

Optimal scheduling for the electrical energy consumption of residential buildings in a microgrid considering the priority of operation through IoT infrastructure

Seyed Ali Hoseini¹, Mehrdad Hojjat^{*2}, Azita Azarfar³

¹Ph.D. Candidate, Department of Electrical and Computer Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran - ¹sa.hosseini@iau-shahrood.ac.ir

²Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran - ²mehrdad.hojjat@iau-shahrood.ac.ir

³Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran - ³A.Azarfar@iau-shahrood.ac.ir

Abstract:

Demand-side response in residential homes is responsible for significant changes in their electricity consumption patterns. Such systems are implemented to shift the load from peak hours to off-peak hours. This approach not only reduces the costs of consumer's energy bills but also brings about many benefits such as postponing power system planning investments, improving network reliability, reducing unexpected outages, and so on. This paper introduces a new structure for managing the electrical energy consumption of residential homes via power aggregation by considering the consumers' priorities in a microgrid. In this situation, the performance priorities of the controllable types of equipment are first sent along with the consumption information of the total electrical equipment to the power aggregator unit through a smart meter. After gathering all information from customers, scheduling is done by a power aggregator in which network constraints are considered. Finally, management programs are sent as a series of binary codes directly from the aggregator to the smart sockets with the help of the Internet of things (IoT) infrastructure. In fact, in this project, there is no need to use home energy management systems (HEMSs) for residential homes, and only smart meters are employed to send information. In this method, information is sent directly from the central control unit to the smart sockets using the IoT technology and the process of information by another separate unit is not needed. In other words, consumption planning for all consumer's controllable devices is coordinated from the power aggregation's point of view to minimize the energy cost of all consumers by taking the constraints of the distribution network and all consumption priorities into account. In this project, an IEEE standard 15-bus microgrid with 50 households (with the average consumption pattern of a 4-person household for 3 months) is used. For each family, there are 12 electrical devices, in which two of them (dishwasher and washing machine) are considered as controllable appliances, and all planning programs are done for scheduling their operating time. The time horizon is considered 24 hours consisting of 15-min time-steps. To better understand the results in different working conditions, six different scenarios are defined in this regard and the results are compared with each other. Finally, according to the simulation results based on the time of use (TOU) tariff defined for 2019 in Iran, it can be realized that by planning the consumption of controllable types of equipment, 42.1% of peak-load duration cost and 21.8% of the total cost of electricity consumption is saved.

Keywords: Home Appliance Consumption Management, Operating Priority, Internet of Things, Genetic Algorithm.

Received: 2020 November 28

Accepted: 2021 May 15

مدیریت مصرف انرژی الکتریکی ساختمان‌های مسکونی توسط تجمیع کننده با

در نظر گرفتن اولویت بهره‌برداری از طریق اینترنت اشیا

سید علی حسینی^۱، دانشجوی دکترا، مهرداد حجت^{۲*}، استادیار، آزیتا آذر فر^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- واحد شاهرود- دانشگاه آزاد اسلامی- شاهرود- ایران

Sa.hosseini@iau-shahrood.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- واحد شاهرود- دانشگاه آزاد اسلامی - شاهرود- ایران

mehرداد.hojat@iau-shahrood.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- واحد شاهرود- دانشگاه آزاد اسلامی - شاهرود- ایران

a_azarfar@iau-shahrood.ac.ir

چکیده: پاسخ‌دهی سمت تقاضا در منازل مسکونی منجر به تغییرات عمده‌ای در الگوی مصرف انرژی الکتریکی آن‌ها می‌گردد. هدف از پیاده‌سازی چنین سیستمی، جابجایی بار از ساعت پرباری به سمت ساعت کم‌باری است. این امر با آزادسازی ظرفیت خطوط شبکه توزیع در ساعت‌های پیک، علاوه بر کاهش هزینه‌های مشترکین، مزایای متعددی از جمله در مدار نبودن نیروگاه‌های پیک، بهبود قابلیت اطمینان شبکه، کاهش خاموشی‌های غیرمنتظره و ... را نیز به همراه دارد. در این مقاله، ساختار جدیدی برای مدیریت مصرف انرژی الکتریکی منازل مسکونی از طریق تجمیع کننده توان با در نظر گرفتن اولویت مصرف تعیین شده توسط مشترک در یک ریزش‌بکه، معرفی شده است. در این رویکرد، ابتدا اولویت‌های عملکرد تجهیزات کنترل‌پذیر به همراه اطلاعات مصرفی تجهیزات برقی مشترک از طریق کنترلر هوشمند به واحد تجمیع کننده توان ارسال شده و سپس برنامه‌ریزی صورت پذیرفته به صورت رشته کدهای باینری به‌طور مستقیم از تجمیع کننده به سمت پریزهای هوشمند و به کمک فناوری اینترنت اشیا ارسال می‌گردد. بدین منظور از نرخ تعرفه سه‌زمانه سال ۱۳۹۸ در یک افق زمانی ۲۴ ساعته و طول گام زمانی ۱۵ دقیقه‌ای بهره گرفته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی بر روی یک سیستم ۱۵ باسه استاندارد IEEE می‌توان گفت که با برنامه‌ریزی مصرف تجهیزات کنترل‌پذیر ۲۱٫۸ درصد در هزینه کل مصرف انرژی برق صرفه‌جویی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مدیریت مصرف تجهیزات خانگی، تجمیع کننده توان، اولویت بهره‌برداری، اینترنت اشیا، الگوریتم ژنتیک.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول: مهرداد حجت

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود- ایران

۱- مقدمه

شبکه هوشمند، شبکه‌ای از فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی است که ارتباط دوطرفه‌ای بین مصرف کننده و شبکه فراهم می‌سازد و شامل ارتباطات، تولید توزیع شده، امنیت سایبری، فناوری‌ها و زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته است (Hu, et al. 2018; Ejaz, et al. 2017; Hussain, et al. 2018). در این راستا، مدیریت بار در سمت تقاضا سهم عمده‌ای در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از شبکه توزیع ایفا می‌نماید (Shakeri, et al 2018; Lu, X, et al. 2017; Yoon, S. H. Kim, et al 2018). یک سیستم مدیریت انرژی ساختمان چندمنظوره را برای مدیریت انرژی کارآمد پیشنهاد می‌کنند. با استفاده از مدل تخمین انرژی پیشنهادی، سالانه ۵٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌شود. در (Zhang, c.q, et al. 2015)، یک الگوریتم سیستم مدیریت انرژی برای جابجایی بارهای برنامه پذیر در یک خانه مسکونی ارائه می‌دهد که راحتی مصرف کننده را برآورده می‌کند و قبض برق مصرف کننده را با استفاده از طرح قیمت گذاری چند زمانه به حداقل می‌رساند.

در (Al-Ali, et al. 2017)، از تعامل دستگاه هوشمند خانگی شخصی با مازول جمع‌آوری داده‌ها به کمک فناوری اینترنت اشیا (IOT) استفاده شده است. این امر باعث می‌شود تا مصرف کنندگان بتوانند دستگاه‌ها را به صورت محلی رصد و کنترل کنند و تولید هزینه‌های آنلاین را با استفاده از برنامه وب موبایل انجام دهند. در (Babaei Toktam, et al. 2015)، نویسندگان تحقیقات خود را با در نظر گرفتن نسبت بار پیک به بار متوسط (PAR) و راحتی کاربر و با استفاده از منطق فازی و تکنیک‌های بهینه‌سازی اکتشافی انجام داده‌اند. نتایج شبیه‌سازی، کاهش قابل توجهی را در مقدار انرژی مصرفی، هزینه‌ها و نسبت PAR نشان می‌دهد. به منظور برنامه‌ریزی مصرف انرژی توسط کنترل کننده خانگی، مقایسه‌ای بین کارکرد الگوریتم‌های اکتشافی شامل الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها در (Tang, et al. 2017) صورت پذیرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تمام مدل‌های طراحی شده برای مدیریت انرژی به طور قابل توجهی عمل نموده و می‌توانند به عنوان یک راه حل مقرون به صرفه برای افزایش پایداری شبکه هوشمند مورد استفاده واقع شوند. در (Basit, et al. 2017)، چارچوبی برای برنامه‌ریزی وسایل خانه در ساعت‌های زمان بندی محدود با حداقل هزینه و پیچیدگی محاسباتی کم و عدم ایجاد اختلال در عملکرد دستگاه‌های غیر زمان بندی ارائه شده است.

با توجه به مرور مطالعات صورت گرفته در این حوزه، مشخص می‌شود که تا به حال مدیریت یکپارچه مجموعه‌ای از منازل مسکونی از طریق یک واحد کنترل کننده مرکزی نصب شده در تجمیع کننده توان و با کمک بستر اینترنت اشیا به صورت جدی مورد بررسی و ارزیابی قرار نگرفته است. در این مقاله، رویکرد نوینی ارائه می‌شود که میزان بهای

مصرفی انرژی الکتریکی مشترکین را با در نظر گرفتن اولویت‌های تعیین شده بر روی تجهیزات کنترل پذیر و قیود حاکم بر روی شبکه توزیع، به حداقل می‌رساند. این مدیریت از طریق ارسال رشته کدهای باینری با کمک IOT به پریزهای منازل مسکونی صورت می‌پذیرد.

در مدل سازی مقاله پیش رو، به منظور به کارگیری اولویت‌دهی مصرف تجهیزات کنترل پذیر و افزایش میزان رفاه مشترکین، مفهومی به نام ارزش بار از دست رفته (VOLL) تعریف شده است که مقدار آن برای هر وسیله کنترل پذیر، توسط کاربر تعیین می‌گردد. با استفاده از این پارامتر، می‌توان به راحتی نظر مشترک را در مورد میزان اهمیت استفاده از وسایل کنترل پذیر در تابع هدف اعمال نمود. در این شرایط، اطلاعات میزان مصرف انرژی وسایل الکتریکی مشترکین به همراه اولویت بندی انتخاب شده آن‌ها از طریق کنترل‌های هوشمند به تجمیع کننده توان ارسال می‌شود. برای این منظور از نرخ تعرفه سه‌زمانه سال ۱۳۹۸ در یک افق برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته با پله‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای برای مدیریت انرژی روز بعد استفاده شده است.

ساختار مقاله بدین شرح است: مدل سازی سیستم مدیریت انرژی در بخش ۲ بیان می‌شود. در بخش ۳ تابع هدف بیان می‌گردد. مدل سازی سیستم مورد مطالعه و نتایج شبیه‌سازی، به ترتیب در بخش‌های ۴ و ۵ ارائه می‌گردد و در انتها نتایج شبیه‌سازی بیان می‌شود.

۲- مدل سازی سیستم مدیریت انرژی

در ریزشبکه تحت مطالعه، فرض می‌شود که تمامی مشترکین از زیرساخت IOT بهره می‌برند. با استفاده از چنین زیرساختی تمامی اطلاعات الگوی مصرف انرژی وسایل کنترل پذیر و غیر کنترل پذیر به کنترلر هوشمند ساختمان ارسال شده و سپس، تمامی نیازهای مصرفی مشترکین و اولویت‌های آن‌ها در کنار محدودیت‌های زمانی و شرایط رفاهی به تجمیع کننده منتقل می‌شود که شکل (۱) شمایی کلی از آن را نشان می‌دهد. در تجمیع کننده توان، پردازش بر روی اطلاعات انجام شده و برنامه‌ریزی صورت گرفته در جهت به حداقل رساندن هزینه بهای انرژی با در نظر گرفتن شرایط اولویت بندی تعیین شده توسط مشترکین و محدودیت‌های حاکم بر روی شبکه توزیع، به صورت رشته کد باینری، برای پریزهای منازل ارسال می‌گردد. این پیام‌ها متشکل از مجموعه‌ای از صفرها و یک‌ها است که به ترتیب مبین وضعیت خاموش یا روشن شدن وسایل کنترل پذیر در هر پله زمانی می‌باشند.

در این مقاله، یک متغیر باینری (به نام x) برای تعیین وضعیت تجهیزات کنترل پذیر تعریف می‌شود. اگر وضعیت این متغیر برای وسیله‌ای ۱ باشد، یعنی وسیله مورد نظر در آن گام زمانی مجاز به عملکرد می‌باشد و اگر صفر باشد، طبق نظر سیستم مدیریت انرژی

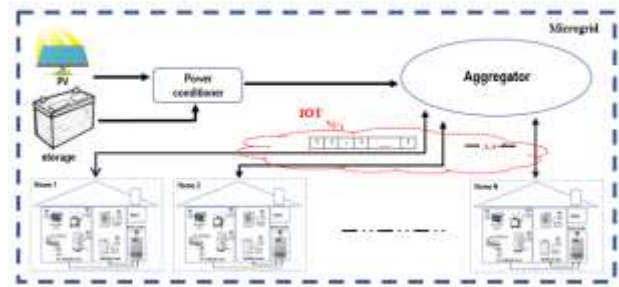
کم، متوسط و بالا برای مشترک می‌باشد و با انتخاب هر کدام از این سه مورد، میزان اهمیت کارکرد وسیله موردنظر از دیدگاه کاربر تعیین می‌گردد. به‌طور مثال، اگر مشترک یکی از سه اولویت مطرح‌شده را برای وسیله کنترل‌پذیر خود تعیین کند، مدیر انرژی واقع در تجمیع کننده توان مجاز است برنامه‌ریزی مصرف انرژی را فقط برای ساعات‌هایی انجام دهد که نرخ تعرفه انرژی، کمتر از میزان VOLL تعریف‌شده در آن اولویت باشد. اگر به هر دلیلی، از جمله رعایت قیود مصرف انرژی در بازه‌های زمانی یا محدودیت‌های اعمال‌شده در استفاده از شبکه توزیع، وسیله کنترل‌پذیر موردنظر در آن ساعات روشن نگردد تا پایان افق برنامه‌ریزی اجازه استفاده از آن تجهیز الکتریکی وجود ندارد. با انتخاب اولویت‌های بالاتر، بازه‌های برنامه‌ریزی کارکرد وسیله کنترل‌پذیر گسترش می‌یابد ولی از طرفی ممکن است هزینه بهای انرژی مصرفی نیز افزایش یابد. وضعیت اضطراری (اولویت Emergency)، برای شرایطی تعریف می‌شود که مشترک نیاز ضروری به کارکرد وسیله در لحظه موردنظرش را دارد که در این شرایط نرخ بهای انرژی هیچ‌گونه محدودیتی برای کارکرد وسیله ایجاد نمی‌کند.

۳- بیان تابع هدف

با توجه به تابع هدف ارائه شده در (Rastegar, et al. 2016)، عملیات کمینه‌سازی روز بعد توسط تابع هدف (O.F) معرفی‌شده در رابطه (۱) اجرا می‌شود تا کل هزینه روزانه را به حداقل برساند. البته در این مرجع، بهینه‌سازی فقط بر اساس درخواست یک‌مسکونی صورت پذیرفته است در حالی که در مقاله پیش رو، بهینه‌سازی تمام منازل مسکونی موجود به‌صورت هم‌زمان در یک ریزشبهه با در نظر گرفتن تعرفه سه‌زمانه و از طریق تجمیع کننده توان و قیود حاکم بر شبکه توزیع از طریق به‌کارگیری IOT و ارسال مستقیم دستورات از کنترل‌کننده مرکزی به پریزها صورت می‌پذیرد.

در رابطه (۲)، مقدار هزینه انرژی مصرفی و در رابطه (۳) هزینه قابلیت اطمینان برای پیاده‌سازی نحوه مشارکت اولویت‌بندی مصرف وسایل کنترل‌پذیر مدل‌سازی می‌شود. در این رابطه، VOLL بیان‌گر میزان ارزش کارکرد وسیله کنترل‌پذیر از نگاه مشترک است که این ضریب به دلیل پروپونیت شدن مقادیر، واحد ندارد. به‌بیان‌دیگر، کاربر می‌تواند با انتخاب مقدار بالایی برای VOLL، زمان کارکرد وسیله کنترل‌پذیر را خودش در دست بگیرد که احتمالاً منجر به افزایش بهای انرژی الکتریکی مصرفی ماهانه می‌گردد. از سویی دیگر، با انتخاب مقادیر پایین برای VOLL، کاربر می‌تواند مدیریت بازه زمانی کارکرد وسیله کنترل‌پذیر را در اختیار تجمیع کننده قرار دهد تا با برنامه‌ریزی بهینه، نه تنها هزینه انرژی مصرفی مشترک کمینه گردد، بلکه با آزادسازی ظرفیت خطوط شبکه در ساعات پیک، قابلیت اعتماد و پایداری شبکه توزیع نیز بهبود یابد.

$$\min O.F = EC + RC \quad (1)$$



شکل (۱): تبادل اطلاعات بین تجمیع کننده و مشترکین جهت مدیریت انرژی مصرفی.

واقع در واحد تجمیع کننده توان، تجهیز کنترل‌پذیر نباید در این گام زمانی عمل نماید. مقدار این متغیر باینری برای همه وسایل کنترل‌پذیر

توسط سیستم کنترل‌کننده مرکزی واقع در تجمیع کننده تعیین می‌گردد. به‌بیان‌دیگر، میزان تعرفه بهای انرژی الکتریکی تعیین‌شده از طرف شرکت برق و میزان اولویت‌های کارکرد تجهیزات کنترل‌پذیر تعیین‌شده از طرف مشترک، به همراه الگوی مصرف کلیه وسایل الکتریکی به‌عنوان ورودی به سیستم کنترل‌کننده مرکزی واقع در تجمیع کننده توان اعمال‌شده و سپس، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، در راستای حداقل سازی هزینه انرژی مصرفی، برنامه‌ریزی مصرف کلیه وسایل انجام پذیرفته و نتایج به‌صورت رشته کدهای باینری به سمت پریزهای هوشمند ارسال می‌گردد.

قابل ذکر است که در سیستم مدیریت انرژی خانگی (Hems) فقط وسایل الکتریکی یک‌مسکونی بدون در نظر گرفتن شرایط شبکه و صرفاً از دیدگاه یک مشترک صورت می‌پذیرد ولی در این مقاله، برای کلیه منازل مسکونی در یک ریزشبهه، برنامه‌ریزی مصرف تجهیزات به‌صورت یکپارچه و هماهنگ و از دیدگاه تجمیع کننده توان و با در نظر گرفتن قیود شبکه توزیع صورت می‌پذیرد و برنامه‌ریزی به‌صورت متمرکز در راستای حداقل سازی هزینه انرژی همه مشترکین و با در نظر گرفتن تمام اولویت‌ها انجام می‌پذیرد.

۱-۲- ارزش بار از دست‌رفته

به‌منظور افزایش سطح رفاه مشترکین، مفهومی به نام ارزش بار از دست‌رفته (VOLL) تعریف می‌شود که مقدار آن برای هر وسیله کنترل‌پذیر، توسط کاربر تعیین می‌گردد. با استفاده از این پارامتر، به‌راحتی می‌توان اولویت‌بندی مدنظر مشترک را در نحوه استفاده از انرژی توسط وسایل کنترل‌پذیر مدل‌سازی کرد. برای این پارامتر، ۳ وضعیت شامل وضعیت‌های مقرون‌به‌صرفه، برنامه‌ریزی‌شده و اضطراری تعریف می‌شود. در وضعیت مقرون‌به‌صرفه (اولویت Economic)، وسیله کنترل‌پذیر در کل افق برنامه‌ریزی روشن نشده و برای زمانی طراحی می‌شود که کاربر تمایلی به استفاده از آن وسیله در روز آینده ندارد. وضعیت برنامه‌ریزی‌شده که شامل اولویت‌های اندک (Low)، متوسط (Medium) و بالا (High) است که به ترتیب بیان‌گر اهمیت

$\beta_{a,r}$: انتهای بازه مجاز عملکرد وسیله a ام برای مشترک r

$$EC = \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \sum_{a \in AC} x_{a,r}^t \cdot \gamma^t \cdot l_{a,r}^t \quad (2)$$

۴- مدل سازی سیستم مورد مطالعه

$$RC = \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \sum_{a \in AC} (1 - x_{a,r}^t) \cdot VOLL_{a,r} \cdot \gamma^t \cdot l_{a,r}^t \quad (3)$$

۴-۱- مدل سازی بار الکتریکی

برای هر واحد مسکونی این مقاله، از ۱۲ تجهیز مختلف خانگی استفاده می‌شود که در جدول (۱) نوع وسایل و مقدار توان مصرفی آن‌ها نشان داده می‌شود. برای مطالعه میزان مصرف انرژی، از الگوی مقدار مصرف انرژی الکتریکی یک خانواده ۴ نفره در مدت زمان سه ماه استفاده می‌شود (Fatih Issi, Orhan Kaplan, 2018). از اطلاعات جدول (۱) برای تعیین میزان مصرف انرژی ماهانه مشترکین در ماه‌های مختلف سال استفاده می‌شود.

جدول (۱): توان مصرفی وسایل الکتریکی (Fatih Issi, Orhan Kaplan, 2018).

نام تجهیز	نرخ مصرف (WH)	نام تجهیز	نرخ مصرف (WH)
یخچال	۳۶	کتری برقی	۲۴۰۰
ظرف شویی	۷۰۰	لباس شویی	۱۰۲۰
تلویزیون	۲۰۰۰	ماشین تست	۱۸۰۰
اجاق گاز	۷۹۰	هود	۱۴۵
اتو	۲۶۰۰	کامپیوتر	۲۵
سشوار	۲۰۰۰	پرینتر	۳۰۰

۴-۲- فناوری اینترنت اشیا

در مقاله پیش رو، از بستر مخابراتی اینترنت اشیا برای نظارت و کنترل توان مصرفی مصرف‌کنندگان در یک ریزشبکه استفاده می‌شود. هر وسیله برقی کنترل‌پذیر در ساختمان به یک پریز برق متصل می‌شود که هر پریز برق به یک حس‌گر هوشمند مجهز است. این حس‌گر هوشمند قادر است مقدار ولتاژ و جریان مصرفی را اندازه‌گیری و اطلاعات جمع‌آوری شده را برای کنترل هوشمند ساختمان ارسال نماید. کنترل هوشمند ساختمان پس از جمع‌آوری اطلاعات از تمامی حس‌گرها، آن‌ها را به واحد مدیریت انرژی واقع در تجمیع کننده توان موجود در منطقه ارسال می‌کند. واحد کنترل و نظارت تجمیع کننده توان، فرمان‌های کنترلی خود را در قالب پیام‌های باینری برای کنترل انرژی مصرفی به عملگر موجود در هر پریز برق ارسال می‌کند. تمامی ارتباطات مذکور در بستر اینترنت اشیا انجام می‌شود.

۴-۳- تعرفه انرژی مصرفی

در این مقاله، ۲۴ ساعت شبانه‌روز به سه بازه زمانی تفکیک شده و برای هر کدام یک نرخ متفاوت تعریف می‌شود. دوره اوج بار از ساعت ۲ عصر

که پارامترهای بکار رفته در رابطه‌های (۱) - (۳) به شرح زیر است:

$x_{a,r}^t$: کد باینری مبین وضعیت عملکرد وسیله a ام در پله زمانی t ام برای مشترک r ام

γ^t : نرخ تعرفه در پله زمانی t ام

$l_{a,r}^t$: انرژی مصرفی وسیله a در پله زمانی t ام برای مشترک r

$voll_{a,r}$: ارزش بار از دست‌رفته وسیله a ام برای مشترک r ام

r : نمایش‌دهنده مشترک

a : نمایش‌دهنده وسیله کنترل‌پذیر

A_c : کلیه وسایل کنترل‌پذیر

T : افق برنامه‌ریزی

R : تعداد کلیه مشترکین

در این مقاله، قیود در نظر گرفته شده مطابق رابطه‌های (۴) - (۶) تعریف می‌شود. در رابطه (۴)، مجموع انرژی موردنیاز برای عملکرد وسایل کنترل‌پذیر a ام از مصرف‌کننده r همواره باید برابر مقدار مجاز تعیین شده باشد. طبق رابطه (۵)، باید میزان حداقل و حداکثر انرژی مصرفی در هر گام زمانی برای هر وسیله کنترل‌پذیر مشخص شود. لازم به ذکر است که برای هر وسیله کنترل‌پذیر یک بازه عملکرد زمانی توسط مشترک تعریف می‌گردد که طبق رابطه (۶)، عملکرد وسیله کنترل‌پذیر در خارج از این بازه زمانی نمی‌تواند برنامه‌ریزی شود.

$$\sum_{t=\alpha_{a,r}}^{\beta_{a,r}} l_{a,r}^t = E_{a,r} \quad (4)$$

$$l_{a,r}^{min} \leq l_{a,r}^t \leq l_{a,r}^{max} \quad (5)$$

$$\alpha_{a,r} \leq l_{a,r} \leq \beta_{a,r} \quad (6)$$

که پارامترهای بکار رفته در رابطه‌های (۴) - (۶) به شرح زیر است:

$E_{a,r}$: کل انرژی وسیله a ام برای مشترک r ام

$l_{a,r}^{min}$: حداقل انرژی مصرفی وسیله a ام برای مشترک r ام

$l_{a,r}^{max}$: حداکثر انرژی مصرفی وسیله a ام برای مشترک r ام

$\alpha_{a,r}$: ابتدای بازه مجاز عملکرد وسیله a ام برای مشترک r

لباسشویی، ماشین ظرفشویی و اتو می‌باشد. در واقع با مدیریت انرژی این دستگاه‌ها، می‌توان درصد قابل‌ملاحظه‌ای از توان مصرفی مشترکین را از ساعات پرباری به ساعات کم‌باری جابجا نمود.

۵- نتایج شبیه‌سازی

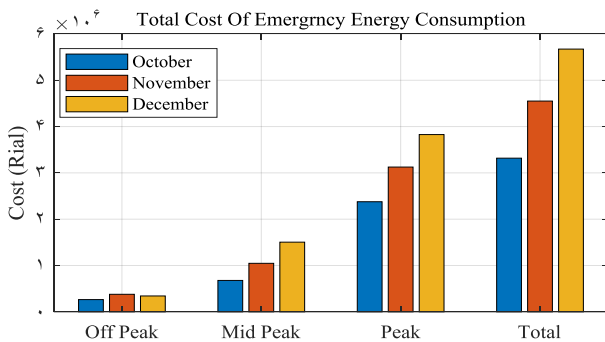
در مدل‌سازی بکار رفته، مفهومی به نام ارزش بار ازدست‌رفته تعریف شده که مقدار آن برای هر وسیله کنترل‌پذیر، توسط کاربر تعیین می‌گردد. با استفاده از این پارامتر، می‌توان نظر مشترک را در مورد نحوه استفاده از انرژی الکتریکی برای استفاده در وسایل کنترل‌پذیر مدل‌سازی کرد. جدول (۲) سطوح این اولویت‌بندی را نشان می‌دهد. در هر منزل مسکونی برای یافتن بهترین حالت ممکن جهت روشن کردن وسایل کنترل‌پذیر بین ساعات کم‌باری تا پرباری از الگوریتم ژنتیک استفاده شده که وضعیت عملکرد تجهیزات را در ۹۶ پله زمانی مشخص می‌کند.

جدول (۲): سطوح اولویت‌بندی به همراه مقادیر VOLL.

مقدار VOLL	نوع اولویت
100	Economic
400	Low
800	Medium
1200	High
2000	Emergency

۵-۱- سناریو ۱: ۱۰۰٪ اولویت اضطراری

در این سناریو، فرض می‌شود که همه ۵۰ خانه مسکونی موجود در ریزشبه A از وضعیت اضطراری (اولویت Emergency) استفاده می‌کنند و هیچ خانه‌ای از وضعیت‌های مقرون‌به‌صرفه و برنامه‌ریزی شده استفاده نکنند. شکل (۳)، نتایج شبیه‌سازی مقدار مجموع هزینه مصرف انرژی در سه ماه از سال برای شرایط کم‌باری، میان‌باری، پیک‌بار و مجموع توان ماهانه را نشان می‌دهد.



شکل (۳): مجموع هزینه مصرف انرژی اضطراری در دوره سه‌ماهه (سناریو ۱).

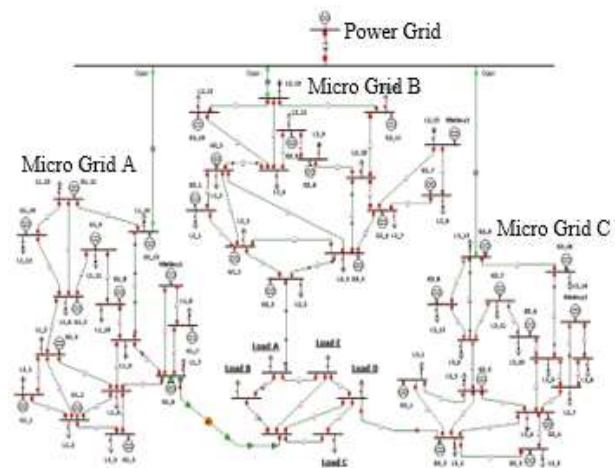
در مدیریت مصرف انرژی یک‌منزل مسکونی با استفاده از وضعیت اضطراری (اولویت Emergency)، روشن شدن وسیله کنترل‌پذیر در

تا ۷ شب است که بالاترین قیمت انرژی برای آن منظور می‌گردد. دوره زمانی بین ۷ صبح تا ۲ عصر و ۷ عصر تا ۱۱ شب به‌عنوان دوره‌های میان‌باری قلمداد شده و یک قیمت میانگین برای این دوره‌ها تعریف می‌شود. در طول دوره کم‌باری، یعنی بازه بین ۱۱ شب تا ۷ صبح، قیمت انرژی در کمترین حالت خود منظور می‌شود و از مدل تعرفه‌بندی سال ۱۳۹۸ استفاده می‌گردد. در این شرایط، نرخ بهای هر کیلووات ساعت انرژی مصرفی برای ساعات کم‌باری برابر ۲۶۲ ریال، برای ساعات میان‌باری برابر ۵۲۴ ریال و برای ساعات پرباری برابر ۱۰۴۸ ریال منظور می‌شود.

۴-۴- مشخصات شبکه مورد استفاده

سیستم مورد مطالعه، یک ریزشبه استاندارد است که در شکل (۲) نشان داده شده و مشخصات این ریزشبه در (Logenthiran, et al. 2011) بیان شده است. در این مقاله، فرض می‌شود که انرژی مصرفی ۵۰ واحد مسکونی در ریزشبه A از طریق تجمیع کننده توان مدیریت می‌گردد.

برای هر واحد مسکونی، سه دستگاه الکتریکی شامل ماشین ظرفشویی، ماشین لباسشویی و اتو به‌عنوان بارهای کنترل‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. عملکرد ماشین ظرفشویی و ماشین لباسشویی در حالت برنامه‌ریزی شده توسط کنترل‌کننده مرکزی واقع در تجمیع کننده توان مدیریت شده و بازه زمانی به‌کارگیری اتو نیز در اختیار مشترک قرار می‌گیرد. با توجه به مشخصات بارهای کنترل‌پذیر فرض می‌شود که ماشین لباسشویی ۲ بار و ماشین ظرفشویی ۳ بار در هفته مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج میزان مصرف متوسط انرژی در سه ماه اکتبر، نوامبر و دسامبر محاسبه می‌گردد.



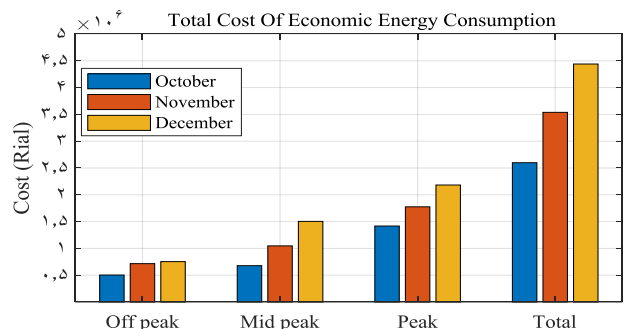
شکل (۲): ریزشبه تحت مطالعه [۱۵].

طبق مطالعات صورت گرفته بر داده‌های انرژی مصرفی مشترکین، در ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر به ترتیب در حدود ۴۰٪، ۲۷٪ و ۲۴٪ از انرژی مصرفی متعلق به سه دستگاه کنترل‌پذیر ماشین

هر ساعات از شبانه‌روز امکان پذیر است. به عبارت دیگر، این حالت هیچ محدودیتی جهت عملکرد وسیله کنترل پذیر ندارد.

۲-۵- سناریو ۲: ۱۰۰٪ اولویت مقرون به صرفه

در این سناریو، فرض می‌شود که همه ۵۰ خانه مسکونی موجود در ریزشبه A از وضعیت مقرون به صرفه (اولویت Economic) استفاده می‌کنند. در این سناریو، هیچ خانه‌ای از وضعیت اضطراری و برنامه ریزی شده استفاده نمی‌کند. شکل (۴)، نتایج شبیه‌سازی مقدار مجموع هزینه مصرف انرژی برای شرایط کم‌باری، میان‌باری، پیک بار و مجموع توان ماهانه را نشان می‌دهد. در مدیریت مصرف انرژی خانه مسکونی در وضعیت مقرون به صرفه (اولویت Economic)، روشن شدن وسیله کنترل پذیر جهت جلوگیری از مصرف انرژی در ساعات پیک مصرف امکان پذیر نیست. به عبارت دیگر، این حالت باعث عدم عملکرد وسیله کنترل پذیر می‌شود.



شکل (۴): مجموع هزینه مصرف انرژی مقرون به صرفه در دوره سه‌ماهه (سناریو ۲).

با توجه به نتایج شکل‌های (۳) و (۴)، در حالت پیک بار ۴۲,۱ درصد و در هزینه کل ۲۱,۸ درصد در هزینه برق صرفه جویی می‌شود. در جدول (۳) مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از سناریوهای اول و دوم انجام می‌شود. قابل ذکر است که اعداد داخل جدول، هزینه مصرفی در پیک بار و هزینه کل برق مصرفی مشترکین را برای دو وضعیت اضطراری و مقرون به صرفه در ماه‌های مختلف سال (اکتبر-نوامبر-دسامبر) برحسب ریال نشان می‌دهد.

جدول (۳): مقایسه هزینه مصرف انرژی (ریال) برای پیک بار و کل.

ماه	سناریوهای ۱ و ۲	هزینه پیک بار	هزینه کل
اکتبر	اضطراری	۲,۳۷۶,۸۶۴	۳,۳۱۷,۸۰۰
	مقرون به صرفه	۱,۴۱۷,۴۲۰	۲,۵۹۸,۲۵۴
نوامبر	اضطراری	۲,۱۲۵,۸۰۰	۴,۵۵۰,۹۰۰
	مقرون به صرفه	۱,۷۷۵,۸۰۰	۳,۵۳۸,۴۰۰
دسامبر	اضطراری	۳,۸۲۷,۱۰۰	۵,۶۷۳,۲۰۰
بر	مقرون به صرفه	۲,۱۸۲,۶۰۰	۴,۴۳۹,۸۰۰

نتایج جدول (۳)، نشان می‌دهد که در ماه اکتبر با تغییر حالت مصرف کننده از وضعیت اضطراری به مقرون به صرفه، در پیک بار معادل ۴۰,۳ درصد و در هزینه کل، ۲۱,۶ درصد در هزینه برق ماهیانه صرفه جویی می‌شود.

در ماه نوامبر در پیک بار، ۴۳,۱ درصد و در هزینه کل، ۲۲ درصد و همچنین در ماه دسامبر در پیک بار ۴۳ درصد و در هزینه کل ۲۱,۷ درصد در هزینه برق ماهیانه صرفه جویی می‌شود.

۳-۵- سناریو ۳: ۸۰٪ اضطراری + ۲۰٪ مقرون به صرفه

در این سناریو، فرض می‌شود که در ریزشبه A، تعداد ۴۰ خانه از وضعیت اضطراری (اولویت Emergency) و ۱۰ خانه از وضعیت مقرون به صرفه (اولویت Economic) استفاده کنند و هیچ خانه‌ای از وضعیت برنامه ریزی شده استفاده نکند.

۴-۵- سناریو ۴: ۲۰٪ اضطراری + ۸۰٪ مقرون به صرفه

در این سناریو، فرض می‌شود که در ریزشبه A، در مصرف انرژی، تعداد ۱۰ خانه از وضعیت اضطراری (اولویت Emergency) و ۴۰ خانه از وضعیت مقرون به صرفه (اولویت Economic) استفاده نمایند. نتایج حاصل از اجرای سناریوهای سوم و چهارم در جدول (۴) نشان داده می‌شود. نتایج، نشان می‌دهد که با تغییر حالت مصرف کننده از وضعیت اضطراری به مقرون به صرفه، هزینه پیک بار در ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر به ترتیب ۲۶,۳، ۲۸,۳ و ۲۸,۱ درصد و برای هزینه کل به ترتیب ۱۳,۶، ۱۴ و ۱۳,۶ درصد صرفه جویی به عمل می‌آید.

جدول (۴): مقایسه هزینه مصرف انرژی (ریال) برای پیک بار و کل.

ماه	سناریوهای ۳ و ۴	هزینه پیک بار	هزینه کل
اکتبر	اضطراری	۲,۱۸۴,۹۸۴	۳,۱۷۳,۹۵۰
	مقرون به صرفه	۱,۶۰۹,۳۰۶	۲,۷۴۲,۱۷۰
نوامبر	اضطراری	۲,۸۵۵,۷۶۰	۴,۳۴۸,۳۷۰
	مقرون به صرفه	۲,۰۴۵,۷۶۰	۳,۷۴۰,۸۷۰
دسامبر	اضطراری	۳,۴۹۸,۲۲۰	۵,۴۲۶,۴۵۰
	مقرون به صرفه	۲,۵۱۲,۱۳۰	۴,۶۸۶,۴۰۰

۵-۵- سناریو ۵: ۵۰٪ اضطراری + ۲۰٪ مقرون به صرفه

مقرون به صرفه + ۳۰٪ برنامه ریزی شده

در این سناریو، فرض می‌شود که در ریزشبه A، تعداد ۲۵ خانه مسکونی از وضعیت اضطراری (اولویت Emergency)، ۱۰ خانه از وضعیت مقرون به صرفه (اولویت Economic) و ۱۵ خانه باقیمانده از وضعیت برنامه ریزی شده استفاده می‌کنند. در وضعیت برنامه ریزی شده، مشترکین برای ماشین ظرف شویی از اولویت بالا (High) و برای ماشین لباس شویی از اولویت متوسط (Medium) استفاده می‌کنند که

وضعیت اضطراری به مقرون به صرفه، حدود ۱،۵ تا ۲٪ در هزینه‌های کل انرژی مصرفی مشترکین صرفه جویی می‌گردد.

۶- نتیجه گیری

با کارگیری سیستم پاسخ‌دهی سمت تقاضا در منازل مسکونی، تغییرات عمده‌ای در الگوی مصرف انرژی الکتریکی مشترکین ایجاد می‌گردد. هدف از پیاده‌سازی چنین سیستمی، نه تنها حداقل سازی بهای انرژی مصرفی مشترکین می‌باشد، بلکه با جابجایی بار از ساعت‌های پیک بار به ساعت‌های کم باری، شرایط بهره‌برداری از شبکه توزیع بهبود یافته و سطح قابلیت اطمینان شبکه ارتقا می‌یابد. برای این منظور سه وضعیت: ۱- مقرون به صرفه، ۲- برنامه‌ریزی شده و ۳- اضطراری برای استفاده از وسایل الکتریکی خانگی تعریف شد. در وضعیت مقرون به صرفه، وسیله در طول روز غیرفعال می‌شود. در وضعیت برنامه‌ریزی شده، بر طبق بازه زمانی تعیین شده توسط مشترک، مدیریت استفاده از وسیله بر عهده تجمیع کننده قرار می‌گیرد. در حالت اضطراری هم بدون توجه به نرخ تعرفه، کنترل وسیله کاملاً در اختیار مصرف کننده قرار داده می‌شود.

در مقاله پیش رو، عملیات ارسال، انتقال و دریافت رشته کدها با استفاده از فناوری اینترنت اشیا (IOT) صورت پذیرفت. در حقیقت، میزان انرژی مصرفی تجهیزات الکتریکی و اولویت بندی توسط مشترک به واحد کنترل کننده مرکزی واقع در تجمیع کننده ارسال می‌شود. سپس، با پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک بر روی تمام داده‌ها و بررسی قیود حاکم بر شبکه توزیع و کارکرد تجهیزات معرفی شده، برنامه‌ریزی مصرف کلیه وسایل انجام شده و نتایج به کمک بستر IOT به پریزهای نصب شده در منازل ارسال می‌گردد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت با برنامه‌ریزی مصرف تجهیزات کنترل پذیر به طور متوسط در حالت پیک بار، ۴۲،۱ درصد و در هزینه کل، ۲۱،۸ درصد در هزینه برق صرفه جویی به عمل آورد.

مراجع

- Al-Ali, A.R. Zuakernan, I.A. Rashid, M. Gupta, R. and Alikarar, M. "A smart home energy management system using IoT and big data analytics approach", IEEE Trans. Consum. Electron. vol. 63, no. 4, pp. 426-434, 2017.
- Babaei, Toktam, Hamid Abdi, Chee Peng Lim, and Saeid Nahavandi. "A study and a directory of energy consumption data sets of buildings", Energy and Buildings 94 (2015): 91-99.
- Basit, A. Sidhu, G. A. S. Mahmood, A. and Gao, F. "Efficient and autonomous energy management techniques for the future smart homes", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 2, pp. 917-926, 2017.
- Ejaz, W, Naeem, M, Shahid, A, Anpalagan, A, and Jo, M. "Efficient energy management for the internet of things in smart cities", IEEE Com. Magazine, vol. 55, no. 1, pp. 84-91, 2017.

استفاده از این اولویت‌ها برای ماشین ظرفشویی و ماشین لباسشویی به واقعیت نزدیک تر است.

۵-۶- سناریو ۶: ۲۰٪ اضطراری + ۵۰٪ مقرون به صرفه + ۳۰٪ برنامه‌ریزی شده

در این سناریو، فرض می‌شود که در ریزش‌بکه A، تعداد ۱۰ خانه مسکونی از وضعیت اضطراری (اولویت Emergency)، ۲۵ خانه از وضعیت مقرون به صرفه (اولویت Economic) و ۱۵ خانه باقیمانده با وضعیت برنامه‌ریزی شده تشکیل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی سناریوهای پنجم و ششم در جدول (۵) به نشان داده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر حالت مصرف کننده از وضعیت اضطراری به مقرون به صرفه، هزینه پیک بار در ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر به ترتیب ۱۴،۳، ۱۵،۶ و ۱۵،۵ درصد و برای هزینه کل به ترتیب ۷، ۷، ۲ و ۷ درصد در هزینه برق صرفه جویی می‌شود.

جدول (۵): مقایسه هزینه مصرف انرژی (ریال) برای پیک بار و کل.

ماه	سناریوهای ۵ و ۶	هزینه پیک بار	هزینه کل
اکتبر	اضطراری	۲,۰۰۳,۷۲۶	۳,۰۶۳,۴۷۰
	مقرون به صرفه	۱,۷۱۵,۸۹۰	۲,۸۴۷,۶۱۷
نوامبر	اضطراری	۲,۵۸۴,۳۹۰	۴,۱۸۴,۱۷۰
	مقرون به صرفه	۲,۱۷۹,۳۹۰	۳,۸۸۰,۴۷۰
دسامبر	اضطراری	۳,۱۶۸,۹۶۰	۵,۲۳۶,۰۵۰
	مقرون به صرفه	۲,۶۷۵,۵۷۰	۴,۸۶۶,۰۰۰

همان‌طور که بیان شد، هدف این مقاله حداقل سازی مصرف انرژی مشترکین در ساعات پیک بار است. برای افزایش سطح رفاه مشترکین، پارامتری به نام ارزش بار از دست رفته (VOLL) تعریف شده است. مشترکین از این طریق می‌توانند میزان تمایل به مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار را مشخص نمایند. در واقع با انتخاب هر چه کمتر مقدار این پارامتر، هزینه‌های انرژی مصرفی کمتر و جابجایی بار بیشتری از ساعت‌های پیک بار به سمت ساعت‌های کم باری صورت می‌پذیرد ولی در عین حال سطح رفاه مشترک کمتر شده و برنامه‌ریزی کارکرد وسایل کنترل پذیر کاملاً در اختیار تجمیع کننده قرار می‌گیرد.

در این مقاله، سناریوهایی تعریف شده است که بر طبق آن‌ها ۵۰٪، ۸۰٪ و ۱۰۰٪ مشترکین از وضعیت اضطراری به وضعیت مقرون به صرفه تغییر حالت داده‌اند. طبق نتایج مشاهده می‌شود که در این سه حالت، میزان هزینه بار پیک مصرفی به ترتیب حدود ۱۵٪، ۲۷٪ و ۴۱٪ کاهش می‌یابد. از طرفی با مقایسه نتایج به دست آمده از هزینه‌های کل انرژی مصرفی، مشخص می‌شود که هزینه بار کل مصرفی مشترکین به ترتیب در حدود ۷٪، ۱۴٪ و ۲۱٪ کاهش می‌یابد. در واقع می‌توان گفت که به ازای هر ۱۰٪ تغییر حالت از

- Fatih Issi; Orhan Kaplan. "The Determination of Load Profiles and Power Consumptions of Home Appliances", *Energies* 2018, 11, 607; doi:10.3390/en11030607.
- Hussain, H. M, Javaid, N, Iqbal, S, Hasan, Q. U, Aurangzeb, K, and Alhussein, M. "An Efficient Demand Side Management system with a New Optimized Home Energy Management Controller in Smart Grid", *Energies*, vol. 11, no. 1, pp. 190, 2018.
- Hu, M, Xiao, J. W, Cui, S. C, and Wang, Y. W, "Distributed real-time demand response for energy management scheduling in smart grid", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 99, pp. 233-245, 2018.
- Logenthiran, T. Srinivasan, D. Khambadkone, A.M. "Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system", *Electr. Power Syst. Res.* 2011, 81, 138–148.
- Lu, X, Zhou, K, Chan, F. T, and Yang, S. "Optimal scheduling of household appliances for smart home energy management considering demand response", *Natural Hazards*, vol. 88, no. 3, pp. 1639-1653, 2017.
- Rastegar, Mohammad, Mahmud Fotuhi-Firuzabad, and Hamidreza Zareipour. "Home energy management incorporating operational priority of appliances", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 74 (2016): 286-292.
- Shakeri, M, Shayestegan, M, Reza, S. S, Yahya, I, Bais, B, Akhtaruzzaman, K, Sopian, K, and Amin, N. "Implementation of a novel home energy management system (HEMS) architecture with solar photovoltaic system as supplementary source", *Renewable Energy*, vol. 125, pp. 108-120, 2018.
- Tang, Samuel, Vineetha Kalavally, Kok Yew Ng, and Jussi Parkkinen. "Development of a prototype smart home intelligent lighting control architecture using sensors onboard a mobile computing device", *Energy and buildings* 138 (2017): 368-376.
- Yoon, S. H. Kim, S. Y. Park, G. H. Kim, Y. K. Cho, C. H. and Park, B. H. "Multiple power-based building energy management system for efficient management of building energy, *Sustainable Cities and Society*", vol. 42, pp. 462-470, 2018.
- Zhang, c.q. He, b.j. Tang, and y.m. wei. "china's energy consumption in the building sector: a life cycle approach", *energy build.* vol. 94, pp. 240-251, 2015.

زیر نویس‌ها

- ^۱ Internet of Things
- ^۲ Peak To Average Ratio
- ^۳ Value of Lost Load
- ^۴ Home Energy Management System
- ^۵ Object Function