh	۱/۵	$SOE^{ESS,ini}$		٪۹۵	CE^{ESS}
kWh	۳	$SOE^{ESS,max}$		٪۹۵	DE^{ESS}
kWh	۰/۷۵	$SOE^{ESS,min}$	kWh	۰/۶	CR^{ESS}
			kWh	۰/۶	DR^{ESS}

در خصوص حضور خودروی الکتریکی در پارکینگ خانه، فرض شده است که خودرو در ساعت ۷ صبح از پارکینگ خارج شده و مجدداً در ساعت ۶ عصر به پارکینگ برمی گردد. همچنین، در هنگام خروج خودروی الکتریکی از پارکینگ، باتری خودرو باید

^۱ Probability distance

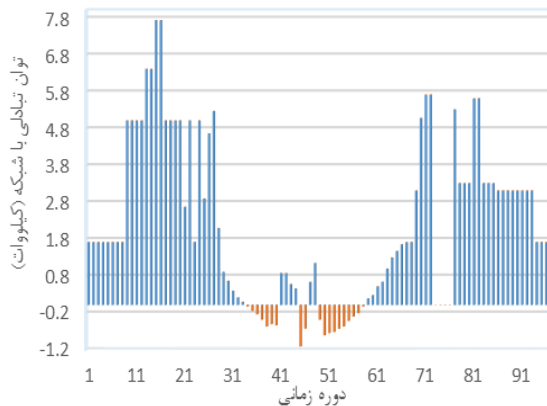
جابجایی زمان استفاده در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: توان خودروی الکتریکی و بارهای با قابلیت جابجایی زمان فعالیت در حالت اول

با توجه به شکل (۴) اختلافی که بین مقدار توان مصرفی دستگاه‌های دارای زمان فعالیت مشخص و توان دریافتی از شبکه وجود دارد ناشی از حضور خودروی الکتریکی و بارهای با قابلیت جابجایی زمان فعالیت است. در زمانی که قیمت خرید انرژی در کمترین مقدار خود قرار دارد خودرو الکتریکی تا حداکثر ظرفیت خود شارژ شده و ماشین‌های لباسشویی و ظرفشویی نیز روشن خواهند شد. همچنین در زمانی که قیمت در بالاترین مقدار خود قرار دارد خودرو تا کمترین مقدار خود دشارژ شده و انرژی خود را به خانه تحویل می‌دهد. در شکل (۵)، مقادیر مثبت توان خودروی الکتریکی مربوط به حالت شارژ و مقادیر منفی مربوط به دشارژ خودرو است. هزینه تأمین انرژی در حالت اول برابر ۱۶۹/۴۴ سنت شده است. مدل MILP پیشنهادی در کمتر از ۰/۲ ثانیه به جواب بهینه رسیده است.

در حالت دوم که سیستم فتوولتائیک به ظرفیت ۳ کیلووات ساعت روی سقف خانه نصب شده تغییرات توان تبدیلی با شبکه در شکل (۶) نشان داده شده است:



شکل ۶: توان تبدیلی با شبکه در حالت دوم

در شکل (۶) مقادیر مثبت توان تبدیلی به معنی دریافت توان از

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵
احتمال	۰/۱	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۰۷
سناریو	۶	۷	۸	۹	۱۰
احتمال	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۰۴	۰/۱۸	۰/۰۹

۳-۱- حالت‌های مختلف بهره‌برداری از خانه هوشمند

جهت ارزیابی تأثیر اقتصادی استفاده از تجهیزات موجود در ساختمان هوشمند، چهار حالت مختلف در نظر گرفته شده است. فرض می‌شود که در هر چهار حالت، استراتژی پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت در نظر گرفته شده و خودروی الکتریکی نیز از ساعت ۶ عصر هر روز الی ۷ صبح روز بعد در پارکینگ قرار دارد.

حالت اول: سیستم‌های فتوولتائیک و ذخیره‌ساز انرژی استفاده نشده است.

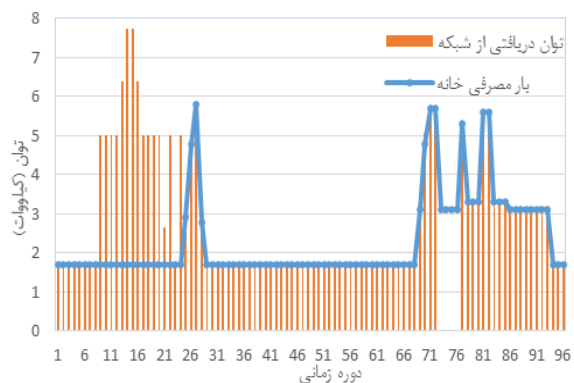
حالت دوم: از یک سیستم فتوولتائیک به ظرفیت توان تولیدی ۵۰۰ وات استفاده شده که می‌تواند انرژی تولیدی را هم به شبکه بالادست فروخته و هم برای مصارف داخلی خانه مورد استفاده قرار دهد.

حالت سوم: علاوه بر خودروی الکتریکی و سیستم فتوولتائیک، یک ذخیره‌ساز انرژی به ظرفیت ۳ کیلووات ساعت اضافه شده است.

حالت چهارم: با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای پیش‌بینی توان خورشیدی، مسئله برنامه‌ریزی خانه هوشمند با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی انجام شده است. در این حالت با در نظر گرفتن معیار ریسک CVAR، مقدار پارامترهای α و β به ترتیب برابر ۰/۸ و ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

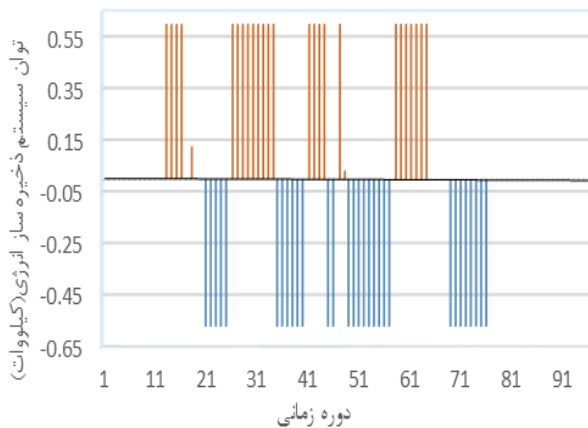
۳-۲- نتایج مدل پیشنهادی برای مدیریت خانه هوشمند

در حالت اول که فقط عملکرد پاسخگویی بار و حضور خودروی الکتریکی در سیستم مدیریت انرژی خانه هوشمند در نظر گرفته شده، توان تبدیلی با شبکه در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴: توان تبدیلی با شبکه در حالت اول

عملکرد شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی و بارهای دارای قابلیت



شکل ۸: توان سیستم ذخیره ساز انرژی در حالت سوم

در حالت چهارم که توان تولیدی سیستم فتوولتائیک همراه با عدم قطعیت مدل شده است هزینه تأمین انرژی در هر سناریو در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: هزینه تأمین انرژی در هر سناریو در حالت چهارم

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵
هزینه	۱۱۳/۲۵۴	۱۱۱/۷	۱۱۰/۷۰۴	۱۱۰/۵۳۵	۱۱۱/۳۶۲
سناریو	۶	۷	۸	۹	۱۰
هزینه	۱۱۱/۲۴۱	۱۱۱/۲۵۶	۱۱۲/۵۰۹	۱۱۱/۶۷۴	۱۱۰/۶۱۹

در این حالت، مقدار پارامتر η برابر ۱۱۱/۷ سنت و CVAR برابر ۱۱۲/۶۳۹ سنت به دست آمده است. هزینه مورد انتظار مصرف انرژی در این حالت برابر ۱۱۱/۴۳۹ سنت به دست آمده است. همچنین زمان استفاده دستگاه‌هایی مانند ماشین لباسشویی و ظرف شویی که قابلیت جابجایی زمان روشن شدن را دارند و مستقل از تحقق سناریوها تعریف شده‌اند مشابه زمان حالت‌های اول الی سوم به دست آمده است. در برنامه ریزی تصادفی و با در نظر گرفتن تعداد ۱۰ سناریو برای پیش‌بینی توان تولیدی خورشیدی در ۲۴ ساعت آینده، پردازش مدل MILP پیشنهادی در حدود ۱/۵ ثانیه طول کشیده است. هزینه تأمین انرژی در چهار حالت مورد ارزیابی در جدول ۵ مقایسه شده است.

جدول ۵: هزینه تأمین انرژی در چهار حالت مورد بررسی

حالت	۱	۲	۳	۴
هزینه تأمین انرژی	۱۶۹/۴۴	۱۱۶/۴۷	۱۱۱/۲۳۴	۱۱۲/۶۳۹
درصد کاهش هزینه نسبت به حالت اول	-	٪۳۱	۳۴٪	۳۳/۵٪

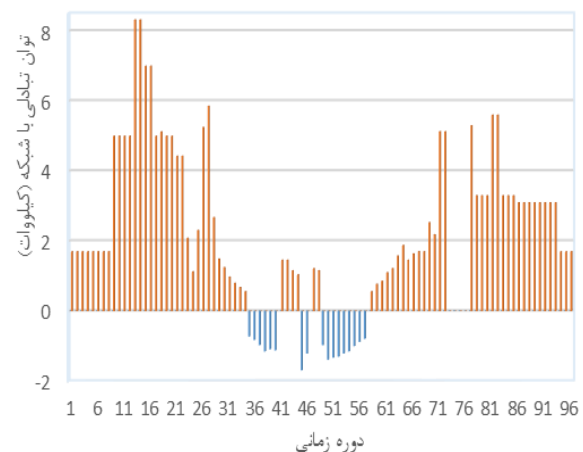
۳-۳- تحلیل حساسیت

در این بخش حساسیت هزینه تأمین انرژی به تغییر برخی از پارامترهای سیستم‌های مورد استفاده سنجیده خواهد شد. در

شبکه و مقادیر منفی به معنی فروش توان به شبکه است. توانی که به شبکه فروخته می‌شود مازاد توان تولیدی سیستم فتوولتائیک است. در زمان دسترس پذیری انرژی از سیستم فتوولتائیک، همه توان مصرفی خانه از این انرژی تأمین می‌شود و هیچ توانی از شبکه دریافت نمی‌شود.

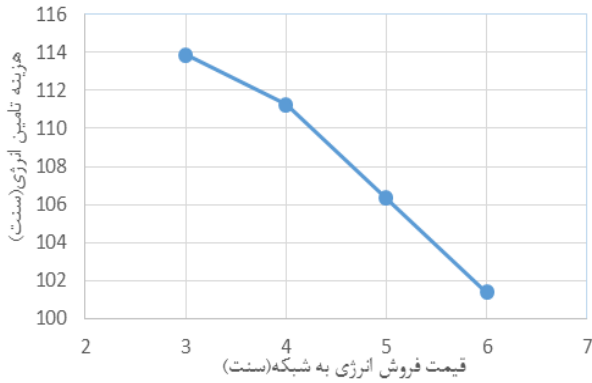
در این حالت، عملکرد شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی و بارهای دارای قابلیت جابجایی زمان فعالیت وضعیت مشابه حالت اول دارند. خودروی الکتریکی در ساعاتی که قیمت انرژی در پایین ترین سطح خود قرار دارد تا حد ماکزیمم، شارژ می‌شود و در ساعاتی که قیمت انرژی بالا است برای مصرف داخلی و تا حد ممکن، دشارژ می‌شود. هزینه تأمین انرژی در حالت دوم برابر ۱۱۶/۴۷ سنت شده است که به دلیل استفاده از سیستم فتوولتائیک نسبت به حالت اول ٪۳۱ کاهش یافته است. پردازش مدل MILP پیشنهادی در این حالت در حدود ۰/۳۷ ثانیه طول کشیده است.

نتایج مربوط به حالت سوم که علاوه بر حضور خودروی الکتریکی و سیستم فتوولتائیک، یک ذخیره ساز انرژی به ظرفیت ۳ کیلووات ساعت نیز مورد استفاده گرفته است در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. توان تبدالی با شبکه در شکل (۷) و عملکرد شارژ و دشارژ ذخیره ساز انرژی در شکل (۸) نشان داده شده است. در شکل (۸) مقادیر مثبت توان ذخیره ساز انرژی مربوط به حالت شارژ و مقادیر منفی مربوط به حالت دشارژ است.

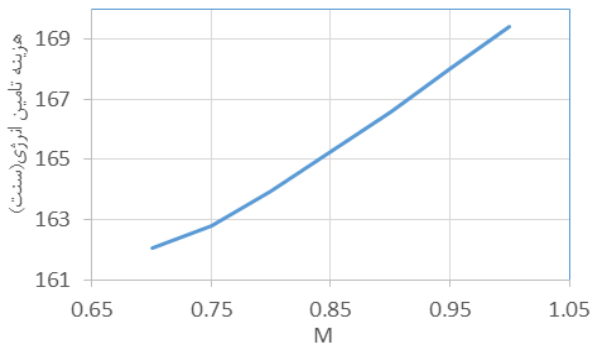


شکل ۷: توان تبدالی با شبکه در حالت سوم

نتایج مربوط به حالت شارژ و دشارژ خودروی الکتریکی و نیز دستگاه‌های قابل جابجایی مشابه حالت اول و دوم است. هزینه تأمین انرژی در حالت سوم برابر ۱۱۱/۲۳۴ سنت شده که نسبت به حالت اول ٪۳۴ کاهش یافته است. مدل MILP پیشنهادی در حدود ۰/۴۷ ثانیه به جواب بهینه رسیده است.



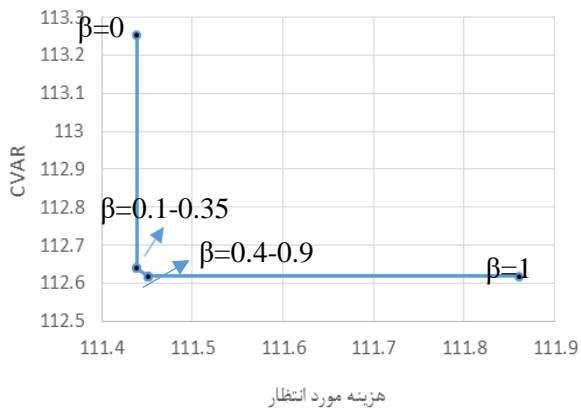
شکل ۱۱: حساسیت هزینه تأمین انرژی به تغییر قیمت فروش انرژی به شبکه



شکل ۱۲: حساسیت هزینه تأمین انرژی به سطح شارژ باتری خودروی الکتریکی در هنگام خروج از پارکینگ

با توجه به شکل (۱۲) هر چه سطح شارژ باتری خودروی الکتریکی در هنگام خروج از خانه افزایش یابد هزینه تأمین انرژی نیز افزایش خواهد یافت.

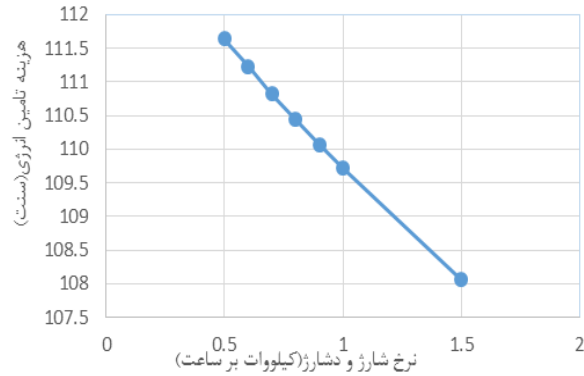
حساسیت هزینه مورد انتظار تأمین انرژی و معیار ریسک CVAR نسبت به تغییر پارامتر β برای حالت چهارم که عدم قطعیت در پیش‌بینی توان خورشیدی در نظر گرفته شده در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۳: حساسیت تغییرات هزینه مورد انتظار تأمین انرژی و CVAR با تغییرات β

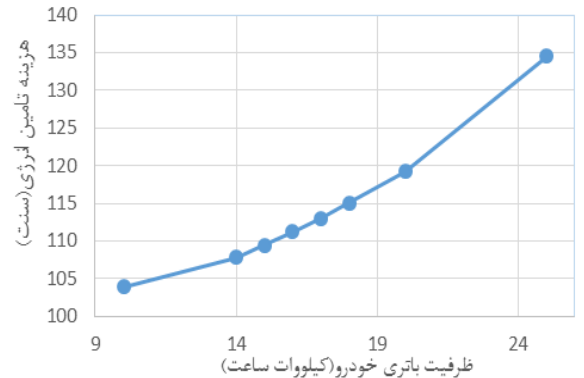
با توجه به شکل (۱۳)، هزینه مورد انتظار تأمین انرژی و معیار

شکل (۹)، حساسیت هزینه تأمین انرژی به نرخ شارژ و دشارژ سیستم فتوولتائیک نشان داده شده است.



شکل ۹: حساسیت هزینه تأمین انرژی به نرخ شارژ و دشارژ سیستم فتوولتائیک

با توجه به شکل (۹) مشخص است که با افزایش نرخ شارژ و دشارژ سیستم فتوولتائیک، هزینه تأمین انرژی کاهش خواهد یافت. در شکل (۱۰)، حساسیت هزینه تأمین انرژی به ظرفیت باتری خودروی الکتریکی نشان داده شده است.



شکل ۱۰: حساسیت هزینه تأمین انرژی به ظرفیت باتری خودرو

با توجه به شکل (۱۰) مشخص است که با افزایش ظرفیت باتری خودرو هزینه تأمین انرژی افزایش خواهد یافت چون فرض شده است که خودرو با سطح شارژ ۸ کیلووات ساعت وارد پارکینگ و با ظرفیت شارژ کامل از پارکینگ خارج شود. لذا افزایش ظرفیت شارژ باتری خودرو موجب افزایش توان دریافتی از شبکه و در نتیجه افزایش هزینه تأمین انرژی خواهد شد.

در شکل (۱۱)، حساسیت هزینه تأمین انرژی نسبت به قیمت فروش انرژی به شبکه نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۱۱)، هر چه قیمت فروش انرژی به شبکه افزایش یابد هزینه تأمین انرژی خانه نیز کاهش خواهد یافت.

در شکل (۱۲)، حساسیت هزینه تأمین انرژی خانه در حالت دوم به سطح شارژ باتری خودروی الکتریکی در هنگام خروج از پارکینگ نشان داده شده است.

CR^{ESS}	نرخ شارژ ذخیره‌ساز
CR^{EV}	نرخ شارژ خودرو
DE^{ESS}	بازده دشارژ ذخیره‌ساز
DE^{EV}	بازده دشارژ خودرو
DR^{ESS}	نرخ دشارژ ذخیره‌ساز
DR^{EV}	نرخ دشارژ خودرو
N_1	حد بالای توان ورودی از شبکه
N_2	حد بالای توان داده‌شده به شبکه
P_t^{other}	توان مصرفی بارهای غیرقابل جابجایی در زمان t
$P_t^{PV, pm}$	انرژی خورشیدی تولیدشده در زمان t
$SOE^{ESS, ini}$	انرژی اولیه ذخیره‌ساز
$SOE^{ESS, max}$	حداکثر انرژی ذخیره‌ساز
$SOE^{ESS, min}$	حداقل انرژی ذخیره‌ساز
$SOE^{EV, ini}$	انرژی اولیه خودرو
$SOE^{EV, max}$	حداکثر انرژی خودرو
$SOE^{EV, min}$	حداقل انرژی خودرو
ΔT	بازه زمانی برنامه‌ریزی
λ_t^{buy}	قیمت خرید برق از شبکه در زمان t
λ_t^{sell}	قیمت فروش برق به شبکه در زمان t
متغیرها	
$P_{ts}^{ESS, ch}$	توان شارژ باتری در زمان t و سناریوی s
$P_{ts}^{ESS, dis}$	توان دشارژ باتری در زمان t و سناریوی s
P_{ts}^{ESS}	توان باتری در زمان t و سناریوی s
$P_{ts}^{EV, ch}$	توان شارژ خودرو در زمان t و سناریوی s
$P_{ts}^{EV, dis}$	توان دشارژ خودرو در زمان t و سناریوی s
P_{ts}^{grid}	توان دریافتی از شبکه در زمان t و سناریوی s
P_{ts}^{PV}	توان خورشیدی تولیدشده توسط پنل‌های خورشیدی در زمان t و سناریوی s
$P_{ts}^{PV, used}$	توان خورشیدی استفاده‌شده جهت مصرف داخلی خانه در زمان t و سناریوی s
P_{ts}^{sold}	توان فروخته‌شده به شبکه در زمان t و سناریوی s
P_{ms}^{sh}	توان بار قابل جابجایی lm در زمان t و سناریوی s
$P_m^{sh, rated}$	توان نامی بار قابل جابجایی lm
k_m	زمان عملکرد بار قابل جابجایی lm
SOE_{ts}^{ESS}	سطح انرژی ذخیره‌ساز در زمان t و سناریوی s
SOE_{ts}^{EV}	سطح انرژی باتری خودرو در زمان t و سناریوی s
N_1	حداکثر توان مجاز دریافتی از شبکه
N_2	حداکثر توان مجاز فروخته‌شده به شبکه
M	نسبت سطح شارژ خودرو در هنگام خروج از خانه
u_t^{ESS}	متغیر باینری که یک بودن آن به معنی شارژ شدن سیستم ذخیره‌ساز انرژی در زمان t است.
u_t^{EV}	متغیر باینری که یک بودن آن به معنی شارژ شدن باتری خودرو در زمان t است.
Z_t^{EV}	عدد باینری که یک بودن آن به معنی حضور خودروی

ریسک CVAR، حساسیت کمی به تغییر پارامتر β دارند. در این مقاله، فقط توان خورشیدی به‌عنوان یک متغیر تصادفی با عدم قطعیت مدل شده است که با توجه به ظرفیت پنل‌های خورشیدی، سهم اندکی در تأمین انرژی خانه هوشمند دارد. همچنین گزینه‌های اندکی برای تصمیم‌گیری در خصوص کاهش هزینه در سناریوهای مختلف وجود دارد لذا بین کمترین و بیشترین مقدار هزینه در سناریوهای تعریف‌شده اختلاف زیادی وجود ندارد که موجب حساسیت پایین هزینه مورد انتظار تأمین انرژی و معیار ریسک CVAR به تغییرات β شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل خطی آمیخته با اعداد صحیح به‌منظور مدیریت انرژی خانه و با هدف به حداقل رساندن هزینه تأمین انرژی با در نظر گرفتن بارهای دارای قابلیت جابجایی زمان فعالیت، خودروی الکتریکی با قابلیت عملکرد خودرو به خانه، سیستم ذخیره‌ساز انرژی و نیز سیستم فتوولتائیک پیشنهاد شده است. با مدیریت مناسب وسایل دارای قابلیت جابجایی زمان استفاده می‌توان هزینه تأمین انرژی را کاهش داد و در زمان‌های اوج مصرف نیز به شبکه کمک کرد. به‌منظور ارزیابی تأثیر اقتصادی هر یک از سیستم‌ها در مدیریت انرژی خانه، چهار حالت مختلف در نظر گرفته شده و زمان استفاده هر یک از وسایل دارای قابلیت جابجایی زمان فعالیت تعیین شد. با مقایسه نتایج می‌توان نتیجه گرفت که در نظر گرفتن هر سیستم اضافی، موجب کاهش هزینه تأمین انرژی خانه خواهد داد. با توجه به خطی بودن مدل پیشنهادی، برنامه‌ریزی تصادفی مقید به ریسک مدیریت انرژی خانه هوشمند در زمانی بسیار کوتاه (در حد یک ثانیه) به جواب بهینه رسیده است. با انجام تحلیل حساسیت مشخص شد که افزایش نرخ شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی و کاهش قیمت خرید انرژی از شبکه موجب کاهش هزینه تأمین انرژی و افزایش ظرفیت باتری خودرو موجب افزایش هزینه تأمین انرژی خواهد شد. همچنین هزینه تأمین انرژی و معیار ریسک CVAR حساسیت کمی به عدم قطعیت‌ها و تغییرات β دارد.

فهرست سمبل‌ها

اندیس‌ها	
زمان	t, i
بارهای با قابلیت جابجایی زمان فعالیت	m
سناریو	s
پارامترها	
بازده شارژ ذخیره‌ساز	CE^{ESS}
بازده شارژ خودرو	CE^{EV}

الکتریکی در خانه در زمان t است
متغیر باینری که یک بودن آن به معنی دریافت توان از شبکه در زمان t است.
 U_t^{grid}

متغیر باینری که یک بودن آن به معنی روشن بودن بار قابل جابجایی lm در زمان t است.
 U_{mt}^{sh}

متغیر باینری که یک بودن آن به معنی راهاندازی بار قابل جابجایی lm در زمان t است.
 v_{mt}^{sh}

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله، مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNTU/370162/98 اعلام می‌دارند.

مراجع

- [1] M. Wissner "The Smart Grid—A Saucerful of Secrets?" , Applied Energy, Vol. 88, No. 7, 2011, pp. 2509-2518.
- [2] P. Siano, "Demand response and smart grids –a survey", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 30, 2014, pp. 461-478.
- [3] Li XH, and Hong SH, "User-expected price-based demand response algorithm for a home-to-grid system", Energy, Vol.64, 2014, pp. 49-437.
- [4] S. Borlease, "Smart grids: infrastructure, technology and solutions" , 1st Edition, CRC Press, 2013.
- [5] Xue X, Wang S, Sun Y, and Xiao F, "An interactive power demand management strategy for facilitating smart grid optimization", Appl Energy, Vol.116, 2014, pp. 297–310.
- [6] N. Venkatesan, J. Solanki, and SK. Solanki, "Residential demand response model and impact on voltage profile and losses of an electric distribution grid", Appl Energy, Vol. 96, 2012, pp. 84–91.
- [7] M. Shakeri, M. Shayestegan, H. Abunima, S. M. Salim Reza, M. Akhtaruzzaman, A. R. M. Alamoud, K. Sopian, and N. Amin, "An intelligent system architecture in home energy management systems (HEMS) for efficient demand response in smart grid", Energy and Buildings, Vol. 138, 2017, pp. 64-154.
- [8] M. Marzband, H. Alavi, S. S. Ghazimirsaeid, H. Uppal, and T. Fernando, "Optimal energy management system based on stochastic approach for a home Microgrid with integrated responsive load demand and energy storage", Sustainable Cities and Society, Vol. 28, 2017, pp. 64-256.
- [9] M. S. Ahmed, A. Mohamed, T. Khatib, H. Shareef, R. Z. Homod, and J. A. Ali, "Real time optimal schedule controller for home energy management system using new binary backtracking search algorithm", Energy and Buildings, Vol. 138, 2017, pp. 27-215.
- [10] T. AlSkaif, A. C. Luna, M. G. Zapata, J. M. Guerrero, and B. Bellalta, " Reputation-based joint scheduling of households appliances and storage in a microgrid with a shared battery," Energy and Buildings, Vol. 138, 2017, pp.39-228.
- [11] E. Shirazi, A. Zakariazadeh, and Sh. Jadid, "Optimal joint scheduling of electrical and thermal appliances in a smart home environment", Energy Conversion and Management, Vol. 106, 2015, pp. 93-181.
- [12] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, and H. Zareipour, "Home energy management incorporating operational priority of appliances", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 74, 2016, pp. 92-286.
- [13] E. Shirazi, and Sh. Jadid, "Optimal residential appliance scheduling under dynamic pricing scheme via HEMDAS", Energy and Buildings, Vol. 93, 2015, pp 9-40.
- [14] A. Anees, and Y. P. Chen, "True real time pricing and combined power scheduling of electric appliances in residential energy management system", Applied Energy, Vol. 165, 2016, pp. 592-600.
- [15] H. A. Özkan, "Appliance based control for Home Power Management Systems", Energy, Vol. 114, 2016, pp. 693-707.
- [16] X. Chen, T. Wei, and S. Hu, "Uncertainty-aware household appliance scheduling considering dynamic electricity pricing in smart home", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, 2013. pp. 94-932.
- [17] R. Hemmati, H. Saboori, "Stochastic optimal battery storage sizing and scheduling in home energy management systems equipped with solar photovoltaic panels " , Energy and Buildings, Vol. 152, October 2017, pp. 290-300.
- [18] C. Sun, F. Sun, and S.J. Moura, "Nonlinear predictive energy management of residential buildings with photovoltaics & batteries", J. Power Sources, Vol.325, 2016. pp.73-723.
- [19] M. Pipattanasomporn, M. Kuzlu, and S. Rahman, "An algorithm for intelligent home energy management and demand response analysis", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.3, 2012, pp.2166–2173.

- [20] M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Hardware demonstration of a home energy management system for demand response applications", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.3 , 2012, pp.1704–1711.
- [21] S. Shao, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Demand response as a load shaping tool in an intelligent grid with electric vehicles", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.2, 2011, pp.624–631.
- [22] E. Matallanas, MC. Cagigal, A. Gutierrez, FM. Huelin, EC. Martin, and D. Masa, "Neural network controller for active demand-side management with PV energy in the residential sector", *Applied Energy*, Vol.91, 2012, pp.90–97.
- [23] R. Missaoui, H. Joumaa, S. Ploix, and S. Bacha, "Managing energy smart homes according to energy prices: analysis of a building energy management system", *Energy and Build*, Vol.4, 2014, pp.155–167.
- [24] A. Weis, P. Jaramillo, and J. Michalek, "Estimating the potential of controlled plug-in hybrid electric vehicle charging to reduce operational and capacity expansion costs for electric power systems with high wind penetration", *Applied Energy*, Vol.115 , 2014, pp.190–204.
- [25] J. Zhao, S. Kucuksari, E. Mazhari, and YJ. Son, "Integrated analysis of high-penetration PV and PHEV with energy storage and demand response", *Applied Energy*, Vol.112, 2013, pp.35–51.
- [26] Sh. Umetani, Y. Fukushima, H. Morita, "A linear programming based heuristic algorithm for charge and discharge scheduling of electric vehicles in a building energy management system" , *Omega*, Vol. 67, March 2017, pp. 115-122.
- [27] O. Erdinc, "Economic impacts of small-scale own generating and storage units and electric vehicles under different demand response strategies for smart households" , *Applied Energy*, Vol.126, 2014, pp.142–150.
- [۲۸] جمشید آقایی، امین رحیمی و محمدرضا کریمی، "هماهنگی نیروگاه‌های بادی و دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیستم قدرت در مسئله برنامه‌ریزی امنیت- مقید مشارکت واحدها با استفاده از بهینه‌سازی استوار"، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷.
- [۲۹] سامان احمدی و محمدتقی بطحایی، "مدل‌سازی و شبیه‌سازی راهبردهای بهینه مدیریت انرژی در خودروی هیبرید پیل سوختی"، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، سال پانزدهم، شماره ۵۰، پاییز ۱۳۹۹.
- [30] A. Ghahgharaee, A. Zakariazadeh, Sh. Jadid , A. Kazemi," Stochastic operational scheduling of distributed energy resources in a large scale virtual power plant", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol.82, 2016, pp. 608–620.
- [۳۱] میلاد غلامی فرد، نیما امجدی و حسین شریف‌زاده، "پخش بار بهینه احتمالاتی به‌منظور تعیین قیمت‌های حاشیه‌ای محلی در حضور تولید بادی"، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، سال پانزدهم، شماره ۴۸، بهار ۱۳۹۶.
- [32] Ditiro Setlhaolo, Sam Sichilalu, and Jiangfeng Zhang, "Residential load management in an energy hub with heat pump water heater", *Applied Energy*, Vol. 208, 2017, pp.551-560.
- [33] A. J. Conejo, M. Carrión, and J. M. Morales, "Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets", New York, Springer, 2010