

Optimizing Smart Building Energy Consumption through Integrated Thermal and Electrical Energy Management with Demand-Side Control

Alireza Moradi^{1*}, Seyyed Mohammad Reza Hashemi², Maryam Faridpour³

1. Assistant professor, Department of Electrical Engineering, Mahdishahr Branch, Islamic Azad University, Mahdishahr, Iran. *Corresponding Author, alireza.moradi@iau.ac.ir
2. Ph.D, Department of Computer Engineering, Skill National University, Tehran, Iran.
3. MSc, Department of Computer Engineering, Skill National University, Tehran, Iran.

Abstract

Introduction: Smart buildings equipped with communication and control infrastructure offer the potential to optimize energy management, leading to increased productivity and significant cost reductions. These buildings typically consist of multiple residential units with common electrical appliances like washing machines and TVs. The energy management system must not only supply electrical needs but also provide thermal energy for heating and sanitation. Modern smart buildings often integrate various energy sources like photovoltaic systems, combined heat and power (CHP) units, boilers, alongside electrical and thermal storage devices. A key challenge in this field is the coordinated management of both thermal and electrical energy to minimize building operating costs. This paper proposes a comprehensive model for this purpose.

Method: The model's convexity allows for finding the global optimal solution using the YALMIP toolbox and mathematical solvers like CPLEX. To validate the model, a simulated smart building was created in MATLAB, where the proposed model was solved with two particle swarm algorithms and YALMIP.

Results: To validate the model, a simulated smart building was created in MATLAB, where the proposed model was solved with two particle swarm algorithms and YALMIP. The results demonstrate the superiority of YALMIP in finding the optimal solution.

Discussion: The energy management system must not only supply electrical needs but also provide thermal energy for heating and sanitation. Modern smart buildings often integrate various energy sources like photovoltaic systems, combined heat and power (CHP) units, boilers, alongside electrical and thermal storage devices. A key challenge in this field is the coordinated management of both thermal and electrical energy to minimize building operating costs. This paper proposes a comprehensive model for this purpose. The model considers flexible scheduling of electrical equipment like vacuum cleaners, along with the operation of the boiler, CHP unit, and storage devices, all aimed at minimizing energy costs. The model ensures that all photovoltaic system output is consumed within the building, and all thermal and electrical demands are met efficiently without load shedding. The model's convexity allows for finding the global optimal solution using the YALMIP toolbox and mathematical solvers like CPLEX. To validate the model, a simulated smart building was created in MATLAB, where the proposed model was solved with two particle swarm algorithms and YALMIP. The results demonstrate the superiority of YALMIP in finding the optimal solution.

Keywords: Simultaneous Energy Management, Smart Building, YALMIP, Photovoltaic System, Boiler, CHP.



بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان هوشمند از طریق مدیریت یکپارچه انرژی حرارتی و الکتریکی با کنترل سمت تقاضا

دوره پنجم، بهار ۱۴۰۳
شماره اول، صص: ۵۷-۷۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳

علیرضا مرادی^{۱*}، سید محمدرضا هاشمی^۲، مریم فریدپور^۳

۱. استادیار، گروه مهندسی برق، واحد مهندیسهر، دانشگاه آزاد اسلامی، مهدیسهر، ایران. * (نویسنده مسئول) alireza.moradi@iau.ac.ir
۲. دکتر، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه ملی مھارت، تهران، ایران. smr.hashemi@shahroodut.ac.ir
۳. کارشناس ارشد، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه ملی مھارت، تهران، ایران. maryam.faridpour68@gmail.com

چکیده: ساختمان‌های هوشمند مجهز به زیرساخت‌های ارتباطی و کنترلی، پتانسیل بهینه‌سازی مدیریت انرژی را ارائه می‌دهند که منجر به افزایش بهره‌وری و کاهش قابل توجه هزینه‌ها می‌شود. این ساختمان‌ها معمولاً از چندین واحد مسکونی با وسایل برقی رایج مانند ماشین لباسشویی و تلویزیون تشکیل شده‌اند. سیستم مدیریت انرژی نه تنها باید نیازهای الکتریکی را تأمین کند، بلکه باید انرژی حرارتی را برای گرمایش و سرویس بهداشتی نیز تأمین کند. ساختمان‌های هوشمند مدرن اغلب منابع انرژی مختلف مانند سیستم‌های فتوولتائیک، واحدهای حرارتی و برق ترکیبی (CHP)، بویلرها، در کنار دستگاه‌های ذخیره‌سازی الکتریکی و حرارتی را ادغام می‌کنند. یک چالش کلیدی در این زمینه، مدیریت هماهنگ انرژی حرارتی و الکتریکی برای به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی ساختمان است. این مقاله یک مدل جامع برای این منظور پیشنهاد می‌کند. این مدل برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر تجهیزات الکتریکی مانند جاروبرقی را به همراه عملکرد دیگ بخار، واحد CHP و دستگاه‌های ذخیره‌سازی در نظر می‌گیرد که هدف همگی آن‌ها به حداقل رساندن هزینه‌های انرژی است. این مدل تضمین می‌کند که تمام خروجی سیستم فتوولتائیک در داخل ساختمان مصرف می‌شود و تمام نیازهای حرارتی و الکتریکی بدون حذف بار به طور مؤثر برآورده می‌شود. مدل محدب، امکان یافتن راه‌حل بهینه سراسری را با استفاده از جعبه ابزار YALMIP و حل‌کننده‌های ریاضی مانند CPLEX می‌دهد. برای اعتبار سنجی مدل، یک ساختمان هوشمند شبیه‌سازی شده در MATLAB ایجاد شد که در آن مدل پیشنهادی با دو الگوریتم ازدحام ذرات و YALMIP حل شد. نتایج نشان‌دهنده برتری YALMIP در یافتن راه‌حل بهینه است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت همزمان انرژی، ساختمان هوشمند، YALMIP، سیستم فتوولتائیک، بویلر، CHP.

یک ساختمان هوشمند مسکونی از چندین واحد مسکونی تشکیل شده که هرکدام از آن‌ها دارای وسایل و تجهیزات برقی خانگی از قبیل تلویزیون و ماشین لباسشویی هستند. همچنین، فرض بر این است که هر واحد دارای یک خودروی برقی نیز می‌باشد که هرروزه فرآیند شارژ آن در پارکینگ ساختمان انجام می‌شود [۱]. علاوه بر CHP، بویلر نیز در ساختمان نصب شده تا در کنار CHP انرژی حرارتی کل ساختمان را تأمین کند. جهت ذخیره حرارت از ذخیره‌ساز حرارتی و جهت ذخیره برق از ذخیره‌سازهای الکتریکی در ساختمان‌های هوشمند نیز استفاده می‌شود تا در مواقع اضطراری یا حساس از انرژی ذخیره‌شده در آن‌ها استفاده نمود. همچنین اخیراً استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک رواج فراوانی یافته و سیستم‌های فتوولتائیک در بام ساختمان‌ها نصب می‌شود [۲]. ساختمان‌های هوشمند به شبکه توزیع برق نیز متصل است و می‌توانند برق از شبکه خریداری کرده و یا برق تولیدی خود را به شبکه بفروشند [۳]. با توجه به پیشرفت‌های فناوری‌های برق همراه با افزایش منابع انرژی توزیع شده (DER ها) در سیستم‌های قدرت، سیستم دادوستد انرژی (TE) که با تکنولوژی اینترنت مورد استفاده قرار می‌گیرد، کمک مناسبی برای مدیریت شبکه‌های برق است. برای ایجاد یک محیط مناسب برای مصرف‌کنندگان و بهره‌برداری بهینه از شبکه، TE به دنبال اهداف مهم از قبیل متعادل کردن عرضه و تقاضا، کاهش هزینه انرژی مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان، مدیریت هوشمند مصرف انرژی در شبکه و غیره می‌باشد [۴]. در مراجع [۴-۱]، به مدیریت مصرف انرژی الکتریکی و حرارتی در ساختمان هوشمند می‌پردازند که هدف نهایی آن‌ها مواردی همچون متعادل کردن عرضه و تقاضا، کاهش هزینه انرژی مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان، مدیریت هوشمند مصرف انرژی و فروش انرژی به شبکه در مواقع ضروری می‌باشد. در مرجع [۵] از ساختمان‌های هوشمند برای به حداکثر رساندن استفاده از منابع تولید پراکنده (انرژی‌های تجدیدپذیر بادی و خورشیدی) بهره‌گرفته که هدف آن مدیریت سمت تقاضا و مدیریت انرژی می‌باشد

در مرجع [۶] از مدیریت انرژی در سمت تقاضا به عنوان ابزاری استفاده می‌کند که هدف آن کنترل توان الکتریکی مشترکین، کاهش هزینه‌های انرژی ساختمان، همزمان با مدیریت انرژی الکتریکی و حرارتی می‌باشد. در مرجع [۷] یک برنامه‌ریزی جامع به منظور مدیریت انرژی صورت گرفته که می‌تواند سرعت پاسخگویی تقاضا را برای مشترکین افزایش دهد و باعث کاهش هزینه‌های مصرف انرژی مشترکین، افزایش قابلیت اطمینان سیستم، عملکرد اقتصادی و تعادل فرکانس سیستم شود. در مرجع [۸]، مدیریت انرژی خانه‌های هوشمند در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط فرمول‌بندی شده است. در این مرجع، مدیریت سمت تقاضا همراه با حضور خودروهای برقی در کنار تجهیزات برقی خانگی در نظر گرفته شده‌اند. تابع هدف شامل مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی است. در مرجع [۹-۱۰]، به بررسی و ارائه

راهکاری برای بهبود توسعه و پیشرفت تکنولوژی شبکه‌های هوشمند پرداخته‌اند. همچنین راهکارهای برای مدیریت تبادل اطلاعات میان یک میکروگرید و ساختمان‌های هوشمند ارائه شده است. در مرجع [۱۱]، به بررسی و تجزیه و تحلیل مدیریت سمت تقاضا، برنامه‌های پاسخگویی بار و مدیریت تولیدات پراکنده در مدیریت ساختمان‌های هوشمند پرداخته شده است. در [۱۲] مدل‌سازی مسئله مدیریت انرژی ساختمان با در نظر گرفتن قیمت دینامیکی (پویای) برق در حضور منابع تجدیدپذیر در مقیاس کوچک و خودروهای برقی انجام شده و سیستم مدیریت انرژی خانه (HEM) مسئولیت برنامه‌ریزی عملکردی آن‌ها را بر عهده دارد. در این مقاله برای حل مسئله بیان شده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) استفاده شده که به نتایج رضایت‌بخشی نیز دست یافته است. در مرجع [۱۳]، با عنوان سیستم مدیریت انرژی خانه هوشمند به منظور بهبود پاسخ تقاضا، یک راه‌حل یکپارچه برای پیش‌بینی و مدیریت تقاضای برق پیشنهاد شده است. در این مقاله پاسخ تقاضا برای بارهای خانگی به وسیله برنامه‌ریزی دینامیکی وسایل قابل کنترل در هر واحد مسکونی، توسعه یافته است. در مرجع [۱۴]، از داده‌های واقعی به منظور مدیریت شارژ خودروهای برقی استفاده کرده است. در این پژوهش، انرژی الکتریکی و توان مصرفی با در نظر گرفتن شارژ کنترل‌نشده وسیله نقلیه (بدون مدیریت سمت تقاضا) در هر زمان از روز در حالت پارک شده در خانه و شارژ کنترل نشده فرصت طلبانه در هر مکانی تعیین می‌گردد. در مرجع [۱۵] مدیریت سمت تقاضا به عنوان یکی از قابلیت‌های کلیدی ریز شبکه‌ها بررسی شده است و از الگوریتم بازی (GA) برای بهینه‌سازی آن استفاده شده است. در این پژوهش، برای ارتباط دوطرفه میان مشترکین و اپراتور از ساختار رادیویی با قابلیت اطمینان بالا است. در [۱۶] الگوریتم گرگ خاکستری برای برنامه‌ریزی چندساله توسعه انتقال از نگاه جذب سرمایه‌گذار خصوصی با لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها و خازن سری ثابت استفاده شده است. در [۱۷] روشی هوشمند برای شناسایی جریان خطا از اشباع ترانسفورماتور جریان در ترانسفورماتورهای قدرت استفاده شده است. در [۱۸] تخمین شاخص فیدرهای فلیکر با روش ترکیبی نمونه‌برداری - شبیه‌سازی ارائه شده است. در [۱۹]، تقسیم توان بین اینورترهای ریز شبکه جزیره‌ای با اصلاح روش کنترل آفتی ارائه شده است.

در این مقاله، یکی از چالش اصلی که مدیریت هماهنگ انرژی حرارتی و الکتریکی باهدف کاهش هزینه‌های انرژی ساختمان مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل ارائه شده در این مقاله، برنامه‌ریزی استفاده از تجهیزات برقی انعطاف‌پذیر، مانند جاروبرقی که زمان استفاده از آن‌ها قابل جابجایی است، به صورت هماهنگ با برنامه‌ریزی عملکردی بویلر، CHP، ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی؛ باهدف کاهش هزینه‌های انرژی ساختمان محاسبه می‌شود. همچنین، تمام تولید سیستم فتوولتائیک جذب ساختمان شده و تمامی تقاضای حرارتی و الکتریکی ساختمان، بدون نیاز به حذف بار، به گونه‌ای اقتصادی، تأمین می‌شود. مدل ارائه شده محدب است و با استفاده از توبلاکس YALMIP

۳. ارائه مدل ریاضی

همان‌گونه که ذکر شد، هدف کاهش هزینه‌های تأمین انرژی الکتریکی و حرارتی ساختمان هوشمند است. تابع هدف OF در رابطه (۱) تعریف شده و بیانگر هزینه انرژی ساختمان است؛ که این هزینه‌ها عبارتند از هزینه خرید برق از شبکه ($Cost_{Buy}$)، هزینه سوخت و تعمیر و نگهداری CHP ($Cost_{CHP}$)، هزینه تعمیر و نگهداری ذخیره‌ساز حرارتی ($Cost_{TS}$)، هزینه سوخت و تعمیر و نگهداری بویلر ($Cost_{Boiler}$)، هزینه تعمیر و نگهداری ذخیره‌ساز الکتریکی ($Cost_{ES}$) می‌باشد.

$$OF = Cost_{Buy} + Cost_{CHP} + Cost_{Boiler} + Cost_{TS} + Cost_{ES} \quad (1)$$

اجزای سازنده تابع هدف ارائه شده در ادامه با جزئیات بیان می‌شوند.

۱ / ۳ . هزینه خرید برق از شبکه

$Cost_{Buy}$ هزینه خرید برق از شبکه توزیع در کل زمان برنامه‌ریزی است [20].

$$Cost_{Buy} = \sum_{t=1}^T \delta \times (\lambda_t^{Grid} \times I_t) \quad (2)$$

که λ_t^{Grid} قیمت برق در ساعت t برحسب I_t (Rial/kWh) میزان انرژی خریداری شده از شبکه در ساعت t برحسب kWh و δ طول گام هر بازه زمانی برحسب ساعت (h) است که بدون از دست دادن کلیت δ برابر ۱ ساعت (h) در نظر گرفته شده است.

۲ / ۳ . هزینه سوخت و تعمیر و نگهداری CHP

در این مقاله، فرض شده است که سوخت فسیلی مورد استفاده در CHP و بویلر از نوع گاز طبیعی است. $Cost_{CHP}$ بیانگر مجموع هزینه سوخت و بهره‌برداری از CHP برحسب ریال است [۳]:

$$Cost_{CHP} = \sum_{t=1}^T \delta \left(\mu_{CHP} \cdot P_{chp,t} + Price_{gas} \left(\frac{u_t}{\eta_{CHP}} \right) \right) \quad (3)$$

که $P_{chp,t}$ میزان توان الکتریکی تولید شده توسط CHP در زمان t بر μ_{CHP} ضریب هزینه تعمیر و نگهداری CHP برحسب $\$/kW$ (kWh) و η_{CHP} بازده الکتریکی CHP است. η_{CHP} به کارایی CHP بستگی دارد و نشان می‌دهد چه میزان از انرژی حرارتی ایجاد شده در اثر سوختن گاز طبیعی به برق تبدیل می‌شود.

$Price_{gas}$ هزینه گاز طبیعی برحسب $\$/kWh$ است. همانند [۳]، جهت محاسبه هزینه سوخت از واحد (Rial/kWh) استفاده شده که نشان می‌دهد بابت تولید ۱ kWh انرژی حرارتی از گاز طبیعی باید چند ریال هزینه پرداخت کرد.

و استفاده از حل‌کننده‌های ریاضی، مانند CPLEX، می‌توان پاسخ بهینه سراسری آن را یافت. برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده، یک ساختمان هوشمند در محیط MATLAB شبیه‌سازی شده و مدل پیشنهادی با دو الگوریتم ازدحام پرندگان (PSO) و تولباکس YALMIP حل شده است.

۲. مدیریت انرژی پیشنهادی

روش پیشنهادی جهت مدیریت همزمان انرژی حرارتی و الکتریکی یک ساختمان هوشمند، با در نظر گرفتن مدیریت تقاضا، ارائه شده است که منظور از مدیریت سمت تقاضا، تعیین زمان بهینه استفاده از این تجهیزات برقی است. هدف از مدیریت انرژی، کاهش هزینه خرید برق، هزینه سوخت و تعمیر و نگهداری بویلر و CHP و هزینه‌هایی تعمیر و نگهداری ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی در ساختمان می‌باشد. ساختمان هوشمند با به‌کارگیری مدیریت انرژی پیشنهادی در این مقاله، می‌تواند هزینه‌های خود را به‌نحوی مؤثر کاهش دهد؛ زیرا در این مقاله، تمام قیود و محدودیت‌های فنی و عملیاتی مرتبط با تجهیزات الکتریکی و حرارتی، از قبیل محدوده تولید بویلر و CHP، محدودیت شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها، محدودیت زمان استفاده از تجهیزات برقی، حداکثر توان قابل تبادل با شبکه و غیره در نظر گرفته شده است.

ساختمان هوشمند در نظر گرفته شده در این مقاله، یک آپارتمان مسکونی است که به شبکه توزیع برق متصل است. این ساختمان دارای یک سیستم فتوولتائیک، CHP، بویلر، ذخیره‌ساز الکتریکی و ذخیره‌ساز حرارتی است. برق تولید شده توسط CHP و سیستم فتوولتائیک صرف تأمین نیاز داخلی ساختمان می‌شود و مازاد آن به شبکه توزیع فروخته می‌شود. بویلر، CHP و سیستم فتوولتائیک نیاز به تعمیر و نگهداری دارند که باید هزینه تعمیر و نگهداری آن‌ها در نظر گرفته شود. همچنین، CHP و بویلر از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند که باید هزینه سوخت آن‌ها نیز در برنامه‌ریزی لحاظ شود. در این روش هنگام برنامه‌ریزی، باید بازه زمانی مجاز استفاده از تجهیزات برقی نیز رعایت شود تا ساکنین ساختمان دچار مشکل نشوند.

علاوه بر انرژی الکتریکی، ساختمان به انرژی حرارتی نیز نیاز دارد که صرف مصارف حرارتی ساختمان از قبیل مصارف بهداشتی، مانند آب گرم حمام، خواهد شد. CHP هنگام تولید برق، حرارت نیز تولید می‌کند و تعیین برنامه‌ریزی بهینه جهت استفاده از آن منوط به در نظر گرفتن همزمان برنامه‌ریزی حرارتی و الکتریکی ساختمان است. زیرا برنامه‌ریزی‌ها باید به‌گونه‌ای انجام شوند که تعادل الکتریکی و حرارتی ساختمان در هر لحظه حفظ شود و مجموع تولید انرژی حرارتی (یا الکتریکی) با مجموع مصرف انرژی حرارتی (الکتریکی) برابر باشد. برنامه‌ریزی مدیریت سمت تقاضا و روش بهره‌برداری از تجهیزات الکتریکی و حرارتی موجود در ساختمان، مانند بویلر و CHP باید به‌گونه‌ای هماهنگ تعیین شوند تا هزینه انرژی ساختمان حداقل شود. در ادامه، تابع هدف و مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده بیان خواهد شد.

۳.۳. هزینه سوخت و تعمیر و نگهداری بویلر

Cost_{Boiler} مجموع هزینه سوخت و تعمیر و نگهداری بویلر را برحسب ریال بیان می کند که طبق رابطه (۴) محاسبه می شود [۳]:

$$Cost_{Boiler} = \sum_{t=1}^T \delta \left(\mu_{Boiler} \cdot H_{boiler,t} + Price_{gas} \left(\frac{x_t}{\eta_{Boiler}} \right) \right) \quad (4)$$

در رابطه فوق، $H_{boiler,t}$ میزان توان حرارتی تولید شده توسط بویلر در زمان t ، $\mu_{Boiler,t}$ ضریب هزینه تعمیر و نگهداری بویلر برحسب (Rial/kWh) ، η_{Boiler} بازده بویلر و $Price_{gas}$ نیز قیمت گاز طبیعی برحسب (Rial/kWh) است. بازده بویلر نشان می دهد چه میزان از انرژی حرارتی تولید شده در اثر احتراق گاز طبیعی توسط بویلر به مدار حرارتی ساختمان تزریق می شود.

۴.۳. هزینه تعمیر و نگهداری ذخیره ساز حرارتی

Cost_{TS} هزینه تعمیر و نگهداری ذخیره ساز حرارتی را نشان می دهد. این هزینه در رابطه (۵) تعریف شده است.

$$Cost_{TS} = \sum_{t=1}^T \mu_{TS} \times \delta \times (H_{dis,t} + H_{ch,t}) \quad (5)$$

که $P_{dis,t}$ و $P_{ch,t}$ به ترتیب توان حرارتی شارژ و دشارژ شده توسط ذخیره ساز حرارتی در ساعت t برحسب kW هستند. μ_{TS} ضریب هزینه تعمیر و نگهداری ذخیره ساز حرارتی برحسب (Rial/kWh) است.

۵.۳. هزینه تعمیر و نگهداری ذخیره ساز الکتریکی

هزینه تعمیر و نگهداری ذخیره ساز الکتریکی (به اختصار ES)، تحت متغیر Cost_{ES}، در رابطه (۶) تعریف شده است [۳].

$$Cost_{ES} = \sum_{t=1}^T \mu_{ES} \times \delta \times (P_{dis,t} + P_{ch,t}) \quad (6)$$

که $P_{dis,t}$ و $P_{ch,t}$ به ترتیب توان شارژ و دشارژ ذخیره ساز الکتریکی در زمان t برحسب kW هستند. μ_{ES} نیز ضریب هزینه تعمیر و نگهداری ذخیره ساز الکتریکی برحسب (Rial/kWh) است.

۴. معرفی قیود فنی حاکم بر شبکه

هنگام مدیریت انرژی باید قیود فنی مرتبط با تجهیزات، مانند محدوده تولید CHP و سایر قیود عملیاتی، مانند محدوده تبادل توان با شبکه ی توزیع و غیره، رعایت شوند. در ادامه، قیود مسئله مدیریت انرژی که

هنگام کمینه سازی تابع هدف رابطه (۱) باید رعایت شوند ذکر شده است. این محدودیت ها عبارتند از:

۱.۴. محدودیت های CHP

طبق رابطه (۷)، میزان توان الکتریکی تولیدی CHP در ساعت t باید کوچک تر یا مساوی حداکثر ظرفیت تولید الکتریکی CHP (C^{CHP}) باشد.

$$P_{chp,t} \leq C^{CHP} \quad \forall t \quad (7)$$

CHP، در ساعت t ام به صورت همزمان با تولید $P_{chp,t}$ کیلووات برق $H_{chp,t}$ کیلووات حرارت تولید می کند. برنامه ریزی صورت گرفته برای آن برحسب میزان برق ($P_{chp,t}$) است و $H_{chp,t}$ با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می شود [۳].

$$H_{chp,t} = P_{chp,t} \times z_{chp} \quad \forall t \quad (8)$$

که $H_{chp,t}$ حرارت تولید شده توسط CHP در ساعت t و ضریبی از توان الکتریکی $P_{chp,t}$ است. z_{chp} نسبت گرما به برق CHP و یک پارامتر ثابت است [۳].

۲.۴. محدودیت تولید بویلر

میزان توان حرارتی تولیدی بویلر در هر زمان، باید کوچک تر یا مساوی حداکثر توان حرارتی آن باشد [۳]. C^B حداکثر توان حرارتی قابل تولید توسط بویلر برحسب kW در هر ساعت است.

$$H_{boiler,t} \leq C^B \quad \forall t \quad (9)$$

۳.۴. قیود ذخیره ساز الکتریکی

ذخیره ساز الکتریکی می تواند انرژی الکتریکی را در خود ذخیره و در مواقع نیاز انرژی ذخیره شده را تحویل دهد. انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز باید در محدوده مجاز آن بوده و کمتر یا بیشتر از حد نامی تعیین شده نباشد. این محدودیت در رابطه (۱۰) تعریف شده است.

$$S_{Min}^E \leq S_t^E \leq S_{Max}^E \quad (10)$$

که S_t^E میزان انرژی موجود در ذخیره ساز الکتریکی در زمان t برحسب kWh، S_{Max}^E حداکثر انرژی مجاز قابل ذخیره سازی و S_{Min}^E حداقل انرژی مجاز قابل ذخیره سازی در ذخیره ساز است. رعایت قید رابطه (۱۰)، باعث می شود تا ذخیره ساز آسیب نبیند و طول عمر آن کاهش نیابد. رابطه میان S_t^E با توان شارژ و دشارژ ذخیره ساز الکتریکی در رابطه (۱۱) تعریف شده است [۳].

$$S_t^E = S_{t-1}^E + \eta^E \delta P_{cha,t} - \frac{\delta P_{dis,t}}{\eta^E} \quad \forall t \quad (11)$$

در رابطه فوق، η^E بازده ذخیره ساز الکتریکی است.

۵/۴. قید تعادل توان الکتریکی

در هر ساعت، باید میزان توان الکتریکی مصرف‌شده در ساختمان با میزان توان تولیدشده در آن برابر باشد. قید تعادل توان الکتریکی ساختمان هوشمند در رابطه (۲۲) تعریف‌شده‌است.

$$P_t = I_t + P_{chp,t} + P_t^{PV} + P_{dis,t} - P_{cha,t} \quad \forall t \quad (22)$$

که P_t ، توان الکتریکی موردنیاز ساختمان در ساعت t است. P_t^{PV} نیز میزان تولید سیستم فتوولتائیک در ساعت t است. P_t^{PV} یک پارامتر غیرقابل کنترل است و به میزان تابش خورشید در ساعت t وابسته است. P_t به زمان به کارگیری وسایل برقی موجود در ساختمان وابسته است و با استفاده از مدیریت سمت تقاضا، طبق رابطه (۲۳) قابل کنترل است.

$$P_t = \sum_{i=1}^N P_i^1 \times u_{i,t}^1 \quad (23)$$

که N تعداد کل تجهیزات الکتریکی موجود در ساختمان، P_i^1 توان مصرفی تجهیز الکتریکی نام برحسب kW و $u_{i,t}^1$ یک متغیر باینری است که وضعیت اتصال به برق تجهیز نام در زمان t ام را نشان می‌دهد. اگر $u_{i,t}^1$ برابر ۱ باشد، تجهیز نام در ساعت t در مدار است و توان P_i^1 را مصرف می‌کند. در غیراین صورت، تجهیز نام در ساعت t در مدار نیست.

۶.۴. قیود مدیریت سمت تقاضا

در این مقاله، با تعیین زمان مناسب برای شروع به کار هر یک از کارهایی که به انرژی الکتریکی نیاز دارند، سمت تقاضا مدیریت می‌شود. برخی از تجهیزات از قبیل سیستم روشنایی قابل تغییر نیستند و به زمان تاریک شدن هوا وابسته است. به عنوان مثال، در یک روز تابستان، حدود ساعت ۸ خورشید غروب کرده و نیاز است تا لامپ‌های داخل منزل روشن شوند. در این حالت نمی‌توان زمان روشن شدن لامپ‌ها را جابجا کرد. برخی از تجهیزات الکتریکی مانند یخچال باید ۲۴ ساعته به برق متصل باشد. مدیریت سمت تقاضا در مورد روشنایی و یخچال معنایی ندارد. ولی به منظور انجام مدیریت سمت تقاضا، زمان شروع به کار تجهیزاتی مانند ماشین لباسشویی و یا اتو را می‌توان کنترل کرد. برای اینکه طرح پیشنهادی قابل اجرا باشد، یک پنجره زمانی مجاز برای هر تجهیز الکتریکی در نظر گرفته می‌شود که زمان استفاده از آن تجهیز باید در این پنجره زمانی باشد.

$$u_{i,t}^1 = 0 \text{ if } t < t_{Min}^i \text{ or } t > t_{Max}^i \quad \forall i \\ = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

که N تعداد تجهیزات الکتریکی قابل کنترل t_{Min}^i و t_{Max}^i نیز به ترتیب حداقل و حداکثر زمان مجاز برای استفاده از تجهیز نام هستند. به عنوان مثال، اگر پنجره زمانی مجاز برای جاروبرقی بین ساعت ۹ تا ۱۷ باشد، آنگاه t_{Min}^i و t_{Max}^i برای i (جاروبرقی) به ترتیب برابر ۹ و ۱۷ خواهد بود.

برای جلوگیری از حذف بار، باید مجموع زمان استفاده از هر تجهیز الکتریکی برابر با مدت زمان در نظر گرفته شده برای استفاده مرسوم از آن در طول شبانه‌روز باشد. این قید در رابطه (۲۵) آمده‌است.

محدودیت دیگری که در ذخیره‌سازهای الکتریکی باید در نظر گرفته شود، محدودیت توان شارژ و دشارژ است. میزان توان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی در هر ساعت، باید کوچک‌تر یا مساوی حداکثر توان نامی ذخیره‌ساز الکتریکی در حالت شارژ (C^E) و یا دشارژ (D^E) باشد تا ذخیره‌ساز الکتریکی آسیب نبیند.

$$0 \leq P_{dis,t} \leq D^E \times U_{dis,t}^E \quad \forall t \quad (12)$$

$$0 \leq P_{cha,t} \leq C^E \times U_{cha,t}^E \quad \forall t \quad (13)$$

$U_{dis,t}^E$ و $U_{cha,t}^E$ متغیرهای باینری هستند که وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی در ساعت t را کنترل می‌کنند. اگر $U_{cha,t}^E$ برابر ۱ باشد ذخیره‌ساز در حالت شارژ و اگر $U_{dis,t}^E$ برابر ۱ باشد، ذخیره‌ساز در حالت دشارژ قرار می‌گیرد. با توجه به این که ذخیره‌ساز در یک لحظه نمی‌تواند به طور همزمان شارژ و دشارژ شود. این قید در رابطه (۱۴) آمده‌است.

$$U_{dis,t}^E + U_{cha,t}^E \leq 1 \quad \forall t \quad (14)$$

انرژی موجود در ذخیره‌ساز در پایان دوره برنامه‌ریزی (S_T^E) باید با مقدار انرژی موجود در ذخیره‌ساز در ابتدای دوره برنامه‌ریزی (S_0^E) برابر باشد تا از انتقال انرژی از یک روز به روز دیگر جلوگیری شود.

$$S_0^E = S_T^E \quad (15)$$

۴.۴. قیود ذخیره‌ساز حرارتی

قیود ذخیره‌ساز حرارتی نیز مشابه قیود ذخیره‌ساز حرارتی است که در رابطه (۱۶) تا (۲۱) آمده است [۳].

$$S_t^{TH} = S_{t-1}^{TH} + \eta^{TH} \delta H_{cha,t} - \frac{\delta H_{dis,t}}{\eta^{TH}} \quad \forall t \quad (16)$$

$$S_{Min}^T \leq S_t^T \leq S_{Max}^T \quad (17)$$

$$0 \leq H_{dis,t} \leq D^{TH} \times U_{dis,t}^{TH} \quad \forall t \quad (18)$$

$$0 \leq H_{cha,t} \leq C^{TH} \times U_{cha,t}^{TH} \quad \forall t \quad (19)$$

$$S_0^{TH} = S_T^{TH} \quad (20)$$

$$U_{dis,t}^{TH} + U_{cha,t}^{TH} \leq 1 \quad \forall t \quad (21)$$

که S_t^{TH} میزان انرژی موجود در ذخیره‌ساز حرارتی در ساعت t برحسب kWh است. $H_{dis,t}$ و $H_{cha,t}$ به ترتیب توان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز در زمان t برحسب kW است. D^{TH} و C^{TH} نیز حداکثر توان مجاز دشارژ و شارژ ذخیره‌ساز حرارتی برحسب kW هستند. η^{TH} نیز بازده ذخیره‌ساز حرارتی است. $U_{dis,t}^{TH}$ و $U_{cha,t}^{TH}$ متغیرهای باینری هستند که وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی را در ساعت t را کنترل می‌کنند. مطابق رابطه (۲۱) ذخیره‌ساز در هر ساعت نمی‌تواند هم شارژ و هم دشارژ شود.

$$\sum_{t=1}^T u_{i,t}^1 = Duration^i \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (25)$$

که $Duration^i$ زمان مورد نیاز برای انجام کار i ام است. به عنوان مثال، اگر مدت زمان استفاده از جاروبرقی ۱ ساعت باشد آنگاه $Duration^i$ برای ۱ جاروبرقی برابر ۱ خواهد بود.

۷.۴. قید تعادل توان حرارتی

در هر ساعت، قید تعادل حرارتی ساختمان باید برقرار باشد [۳]:

$$H_t = H_{chp,t} + H_{boiler,t} + H_{dis,t} - H_{cha,t} \quad \forall t \quad (26)$$

که H_t میزان توان حرارتی مورد نیاز ساختمان در ساعت t بر حسب kW است. مطابق این قید، میزان تولید در هر ساعت باید با میزان مصرف در آن ساعت برابر باشد. CHP، بویلر و حالت شارژ ذخیره ساز تولیدکننده توان؛ و میزان تقاضای حرارتی و حالت شارژ ذخیره ساز نیز مصرف کننده توان هستند.

۸.۴. محدوده تبادل توان با شبکه

ساختمان هوشمند به شبکه توزیع متصل است. تعرفه خرید برق از شبکه، توسط شرکت توزیع به ساختمان ابلاغ شده است. میزان انرژی خریداری شده از شبکه توزیع در ساعت t برابر I_t است که باید در محدودیت زیر صدق کند.

$$-P_{Max}^{grid} \leq I_t \leq P_{Max}^{grid} \quad (27)$$

که P_{Max}^{grid} حداکثر توان قابل جابجایی میان ساختمان هوشمند و شبکه برق است که به نوع قرارداد خرید یا فروش توان با شبکه توزیع بستگی دارد. ساختمان در ساعاتی که مازاد تولید دارد، می تواند انرژی مازاد خود را به شبکه توزیع بفروشد. در این حالت I_t منفی خواهد شد. مدل سازی پیشنهادی برای مدیریت انرژی ساختمان هوشمند با در نظر گرفتن قیود فنی در قالب یک مسئله برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط بیان شد. مدل ارائه شده محدب است و با استفاده از تولباکس YALMIP [21] می توان پاسخ بهینه سراسری آن را یافت. پاسخ به دست آمده از YALMIP بهترین پاسخ در میان تمامی پاسخ های به دست آمده از الگوریتم های دیگر از قبیل PSO خواهد بود. زیرا YALMIP برای حل مسئله از حل کننده قدرتمند CPLEX که بر اساس روش های ریاضی طراحی شده، بهره می برد [22].

۵. پیاده سازی الگوریتم و تحلیل نتایج مطالعات

۵.۱. مورد مطالعاتی (ساختمان هوشمند)

یک ساختمان هوشمند که دارای ۳۰ واحد مسکونی هوشمند است، جهت شبیه سازی در نظر گرفته شده است. داده های کلی این ساختمان از مرجع [۳] استخراج شده که مطابق با کشور انگلستان است. باین وجود، برخی از داده ها از قبیل قیمت گاز طبیعی و همچنین تعرفه برق مطابق شرایط کشور ایران در نظر گرفته شده است.

مطابق [۳] فرض بر این است که سوخت CHP و بویلر گاز طبیعی است. در ایران مطابق داده های سال ۱۳۹۷، هزینه گاز طبیعی که در CHP و بویلر به عنوان سوخت مصرف می شود، به طور میانگین برابر ۱۰۸۰ ریال بر مترمکعب است. هر مترمکعب گاز طبیعی نیز حدود ۸۲۰۰ کیلوکالری انرژی آزاد می کند که معادل ۹/۵۳۷۱ kWh است؛ بنابراین قیمت گاز طبیعی برابر (Rial/kwh) ۱۱۳/۲۴۲ است. بدون از دست دادن کلیت، افق برنامه ریزی ۲۴ ساعته در نظر گرفته شده و از ساعت ۱ بامداد یک روز تابستانی آغاز و تا ساعت ۲۴ آن روز ادامه خواهد داشت. در این شبیه سازی، طول هر بازه زمانی برابر با یک ساعت در نظر گرفته شده است ($\delta = 1$) بنابراین در هر روز ۲۴ بازه زمانی وجود خواهد داشت ($T = 24$). در ادامه این بخش از مقاله، تجهیزات الکتریکی موجود در هر کدام از خانه های ساختمان هوشمند در کنار زمان متعارف استفاده از آن ها بیان خواهد شد.

۵.۱.۱. تجهیزات الکتریکی خانگی

در مجموع در هر خانه ۱۲ وسیله الکتریکی در نظر گرفته شده است. پنجره زمانی متعارف برای استفاده از هر کدام از آن ها به همراه مدت زمان استفاده و میزان توان مصرفی هر کدام، در جدول (۱) داده شده است. وسایل برقی ۱۱ و ۱۲، یعنی روشنایی داخلی و یخچال، غیر قابل کنترل هستند و زمان استفاده از آن ها قابل تغییر نیست؛ بنابراین مدیریت سمت تقاضا به تعیین زمان بهینه شروع به کار تجهیزات برقی شماره ۱ تا ۱۰ محدود می شود. قیمت برق در جدول (۲) برای ساعات مختلف آمده است.

جدول ۱: وسایل برقی متداول در هر خانه مسکونی [۳]

ردیف	نام وسیله برقی	توان (kw)	زودترین زمان شروع (ساعت)	دیرترین زمان پایان (ساعت)	زمان انجام (ساعت)
۱	ماشین ظرفشویی	۱	۹	۱۷	۲
۲	ماشین لباسشویی	۰/۴	۹	۱۲	۲
۳	خشک کن	۲/۵	۱۳	۱۸	۱
۴	کیک پز برقی	۳	۷	۱۰	۱
۵	فر	۵	۱۸	۱۹	۱
۶	مایکروفر	۱/۷	۸	۱۰	۱
۷	لپ تاپ	۰/۱	۱۸	۲۴	۲
۸	کامپیوتر	۰/۳	۱۸	۲۴	۳
۹	جاروبرقی	۱/۲	۹	۱۷	۱
۱۰	خودروی برقی	۳/۵	۱	۷	۴
۱۱	روشنایی داخلی	۰/۸۴	۱۸	۲۴	۶
۱۲	یخچال	۰/۳	۱	۲۴	۲۴

۵.۱.۲. قرارداد خرید و فروش برق

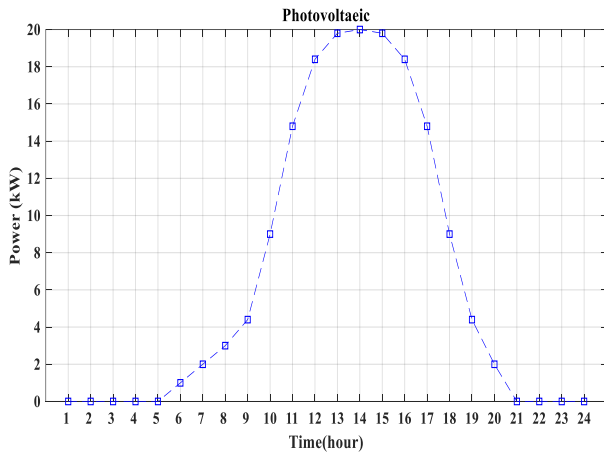
قیمت برق توسط شرکت توزیع تعیین و به ساختمان ابلاغ شده است. قیمت برق، مطابق تعرفه مسکونی در ایران در نظر گرفته شده است که

۵, ۱, ۴. بویلر

یک بویلر با توان نامی ۱۲۰ kW، بازده ۸۵٪ در ساختمان نصب شده است. هزینه نگهداری بویلر برابر (Rial/kwh) ۱۰۵ در نظر گرفته شده است. سوخت استفاده شده در بویلر مانند CHP از نوع گاز طبیعی است که قیمت آن برابر با ((Rial/kwh) ۱۱۳/۲۴۲ فرض شده است.

۵, ۱, ۵. سیستم فتوولتائیک

یک سیستم فتوولتائیک با ظرفیت ۲۰ kW در ساختمان نصب شده است. از آنجا که سیستم فتوولتائیک قطعات متحرک مکانیکی ندارد و از قطعات استاتیک الکترونیکی ساخته شده، از کیفیت بالایی برخوردار است و هزینه تعمیر و نگهداری آن بسیار کم و در حد صفر است. پیش‌بینی میزان تولید سیستم فتوولتائیک، مطابق پیش‌بینی‌های هواشناسی در ۲۴ ساعت آینده در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: پیش‌بینی تولید سیستم فتوولتائیک در ۲۴ ساعت آینده مطابق پیش‌بینی‌های هواشناسی

یک تولید سیستم فتوولتائیک در ساعت ۱۴ و برابر ۲۰ kW است. لازم به ذکر است، اطلاعات فوق مربوط به یک روز تابستانی است. به‌رحال، داده‌های تولید سیستم فتوولتائیک و سایر داده‌های تعریف شده در این مورد مطالعاتی متناسب با شرایط جغرافیایی خاص ساختمان هوشمند تعیین شده‌اند. برنامه‌ریزی صورت گرفته در این مقاله به‌گونه‌ای است که تمام توان تولیدی سیستم فتوولتائیک جذب شده و هیچ‌گونه کاهش تولیدی صورت نخواهد گرفت. این مسئله علاوه بر کاهش هزینه ساختمان، انتشار آلاینده‌های محیطی را کاهش می‌دهد.

۵, ۱, ۶. ذخیره‌ساز الکتریکی

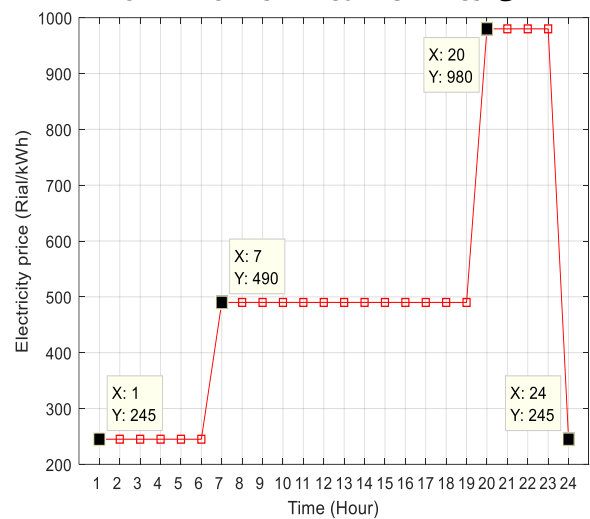
فرض شده است که یک ذخیره‌ساز الکتریکی با ظرفیت ذخیره‌سازی ۵۰ kWh، بازده شارژ/دشارژ ۹۵ درصد، توان حداکثر شارژ/دشارژ ۱۰ kW و هزینه نگهداری ((Rial/kwh) ۵۰ در ساختمان نصب شده است. حداقل توان موجود در ذخیره‌ساز برابر ۱۰٪ ظرفیت آن، یعنی برابر ۵ kWh در نظر گرفته شده است.

اطلاعات مربوط به آن در جدول (۲) آمده است. مطابق با این جدول، قیمت برق در طول شبانه‌روز مطابق با دوره کم باری، میان باری و اوج بار متغیر خواهد بود.

جدول ۲: ساعات هر دوره کم باری، میان باری و اوج بار در سال ۱۳۹۷

دوره	بازه‌ی زمانی هر دوره	قیمت (ریال بر kWh)
میان باری	از ۷ صبح تا ۱۹	۴۹۰
اوج بار	از ۲۰ تا ۲۳	۹۸۰
کم باری	از ۲۴ تا ۶ صبح	۲۴۵

قیمت ساعتی برق، مطابق جدول (۲) در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: قیمت ساعتی خرید برق از شبکه توزیع

قیمت خرید و فروش برق یکسان و حداکثر توان قابل انتقال میان ساختمان هوشمند و شبکه توزیع ۱۵۰ kW در نظر گرفته شده است.

۵, ۱, ۳. اطلاعات CHP

یک ژنراتور CHP با ظرفیت نامی الکتریکی ۴۰ kW، بازده ۴۰ درصد و با نسبت گرما به برق ۱/۲ در ساختمان هوشمند وجود دارد. بنابراین، حداکثر توان تولیدی CHP برابر ۴۰ kW توان الکتریکی و ۴۸ kW توان حرارتی است. از آنجا که نسبت تولید حرارت به برق این CHP برابر ۱/۲ است، CHP همزمان با تولید ۱ kWh انرژی الکتریکی و ۱/۲ kWh انرژی حرارتی نیز تولید می‌کند؛ بنابراین این CHP در توان نامی خود، به‌طور همزمان ۴۰ kWh انرژی الکتریکی و ۴۸ kW انرژی حرارتی تولید می‌کند. هزینه نگهداری این CHP برابر (Rial/kwh) ۱۴۷ الکتریکی است. یعنی برای تولید هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی (که همزمان kWh ۱/۲ هم انرژی حرارتی ایجاد می‌شود) باید ۱۴۷ ریال صرف تعمیر و نگهداری CHP شود.

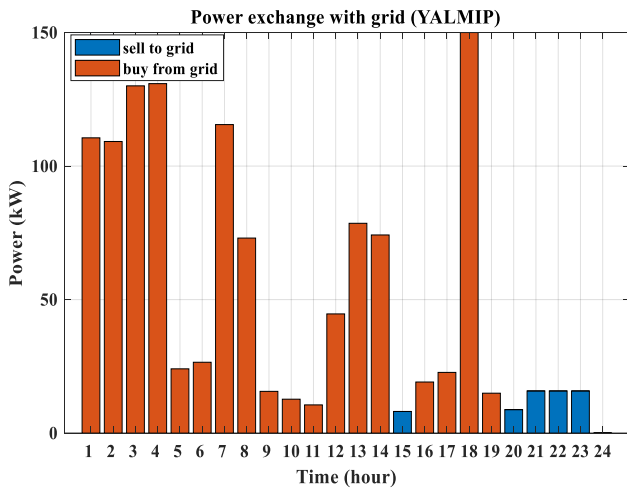
۷, ۱, ۵. ذخیره‌ساز حرارتی

ساعت ۱۸ و برابر ۱۵۰ kW است؛ بنابراین در طول ساعت ۱۸، kWh ۱۵۰ برق از شبکه توزیع خریداری شده‌است.

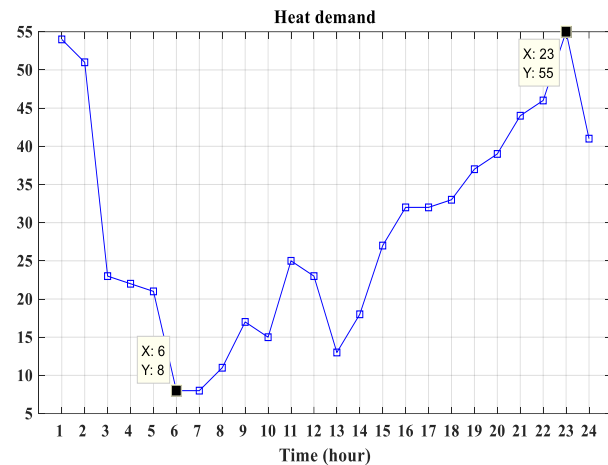
یک ذخیره‌ساز حرارتی با ظرفیت ۲۰ kWh، بازده شارژ/دشارژ ۰/۹۸، توان حداکثر شارژ/دشارژ حرارتی ۲۰ kW و هزینه نگهداری (Rial/kwh) ۱۰ در ساختمان نصب شده‌است.

۸, ۱, ۵. تقاضای حرارتی ساختمان

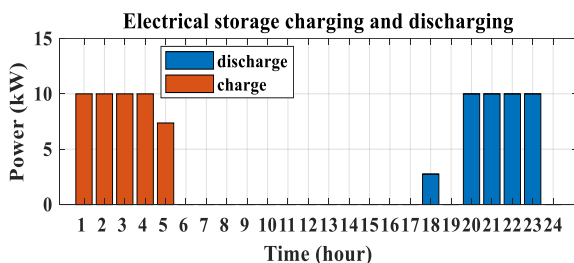
پیش‌بینی تقاضای حرارتی ساختمان در شکل (۳) آمده‌است.



شکل ۴: برنامه‌ریزی خرید/فروش برق / به شبکه توزیع



شکل ۳: تقاضای حرارتی ساختمان در افق ۲۴ ساعت‌ها برنامه‌ریزی



شکل ۵: برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی به همراه تغییرات میزان انرژی ذخیره‌شده در آن

برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی به همراه میزان تغییرات انرژی ذخیره‌شده در آن در کل ساعات برنامه‌ریزی در شکل (۵) آمده‌است. انرژی اولیه موجود در ذخیره‌ساز قبل از شروع برنامه‌ریزی برابر ۵ kWh است که در انتهای برنامه‌ریزی در پایان ساعت ۲۴ به همان مقدار اولیه، یعنی ۵ kWh رسیده‌است. این موضوع نشان‌دهنده رعایت قید برابری شارژ اولیه و نهایی ذخیره‌ساز الکتریکی در رابطه (۱۵) است. همچنین بررسی شکل (۵) نشان می‌دهد توان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز در محدوده مجاز از پیش تعیین شده (کوچک‌تر از ۱۰ kWh) است.

در شکل (۶)، برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی به همراه تغییرات ساعتی انرژی حرارتی ذخیره‌شده در آن، نشان داده شده‌است. انرژی اولیه موجود در این ذخیره‌ساز در ساعت ۰ (ساعت ۲۴ روز قبل) برابر ۱۲/۸۶ kWh است که در پایان افق برنامه‌ریزی، یعنی در پایان

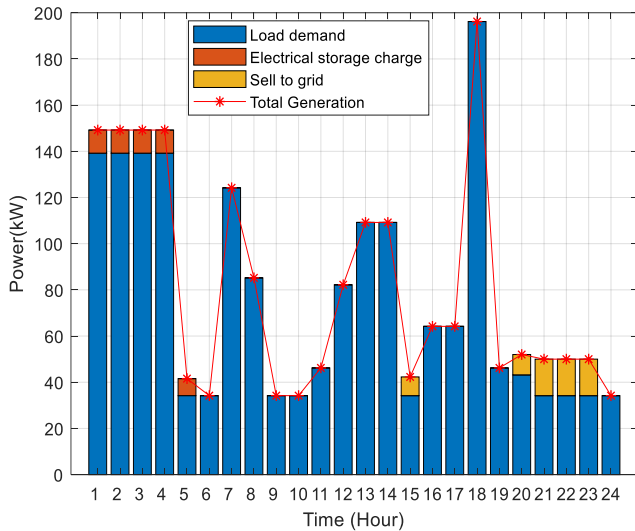
لازم به ذکر است، تقاضای الکتریکی ساختمان یک متغیر تصمیم‌گیری است که پس از حل مسئله بهینه‌سازی و تعیین زمان به‌کارگیری تجهیزات الکتریکی میزان آن محاسبه می‌شود. در ادامه و در سناریوی اول، مسئله مدیریت همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی ساختمان هوشمند معرفی شده با استفاده از تولاکس YALMIP حل خواهد شد.

۵. ۲. حل مسئله با YALMIP

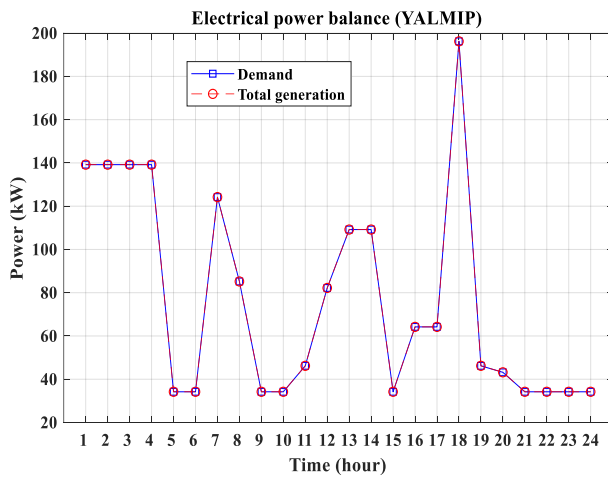
در این سناریو، از تولاکس YALMIP [21] و حل‌کننده CPLEX [23] برای حل مسئله موردنظر استفاده شده‌است. تابع هدف OF در رابطه (۱) است که بیانگر هزینه انرژی ساختمان در ۲۴ ساعت برنامه‌ریزی می‌باشد. روابط (۷) الی (۲۷) به‌عنوان قیود مسئله باید در نظر گرفته شوند.

پس از اجرای شبیه‌سازی، YALMIP تنها پس از گذشت ۳/۰۹ ثانیه مسئله را حل می‌کند. پس از حل، زمان‌بندی استفاده از تجهیزات الکتریکی، میزان خرید توان از شبکه، برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی، برنامه‌ریزی تولید بویلر و CHP به‌صورت همزمان تعیین می‌شود.

در شکل (۴) برنامه‌ریزی تبادل برق با شبکه توزیع نشان داده شده‌است. مطابق این برنامه‌ریزی، ساختمان هوشمند در ساعات ۱۵ و ۲۰ الی ۲۳ خریدار توان از شبکه توزیع است. در بقیه ساعات شبانه‌روز، ساختمان هوشمند به شبکه توزیع برق می‌فروشد. پیک فروش برق در



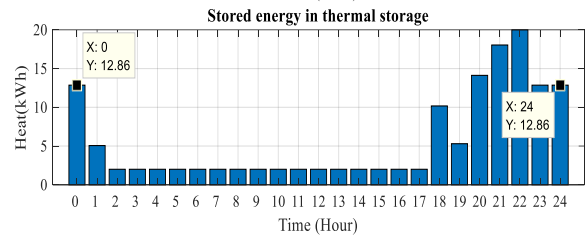
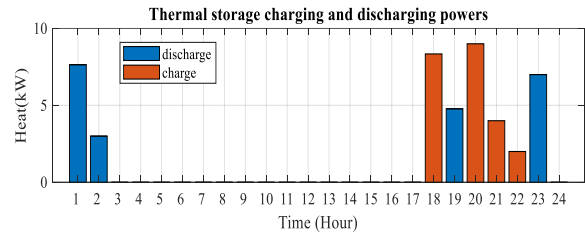
شکل ۸: تطابق مجموع تقاضا با مجموع تولید توان الکتریکی



شکل ۹: بررسی قید تعادل توان الکتریکی در پاسخ به دست‌آمده از YALMIP

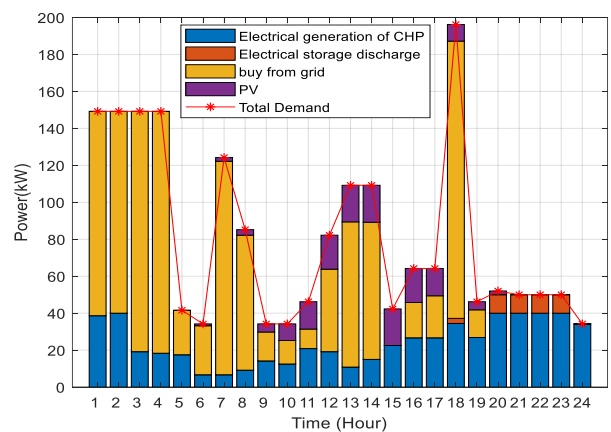
درواقع تطابق تولید با مصرف در شکل (۷) و (۸) صورت پیوسته آمده‌است. در شکل (۸) مجموع تقاضای سیستم به‌صورت پیوسته در کنار مجموع تولید ساختمان رسم شده‌است. جهت بررسی قید تعادل توان الکتریکی، یعنی رابطه (۲۲)، مجموع تولید خالص الکتریکی ساختمان در سمت راست رابطه (۲۲)، در کنار تقاضای الکتریکی ساختمان، در شکل (۹) رسم شده‌اند. بررسی این شکل نشان می‌دهد قید تعادل توان الکتریکی در کلیه ساعات برنامه‌ریزی برقرار است. میزان تولید توان حرارتی CHP، بویلر و میزان توان دشارژ شده ذخیره‌ساز الکتریکی به‌صورت پیوسته در شکل (۱۰) رسم شده‌است. در این شکل، نمودار Total heat demand مجموع تقاضای حرارتی و توان شارژ ذخیره‌ساز حرارتی را نشان می‌دهد. بررسی این شکل نشان می‌دهد، در بیشتر ساعات شبانه‌روز، تقریباً تمام انرژی حرارتی موردنیاز ساختمان توسط CHP تولید می‌شود.

ساعت ۲۴، میزان انرژی موجود در ذخیره‌ساز به همان مقدار اولیه بازمی‌گردد. این مورد، رعایت قید (۲۰) را نشان می‌دهد. بررسی شکل (۵) و شکل (۶) نشان می‌دهد، در پاسخ‌های به دست‌آمده با YALMIP هم‌زمانی شارژ با دشارژ رخ نداده و تمامی قیود مرتبط با ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی رعایت شده‌است.



شکل ۶: برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی به همراه تغییرات میزان انرژی ذخیره‌شده در آن

برنامه‌ریزی تولید برق CHP همراه با میزان توان خریداری‌شده از شبکه توزیع، تولید PV و توان دشارژ شده ذخیره‌ساز الکتریکی به‌صورت پیوسته در شکل (۷) رسم شده‌است. در این شکل، مجموع تقاضای الکتریکی ساختمان، یعنی مجموع بار موردنیاز تجهیزات الکتریکی، توان شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی و میزان توان فروخته‌شده به شبکه توزیع، نیز به‌صورت خط-ستاره قرمز رسم شده‌است.



شکل ۷: تطابق مجموع تولید با مجموع تقاضای الکتریکی ساختمان هوشمند

جدول ۳: ساعات آغاز به کار وسایل برقی قابل کنترل به دست آمده از تولباکس YALMIP

شماره وسیله برقی	زمان آغاز به کار	زمان پایان کار	مدت استفاده	مدت تعیین شده
۱	۱۶	۱۷	۲	۲
۲	۱۱	۱۲	۲	۲
۳	۱۳	۱۴	۲	۲
۴	۷	۷	۱	۱
۵	۱۸	۱۸	۱	۱
۶	۸	۸	۱	۱
۷	۱۸	۱۹	۲	۲
۸	۱۸	۲۰	۳	۳
۹	۴۵	۱۲	۱	۱
۱۰	۱	۴	۴	۴

طبق جدول فوق، زمان آغاز به کار وسایل برقی بسیار دقیق و متناسب با محدودیت‌های تعیین شده برای هر وسیله محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد، مدت زمان استفاده از وسایل برقی با مدت تعیین شده در جدول (۱) یکسان است. این بدان معناست که حذف باری صورت نگرفته و تنها زمان استفاده از وسایل قابل کنترل تغییر کرده است. مجموع انرژی مورد نیاز برای تأمین برق مورد نیاز وسایل برقی ذکر شده در جدول (۱) برابر $1834/8$ kWh است که در برنامه ریزی به دست آمده از YALMIP، میزان انرژی الکتریکی تأمین شده برای وسایل الکتریکی، دقیقاً برابر با همین مقدار است. هزینه کلی ساختمان هوشمند در این حالت (در حالت حل با YALMIP) تقریباً برابر 635044 ریال است. ریز هزینه‌های ساختمان در جدول (۶) نشان داده شده است.

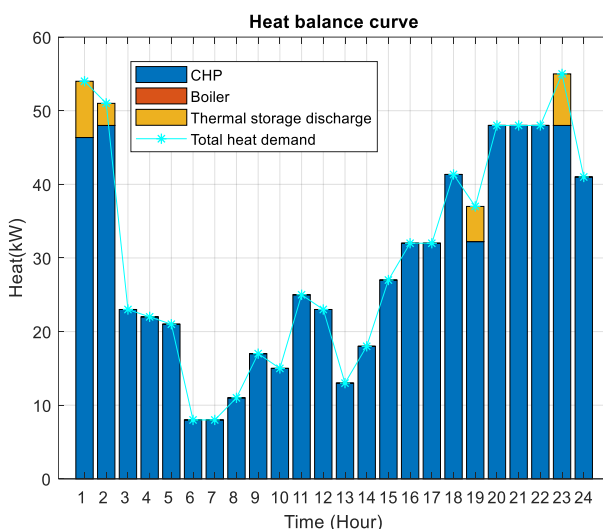
۵.۳. مقایسه با الگوریتم ازدحام پرندگان (PSO)

در سناریوی دیگر، مسئله مدیریت همزمان انرژی ساختمان با الگوریتم ازدحام پرندگان PSO حل شده است. جمعیت ذرات الگوریتم PSO برابر ۵۰۰ ذره و حداکثر تعداد تکرار آن برابر ۵۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. ضرایب $c1$ و $c2$ که به ترتیب اینرسی حرکت به سمت بهترین ذره محلی و بهترین ذره سراسری را تنظیم می‌کنند، هر دو برابر ۲ در نظر گرفته شده‌اند.

شرط توقف الگوریتم PSO یکی از دو شرط زیر است:

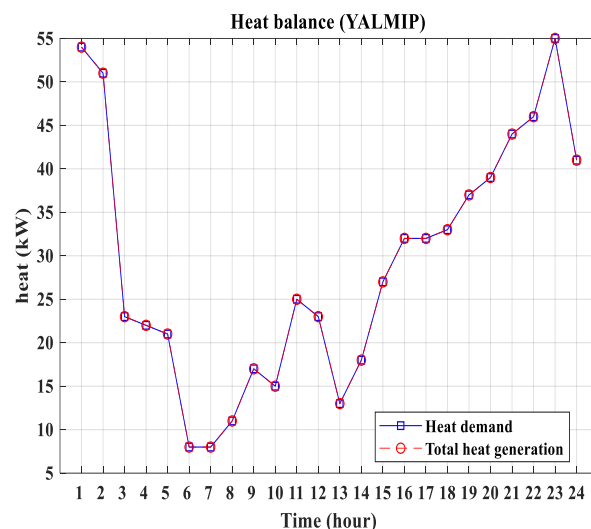
۱. در ۵۰ تکرار پشت سر هم مقدار تابع هدف ثابت (OF) بماند یا کمتر $0/01$ بهبود داشته باشد.
۲. رسیدن به حداکثر تکرارها.

اگر هر کدام از شرایط فوق برقرار شود، الگوریتم متوقف شده و موقعیت بهترین ذره به عنوان جواب در نظر گرفته خواهد شد. تنظیمات الگوریتم PSO در جدول (۴) آمده است. الگوریتم PSO بعد از گذشت $122/44$



شکل ۱۰: تطابق مجموع تولید با مجموع تقاضای حرارتی ساختمان

جهت بررسی برقراری قید تعادل حرارتی ساختمان در ساعات مختلف افق برنامه ریزی، مجموع تولید توان، یعنی سمت راست رابطه (۲۶)، در کنار مجموع بار حرارتی ساختمان در شکل (۱۱) آمده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد در تمامی ساعات، حرارت خالص تولید شده با حرارت مصرف شده یکسان است.

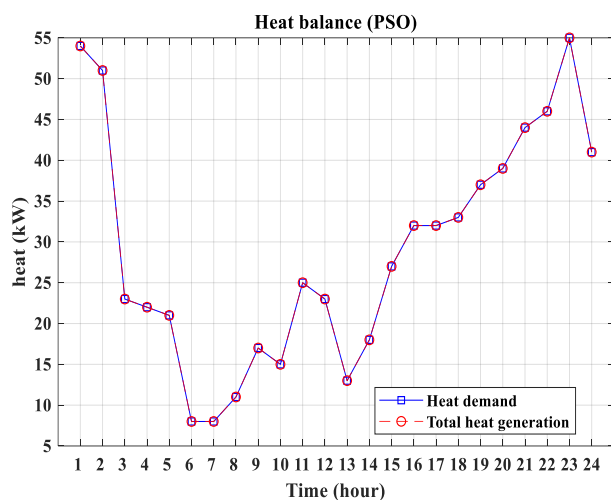


شکل ۱۱: بررسی قید تعادل توان الکتریکی در پاسخ به دست آمده از YALMIP

زمان بهینه شروع به کار تجهیزات الکتریکی در جدول (۳) آمده است.

پاسخ به‌دست‌آمده از PSO قیود مسئله را رعایت می‌کند، و البته پاسخ بهینه سراسری نیست. در شکل (۱۳) و (۱۴) به ترتیب، تعادل توان الکتریکی و تعادل توان حرارتی ساختمان، در پاسخ به‌دست‌آمده از PSO، بررسی شده‌است.

نتایج به‌دست‌آمده در این سناریو، برای تعیین زمان شروع به کار تجهیزات برقی قابل کنترل در جدول (۵) آمده‌است و بررسی نشان می‌دهد، PSO قیود متناظر با مدیریت سمت تقاضا را رعایت کرده و در مجموع $1834/8 \text{ kWh}$ انرژی الکتریکی مورد نیاز تجهیزات برقی ساختمان را تأمین نموده‌است.



شکل ۱۴: بررسی قید تعادل توان حرارتی در پاسخ به‌دست‌آمده از PSO

جدول ۵: ساعات آغاز به کار تجهیزات برقی قابل کنترل به‌دست‌آمده از PSO

شماره وسیله برقی	زمان آغاز به کار	زمان پایان کار	مدت استفاده	مدت تعیین شده
۱	۱۲	۱۳	۲	۲
۲	۹	۱۰	۲	۲
۳	۱۵	۱۶	۲	۲
۴	۸	۸	۱	۱
۵	۱۹	۱۹	۱	۱
۶	۹	۹	۱	۱
۷	۲۲	۲۳	۲	۲
۸	۲۰	۲۲	۲	۲
۹	۱۰	۱۰	۱	۱
۱۰	۲	۵	۴	۴

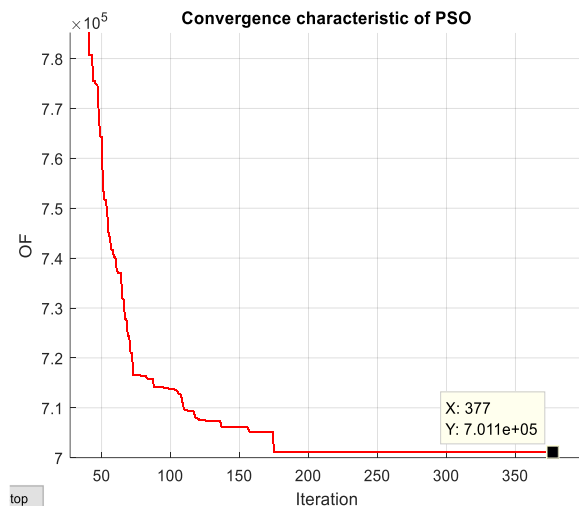
میزان تبادل ساعتی توان میان شبکه توزیع و ساختمان هوشمند در شکل (۱۵) نشان داده شده‌است.

ثانیه و در تکرار ۳۷۷ همگرا شده‌است. نمودار همگرایی آن در شکل (۱۲) نشان داده شده‌است.

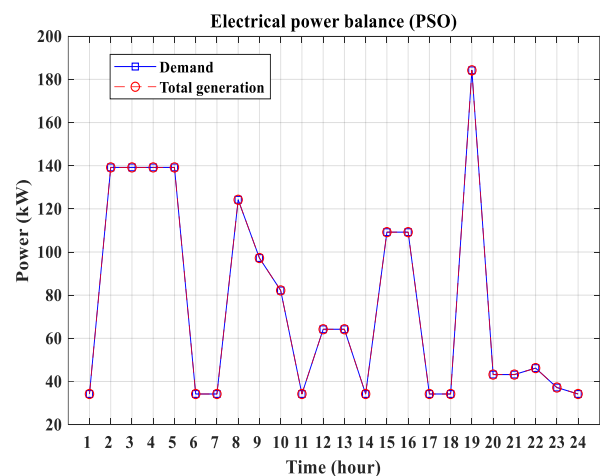
مجموع هزینه ساختمان (متغیر OF)، در پاسخ به‌دست‌آمده از الگوریتم PSO، حدود 701110 ریال است. جزئیات هزینه‌های ساختمان هوشمند در این سناریو، در جدول (۶) آمده‌است.

جدول ۴: تنظیمات مربوط به پارامترهای الگوریتم PSO

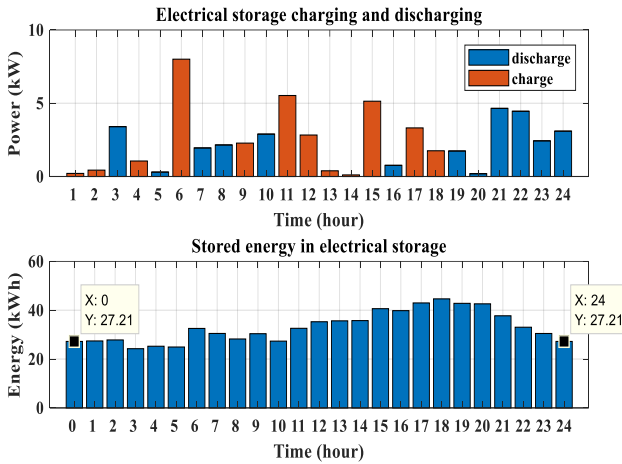
ردیف	پارامتر	مقدار
۱	حداکثر تعداد تکرارها ($iter_{max}$)	۵۰۰
۲	اندازه جمعیت ذرات	۵۰۰
۳	C_1	۲
۴	C_2	۲
۵	W_{damp}	۰/۸
۶	$w(0)$	۱



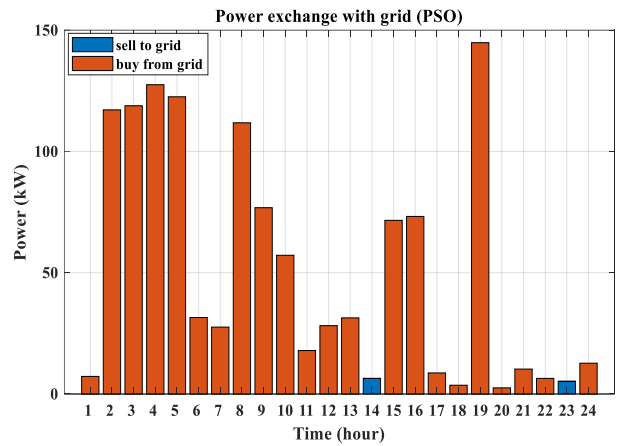
شکل ۱۲: نمودار همگرایی الگوریتم PSO



شکل ۱۳: بررسی قید تعادل توان الکتریکی در پاسخ به‌دست‌آمده از PSO

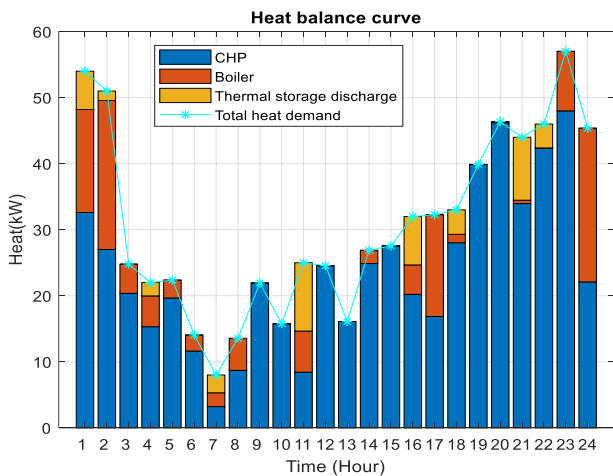


شکل ۱۷: برنامه‌ریزی ذخیره‌ساز الکتریکی در پاسخ به‌دست‌آمده از PSO



شکل ۱۵: تبادل توان ساختمان با شبکه توزیع در پاسخ به‌دست‌آمده از PSO

مطابق شکل (۱۸)، PSO تمایل دارد علاوه بر CHP، از بویلر نیز جهت تأمین تقاضای حرارتی ساختمان استفاده کند.



شکل ۱۸: برنامه‌ریزی تأمین تقاضای حرارتی ساختمان در پاسخ به‌دست‌آمده از PSO

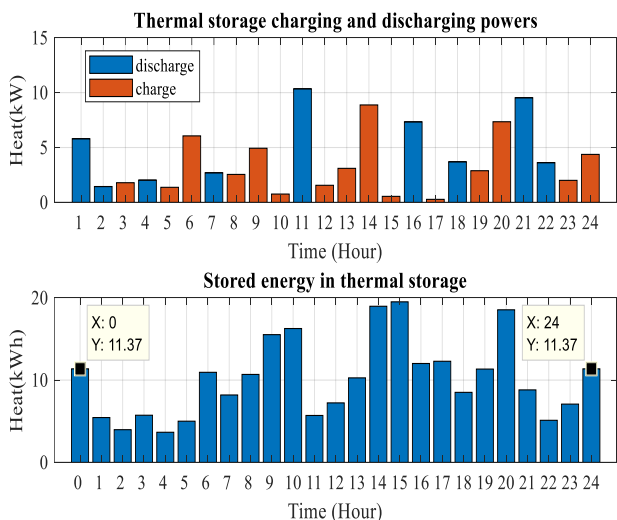
در ادامه، جزئیات هزینه‌های به‌دست‌آمده از پاسخ PSO با پاسخ YALMIP مقایسه خواهد شد.

۴.۵. مقایسه عملکرد PSO و YALMIP

در این بخش، به‌منظور بررسی صحت پاسخ‌های به‌دست‌آمده از YALMIP، که از حل‌کننده CPLEX و الگوریتم ازدحام پرندگان (PSO) در جدول (۶) نتایج نهایی به‌دست‌آمده از این الگوریتم و تولباس YALMIP (با حل‌کننده CPLEX) باهم مقایسه شده‌است.

مطابق شکل، در پاسخ به‌دست‌آمده از PSO، ساختمان هوشمند در تمامی ساعات غیر از ساعات ۱۴ و ۲۳ از شبکه توزیع توان می‌خرد. طبق این برنامه‌ریزی، ساختمان هوشمند تنها در ساعات ۱۴ و ۲۳ به شبکه توزیع، آن هم در حدود ۷ kWh برق می‌فروشد.

برنامه‌ریزی ذخیره‌سازهای حرارتی و الکتریکی در پاسخ به‌دست‌آمده از PSO به‌ترتیب در شکل (۱۶) و (۱۷) آمده‌است. بررسی این دو شکل نشان می‌دهد تمامی قیود مرتبط با ذخیره‌سازها، از جمله قید برابری انرژی اولیه و نهایی آن‌ها، در این سناریو (حل با PSO) نیز رعایت شده‌اند.



شکل ۱۶: برنامه‌ریزی ذخیره‌ساز حرارتی در پاسخ به‌دست‌آمده از PSO

جدول ۶: مقایسه نتایج PSO و YALMIP هنگام کمینه‌سازی مسئله مدیریت انرژی ساختمان

ردیف	نوع هزینه/هدف	PSO	YALMIP
۱	هزینه بویلر (CostBoiler)	۲۸۹۸۹,۲۶	۰,۰۰
۲	هزینه CHP (CostCHP)	۲۰۶۱۷۳,۲۶	۲۴۹۴۳۳,۷۵
۳	هزینه ذخیره‌ساز الکتریکی (CostES)	۲۹۵۲,۹۹۵۷	۴۵۰۵,۹۲
۴	هزینه ذخیره‌ساز حرارتی (CostTS)	۹۴۹,۴۳	۴۵۷,۵۶
۸	هزینه خرید برق از شبکه (CostBuy)	۴۶۲۰۴۴,۹۸	۳۸۰۶۴۷,۰۲
۹	زمان حل (ثانیه)	۱۲۲,۴۴	۳,۰۹
۹	تابع هدف (OF)	۷۰۱۱۱۰,۶۳۲۸	۶۳۵۰۴۴,۲۵۵۱

سرعت حل آن نیز بسیار بیشتر از PSO می‌باشد. به طوری که YALMIP مسئله مدیریت انرژی را تنها در حدود ۳ ثانیه حل می‌کند و به پاسخ بهینه سراسری می‌رسد. ولی PSO بعد از ۱۲۲ ثانیه به پاسخ بهینه محلی می‌رسد.

این امر می‌تواند کارایی و اثربخشی روش پیشنهادی را اثبات کند و این که این روش ممکن است قادر به ارائه عملکرد بهتر در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در زمینه مدیریت همزمان انرژی حرارتی و الکتریکی ساختمان هوشمند باشد.

منابع

- [۱] M. Majidi, B. Mohammadi-Ivatloo, and A. Anvari-Moghaddam, "Optimal robust operation of combined heat and power systems with demand response programs," *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, pp. 1359-1369, 2019.
- [۲] A. Yıldız, "Predicting the energy production of a rooftop pv plant by using differential evolution algorithm," *Turkish Journal of Engineering (TUJE)*, vol. 3, pp. 106-109, 2019.
- [۳] D. Zhang, S. Evangelisti, P. Lettieri, and L. G. Papageorgiou, "Economic and environmental scheduling of smarthomes with microgrid: DER operation and electrical tasks," *Energy conversion and management*, vol. 110, pp. 113-124, 2016.
- [۴] M. Daneshvar, M. Pesaran, and B. Mohammadi-ivatloo, "Transactive energy in future smart homes," in *The Energy Internet*, ed: Elsevier, 2019, pp. 153-179.
- [۵] M. B. Rasheed, N. Javaid, M. S. A. Malik, M. Asif, M. K. Hanif, and M. H. Chaudary, "Intelligent multi-agent based multilayered control system for opportunistic load scheduling in smart buildings," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 239,۲۰۱۹, ۲۴۰۰۶-۹۰.
- [۶] S. Yilmaz, J. Chambers, and M. Patel, "Comparison of clustering approaches for domestic electricity load profile characterisation-Implications for demand side management," *Energy*, vol. 180, pp. 665-677, 2019.
- [۷] C. Sijie and L. Chen-Ching, "From demand response to transactive energy: state of the art," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 5, pp. 10-19, 2017.
- [۸] D. Zhang, N. Shah, and L. G. Papageorgiou, "Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid," *Energy Conversion and Management*, vol. 74, pp. 209-222, 2013.
- [۹] M. L. Tuballa and M. L. Abundo, "A review of the development of Smart Grid technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 710-725, 2016.

نتایج جدول فوق برتری پاسخ به‌دست‌آمده از YALMIP را نشان می‌دهد؛ زیرا همزمان حل و هم‌مقدار تابع هدف (OF) در پاسخ به‌دست‌آمده از YALMIP کوچک‌تر از پاسخ به‌دست‌آمده از PSO است.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدیریت همزمان انرژی حرارتی و الکتریکی یک ساختمان هوشمند با در نظر گرفتن مدیریت سمت تقاضا و باهدف کاهش هزینه‌های انرژی ساختمان انجام شده است. در این مدل، برنامه‌ریزی استفاده از تجهیزات برقی انعطاف‌پذیر، مانند جاروبرقی که زمان استفاده از آن‌ها قابل جابجایی است، به‌صورت هماهنگ با برنامه‌ریزی عملکردی بویلر، CHP، ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی؛ باهدف کاهش هزینه‌های انرژی ساختمان محاسبه می‌شود. در مدل ارائه شده، تمام تولید سیستم فتوولتائیک جذب ساختمان شده و تمامی تقاضای حرارتی و الکتریکی ساختمان، بدون نیاز به حذف بار، به‌گونه‌ای اقتصادی، تأمین می‌شود. همچنین، قیود و محدودیت‌های فنی مرتبط با تجهیزات، از قبیل قید حداقل و حداکثر انرژی قابل ذخیره در ذخیره‌سازها، قید برابری انرژی اولیه و نهایی ذخیره شده در ذخیره‌سازها، ظرفیت تولید بویلر و CHP، محدودیت توان انتقالی میان ساختمان هوشمند و شبکه توزیع و قیود مرتبط با زمان استفاده از تجهیزات برقی در نظر گرفته شده است.

مسئله مدل شده در این مقاله، از نظر ریاضی محدب است و با استفاده از حل‌کننده CPLEX و یا سایر حل‌کننده‌های ریاضی موجود در YALMIP می‌توان به پاسخ بهینه سراسری آن دست یافت. در انتها جهت نشان دادن قابلیت YALMIP در یافتن پاسخ بهینه سراسری، مدل ارائه شده با PSO و YALMIP به‌صورت مجزا حل شده و نتایج به‌دست‌آمده باهم مقایسه شده است.

در نتایج به‌دست‌آمده با PSO، هزینه انرژی ساختمان در کل ۲۴ ساعت برنامه‌ریزی به ۷۰۱۱۱۰ ریال می‌رسد، در حالی که در پاسخ به‌دست‌آمده از YALMIP هزینه‌های نهایی ساختمان به ۶۳۵۰۴۴ ریال کاهش می‌یابد. علاوه بر بهینه بودن پاسخ به‌دست‌آمده از YALMIP،

- independent and coalition operations," *Renewable energy*, vol. 126, pp. 95-106, 2018.
- [۲۱] J. Lofberg, "YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB," ed, 2004.
- [۲۲] C. Blikelú, P. Bonami, and A. Lodi, "Solving mixed-integer quadratic programming problems with IBM-CPLEX: a progress report," in *Proceedings of the twenty-sixth RAMP symposium*, 2014, pp. 16-17.
- [۲۳] I. Ibm, "CPLEXOptimizer: <http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer>," ed: Accessed, 2014.
- [۱۰] J.-Y. Joo and M. D. Ilić, "An information exchange framework utilizing smart buildings for efficient microgrid operation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, pp. 858-864, 2016.
- [۱۱] S. Kakran and S. Chanana, "Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 524-535, 2018.
- [۱۲] O. Erdinc, N. G. Paterakis, T. D. Mendes, A. G. Bakirtzis, and J. P. Catalão, "Smart household operation considering bi-directional EV and ESS utilization by real-time pricing-based DR," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 1281-1291, 2015.
- [۱۳] Y. Ozturk, D. Senthikumar, S. Kumar, and G. K. Lee, "An Intelligent Home Energy Management System to Improve Demand Response," *IEEE Trans .Smart Grid*, vol. 4, pp. 694-701, 2013.
- [۱۴] D. Wu, D. C. Aliprantis, and K. Gkritza, "Electric energy and power consumption by light-duty plug-in electric vehicles," *IEEE transactions on power systems*, vol. 26, pp. 738-746, 2011.
- [۱۵] K. Wang, H. Li, S. Maharjan, Y. Zhang, and S. Guo, "Green energy scheduling for demand side management in the smart grid," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 2, pp. 596-611, 2018.
- [۱۶] A. Moradi, Y. Alinejad-Beromi, K. Kiani, "Application of grey wolf algorithm for multi-year transmission expansion planning from the viewpoint of private investor considering fixed series compensation and uncertainties", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, <https://doi.org/10.1002/etep.2702>.
- [۱۷] A. Moradi, Y. Alinejad Beromi, K. Kiani, Z. Moravej, "Artificial Intelligence Based Approach for Identification of Current Transformer Saturation from Faults in Power Transformers", *International Journal of Smart Electrical Engineering*, vol. 3, pp. 37-46, 2014.
- [۱۸] P. Nazarian, M. Moradlou, "Estimation of Flicker Generating Feeders Index with Combined Sampling-Simulation Method", *Intelligent Multimedia Processing and Communication Systems (IMPCS)*, vol. 4, no. 4, pp. 37-43, 2023.
- [۱۹] K. Sabzevari, "Power Sharing Between Islanded Microgrid Inverters by Modifying the Droop Control Method", *Intelligent Multimedia Processing and Communication Systems (IMPCS)*, vol. 3, no. 4, pp. 43-49, 2022.
- [۲۰] M. Marzband, F. Azarnejadian, M. Savaghebi, E. Pouresmaeil, J. M. Guerrero, and G. Lightbody, "Smart transactive energy framework in grid-connected multiple home microgrids under