

برنامه ریزی بهینه مصارف خانگی با استفاده از یک مدل پاسخگویی بار و با در نظر گرفتن رفاه ساکنین

محمدحسن امیریون^{۱*} و میلاد علائی^۲

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|---|
| <p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۲۹</p> | <p>پیاده سازی پاسخگویی بار خانگی یکی از چالش های جدی بهره برداران شبکه های قدرت است. ظهور شبکه های هوشمند زیرساخت های ارتباطی مورد نیاز برای تبادل سیگنال های برخط با خانه های هوشمند را فراهم نموده است. در این مقاله مدلی برای پیاده سازی پاسخگویی بار در بخش خانگی ارائه شده است. در این مدل، بار هر خانه به سه دسته ی غیر قابل کنترل، قابل کنترل بدون ترموستات و قابل کنترل دارای ترموستات تقسیم بندی شده است. برنامه ی پاسخگویی بار پیشنهادی یک برنامه ی ترکیبی از برنامه های قیمت دهی زمان واقعی و پرداخت تشویقی است که ضمن انعکاس قیمت ساعتی برق، مشتریان را به مشارکت در طرح مدیریت مصرف ترغیب می کند. مدل بهینه سازی پیشنهادی برای یک مجتمع مسکونی ۵۰ واحدی و با استفاده از نرم افزار GAMS اعتبارسنجی شد. نتایج به دست آمده حاکی از کارایی مدل پیشنهادی در کاهش اوج بار و نیز جابه جایی زمان شروع به کار مصارف خانگی دارند. یک مطالعه آنالیز حساسیت برای بررسی تأثیر هزینه نقض رفاه ساکنین و نرخ تشویقی مشارکت در برنامه پاسخگویی بار نیز انجام شد و نتایج مورد بحث قرار گرفتند.</p> |
| <p>واژگان کلیدی: بهینه سازی، پاسخگویی بار خانگی، هزینه ی انرژی، هزینه ی نقض رفاه، بارهای کنترل پذیر.</p> | |

۱-مقدمه

تنوع بارهای مورد استفاده و پیچیدگی مدل سازی دقیق آن ها، اهمیت بالای سطح رفاه برای ساکنین و دشواری متقاعد کردن مشتریان برای شرکت در برنامه های پاسخگویی بار از اهمیت خاصی برخوردار است [۷]. به طور کلی روش های پاسخگویی بار را می توان به دو دسته ی کلی برنامه های پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت برق و برنامه های پاسخگویی بار مبتنی بر تشویق تقسیم بندی کرد. در گروه اول، شرکت های برق با استفاده از تغییر قیمت برق در زمان های مختلف روز مشتریان خود را به قطع، کاهش یا جابه جایی مصرف انرژی برق متقاعد می کنند. در برنامه های مبتنی بر تشویق به بارهای شرکت کننده در پاسخگویی بار مبالغی تشویقی اختصاص می یابد که این مبالغ تشویقی جدا از هزینه ی پرداختی

پاسخگویی بار از دیرباز به عنوان ابزاری برای کاهش مصرف برق در ساعات بحرانی سیستم قدرت مورد توجه بهره برداران شبکه بوده است. یکی از موانع پیش روی اجرای کامل برنامه های پاسخگویی بار، نیاز به زیرساخت های پیشرفته ی ارتباطی است که تاکنون کاربرد پاسخگویی بار را به مشتریان بزرگ شبکه و بیشتر در مواقع لزوم محدود کرده است [۱]-[۴]. با پیشرفت سامانه های ارتباطی هوشمند، امکان پیاده سازی برنامه های پاسخگویی بار در سطح مشتریان انتهایی شبکه ی توزیع نیز مهیا شده و سیستم قدرت در شرایط مختلف می تواند از مزایای آن بهره مند شود [۵]-[۷]. پیاده سازی برنامه های پاسخگویی بار در سطح مشتریان خانگی با توجه به تعداد زیاد و تنوع گسترده ی سلیقه ی آن ها،

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.h.amirioun@shr.ui.ac.ir

۱. استادیار، گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، ایران.

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، ایران.

با توجه به اهمیت زمان اوج بار برای شبکه برق، برنامه‌های پاسخگویی بار مبتنی بر تشویق به عنوان یکی از ابزارهای کمکی برای همراه نمودن بیشتر مشترکین پیشنهاد شده است. در پیشینه موضوع تحقیق، مزیت استفاده از برنامه ترکیبی مبتنی بر قیمت و تشویق در چند مقاله بررسی شده است. البته استفاده از این نوع برنامه‌ها بیشتر از دیدگاه شبکه توزیع بالادست، شبکه انتقال یا بازار برق بوده است و برخلاف مقاله حاضر، کمتر به کاربرد آن در بخش خانگی پرداخته شده است. برای نمونه، در مرجع [۲۰]، با استفاده از ترکیب برنامه‌های زمان استفاده و یک برنامه تشویقی، قیمت‌های محلی برق نسبت به برنامه مبتنی بر قیمت کاهش یافته است. در مرجع [۲۱]، استفاده از یک برنامه ترکیبی قیمت زمان واقعی (RTP) و تشویقی، تقاضای برق در ساعات اوج بار را در یک فیدر توزیع را تا ۱۸٪ نسبت به هر یک از حالات پیاده‌سازی برنامه مبتنی بر قیمت یا تشویقی کاهش داده است. جدول ۱ مقالات متمرکز بر پاسخگویی بار خانگی را از جنبه‌های مختلف بررسی و مقایسه می‌نماید. لازم به توضیح است که به دلیل کثرت مقالات و محدودیت صفحات این مقاله، تعدادی از مقالات مهم و واحد امکان جدید در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در پاسخگویی بار خانگی، توجه به رفاه ساکنین و مدل‌سازی دقیق بار لوازم خانگی مطابق برنامه کاری آن‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. همچنین، استفاده از برنامه‌های تشویقی در کنار برنامه‌های مبتنی بر قیمت می‌تواند مشارکت مشترکین در برنامه‌های پاسخگویی بار را افزایش دهد. مقایسه کیفی مقالات پیشین بر اساس این معیارها صورت گرفته است. همان‌گونه که از جدول ۱ مشخص است، برخی از کارهای پیشین به یک یا برخی از معیارهای مذکور توجه کمتری داشته‌اند. در مقاله حاضر سعی شده است به همه این معیارها توجه شود تا برنامه پاسخگویی بار پیشنهادی از اعتبار بیشتری برای پیاده‌سازی برخوردار باشد.

در این مقاله، مدلی برای برنامه‌ریزی بارهای خانگی در یک مجتمع مسکونی هوشمند ارائه شده است. بارهای هر خانه به سه دسته تقسیم شده‌اند؛ بارهای غیرقابل کنترل مانند یخچال، تلویزیون، روشنایی و ...، بارهای قابل کنترل بدون ترموستات که فقط قابلیت جابه‌جایی زمان شروع فعالیت را دارند؛ مانند ماشین لباسشویی، لباس خشک‌کن، ماشین ظرف‌شویی و بارهای قابل کنترل دارای ترموستات که امکان تنظیم عملکردشان در کلیه‌ی زمان‌ها فراهم

بارها برای مصرف برق می‌باشد. این مبالغ تشویقی می‌تواند به صورت اعتبار مصرف برق و یا پرداخت پول به صورت قراردادهای از پیش تعیین شده و یا در ازای کاهش بار اندازه‌گیری شده باشد [۸].

پاسخگویی بار خانگی در سال‌های اخیر مورد توجه محققان واقع شده است و انتظار می‌رود در آینده‌ی نزدیک مطالعات بیشتری را در این حوزه شاهد باشیم. در [۹]، مدلی برای مدیریت انرژی یک خانه‌ی هوشمند (مجهز به تجهیزات اندازه‌گیری و ارتباطی پیشرفته) با استفاده از یادگیری تقویتی و شبکه عصبی ارائه شده است. برای مقابله با عدم قطعیت در قیمت‌های آتی، مدل پیش‌بینی قیمت ثابت براساس شبکه عصبی ارائه شده است. مرجع [۱۰] به بررسی رفتار پاسخ‌دهی مشتریان به برنامه‌های پاسخگویی بار زمان استفاده (TOU) پرداخته است. مراجع [۱۱]–[۱۳] با مدل‌سازی دقیق بارهای خانه‌ی هوشمند از جمله بار حرارتی، به بررسی کاهش اوج بار و سودآوری آن برای ساکنین خانه پرداخته‌اند.

در [۱۴] با در نظر گرفتن مدل دقیق مصرف ماشین لباس شویی، لباس خشک‌کن، ماشین ظرف‌شویی و خنک‌کننده‌ی هوا، یک مدل مبتنی بر پرداخت های تشویقی برای یک خانه‌ی هوشمند پیاده‌سازی شده و سپس با استفاده از الگوریتم مونت کارلو مدل برای یک گروه از خانه‌های هوشمند گسترش یافته است. مرجع [۱۵] به مقایسه‌ی برنامه‌های زمان استفاده و کاهش بار در حضور خودروهای الکتریکی و منابع انرژی خورشیدی در سطح شبکه‌ی توزیع پرداخته است. نقض رفاه ساکنین خانه‌ها در تابع هدف در نظر گرفته شده است. مرجع [۱۶] به مروری بر تحقیقات صورت گرفته در پاسخگویی بار در سطح خانگی پرداخته است. مزایای اجرای پاسخگویی بار خانگی در کاهش آلاینده‌های هوا برای یک مطالعه‌ی موردی در [۱۷] بررسی شده است. تعیین زمان مشارکت بارهای خانگی در یک خانه‌ی هوشمند با در نظر گرفتن خودروی الکتریکی و ذخیره‌ساز انرژی در چند مطالعه‌ی موردی مختلف موضوع تحقیق در [۱۸] است.

نتایج تحقیق نقش خودروی الکتریکی و ذخیره‌ساز را بر درآمدزایی مالک خانه از برنامه‌ی زمان استفاده نشان می‌دهند. در [۱۹] تاثیر خودروهای الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار بر بهره‌برداری بهینه از شبکه‌ی توزیع در چهارچوب یک مدل دو سطحی بررسی شده است.

جدول ۱: مقایسه کیفی مقاله حاضر با تحقیقات مشابه

| مرجع | نوع برنامه | نوع کنترل | رفاه ساکنین | مدل دقیق بار لوازم خانگی | هدف/نتایج |
|-----------|------------------------|-----------|-------------|--------------------------|--|
| [۲۲] | مبتنی بر قیمت | متمرکز | × | × | مقایسه سه برنامه مبتنی بر قیمت در سه کشور مختلف |
| [۲۳] | تشویقی | متمرکز | × | × | بررسی نحوه پاسخ مشترکین به پیشنهادهای تشویقی متفاوت |
| [۲۴] | تشویقی | متمرکز | √ | × | کاهش نقض رفاه مشتریان با استفاده از یک برنامه تشویقی |
| [۲۵] | مبتنی بر قیمت | غیرمتمرکز | √ | × | مدیریت انرژی و هزینه خنک کننده با توجه به دمای تنظیمی |
| [۲۶] | مبتنی بر قیمت | غیرمتمرکز | × | × | کاهش اوج بار با استفاده از یک الگوریتم برخط غیرمتمرکز |
| [۲۷] | مبتنی بر قیمت | متمرکز | × | × | کاهش مصرف انرژی و اوج بار با استفاده از یک روش فازی |
| [۲۰] | مبتنی بر قیمت و تشویقی | متمرکز | √ | × | تعیین نرخ تشویق کافی، کاهش بار لازم و زمان بهینه اجرای برنامه |
| [۲۱] | مبتنی بر قیمت و تشویقی | غیرمتمرکز | × | × | تعیین تصمیمات بهینه خرده فروش و مشتری با استفاده از یک روش مبتنی بر تئوری بازیها |
| [۲۸] | مبتنی بر قیمت | متمرکز | √ | × | مدیریت بهینه انرژی خانه هوشمند |
| [۲۹]-[۳۲] | مبتنی بر قیمت | متمرکز | √ | × | کاهش اوج بار و هزینه انرژی یک ساختمان مسکونی بزرگ |
| [۳۳] | مبتنی بر قیمت | غیرمتمرکز | √ | √ | کاهش هزینه انرژی و نقض رفاه مشتریان |
| [۳۴] | مبتنی بر قیمت | متمرکز | × | × | تعیین قیمت برق با استفاده از یک روش یادگیری ماشین |
| [۳۵] | مبتنی بر قیمت | متمرکز | √ | × | مدیریت بهینه انرژی خانه هوشمند با استفاده از منابع تجدیدپذیر |
| [۳۶] | مبتنی بر قیمت | متمرکز | √ | × | مدیریت بهینه انرژی خانه هوشمند با استفاده از باتریها |
| [۳۷] | مبتنی بر قیمت و تشویقی | متمرکز | × | × | کاهش اوج بار و افزایش فروش انرژی به شبکه توزیع |
| این مقاله | مبتنی بر قیمت و تشویقی | متمرکز | √ | √ | کاهش هزینه انرژی یک مجتمع مسکونی هوشمند با در نظر گرفتن رفاه ساکنین |

و تشویقی اوج بار برای تسهیل و ترغیب مشارکت مشتریان خانگی در برنامه‌های پاسخگویی بار،

- مدل‌سازی منحنی بار مصارف خانگی نظیر ماشین لباسشویی با توجه به کاربرد و برنامه کاری آن‌ها (به جای استفاده از توان میانگین)،
- در نظر گرفتن اولویت‌های ترجیحی ساکنین برای دمای محیط و زمان شروع به کار لوازم خانگی،

در ادامه در بخش ۲ ساختار پیشنهادی مسئله تشریح می‌شود. در بخش ۳، مدل‌سازی و فرمول‌بندی ریاضی مسئله ارائه می‌گردد. در بخش ۴ مدل پیشنهادی در یک مطالعه‌ی موردی اعتبارسنجی شده و نتایج مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در بخش ۵ نتیجه‌گیری از بحث‌های ارائه شده صورت گرفته و پیشنهادهای برای ادامه‌ی کار مطرح خواهند شد.

۲- ساختار مسئله

مدل مفهومی ساختار ارتباطی و بازار برق برای اجرای طرح

است؛ مانند خنک‌کننده‌ی هوا. یکی از ویژگی‌های مهم مدل ارائه شده از جنبه‌ی فنی در نظر گرفتن منحنی بارهای مصرفی لوازم خانگی با توجه به کاربرد و برنامه کاری آن‌ها می‌باشد که در تحقیقات قبلی کمتر بدان توجه شده است. از برنامه پاسخگویی بار قیمت زمان واقعی (قیمت‌های ساعتی برق برای روز پیش‌رو) و تشویقی اوج بار به صورت ترکیبی استفاده شده است که ضمن انعکاس قیمت واقعی برق در هر لحظه، مشتریان را به پاسخگویی ترغیب می‌کند. تابع هدف مسئله کمینه‌سازی هزینه‌ی انرژی مجتمع به گونه‌ای است که نقض رفاه ساکنین نسبت به انحراف از اولویت‌های ترجیحی آن‌ها به حداقل برسد. مدل پیشنهادی به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) مدل‌سازی می‌شود.

نوآوری‌های این مقاله به صورت خلاصه و موردی به شرح زیر بیان می‌گردند:

- ارائه یک مدل پاسخگویی بار ترکیبی قیمت زمان واقعی

ارائه‌ی مدلی بهینه برای تعیین زمان‌های شروع به کار ماشین لباسشویی، لباس خشک‌کن، ماشین ظرفشویی و همچنین تعیین دمای تنظیمی خنک‌کننده‌ی هوا در هر بازه‌ی زمانی است. برنامه‌ریزی لوازم خانگی مذکور به گونه‌ای صورت می‌گیرد که هزینه‌ی انرژی مجتمع کمینه شده و هم‌زمان نقض رفاه ساکنین با توجه به ترجیحات تعیین شده از سوی آن‌ها به حداقل برسد. فرضیات در نظر گرفته شده در مدل پیشنهادی در ارتباط با زیرساخت شبکه و خانه هوشمند عبارتند از:

۱- لوازم خانگی قابل کنترل شامل ماشین ظرفشویی، ماشین لباسشویی، لباس خشک‌کن و خنک‌کننده هوا، مجهز به سیستم هوشمند کنترل و فرمان برای تنظیم زمان خاموش و روشن شدن می‌باشند. در صورت فراهم‌نبودن این فرض، ساکنین باید خود در زمان بهینه تنظیم‌شده توسط برنامه پیشنهادی، دستگاه را روشن نمایند و یا دمای هوای خنک‌کننده را به صورت مداوم و طبق تنظیم برنامه پیشنهادی تغییر دهند. بدیهی است این چالش موجب عدم رضایت ساکنین و عدم تمایل احتمالی برای شرکت در برنامه پاسخگویی بار خواهد شد.

۲- ساکنین ترجیحات خود در روز پیش‌رو برای لوازم خانگی قابل کنترل را از طریق یک رابط نرم‌افزاری/برنامه‌ک (اپلیکیشن) تحت تلفن همراه هوشمند/پیامک اعلام می‌کنند.

۳- قیمت ساعتی برق، برای روز پیش‌رو از سوی شرکت برق/خرده‌فروش برق اعلام شده است.

۳- مدل ریاضی مسئله

هر یک از وسایل برقی قابل کنترل بدون ترموستات در نظر گرفته شده در این مدل فقط یک بار در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی می‌توانند روشن شوند. این محدودیت توسط متغیرهای تصمیم‌گیری به صورت زیر بیان می‌شود:

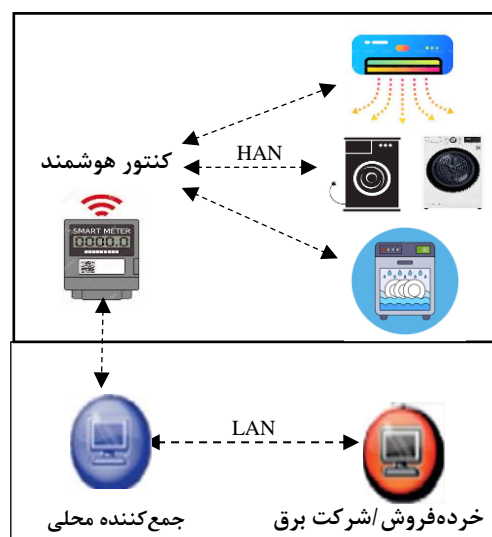
$$\sum_{m=1}^{S_{wm}^{\max}} Y_{h,m} = 1, \quad \sum_{m=1}^{S_{dw}^{\max}} Z_{h,m} = 1, \quad \sum_{m=1}^{S_{cd}^{\max}} U_{h,m} = 1 \quad (1)$$

توان مصرفی هر یک از وسایل فوق در بازه‌ی m به صورت زیر می‌تواند نوشته شود:

$$P_{h,m}^{wm} = \sum_{k_{wm}=1} Y_{h,m-k_{wm}} \cdot P_{k_{wm}}^{wm}, \quad P_{h,m}^{cd} = \sum_{k_{cd}=1} U_{h,m-k_{cd}} \cdot P_{k_{cd}},$$

$$P_{h,m}^{dw} = \sum_{k_{dw}=1} Y_{h,m-k_{dw}} \cdot P_{k_{dw}}^{dw} \quad (2)$$

پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. در یک خانه‌ی هوشمند، کنتور هوشمند می‌تواند در بستر شبکه‌ی مخابراتی داخلی در خانه (HAN) و از طریق کنترل‌کننده نصب‌شده بر روی دستگاه، زمان روشن/خاموش و نحوه بهره‌برداری از تجهیز را کنترل نماید. همچنین کنتور هوشمند قادر است قیمت برق و برنامه‌های پاسخگویی بار شبکه را از طریق یک شبکه‌ی مخابراتی محلی (LAN) به صورت برخط دریافت نماید [۱۸]. در مقابل، برنامه‌ریزی بهینه مصرف هر خانه در روز پیش‌رو به جمع‌کننده محلی مربوطه اعلام می‌گردد. هر جمع‌کننده محلی با تعدادی خانه‌ی هوشمند در ارتباط است. در نهایت خرده‌فروش/شرکت برق با جمع‌آوری اطلاعات جمع‌کننده‌های محلی، بار کل شبکه‌ی توزیع برای روز پیش‌رو را پیش‌بینی می‌نماید [۳۹،۳۸].



شکل (۱): ساختار ارتباطی و بازار برق در مدل پیشنهادی

برنامه‌های TOU از دیرباز برای اجرای پاسخگویی بار در سطح شبکه‌ی توزیع مورد استفاده قرار می‌گرفته است. مزیت این برنامه‌ها آشنایی مشتریان و قابلیت پیگیری توسط آن‌هاست، در حالی که عیب اصلی آن‌ها عدم انعکاس قیمت لحظه‌ای برق است. مشتریان خانگی در برابر برنامه‌های RTP برق قابلیت پیگیری و انعطاف بالایی ندارند و ممکن است مشارکت آن‌ها در پاسخگویی بار کاهش یابد [۴۰]. از این‌رو، معمولاً از قیمت‌های ساعتی برق در برنامه پاسخگویی بار RTP استفاده می‌گردد.

در این مقاله از یک مکانیزم ترکیبی برنامه RTP و طرح تشویقی برای زمان‌های اوج بار استفاده شده است که ضمن انعکاس قیمت واقعی برق در هر ساعت، مشتریان را به مشارکت در پاسخگویی بار ترغیب می‌کند. هدف مسئله

$$T_h^{st.dw} \leq St_{dw}^{\max} \quad (9)$$

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در این تحقیق در کنار برنامه‌ی پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت‌های واقعی، یک برنامه‌ی پاسخگویی بار تشویقی از سوی شبکه برای برنامه ریزی بخش قابل کنترل مصرف در ساعات اوج بار ارائه شده است. در ساعات اوج بار مشخص شده که از ۲۴ ساعت پیش‌تر به اطلاع مشتریان می‌رسد، به ازای کاهش مصرف از بار مبنا (میانگین بار مصرفی مشتری در روز مشابه هفته قبل و سال)، مبلغ تشویقی به مشتریان پرداخت خواهد شد. در این تحقیق فرض می‌کنیم همه‌ی مشتریانی که سیگنال درخواست شرکت در برنامه‌ی پاسخگویی بار تشویقی را دریافت می‌کنند به این درخواست پاسخ مثبت بدهند و در برنامه شرکت کنند؛ به عبارت دیگر:

$$K_h = 1 \quad (10)$$

مبلغ تشویقی پرداختی به هر مشتری h در بازه‌ی اوج t برابر خواهد بود با:

$$PA_{h,t}^{inc} = K_h \cdot E_{t}^{inc} \cdot (P_{h,t}^{forecast} - P_{h,t}^{ac} - P_{h,t}^{wm} - P_{h,t}^{cd} - P_{h,t}^{dw}) \quad (11)$$

برای در نظر گرفتن اولویتهای ترجیحی مشتریان، میزان انحراف از دمای ترجیحی و انحراف از زمان ترجیحی مشتریان برای شروع به کار لوازم برقی را در تابع هدف منظور می‌کنیم. انحراف از رفاه مشتریان در هر بازه زمانی m به صورت زیر قابل فرمول‌بندی است:

$$\left| \frac{T_{h,m}^{st.dw} - T_{h,m}^{pref}}{4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 3} \right|, \left| \frac{T_{h,m}^{st.wm} - pref_h^{wm}}{4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4} \right|, \left| \frac{T_{h,m}^{st.cd} - pref_h^{cd}}{4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 3} \right|, \left| \frac{P_{h,m}^{st.dw} - pref_h^{dw}}{4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 3} \right| \quad (12)$$

که در آن جملات ۱ تا ۴ بیانگر میزان نقض رفاه ساکنین ناشی از به ترتیب انحراف از دمای ترجیحی، انتقال زمان عملکرد از زمان تنظیمی برای ماشین لباسشویی، لباس خشک‌کن و ماشین ظرفشویی هستند. برای هر یک از موارد فوق یک ضریب تبدیل به هزینه قرار می‌دهیم و به شکل زیر به تابع هدف مسئله اضافه می‌کنیم:

$$\lambda_{ac} \sum_m \left| T_{h,m} - T_{h,m}^{pref} \right| + \lambda_{wm} \left| T_{h,m}^{st.wm} - pref_h^{wm} \right| + \lambda_{cd} \left| T_{h,m}^{st.cd} - pref_h^{cd} \right| + \lambda_{dw} \left| P_{h,m}^{dw} - pref_h^{dw} \right| \quad (13)$$

متغیر تصمیم‌گیری برای دستگاه تهویه‌ی هوا، دمای هوا در هر بازه‌ی زمانی است. دما در هر بازه بین کمینه و بیشینه‌ی تنظیم‌شده قرار می‌گیرد:

$$T_{h,m}^{\min} \leq T_{h,m} \leq T_{h,m}^{\max} \quad (3)$$

در [۱۴] با استفاده از یک تقریب خطی رابطه‌ی بین توان مصرفی دستگاه تهویه‌ی هوا و دمای هوا به فرم ساده‌شده‌ی زیر نوشته شده است:

$$P_{h,m}^{ac} = \frac{1}{\Delta t \cdot EER} (CT \cdot (T_{h,m} - T_{h,m+1}) + a \cdot \Delta t \cdot (T_h^{out} - T_{h,m})) \quad (4)$$

محدودیت توان مصرفی دستگاه خنک‌کننده هوا:

$$0 \leq P_{h,m}^{ac} \leq P_{ac}^{\max} \quad (5)$$

توان کل مصرفی هر خانه در بازه‌ی m که از دو قسمت توان کنترل‌پذیر و غیرقابل کنترل تشکیل شده است؛ باید از بیشینه‌ی مجاز کمتر باشد:

$$P_{h,m}^{total} = P_{h,m}^{ac} + P_{h,m}^{wm} + P_{h,m}^{cd} + P_{h,m}^{dw} + d_{h,m}^{nc} \leq P_{lim} \quad (6)$$

توان مصرفی غیرقابل کنترل، معادل میانگین مصرف مشتری در روز مشابه سال گذشته و روز مشابه هفته قبل منظور می‌گردد. استفاده از الگوی بار روز مشابه سال قبل، برقراری تناظر بین روز پیش‌رو و نزدیک‌ترین روز مشابه به آن از حیث دمای هوا، طول روز و عادات ساکنین را برقرار می‌نماید. گفتنی است در انتخاب روز مشابه سال گذشته، به همخوانی آن با روز پیش‌رو از نظر تعطیل/غیرتعطیل بودن توجه می‌گردد. به علاوه، استفاده از الگوی بار روز مشابه هفته قبل، تضمین می‌نماید که هرگونه تغییرات در بارها یا تعداد ساکنین نسبت به سال قبل در محاسبات منظور شود.

برای آن که مطمئن باشیم ماشین لباسشویی، ظرفشویی و لباس خشک‌کن بتوانند حتما کار خود را در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی کامل کنند، آخرین زمان مجاز آن‌ها باید طوری تعیین شود که با توجه به زمان مورد نیاز آن‌ها برای طی ترتیب زمانی عملکردشان بتوانند کار خود را تکمیل کنند. نکته‌ای که باید به آن دقت شود لزوم توالی عملکرد ماشین لباسشویی و لباس خشک‌کن می‌باشد که باید رعایت شود:

$$T_h^{st.wm} \leq St_{wm}^{\max} \quad (7)$$

$$T_h^{st.cd} = T_{h,m}^{st.wm} + 11 \quad (8)$$

۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

۴-۱- شناخت مطالعه موردی

مدل پیشنهادی در یک بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته پیاده‌سازی می‌شود و به منظور بالابردن دقت مدل‌سازی بارهای در نظر گرفته شده، طول دوره‌ی برنامه‌ریزی به بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای تقسیم شده و بنابراین ۹۶ بازه‌ی زمانی خواهیم داشت. تعداد مشتریان خانگی مجتمع ۵۰ در نظر گرفته شده است. مشتریان بر اساس اطلاعات گذشته و آخرین داده‌های دریافتی از آن‌ها برای اولویت‌های ترجیحشان به گروه‌های ده‌گانه (هر گروه شامل ۵ خانه) تقسیم می‌شوند که وجه مشترک اعضای هر گروه اولویت‌های ترجیحی آن‌ها برای لوازم خانگی قابل کنترلشان می‌باشد. در این تحقیق بخش غیر قابل کنترل بار برای همه‌ی گروه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به هر یک از گروه‌های ذکر شده در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول ستون‌های دوم تا ششم به ترتیب برابر کمینه‌ی دمای ترجیحی ساکنان، بیشینه‌ی دمای ترجیحی ساکنان، زمان ترجیحی شروع به کار ماشین لباسشویی و زمان ترجیحی شروع به کار ماشین ظرفشویی هستند. قابل ذکر است با توجه به این‌که زمان شروع عملکرد لباس خشک‌کن بلافاصله پس از ماشین لباسشویی است (رابطه‌ی (۸))، از ذکر این داده خودداری شده است. ساعات اوج بار اعلام شده از سوی شبکه منطبق بر بازه‌های ۷۷ تا ۸۸ دوره‌ی برنامه‌ریزی (۹۶ بازه) می‌باشد. منحنی دمای هوای محیط در بازه‌ی زمانی اجرای مدل برای یک روز نمونه در تابستان به صورت شکل (۲) است [۴۲]. (۳) مشاهده می‌شود [۴۳]. همان‌گونه که دیده می‌شود الگوی قیمت ارائه‌شده، زمان واقعی (ساعتی) می‌باشد.

جدول ۲: داده‌های مربوط به هریک از گروه‌های ده‌گانه خانه‌ها

| گروه | $T_{i,j}^{\min} (^{\circ}C)$ | $T_{i,j}^{\max} (^{\circ}C)$ | $T_{i,j}^{pref} (^{\circ}C)$ | $pref_i^{wm}$ | $pref_i^{dw}$ |
|------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|---------------|
| ۱ | ۱۹ | ۲۳ | ۲۱ | ۸۰ | ۹۵ |
| ۲ | ۱۹ | ۲۷ | ۲۳ | ۴۲ | ۹۵ |
| ۳ | ۱۹ | ۲۵ | ۲۱ | ۷۰ | ۶۰ |
| ۴ | ۲۲ | ۳۰ | ۲۶ | ۴۵ | ۹۵ |
| ۵ | ۱۹ | ۳۰ | ۲۳ | ۵۸ | ۹۸ |
| ۶ | ۲۲ | ۲۶ | ۲۴ | ۳۶ | ۶۰ |
| ۷ | ۱۹ | ۲۳ | ۲۱ | ۸۰ | ۹۵ |
| ۸ | ۲۴ | ۳۰ | ۲۷ | ۵۰ | ۶۸ |
| ۹ | ۲۰ | ۲۵ | ۲۲ | ۴۵ | ۳۶ |
| ۱۰ | ۲۳ | ۲۷ | ۲۵ | ۶۰ | ۹۵ |

معادلات غیرخطی فوق، مسئله بهینه‌سازی را به یک مسئله غیرمحدب تبدیل می‌نماید که پاسخ آن ممکن است لزوماً بهینه جامع نباشد. به منظور اجتناب از پاسخ بهینه محلی، با تعریف یک متغیر کمکی برای هر یک از لوازم خانگی، رابطه‌ی (۱۳) را خطی‌سازی می‌کنیم:

برای خنک کننده‌ی هوا می‌توان نوشت:

$$-W_{h,m} \leq T_{h,m} - T_{h,m}^{pref} \leq W_{h,m} \quad (14)$$

با توجه به محدوده‌ی تغییر دمای هوا می‌توان نوشت:

$$0 \leq W_{h,m} \leq \text{Max}\{T_{h,m}^{\max} - T_{h,m}^{pref}, T_{h,m}^{pref} - T_{h,m}^{\min}\} \quad (15)$$

به همین ترتیب برای سه متغیر کمکی دیگر نیز داریم:

$$-X_h \leq T_h^{st.wm} - pref_h^{wm} \leq X_h \quad (16)$$

$$0 \leq X_h \leq \text{Max}\{St_{wm}^{\max} - pref_h^{wm}, pref_h^{wm}\}$$

$$-S_h \leq T_h^{st.dw} - pref_h^{dw} \leq S_h \quad (17)$$

$$0 \leq S_h \leq \text{Max}\{St_{dw}^{\max} - pref_h^{dw}, pref_h^{dw}\}$$

$$-V_h \leq T_h^{st.cd} - pref_h^{cd} \leq V_h \quad (18)$$

$$0 \leq V_h \leq \text{Max}\{St_{cd}^{\max} - pref_h^{cd}, pref_h^{cd}\}$$

در نهایت تابع هدف مسئله پیشنهادی را می‌توان برای هر خانه‌ی h به صورت زیر خلاصه نمود:

Minimization of:

$$\underbrace{\sum_m p_{h,m}^{total} \cdot \pi_m \cdot \Delta t}_1 - \underbrace{\sum_t pay_{h,t}^{inc}}_2 + \underbrace{\sum_m (\lambda_{ac} W_{h,m} + \lambda_{wm} X_h + \lambda_{cd} V_h + \lambda_{dw} S_h)}_3 \quad (19)$$

جمله‌ی اول هزینه‌ی انرژی خانه‌ی h ، جمله‌ی دوم درآمد ناشی از شرکت در برنامه‌ی پاسخگویی بار تشویقی و جمله‌ی سوم هزینه‌ی نقض رفاه ساکنین هستند. مدل پیشنهادی، برنامه پاسخگوئی بار قیمت واقعی و تشویقی را به صورت هم زمان در نظر می‌گیرد. مدل ارائه شده یک مدل برنامه‌ریزی خطی با متغیرهای باینری یا (MILP) است که با استفاده از نرم‌افزار GAMS و حل‌کننده CPLEX تجزیه و تحلیل خواهد شد [۴۱]. این مدل برای هر مشتری اجرا می‌شود و خروجی مدل ضمن تعیین مشارکت کلیدی بارهای مجتمع، توان کل بهینه‌ی برنامه ریزی شده‌ی هر خانه و نیز کل ساختمان را نشان می‌دهد.

کاری تنظیم شده برای آن، می‌توان مشخصه بار مصرفی دستگاه را با تقریب قابل قبولی به صورت ثابت در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت (مثلاً ۱۵ دقیقه) معین نمود [۱۸]. ماشین لباس‌شویی استاندارد دارای ۱۱ بازه‌ی ۱۵ دقیقه‌ای عملکرد است. توان مصرفی ماشین لباس‌شویی در زمان‌های عملکرد متوالی آن kW به صورت زیر است [۱۴]:

$$p_{k_{dm}}^{wm} = \{0.272, 0.198, 2.065, 2.065, 2.065, 2.065, 0.11, 0.108, 0.101, 0.19, 0.157\}$$

یک ماشین ظرف‌شویی استاندارد دارای ۹ بازه‌ی ۱۵ دقیقه‌ای عملکرد برحسب kW برابر است با [۱۴]:

$$p_{k_{dw}}^{dw} = \{0.0647, 1.402, 1.402, 0.091, 0.484, 0.484, 0.484, 0.322\}$$

یک لباس خشک‌کن استاندارد به طور معمول دارای ۷ بازه‌ی ۱۵ دقیقه‌ای عملکرد است و در تمام مدت عملکرد تقریباً توان ثابتی مصرف می‌کند که در این مقاله برابر $2/318 \text{ kW}$ در نظر گرفته شده است. برای خنک‌کننده‌ی هوا توان نامی برابر $1/8 \text{ kW}$ در نظر گرفته شده است و نسبت بازه انرژی (Wt/We) در نظر گرفته شده است [۱۴].

در نهایت، بیشینه توان قابل عبور از کنتور هوشمند نصب شده برای هر خانه برابر 4 kW قرار داده شده است.

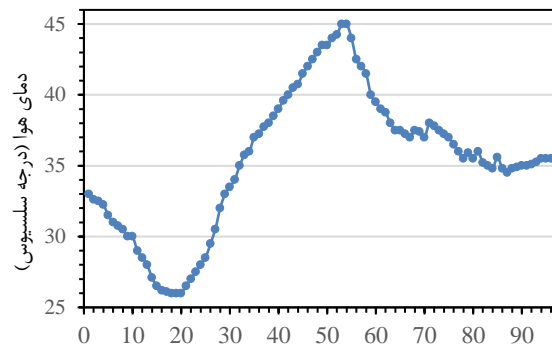
۴-۲- نتایج و بحث

جدول ۳ زمان‌های شروع ترجیحی و برنامه‌ریزی ماشین لباس‌شویی، لباس خشک‌کن و ماشین ظرف‌شویی را برای یک خانه در گروه هفتم به عنوان نمونه مقایسه می‌کند. همان‌گونه که در این جدول قابل مشاهده است، با وجود اعمال هزینه‌ی نقض رفا، به دلیل گران بودن برق در زمان‌های اوج بار، زمان‌های ترجیحی و برنامه‌ریزی متفاوت می‌باشند. این تغییر زمان عملکرد به منظور جابه‌جایی و کاهش اوج بار با توجه به محدوده‌ی مجاز تعیین شده توسط ساکنین و برای کاهش هزینه انرژی صورت می‌گیرد.

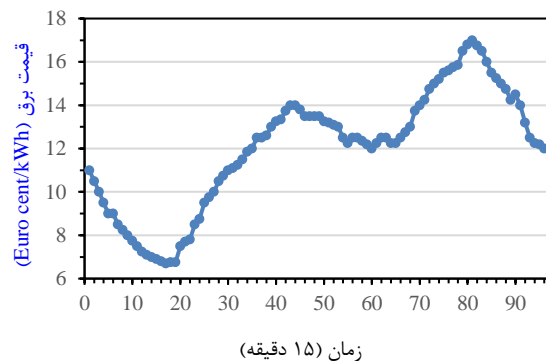
جدول ۳: زمان‌های شروع ترجیحی و برنامه‌ریزی یک خانه در گروه هفتم

| لباسشویی | لباس خشک‌کن | ظرفشویی | زمان شروع |
|----------|-------------|---------|-------------|
| ۷۰ | ۸۱ | ۸۵ | ترجیحی |
| ۵۵ | ۶۶ | ۸۸ | برنامه‌ریزی |

شکل (۴) هزینه‌ی بخش‌های مختلف تابع هدف مسئله را برای یک خانه در گروه هفتم نشان می‌دهد. پرداخت‌ها با



شکل (۲): دمای هوای محیط در روز مطالعه (زمان ۱۵ دقیقه)



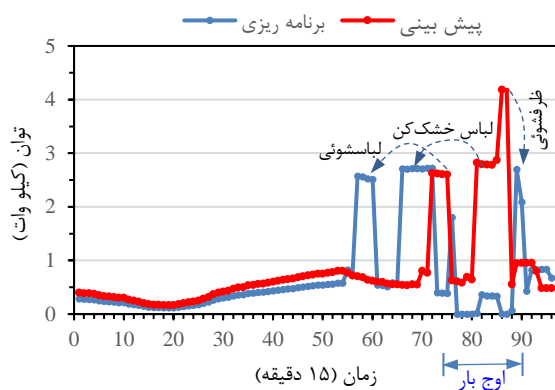
شکل (۳): قیمت زمان واقعی برق در روز مطالعه (زمان ۱۵ دقیقه)

میزان تشویقی پرداختی از سوی شبکه در هر بازه‌ی اوج برابر ۱۰ درصد قیمت برق شبکه در بازه‌ی متناظر فرض شده است. برای یافتن مقادیر مناسب ضرایب نقض رفا، از روش‌های تجربی و آماری نظیر بررسی سوابق مشارکت مشترکین در پاسخگویی بار و پرسش‌نامه جهت تخمین حساسیت مشترکین استفاده می‌شود. در این مقاله، به منظور کاهش بار محاسباتی شبیه‌سازی و سادگی مدل، از مقادیر میانگین داده‌های ضرایب نقض رفا برای هر گروه از خانه‌ها استفاده گردیده است. نرخ تبدیل نقض رفا به هزینه برابر $0/05 \text{ Cent Euro}/^\circ\text{C}$ تجهیزات $0/05 \text{ Cent Euro}/\text{h}$ در نظر گرفته شده است.

ضریب پراکندگی حرارتی برای این مطالعه معادل $\alpha = 0/077 \text{ KW}/^\circ\text{C}$ و ظرفیت گرمایی معادل $CT = 2/63 \text{ Kwh}/^\circ\text{C}$ در نظر گرفته شده‌اند. زمان‌های پیشینه‌ی مجاز شروع به کار تجهیزات بدون ترموستات به گونه‌ای تعیین شده است که بتوانند در بازه‌ی ۲۴ ساعته‌ی مورد مطالعه کار خود را به پایان برسانند: $St_{dw}^{\max} = 70$.

$$T_h^{st.cd} = 90, St_{wm}^{\max} = 79$$

با توجه به مشخصات فنی هر یک از لوازم خانگی و برنامه



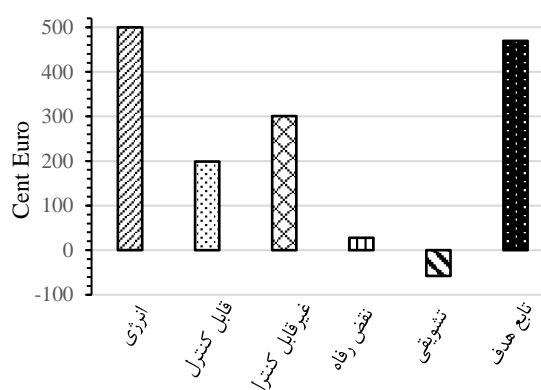
شکل (۵): توان‌های مصرفی قابل کنترل یک خانه‌ی نمونه در گروه هفتم

مطابق شکل (۶)، کاهش ۱/۵ کیلووات و ۱/۲۵ کیلووات در مقدار اوج بار به ترتیب در برنامه RTP و برنامه تشویقی RTP+ نسبت به مقدار پیش‌بینی، بسیار چشمگیر است و کمک بسیار زیادی به بارزدایی در ساعات اوج بار می‌کند. به علاوه، در برنامه تشویقی RTP+، کاهش مصرف بیشتری در بازه‌های اوج بار، ۷۷ تا ۸۸، نسبت به برنامه RTP مشاهده می‌گردد که عمدتاً مربوط به افزایش دمای ترجیحی خنک‌کننده و کاهش مصرف آن است.

بار مسکونی کل مجتمع مسکونی از جمع منحنی بار تمام گروه‌ها حاصل می‌شود. از آن‌جا که بررسی و تحلیل منحنی بار ساعتی آسان‌تر و کاربردی‌تر است، در شکل (۷) نمودار ساعتی بار مجموعه مسکونی نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در منحنی بار پیش‌بینی (منحنی بار بدون پاسخگویی بار) دو قله بار در ساعات ۱۲-۱۴ و ۲۰-۲۲ وجود دارد. در منحنی بار برنامه RTP دو قله بار با اندازه‌های کمتر نسبت به پیش‌بینی در ساعات ۱۳-۱۵ و ۲۰-۲۲ وجود دارند. این در حالی است که در منحنی بار برنامه تشویقی RTP+، فقط یک قله در ساعات ۱۳-۱۵ و با اندازه کمتر نسبت به پیش‌بینی مشاهده می‌شود.

از شکل‌های (۶) و (۷) می‌توان جمع‌بندی نمود که اعمال برنامه پاسخگویی بار تشویقی RTP+ نسبت به به کارگیری برنامه RTP، منجر به جابجایی/کاهش بار بیشتری در زمان اوج بار، بازه‌های زمانی ۷۷ تا ۸۸، می‌گردد. این مشاهده بدین گونه قابل توجیه است که در حالت اعمال برنامه تشویقی RTP+، دریافت مبلغ تشویقی به ازای جابجایی زمان شروع بارهای ماشین لباسشویی، لباس خشک‌کن و ماشین ظرفشویی و افزایش دمای تنظیمی خنک‌کننده هوا (کاهش مصرف) در ساعات اوج بار، بر هزینه نقض رفاه مشتری فائق

علامت مثبت و دریافتی‌ها با علامت منفی نشان داده شده‌اند. هزینه‌ی کل انرژی به تفکیک بخش‌های قابل کنترل و غیر قابل کنترل نمایش داده شده است. هزینه‌ی نقض رفاه مشتری و نیز تشویقی پرداختی از سوی شبکه نیز در شکل (۴) دیده می‌شود که برآیند آن‌ها یک درآمد معادل Cent Euro ۳۰/۰۵ برای مشترک ایجاد می‌نماید. در صورتی که از برنامه تشویقی استفاده نگرده، مبلغ دریافتی تشویقی صفر خواهد بود و هزینه نقض رفاه نیز به دلیل تمایل کمتر مشترک به انحراف از اولویت‌های ترجیحی اندکی کاهش می‌یابد؛ در نتیجه در کل هزینه انرژی و تابع هدف در این حالت افزایش می‌یابند.

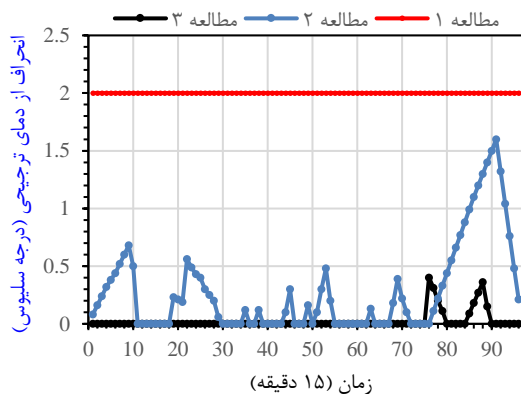


شکل (۴): تفکیک هزینه‌ها برای یک خانه در گروه هفتم

منحنی شکل (۵) توان قابل کنترل پیش‌بینی شده (مبنا) و برنامه‌ریزی پس از اجرای برنامه پاسخگویی بار پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در زمان‌های اوج بار اختلاف چشم‌گیری بین دو مقدار توان پیش‌بینی و برنامه‌ریزی وجود دارد. با دقت در شکل چگونگی انتقال زمان کار ماشین لباسشویی، لباس خشک‌کن و ماشین ظرف شویی به ساعات ارزان‌تر با در نظر گرفتن رفاه مشتریان نشان داده شده است. مقدار اوج توان برنامه‌ریزی شده در مقایسه با توان پیش‌بینی شده حدود ۱/۵ کیلووات کاهش پیدا کرده است.

به منظور ارزیابی تأثیر برنامه‌های تشویقی بر کارایی برنامه‌های پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت، نتایج شبیه‌سازی برای حالات اعمال برنامه پاسخگویی بار RTP (بدون برنامه تشویقی) و برنامه RTP+ تشویقی ارائه و مقایسه شدند. با توجه به محدودیت تعداد صفحات و نیز رعایت سادگی، نتایج مذکور فقط در شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب برای بار کل مصرفی یک خانه نمونه در گروه هفتم و منحنی بار ساعتی مجتمع مسکونی ارائه شده‌اند.

کننده برحسب $Cent Euro/°C$ و برای سایر بارها بر حسب $Cent Euro/h$ است. در نرخ تبدیل ۰، یعنی زمانی که هزینهی نقض رفاه ساکنین در مدل لحاظ نشود، دمای هوای اتاق در کلیه‌ی بازه‌ها بیشترین انحراف ممکن از مقدار ترجیحی را دارد و در کمینه‌ی ممکن قرار می‌گیرد. همان‌گونه که از نمودار مطالعه ۲ مشخص است، با افزایش نرخ تبدیل، میزان انحراف از دمای ترجیحی کاهش می‌یابد و در بازه‌های اوج بار (۷۷ تا ۸۸) بیشترین است. به دلیل اعمال مستقیم رفاه مشتریان در تابع هدف، در نرخ تبدیل ۰/۰۳، تنها در بازه‌های اوج بار دمای اتاق اندکی از دمای ترجیحی انحراف پیدا می‌کند و در زمان‌های دیگر در دمای ترجیحی باقی می‌ماند.



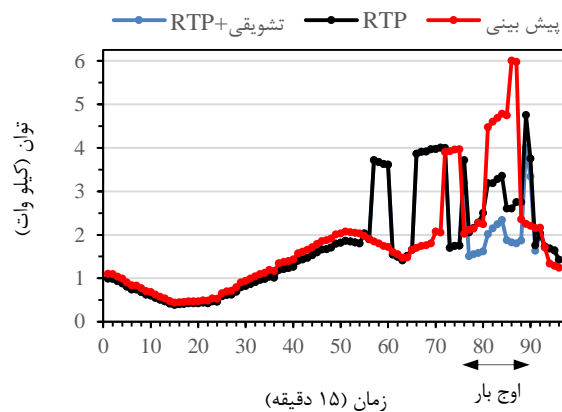
شکل (۸): انحراف دمای اتاق از دمای ترجیحی ساکنان به ازای نرخ‌های مختلف هزینه نقض رفاه، مطالعه ۱: نرخ نقض رفاه ۰، مطالعه ۲: نرخ نقض رفاه ۰/۰۱، مطالعه ۳: نرخ نقض رفاه ۰/۰۳.

نرخ تشویق: تعیین نرخ دقیق پرداختی به مشتری به ازای کاهش یا جابجایی مصرف در ساعات اوج بار توسط خرده‌فروش/شرکت برق صورت می‌گیرد. این نرخ باید به گونه‌ای باشد که از یک سو انگیزه لازم را در مشترک برای شرکت در برنامه پاسخگویی بار فراهم کند و از سوی دیگر برای خرده‌فروش به‌صرفه باشد. در این بخش، تحلیل حساسیت برای بررسی وابستگی تابع هدف به این نرخ انجام می‌گیرد. شکل (۹) مقدار تابع هدف مسئله را به ازای تغییر نرخ تشویقی برای خانه‌ای در گروه‌های چهارم، هفتم و نهم برای نمونه نشان می‌دهد. لازم به ذکر است نرخ هزینه نقض رفاه در این حالت برای کلیه‌ی بارها در مقدار ۰/۰۵ تنظیم شده است. با نرخ تشویقی معادل ۰، برنامه‌ی پاسخگویی بار به یک برنامه‌ی پاسخگویی زمان واقعی تبدیل می‌شود و هزینه‌ی انرژی خانه در بیشترین مقدار خود قرار دارد. همان‌طور که دیده می‌شود، منحنی هزینه‌ی

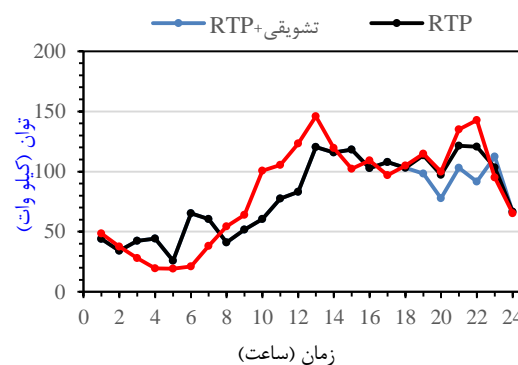
می‌آید. این در حالی است که در صورت عدم اعمال برنامه تشویقی، جابجایی/کاهش مصرف در ساعات اوج بار صرفاً هزینه نقض رفاه به تابع هدف اضافه می‌شود؛ بنابراین از دید مشتری تغییر الگوی مصرف از الگوی ترجیحی خود توجیه ندارد. می‌توان بحث اخیر را این‌گونه جمع‌بندی نمود که در نظر گرفتن برنامه‌های تشویقی در کنار برنامه‌های مبتنی بر قیمت می‌تواند همراهی و تمایل مشترکین برای تغییر الگوی بار خود در ساعات اوج مصرف را افزایش داده و شبکه را در رسیدن به اهداف پاسخگویی بار یاری نماید.

۴-۲-۱- آنالیز حساسیت

هزینه نقض رفاه: تعیین هزینه‌ی نقض رفاه ساکنین بسیار دشوار و به پارامترهای بسیاری مانند فصل، فرهنگ مصرف مشتریان در دراز مدت، نوع تجهیز برقی مورد نظر و ... بستگی



شکل (۶): بار کل مصرفی یک خانه در گروه هفتم



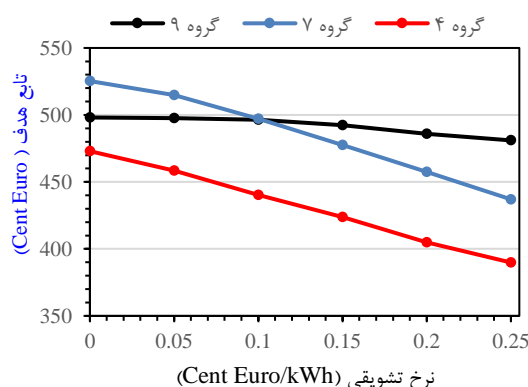
شکل (۷): منحنی بار ساعتی مجتمع مسکونی

دارد. برای درک بهتر نسبت به تأثیر میزان نرخ تبدیل هزینه نقض رفاه بر نتایج، انحراف از دمای ترجیحی خنک‌کننده‌ی هوا برای بازه‌ی زمانی برنامه ریزی به ازای چند نرخ تبدیل و برای یک خانه در گروه هفتم به‌طور نمونه در شکل (۸) نشان داده شده است. منحنی‌های ۱ تا ۳ به ترتیب مربوط به نرخ تبدیل ۰، ۰/۰۱ و ۰/۰۳ هستند. نرخ تبدیل هزینه برای خنک

مشارکت در برنامه‌ی پاسخگویی بار ترغیب می‌کند. همچنین با در نظر گرفتن هزینه نقض رفاه مشتری در تابع هدف، به اولویت‌های مشتریان برای زمان شروع کار مصارف خانگی توجه شده است. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (MILP) پیشنهادی با نرم‌افزار GAMS و حل‌کننده CPLEX تحلیل شد.

مدل پیشنهادی برای یک آپارتمان شامل ۵۰ خانه‌ی هوشمند پیاده‌سازی شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از کارایی مدل پیشنهادی در کاهش اوج بار و نیز جابه‌جایی زمان اوج بار دارند. با وجود اعمال هزینه‌ی نقض رفاه مشتریان، زمان‌های برنامه‌ریزی شروع به کار ماشین لباسشویی، لباس خشک‌کن و ماشین ظرفشویی نسبت به زمان‌های ترجیحی مشتریان متفاوت می‌باشند. همچنین دمای تنظیمی خنک‌کننده نسبت به دمای ترجیحی مشتریان متفاوت است. این تغییر اولویت ترجیحی مشتریان، به منظور جابه‌جایی و کاهش اوج بار با توجه به محدوده‌ی مجاز تعیین شده توسط ساکنین و کاهش هزینه انرژی صورت می‌گیرد. به منظور مطالعه تأثیر دو پارامتر نرخ هزینه نقض رفاه و نرخ تشویقی شرکت در برنامه پاسخگویی بار، یک مطالعه آنالیز حساسیت برای این دو پارامتر انجام شد. طبق انتظار، با افزایش هزینه نقض رفاه، میزان انحراف از اولویت‌های ترجیحی مشتریان کاهش می‌یابد. همچنین افزایش نرخ تشویقی، هزینه انرژی کل مجتمع مسکونی را کاهش می‌دهد. بدیهی است با افزایش نرخ تشویقی، تمایل مشتریان بخش خانگی به شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار و همکاری با شرکت توزیع برق در ساعات اوج بار افزایش می‌یابد. در مطالعات آینده عدم قطعیت قیمت‌های زمان واقعی روز بعد به منظور افزایش دقت برنامه‌ریزی در مدل لحاظ خواهد شد. همچنین مدل‌سازی دقیق منحنی بار تجهیزات برقی دیگر مانند آبگرمکن برقی و خودروی الکتریکی و بهره‌گیری از ظرفیت ذخیره‌سازهای انرژی از محورهای هستند که نویسندگان در تحقیقات بعدی مورد ارزیابی قرار خواهند داد.

انرژی گروه ۴ پایین‌تر از دو گروه دیگر قرار گرفته است. این نکته با توجه به اطلاعات گروه‌ها در جدول ۲ قابل توجه است. در واقع با توجه به بازه‌ی دمای ترجیحی و زمان‌های ترجیحی عملکرد تجهیزات برقی ساکنان در این گروه، هزینه‌ی انرژی یک خانه در این گروه کمتر از دو گروه دیگر است. با افزایش میزان نرخ تشویقی، هزینه‌ی انرژی خانوار در هر گروه کاهش می‌یابد که این نشان‌دهنده‌ی افزایش مشارکت مشتریان در پاسخگویی بار و کارایی برنامه‌ی ارائه شده در مقایسه با برنامه‌ی پاسخگویی قیمت زمان واقعی است.



شکل (۹): تابع هدف (برآیند همه هزینه‌ها) برای یک خانه نمونه در گروه‌های ۴، ۷ و ۹ به ازای تغییر نرخ تشویقی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل پاسخگویی بار خانگی برای مجتمع‌های مسکونی هوشمند ارائه شد. در مدل پیشنهادی، بار هر خانه به سه دسته‌ی غیر قابل کنترل، قابل کنترل بدون ترموستات و قابل کنترل دارای ترموستات تقسیم‌بندی و منحنی بار هر یک از لوازم خانگی در نظر گرفته شده در مطالعه با توجه به کاربرد و برنامه کاری آن مدل شد. برنامه‌ی پاسخگویی بار پیشنهادی یک برنامه‌ی ترکیبی از برنامه‌ی پاسخگویی بار قیمت زمان واقعی و برنامه پاسخگویی بار تشویقی است که ضمن انعکاس قیمت لحظه‌ای برق، با کاهش هزینه انرژی برق، مشتریان را به

| ثابت‌ها | فهرست علائم | اندیس‌ها |
|--|-----------------|---|
| ضریب پراکندگی حرارتی بر حسب $kW/°C$ | α | |
| بیشینه توان قابل عبور از کنتور برای هر خانه بر حسب KW | P_{lim} | بازه‌ی زمانی مطالعه (هر بازه ۱۵ دقیقه)؛ ۱ تا ۹۶ |
| توان نامی دستگاه تهویه‌ی هوا بر حسب KW | P_{ac}^{max} | نشان‌گر خانه‌های ساختمان ۱ تا ۵۰ |
| بازده خنک‌سازی هوای خانه بر حسب Wt/We | EER | بازه‌ی زمانی اوج بار؛ ۷۷ تا ۸۸ |
| توان مصرفی لباس خشک‌کن بر حسب kW | P_{cd} | ترتیب بازه زمانی بهره‌برداری از ماشین ظرف‌شویی؛ ۱ تا ۹ |
| بیشینه زمان آغاز به کار ماشین ظرف‌شویی | St_{dw}^{max} | ترتیب بازه زمانی بهره‌برداری از ماشین لباس‌شویی؛ ۱ تا ۱۱ |
| بیشینه زمان آغاز به کار ماشین لباس‌شویی | St_{wm}^{max} | ترتیب بازه زمانی بهره‌برداری از لباس خشک‌کن؛ ۱ تا ۷ |
| ظرفیت گرمایی محیط بر حسب $kWh/°C$ | CT | |
| طول هر بازه‌ی زمانی؛ که برابر 0.25 فرض شده است (نمایانگر ۱۵ دقیقه) | Δt | |
| عددی مثبت و بزرگ (مثلاً ۱۰۰) | M | کمینه دمای داخل خانه‌ی h در بازه‌ی m بر حسب $°C$ |
| ضریب وزنی اهمیت دستگاه تهویه‌ی هوا (خنک‌کننده) از نگاه مشتری | λ_{ac} | بیشینه دمای داخل خانه‌ی h در بازه‌ی m بر حسب $°C$ |
| ضریب وزنی اهمیت ماشین لباس‌شویی از نگاه مشتری | λ_{wm} | دمای ترجیحی ساکنین خانه‌ی h در بازه‌ی m بر حسب $°C$ |
| ضریب وزنی اهمیت لباس خشک‌کن از نگاه مشتری | λ_{cd} | دمای محیط خارج از خانه‌ی h در بازه‌ی m بر حسب $°C$ |
| ضریب وزنی اهمیت ماشین ظرف‌شویی از نگاه مشتری | λ_{dw} | زمان ترجیحی ساکنین خانه‌ی h برای شروع به کار ماشین لباس‌شویی |
| متغیرهای مثبت و پیوسته | | |
| توان مصرفی ماشین لباس‌شویی خانه‌ی h در بازه‌ی m بر حسب KW | $P_{h,m}^{wm}$ | زمان ترجیحی ساکنین خانه‌ی h برای شروع به کار لباس خشک‌کن |
| توان مصرفی لباس خشک‌کن خانه‌ی h در بازه‌ی m بر حسب KW | $P_{h,m}^{cd}$ | زمان ترجیحی ساکنین خانه‌ی h برای شروع به کار ماشین ظرف‌شویی |
| توان مصرفی دستگاه تهویه‌ی هوای خانه‌ی h در بازه‌ی m | $P_{h,m}^{ac}$ | بخش غیر قابل کنترل بار خانه‌ی h در بازه‌ی m بر حسب kW |
| توان مصرفی ماشین ظرف‌شویی خانه‌ی h در بازه‌ی m بر حسب KW | $P_{h,m}^{dw}$ | تشویقی شرکت در برنامه‌ی پاسخگویی بار در بازه‌ی اوج مصرف t بر حسب $ceuro/kWh$ |
| متغیر کمکی برای ماشین ظرف‌شویی خانه‌ی h | S_h | کل توان پیش‌بینی‌شده‌ی قابل کنترل خانه‌ی h در بازه‌ی اوج مصرف t بر حسب kW |
| متغیر کمکی دستگاه تهویه‌ی هوای خانه-ی h در بازه‌ی m | $W_{h,m}$ | |
| متغیر کمکی برای ماشین لباس‌شویی خانه‌ی h | X_h | توان مصرفی ماشین لباس‌شویی در ترتیب زمانی k_{wm} بر حسب kW |

| | | | |
|--|-------------------|---|-------------------|
| متغیر کمکی برای لباس خشک‌کن خانگی | V_h | میزان تشویقی خانه‌ی h در بازه‌ی اوج t | $pay_{h,t}^{inc}$ |
| زمان آغاز به‌کار ماشین ظرف‌شویی خانگی | $T_h^{st.dw}$ | متغیرهای گسسته | |
| زمان آغاز به‌کار لباس خشک‌کن خانگی | $T_h^{st.cd}$ | نشان‌گر زمان آغاز به‌کار ماشین لباس‌شویی خانگی h ؛ ۱ زمان آغاز و ۰ سایر زمان‌ها | $Y_{h,m}$ |
| زمان آغاز به‌کار ماشین لباس‌شویی خانگی | $T_h^{st.vvm}$ | نشان‌گر زمان آغاز به‌کار ماشین ظرف‌شویی خانگی h ؛ ۱ زمان آغاز و ۰ سایر زمان‌ها | $Z_{h,m}$ |
| دمای داخل خانه‌ی h در بازه‌ی m برحسب $^{\circ}C$ | $T_{h,m}$ | نشان‌گر زمان آغاز به‌کار لباس خشک‌کن خانگی h ؛ ۱ زمان آغاز و ۰ سایر زمان‌ها | $U_{h,m}$ |
| میزان کاهش مصرف خانگی h در بازه‌ی اوج t | $p_{h,t}^{dec}$ | نشان‌گر شرکت خانگی h در برنامه‌ی پاسخگویی بار؛ ۱ شرکت و ۰ عدم شرکت | K_h |
| کل توان مصرفی خانگی h در بازه‌ی m برحسب KW | $p_{h,m}^{total}$ | | |

مراجع

- [1] X. Wu, W. Cao, D. Wang, M. Ding, L. Yu, and Y. Nakanishi, "Demand Response Model Based on Improved Pareto Optimum Considering Seasonal Electricity Prices for Dongfushan Island," *Renewable Energy*, vol. 164, 2021, pp. 926–936.
- [2] R. Sharifi, A. Anvari-Moghaddam, S. Hamid Fathi, J. M. Guerrero, and V. Vahidinasab, "An Optimal Market-Oriented Demand Response Model for Price-Responsive Residential Consumers," *Energy Efficiency*, vol. 12, no. 3, 2019, pp. 803–815.
- [3] S. Pal, S. Thakur, R. Kumar, and B. K. Panigrahi, "A Strategical Game Theoretic Based Demand Response Model for Residential Consumers in a Fair Environment," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 97, 2018, pp. 201–210.
- [4] M. Alipour, K. Zare, H. Seyedi, and M. Jalali, "Real-Time Price-Based Demand Response Model for Combined Heat and Power Systems," *Energy*, vol. 168, 2019, pp. 1119–1127.
- [5] J. R. Vázquez-Canteli and Z. Nagy, "Reinforcement Learning for Demand Response: A Review of Algorithms and Modeling Techniques," *Applied Energy*, vol. 235, 2019, pp. 1072–1089.
- [6] Z. Tan, S. Yang, H. Lin, G. De, L. Ju, and F. Zhou, "Multi-Scenario Operation Optimization Model for Park Integrated Energy System Based on Multi-Energy Demand Response," *Sustainable Cities and Society*, vol. 53, 2020, p. 101973.
- [7] X. Yan, Y. Ozturk, Z. Hu, and Y. Song, "A Review on Price-Driven Residential Demand Response," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, 2018, pp. 411–419.
- [8] B. Parrish, P. Heptonstall, R. Gross, and B. K. Sovacool, "A Systematic Review of Motivations, Enablers and Barriers for Consumer Engagement with Residential Demand Response," *Energy Policy*, vol. 138, 2020, p. 111221.
- [9] R. Lu, S. H. Hong, and M. Yu, "Demand Response for Home Energy Management Using Reinforcement Learning and Artificial Neural Network," *IEEE Transaction on Smart Grid*, vol. 10, no. 6, 2019, pp. 6629–6639.
- [10] S. J. Darby, "Demand Response and Smart Technology in Theory and Practice: Customer Experiences and System Actors," *Energy Policy*, vol. 143, 2020, p. 111573.
- [11] H. M. Ruzbahani, A. Rahimnejad, and H. Karimipour, "Smart Households Demand Response Management with Micro Grid," in *IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2019*, pp. 1–5.
- [12] Y. Susowake, H. Masrur, T. Yabiku, T. Senjyu, A. Motin Howlader, M. Abdel-Akher, and M. Hemeida, "A Multi-Objective Optimization Approach Towards a Proposed Smart Apartment with Demand-Response in Japan," *Energies*, vol. 13, no. 1, 2020, p. 127.
- [13] Y. Liu, L. Xiao, G. Yao, and S. Bu, "Pricing-Based Demand Response for a Smart Home with Various Types

of Household Appliances Considering Customer Satisfaction,” *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 86463–86472.

[14] C. Gorria, J. Jimeno, I. Laresgoiti, M. Lezaun, and N. Ruiz, “Forecasting Flexibility in Electricity Demand with Price/Consumption Volume Signals,” *Electric Power System Research*, vol. 95, 2013, pp. 200–205.

[15] J. Zhao, S. Kucuksari, E. Mazhari, and Y. J. Son, “Integrated Analysis of High-Penetration PV and PHEV with Energy Storage and Demand Response,” *Applied Energy*, vol. 112, 2013, pp. 35–51.

[16] A. R. Jordehi, “Optimisation of Demand Response in Electric Power Systems, A Review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 103, 2019, pp. 308–319.

[17] N. Gilbraith and S. E. Powers, “Residential Demand Response Reduces Air Pollutant Emissions on Peak Electricity Demand Days in New York City,” *Energy Policy*, vol. 59, 2013, pp. 459–469.

[18] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, and F. Aminifar, “Load Commitment in a Smart Home,” *Applied Energy*, vol. 96, 2012, pp. 45–54.

[19] سید محمدباقر ساداتی، جمال مشتاق و میعادرضا شفیعی خواه، "تاثیر خودروهای الکتریکی و برنامه پاسخ‌گویی بار بر بهره‌برداری بهینه از شبکه‌ی توزیع در چهارچوب یک مدل دو سطحی جدید"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۵۳–۶۸.

[20] Asadinejad A, Tomsovic K., "Optimal Use of Incentive and Price Based Demand Response to Reduce Costs and Price Volatility", *Electric Power Systems Research*, vol.144, Mar. 2017, pp. 215-23.

[21] Xu B, Wang J, Guo M, Lu J, Li G, Han L., "A Hybrid Demand Response Mechanism Based on Real-Time Incentive and Real-Time Pricing", *Energy*. vol. 231, Sep. 2021, pp. 120940.

[22] Shakeri, M.; Amin, N.; Pasupuleti, J.; Mehbodniya, A.; Asim, N.; Tiong, S.K.; Low, F.W.; Yaw, C.T.; Samsudin, N.A.; Rokonzaman, M.; et al., "An Autonomous Home Energy Management System Using Dynamic Priority Strategy in Conventional Homes." *Energies*, vol. 13, no. 13, 2020, pp. 3312

[23] Inoue, M.; Higuma, T.; Ito, Y.; Kushiro, N.; Kubota, H. "Network Architecture for Home Energy Management System." *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 49, 2003, pp. 606–613

[24] Digital Illumination Interface Alliance. Standards. 2018. Available online: <https://www.dali-alliance.org/dali/> (accessed on 25 July 2022).

[25] Lilakiatsakun, W.; Seneviratne, A. Wireless Home Networks Based on a Hierarchical Bluetooth Scatternet Architecture. In Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Networks, ICON 2001, Bangkok, Thailand, 10–11 October 2001; pp. 481–485.

[26] Tozlu, S.; Senel, M.; Mao, W.; Keshavarzian, "A. Wi-Fi Enabled Sensors for Internet of Things: A Practical Approach." *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, 2012, pp. 134–143

[27] Khalid R, Javaid N, Rahim MH, Aslam S, Sher A. "Fuzzy Energy Management Controller and Scheduler for Smart Homes." *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. vol. 21, Mar. 2019, pp. 103-18.

[28] Ahmed MS, Mohamed A, Khatib T, Shareef H, Homod RZ, Abd Ali J., "Real Time Optimal Schedule Controller for Home Energy Management System Using New Binary Backtracking Search Algorithm." *Energy and Buildings*. vol. 138, Mar. 2017; pp. 215-27.

[29] Aslam S, Iqbal Z, Javaid N, Khan ZA, Aurangzeb K, Haider SI. Towards Efficient Energy Management of Smart Buildings Exploiting Heuristic Optimization with Real Time and Critical Peak Pricing Schemes. *Energies*. Dec. 2017; vol. 10, no. 12, pp. 2065.

[30] Javaid N, Ullah I, Akbar M, Iqbal Z, Khan FA, Alrajeh N, Alabed MS. An Intelligent Load Management System with Renewable Energy Integration for Smart Homes. *IEEE Access*. vol. 14, no. 5, June. 2017, pp. 13587-600.

[31] Yahia Z, Pradhan A. Multi-Objective Optimization of Household Appliance Scheduling Problem Considering Consumer Preference and Peak Load Reduction. *Sustainable Cities and Society*. vol. 55, Apr. 2020, pp. 102058.

[32] Fayaz M, Kim D. Energy Consumption Optimization and User Comfort Management in Residential Buildings Using a Bat Algorithm and Fuzzy Logic. *Energies*. Jan. 2018, vol. 11, no. 1, pp. 161.

[33] Kou X, Du Y, Li F, Pulgar-Painemal H, Zandi H, Dong J, Olama MM. Model-Based and Data-Driven HVAC Control Strategies for Residential Demand Response. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*. vol. 8, May. 2021, pp. 186-97.

- [34] Wan Y, Qin J, Yu X, Yang T, Kang Y. Price-Based Residential Demand Response Management in Smart Grids: A Reinforcement Learning-Based Approach. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. vol. 9, no. 1, Oct. 2021, pp. 123-34.
- [35] Essiet IO, Sun Y, Wang Z. Optimized Energy Consumption Model for Smart Home Using Improved Differential Evolution Algorithm. *Energy*. vol. 172, Apr. 2019, pp. 354-65.
- [36] Jindal A, Bhambhu BS, Singh M, Kumar N, Naik K. A Heuristic-Based Appliance Scheduling Scheme for Smart Homes. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. vol. 16, no. 5, Apr. 2019, pp. 3242-55.
- [37] Monfared HJ, Ghasemi A, Loni A, Marzband M. A Hybrid Price-Based Demand Response Program for the Residential Micro-Grid. *Energy*. vol. 185, Oct. 2019, pp. 274-85.
- [38] نیلوفر گرامی و احمد قاسمی، "مدل‌سازی مصرف انرژی در فرآیندهای تولید واحدهای صنعتی بر مبنای روش تقریب خطی تکه‌ای با هدف اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار و مشارکت در بازار انرژی و خدمات جانبی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۹، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۷۹-۱۹۳.
- [39] ابراهیم اکبری، رحمت‌اله هوشمند، مهدی قلی‌پور و معین پرستگاری، "استراتژی پیشنهاددهی بهینه مشارکت یکپارچه ذخیره‌ساز هوای فشرده و تکنولوژی برق به گاز در بازار روز پیش تحت رویکرد ترکیبی تصادفی-مقاوم"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، صفحه ۲-۱۳.
- [40] C. W. Gellings, *The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response*, River Publishers, 2020.
- [41] Meeraus A, Bussieck M, Jagla JH, Nelissen F, Westermann L. *GAMS*. Cambridge, MA: Scientific Press; 1988.
- [42] Historical & Forecast Weather Data." <https://www.weatheranalytics.com/products/atlas/> (accessed Mar. 14, 2022).
- [43] P. Sánchez-Martín, G. Sánchez, and G. Morales-España, "Direct Load Control Decision Model for Aggregated EV Charging Points," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 3, 2012, pp. 1577-1584.