



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>



Research Article

Intelligent consumption management of residential buildings with the help of energy hub in the presence of multiple energy carriers

Rahim Ildarabadi^{1,*}, Hossein Lotfi¹, Mohammad Hasan Nikkhah¹, Mohammad Rooeintan¹

1. Department of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

*Corresponding Author: Rahim Ildarabadi, R.ildar@hsu.ac.ir

PAPER INFO

Paper history:

Received: 26 November 2022

Revised: 02 March 2023

Accepted: 08 April 2023

Keywords:

Energy hub,
Demand response program,
Solar cell,
Combined cooling and heating
Electrical load,
Heating load.

ABSTRACT

In the upcoming research, the issue of consumption and energy management in residential buildings has been discussed using the energy hub system. The purpose of using an energy hub is the simultaneous and optimal use of several energy carriers for the appropriate, reliable, and economical supply of consumer needs while complying with the conditions of satisfaction and comfort of the residents. The optimization problem considered in this study is formulated as mixed-integer linear programming. In order to solve the optimization problem, Gems software has been used. During the implementation of problem solving, the effect of two conventional pricing models, including hourly, time of use, was investigated in Iran, and part of the results are presented in the form of tables and graphs. In all cases, the possibility of selling jointly produced electricity to the grid is included; therefore, it is possible to pay more attention to the energy hub technology even in the climatic conditions and pricing policies of Iran and, by creating a suitable investment environment, especially in large residential complexes and building blocks, to increase security. Energy, reducing the consumption of fossil fuels, and expanding the use of various energy sources in different regions helped.

© 2023 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.28953.2360>

How to cite this article:

Ildarabadi, R., Lotfi, H., Nikkhah, M. H., & Rooeintan, M. (2023). Intelligent consumption management of residential buildings with the help of energy hub in the presence of multiple energy carriers. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(74), 21-35. doi: 10.22075/jme.2023.28953.2360

مدیریت هوشمند مصرف ساختمان‌های مسکونی با کمک هاب انرژی در حضور حامل‌های انرژی چندگانه

رحیم ایلدرآبادی^{۱*}، حسین لطفی^۲، محمدحسن نیک‌خواه^۳، محمد روئین‌تن^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی</p> <p>دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵</p> <p>بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۱</p> <p>پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۱۹</p> <p>واژگان کلیدی:</p> <p>هاب انرژی، برنامه پاسخگویی بار، مدیریت انرژی، سلول خورشیدی، تولید همزمان توان و گرما، بار الکتریکی، بار گرمایشی.</p>	<p>در پژوهش پیش‌رو به موضوع مدیریت مصرف و انرژی در ساختمان‌های مسکونی با استفاده از سامانه‌ی هاب انرژی پرداخته شده است. هدف از بکارگیری هاب انرژی استفاده‌ی همزمان و بهینه از چند حامل انرژی برای تأمین مناسب، مطمئن و اقتصادی نیاز مصرف‌کننده با رعایت قید رضایت و آسایش ساکنین است. مسئله بهینه‌سازی مورد نظر در این مطالعه به صورت برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح مخلوط فرموله می‌شود. به منظور حل مسئله‌ی بهینه‌سازی از نرم‌افزار گمز استفاده شده است. طی اجرا حل مسئله، تأثیر دو مدل قیمت‌گذاری مرسوم شامل ساعتی، زمان استفاده در ایران بررسی شد و بخشی از نتایج حاصل در قالب جداول و نمودارهایی ارائه شده است. در کلیه‌ی حالات، امکان فروش برق تولیدی مشترک به شبکه لحاظ شده است؛ بنابراین می‌توان به فناوری هاب انرژی حتی در شرایط اقلیمی و سیاست‌های قیمت‌گذاری ایران بیش از پیش توجه نمود و با ایجاد فضای مناسب سرمایه‌گذاری به‌خصوص در مجتمع‌های مسکونی بزرگ و بلوک‌های ساختمانی به افزایش امنیت انرژی، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و گسترش استفاده از منابع متنوع انرژی در مناطق مختلف کمک نمود.</p>

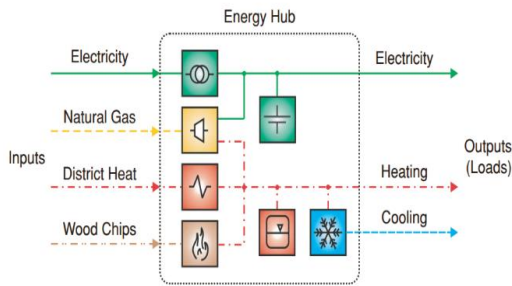
۱- مقدمه

اهمیت انرژی و منابع تأمین آن امروزه بر کسی پوشیده نیست و یکی از چالش‌های اصلی هر کشور و حکومتی در هر دوره‌ای بوده، هست و خواهد بود. تلاش‌های گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف مربوط به انرژی از جمله تأمین منابع انرژی ارزان، قابل اطمینان، دسترس‌پذیرتر، افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش آلاینده‌ی و... انجام گرفته است. پیشرفت فناوری و همین‌طور افزایش جمعیت نیز روزه‌روز نیاز به انرژی را افزایش می‌دهد که بر اهمیت این موضوع می‌افزاید. در این راستا حرکت به‌سوی برنامه‌های مدیریت مصرف و انرژی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران، مدیران و طراحان حوزه‌ی انرژی در سراسر جهان قرار گرفت.

طی سالیان گذشته سامانه‌های مختلفی در همین راستا طراحی، معرفی و گاهی اجرا شده‌اند. هاب انرژی و برنامه‌های مدیریت انرژی مرتبط با آن نیز یکی از این سامانه‌ها است. استفاده همزمان از زیرساخت‌های مختلف انتقال و تولید انرژی مانند گاز و برق مسئله‌ای است که به عنوان هاب‌انرژی مطرح می‌شود. انعطاف‌پذیری، گستردگی زمینه‌های استفاده و پشتیبانی از فناوری‌های مختلف تأمین، تبدیل و ذخیره‌سازی انرژی باعث شده از ویژگی‌های این فناوری است. روش هاب انرژی اولین بار توسط گروه تحقیقاتی آزمایشگاه سیستم‌های قدرت و ولتاژ قوی در دانشگاه زوریخ سوئیس در چارچوب پروژه‌ای با عنوان «چشم‌انداز شبکه‌های انرژی آینده ارائه شد. هدف این

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: R.ildar@hsu.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری
 ۲. محقق پسا دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری
 ۳. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری
 ۴. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری



شکل ۱- نمونه‌ای از یک هاب انرژی [۱۹]

انعطاف‌پذیری در بخش‌های مختلف یک هاب از ویژگی‌های مفید و کاربردی این سامانه است.

در جدول یک، تنوع گسترده‌ی تجهیزات قابل استفاده در بخش‌های مختلف هاب انرژی آورده شده است.

جدول ۱- تجهیزات قابل استفاده در بخش‌های مختلف یک هاب انرژی

بخش	تجهیزات قابل استفاده
ورودی‌ها	شبکه‌ی برق- شبکه‌ی گاز طبیعی- انرژی خورشیدی- انرژی باد- بیومس- هیدروژن- آب- انرژی برقی- انرژی هسته‌ای- گرمایش ناحیه‌ای- سوخت‌های فسیلی- انرژی‌های تجدیدپذیر
تبدیل انرژی و انتقال	ترانسفورماتور- مشعل گازی- CHP- صفحات خورشیدی (حرارتی و فتوولتائیک)- انواع چیلر (برقی، جذبی و تراکمی)- مبدل گازی- مبدل حرارتی- پمپ حرارتی- راکتور و مشعل بیومس- پیل سوختی- الکترولیزر- کمپرسور- راکتور هسته‌ای- توربین بادی
ذخیره‌سازها	باتری (لیتیوم- نیکل کادمیم) و سایر ذخیره- سازهای الکتروشیمیایی [۱۸]- مخزن گاز- مخزن هیدروژن- خودروهای الکتریکی- انباره‌های حرارتی- مخزن آب
خروجی‌ها	گاز دی‌اکسیدکربن- آب- هوای فشرده شده- هیدروژن- سرما- گرما- برق- گاز طبیعی و...

۳- مروری بر پژوهش‌های گذشته

سیستم‌های انرژی چند حامل از دیدگاه‌های مختلف، از جمله مدل‌های ریاضی، مولفه‌ها و فن‌آوری‌های یکپارچه، مدیریت عدم قطعیت، اهداف برنامه‌ریزی، آلودگی محیطی، انعطاف‌پذیری و استحکام بررسی می‌شوند [۷].

به عنوان نمونه، عملکرد بهینه هاب‌های انرژی به عنوان یک مسئله بهینه

سازی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدل شده است [۸]. همچنین، یک الگوی کم‌هزینه برای برآوردن نیازهای مراکز انرژی صنعتی، تجاری و مسکونی در مدل

مقاله ایجاد تصویری از آینده‌ی سیستم‌های انرژی در بلندمدت با استفاده از پتانسیل انرژی‌های پاک است. توضیحات بیشتر درباره‌ی این پروژه و نتایج آن در مرجع [۳-۱] در دسترس است. پس از آن، پژوهش‌های گوناگونی در رابطه با جوانب مختلف این سامانه انجام شده است و همچنان نیز یکی از موارد موردعلاقه‌ی محققان حوزه انرژی است.

۲- هاب انرژی

یکی از فناوری‌های پیشنهادشده برای مدیریت صحیح انرژی، هاب انرژی (EH) است. این فناوری با برقراری ارتباط مناسب بین تولیدکننده و مصرف‌کننده، قادر به ایفای نقشی مؤثر در راستای مدیریت بهینه‌ی مصرف است. از طریق EH با استفاده از امکاناتی از جمله فناوری تولید همزمان حرارت و توان، ترانسفورماتور، ادوات الکترونیک قدرت، کمپرسورها، مبدل‌های گرمایشی و سایر تجهیزات، تبدیل و متعادل‌سازی می‌شود. مواردی که می‌توانند به عنوان هاب انرژی در نظر گرفته شوند عبارتند از: کارخانه‌های صنعتی (صنایع فولاد یا کاغذ)، ساختمان‌ها و مجتمع‌های بزرگ (فرودگاه، بیمارستان، فروشگاه‌های بزرگ، مجتمع‌های مسکونی)، مناطق شهری و روستایی و سامانه‌های کوچک مانند قطار، هواپیما یا کشتی [۴-۶]. از ویژگی‌های مهم هاب انرژی توانایی در استفاده از چند حامل انرژی در ورودی سامانه و تلفیق با منابع تولید تجدیدپذیر است که در پژوهش پیش رو نیز به این امر توجه شده است. با کمک این فناوری در مجتمع‌های مسکونی و گسترش آن در سطوح بالاتر و گسترده‌های بیشتر مصرف، علاوه بر مدیریت بهینه، می‌توان با تغییر مناسب الگوی مصرف، گسترش استفاده از منابع انرژی پاک و کمک به اقتصاد خانواده‌ها، گامی مهم در راستای حفظ محیط‌زیست و احیای آن برداشت.

ساختار کلی هاب انرژی

به‌طورکلی یک هاب انرژی را می‌توان به چهار بخش تقسیم کرد:

- منابع ورودی (برق، گاز و...)
- مبدل‌های انرژی
- ذخیره‌سازها
- خروجی (برق، گرما، سرما و...)

شکل (۱)، نمونه‌ای از یک هاب انرژی را نمایش می‌دهد.

پایه‌سازی شده است. به علاوه، عملکرد سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی موجود و سیستم‌های چند انرژی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است و نتایج نشان دهنده برتری سیستم‌های چند انرژی است [۹]. علاوه بر این، برنامه‌ریزی قوی از ترکیب هاب انرژی‌های سرمایشی، حرارتی و توان در حضور عدم قطعیت تقاضا، سیستم‌های فتوولتائیک و تولید برق بادی و همچنین قیمت برق مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰]. یک سیستم هاب انرژی شامل یک توربین بادی، فتوولتائیک و وسایل نقلیه الکتریکی که با بخش‌های انرژی، حرارتی و گازی، برنامه پاسخگویی بار و بازار ذخیره‌سازی انرژی مبادله می‌شوند، پیشنهاد شده است. بنابراین، عدم قطعیت قیمت توربین بادی، فتوولتائیک، بار و برق در بازار با روش مونت کارلو در این مطالعه مدل‌سازی می‌شود [۱۱]. یک روش مدیریت بهینه‌سازی انرژی برای تعامل بین هاب انرژی هوشمند و کاربران در سیستم انرژی پیشنهاد شده است [۱۲]. نتایج نشان می‌دهد که این تکنیک برای مدیریت انرژی کارآمد در یک سیستم انرژی یکپارچه قابل استفاده است. یک مدل جدید بهینه‌سازی عملیات هاب انرژی در [۱۳] پیشنهاد شده است که پاسخ بهینه بارهای پاسخگو به هزینه‌های تولید انرژی هاب مرتبط را تعیین می‌کند تا هزینه کل عملیات هاب انرژی و همچنین پرداخت‌های مشتری را به حداقل برساند. در [۱۴] بیان شده است که اجرای مناسب برنامه‌های پاسخگویی بار نیازمند ابزارهای زیرساخت‌های مناسب اندازه‌گیری و ارتباطی است که شبکه‌های هوشمند می‌توانند با برقراری ارتباط مناسب دوسویه بین تولیدکننده و مصرف‌کننده، نقش شایانی را ایفا کنند. در همین راستا در این مقاله روشی ارائه شده است بر مبنای ترکیب برنامه‌های پاسخگویی بار و به‌طور خاص بررسی زمان استفاده‌ی تجهیزات در سمت مصرف‌کننده که توسط کنترل‌های هوشمند قابل‌بررسی است و توزیع اقتصادی پویا که قادر به کاهش هزینه‌های مشترکین و تولیدکننده، افزایش میزان رضایت مصرف‌کنندگان و کاهش مصرف سوخت واحدهای تولیدی گردد.

از میان دیگر پژوهش‌ها می‌توان به [۱۵] اشاره کرد که در آن روشی بر مبنای ارتباط بهینه بین هزینه‌های برق و لوازم‌خانگی و خودروهای برقی با اعمال قیمت‌گذاری به شکل آنی مورد بررسی قرار گرفته است که با کمک

زیرساخت‌های مناسب ارتباطی و پیش‌بینی میزان مناسب هزینه‌ها و تقاضا، به کنترل بار مصرفی توسط مشتری کمک می‌کند. در مرجع [۱۶] روشی ارائه شده که با زمان‌بندی خودکار تجهیزات ذخیره‌ی انرژی برای ذخیره‌سازی در ساعات کم باری و تحویل آن به مصرف‌کننده در ساعات اوج مصرف می‌توان میزان بار تحمیلی بر شبکه در ساعات اوج مصرف را کاهش داد و حتی تا بیش از ۳۹ درصد به کاهش مجموع هزینه‌ها کمک نمود. با توجه به قیمت پایین برق در ایران و همچنین گران بودن نسبی تجهیزات ذخیره‌سازی، به نظر می‌رسد در مقیاس کوچک این روش صرفه‌ی اقتصادی چندانی نخواهد داشت. در مرجع [۱۷]، یک مدل جدید برای تجزیه و تحلیل اثرات پاسخ تقاضا در سیستم انرژی هاب‌های به هم پیوسته ارائه شده است. در این راستا، یک مدل بهینه‌سازی برای عملکرد دو انرژی هاب شامل سه انرژی ورودی، دو نوع ذخیره‌سازی و بارهای الکتریکی و حرارتی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۸]، یک مدل عملیات انرژی هاب جدید پیشنهاد شده است که توسط آن تغییرات بار پاسخگو بهینه در برابر قیمت‌های انرژی خروجی هاب انرژی و همچنین برنامه‌های هاب انرژی تعیین می‌شوند. برای دستیابی به این هدف، یک رویکرد سه مرحله‌ای پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۹]، آثار به-کارگیری برنامه‌های پاسخگویی بار بر نوسانات قیمت برق و بهینه‌سازی قابلیت اطمینان شبکه بررسی شده است. در این روش مشتری حتی می‌تواند به شبکه برق بفروشد، همچنین با استفاده از برنامه‌های پاسخگویی بار، دسترسی به بازار انرژی رقابتی بلندمدت و قابل اطمینان امکان‌پذیر است که خود می‌تواند مشوقی برای بهبود مصرف و پروفیل بار شبکه باشد. همان‌گونه که مشاهده شد در چند مقاله‌ی بالا و بسیاری مقالات از این دست تأکید اصلی بر مدیریت بار و اعمال استراتژی‌های مختلف برای شکل‌دهی به الگوی مصرف و همچنین بهبود شرایط برای شبکه و تولیدکنندگان بزرگ مانند نیروگاه‌ها است. در برخی منابع دیگر مانند [۲۰-۲۱] به بررسی تأثیرات استفاده از سامانه‌های چندحاملی تأمین انرژی مانند هاب انرژی در برنامه‌های پاسخگویی بار بر اساس برنامه‌های قیمت‌محور پرداخته شده است و نتایج حاکی از این است که استفاده از سامانه‌های چندحاملی در سمت تولید می‌تواند با همراهی برنامه‌های پاسخگویی بار، به کاهش هزینه‌های مصرف‌کننده کمک بیشتری کند.

مشترکین، رعایت قوانین و قیود مطلوب شبکه‌ی ارائه دهنده‌ی سرویس، کاهش آلاینده‌ها و گسترش استفاده از منابع انرژی‌های نو و تجدیدپذیر است. این موارد در مراجع [۳۱-۲۴] به خوبی مشهود است.

مشارکت اصلی این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

- تعریف یک تابع هدف جدید در این مطالعه با توجه به توان خریداری شده شبکه از CHP و صفحات خورشیدی.
- در نظر گرفتن سه نوع مختلف از برنامه‌های پاسخگویی بار در بهینه‌سازی مدیریت انرژی در سیستم هاب.

- ارائه مدل ریاضی برای بهینه‌سازی ساختار هاب انرژی و بررسی چهار ساختار مختلف هاب انرژی.

این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: در بخش چهارم تعریف مسئله شامل متغیرهای مساله، توابع هدف، قیود مسئله و ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی و نتیجه گیری به ترتیب در بخش‌های پنجم و ششم بیان شده است.

۴- تعریف مسئله پیشنهادی و چارچوب آن

در خصوص بهینه‌سازی ارتباط بین تجهیزات یک هاب انرژی می‌توان دیدگاه‌های مختلف را در نظر گرفت. فناوری‌های مختلفی برای مبدل‌ها، ذخیره‌سازها و منابع تأمین انرژی می‌توان به کار برد.

اگر یک واحد مسکونی با ورودی انرژی معمولی با توجه به شکل (۲) که تنها شامل دو ورودی برق و گاز است را در نظر بگیریم، در صورت عدم اعمال برنامه‌های پاسخگویی بار، هزینه‌ی انرژی مصرفی آن، به روش معمول به صورت معادله‌ی (۱) خواهد بود:

$$C = \sum_{t=1}^T \pi_e(t)P_e(t) + \pi_g(t)P_g(t) \quad (1)$$

در این معادله π_e و π_g به ترتیب قیمت برق و گاز و P_e و P_g میزان مصرف از این دو منبع و T طول دوره است. تنها عمل بهینه‌سازی هزینه‌های قابل‌اعمال بر این سیستم اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار خواهد بود. توجه شود که در سیستم مورد بحث هزینه‌های اجرا و راه‌اندازی اعمال نشده است چون فرض بر وجود سامانه‌ی پایه در محل مصرف‌کننده بوده است.

۴-۱- معادلات و قیود بهینه‌سازی

در این بخش به معادلات و قیود مورد استفاده در مسئله‌ی

اگر بخواهیم تمرکزمان را بیشتر بر روی مشترکین خانگی معطوف نماییم، خواهیم دید که تحقیقات و آزمایشات بسیاری در این زمینه به‌خصوص با همراهی سامانه‌های مدیریت انرژی انجام شده است. برای مثال در مرجع [۲۲] با ارائه‌ی مدلی براساس دسته‌بندی تجهیزات مصرف‌کننده برای مدیریت هوشمند بار خانه‌های هوشمند در حضور هاب انرژی و ادوات ذخیره‌سازی، نسبت به بهبود پروفیل بار و کاهش هزینه‌های مصرف‌کننده اقدام نموده است. خانه‌های هوشمند، بستر مناسبی را برای اجرای مناسب‌تر و بهینه‌تر برنامه‌های مدیریت بار و انرژی فراهم می‌کند. از این رو، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران حوزه‌ی مدیریت انرژی خانگی قرار دارد. در پژوهش‌های دیگر نیز این موارد مورد توجه قرار گرفته است، مانند مراجع [۲۴-۲۳] که با ارائه‌ی سامانه‌ی مدیریت بار هوشمند با استفاده از امکانات فراهم‌شده توسط فناوری‌های ارتباطی و اندازه‌گیری موجود در خانه‌های هوشمند، اقدام به برنامه‌ریزی بهینه برای استفاده از تجهیزات مختلف نموده است. در این پژوهش‌ها علاوه بر کاهش هزینه‌های مشتری، قیود شبکه مانند حد مجاز مصرف و قیمت انرژی مورد توجه بوده است؛ علاوه بر این حضور منابع انرژی تجدیدپذیر نیز در نظر گرفته شده و با زمان‌بندی مناسب باتری‌های موجود در ساختمان به بهبود عملکرد و بهره‌وری از این منابع هم کمک شده است. در [۲۵] با ارائه‌ی مدلی چندگانه از خانه‌های هوشمند برای پاسخگویی بارخانگی بر بستر تکنولوژی‌های کنترلی و ارتباطی مرتبط با هوشمندسازی منازل پرداخته‌اند. نرم‌افزار ارائه‌شده در این پژوهش به صورت یکپارچه عمل پاسخگویی بار و کنترل بهره‌وری انرژی محلی همراه با سطوح مختلفی از تعامل با مشتری را پشتیبانی می‌کند. در این مرجع نیز به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر توجه ویژه شده است و پیش‌بینی می‌شود در سطح قابل قبولی به بهبود الگوی مصرف و کاهش هزینه‌ها و افزایش سود مشتریان کمک نماید. تأکید اصلی این پژوهش بر اجرای مناسب مدل چندگانه و تجزیه و تحلیل و کنترل درست، به‌هنگام و بهینه‌ی داده‌های مختلف و فراوان ارسالی از سنسورها و ادوات هوشمند اندازه‌گیری موجود در ساختمان می‌باشد.

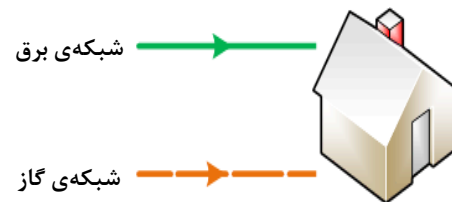
در رابطه با مدیریت هوشمند بارهای خانگی، مباحث مختلف و روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده است. پایه و اساس و هدف اصلی تمام این پژوهش‌ها، بر مبنای کاهش هزینه‌ها، بهبود الگوی مصرف، افزایش سود و رضایت

بهینه‌سازی به تفکیک تجهیزات پرداخته می‌شود.

• **تابع هدف**

تابع هدف اصلی همان رابطه (۱) است که با افزودن متغیرهای دیگر آن را متناسب با هدف اصلی تغییر داد و بهبود بخشید. با در نظر گرفتن امکان فروش برق اضافی تولیدی می‌توان تابع هدف را به شکل زیر تغییر داد.

$$C = \sum_{t=1}^T \pi_e(t) P_e(t) + \pi_g(t) P_g(t) - P_{exSell}^{PV}(t) \cdot FIT_{PV}(t) - P_{exSell}^{CHP}(t) \cdot FIT_{CHP}(t) \quad (2)$$



شکل ۲- ورودی‌های اصلی یک ساختمان مسکونی (حالت پایه)

$$P_{PV}(t) = P_{use}^{PV}(t) + P_{ch}^{PV}(t) + P_{exSell}^{PV}(t), \forall t \in T \quad (6)$$

$$0 \leq P_{PV}(t) \leq P_{max}^{PV} \quad (7)$$

در رابطه (۶)، متغیرهای $P_{use}^{PV}(t)$ ، $P_{ch}^{PV}(t)$ و $P_{exSell}^{PV}(t)$ سه بخش متصل به خروجی PV است. بیان این نکته ضروری است که برای جلوگیری از غیرخطی شدن مسئله، از ضریب مشارکت استفاده نشده و تقسیم‌بندی بر روی خروجی‌ها اعمال شده است.

• **تولید هم‌زمان توان و گرما (CHP)**

استفاده از CHP ها در مقیاس خانگی با توجه به هزینه‌ی اولیه‌ی بالا ممکن است مورد تردید بسیاری از مصرف‌کنندگان باشد اما مزایای همراه آن مانع از چشم‌پوشی از این تجهیز شده است. با توجه به دو خروجی برق و گرما بدون شک فناوری قابل اعتنا و مفیدی بوده و با تغییراتی در مقیاس‌های مختلف قابل استفاده است. در مورد CHP نیز مانند PV خروجی برق آن به سه بخش و همچنین خروجی گرمایی‌اش به دو بخش تقسیم شده است. در بخش گرمایی امکان استفاده از خروجی در دو بخش بار گرمایشی و منبع ورودی برای چیلر تعبیه شده است. معادلات مرتبط:

$$P_{CHP}(t) = P_{use}^{CHP}(t) + P_{ch}^{CHP}(t) + P_{exSell}^{CHP}(t), \forall t \in T \quad (8)$$

$$P_{CHP}(t) = \eta_{ge}^{CHP} G_1(t), \forall t \in T \quad (9)$$

$$H_{CHP}(t) = H_1^{CHP}(t) + H_2^{CHP}(t), \forall t \in T \quad (10)$$

$$H_{CHP}(t) = \eta_{gh}^{CHP} G_1(t), \forall t \in T \quad (11)$$

در معادلات بالا، $P_{CHP}(t)$ و η_{ge}^{CHP} توان الکتریکی تولیدی و بازدهی تولید آن با استفاده از گاز طبیعی است. $H_{CHP}(t)$

در معادله‌ی بالا $P_{exSell}^{PV}(t)$ و $P_{exSell}^{CHP}(t)$ به ترتیب میزان توان الکتریکی تحویلی به شبکه توسط صفحات خورشیدی و CHP است. منظور از $FIT(t)$ ، تعرفه‌ی خرید تضمینی برق ارائه شده توسط شبکه و T مدت زمان مورد بررسی است. برای مقادیر $P_e(t)$ و $P_g(t)$ نیز می‌توان قید محدودیت مصرف به شکل زیر اعمال نمود.

$$0 \leq P_e(t) \leq P_{max}^e \quad (3)$$

$$0 \leq P_g(t) \leq P_{max}^g \quad (4)$$

• **صفحه‌ی خورشیدی (فتوولتائیک-PV)**

میزان تولید صفحات خورشیدی به میزان تابش سراسری روزانه‌ی خورشید، سطح مقطع صفحات و بازدهی آن‌ها وابسته است. معادلات مرتبط در ادامه آمده‌اند.

$$P_{PV}(t) = \eta_{PV} Irr(t) A_{PV}, \forall t \in T \quad (5)$$

منظور از η_{PV} ، بازدهی کلی خروجی PV با احتساب بازدهی اینورتر، کاهش تولید ناشی از آلودگی‌های محیط و افزایش دما و بازدهی سلول‌هاست. عوامل فوق در تعیین تعداد پنل‌های مورد نیاز و انتخاب باتری قابل استفاده برای آن مؤثرند.

متغیر دودویی $I_C(t)$ و $I_H(t)$ در نظر گرفته شده است که در هر زمان تنها یکی از آن‌ها می‌تواند مقدار یک (به معنی فعال) را اختیار کند. در خصوص پمپ‌های حرارتی، پارامتر ضریب عملکرد مطرح می‌شود. ضریبی بدون بُعد با مقداری بزرگ‌تر یا مساوی یک. هرچه مقدارش بزرگ‌تر باشد بیانگر عملکرد بهتر پمپ حرارتی است. این کمیت برابر با نسبت گرمای گرفته شده از اتاق به کار انجام‌شده توسط پمپ حرارتی است.

$$COP = \frac{Q_c}{W} \quad (16)$$

پس در ادامه خواهیم داشت:

$$C_{EHP}(t) + H_{EHP}(t) = COP_{EHP} E_{EHP}(t), \forall t \in T \quad (17)$$

$$0 \leq H_{EHP}(t) \leq H_{max}^{EHPH} \quad (18)$$

$$0 \leq C_{EHP}(t) \leq C_{max}^{EHPc} \quad (19)$$

$$I_H(t) + I_C(t) \leq 1, \forall t \in T \quad (20)$$

$$I_H, I_C \in \{0,1\} \quad (21)$$

در روابط فوق، $C_{EHP}(t)$ و $H_{EHP}(t)$ مقدار توان سرمایشی و گرمایشی خروجی EHP را نشان می‌دهند. کمیت $E_{EHP}(t)$ نیز میزان توان الکتریکی مصرفی EHP است.

• باتری و انباره گرمایی

روابط مربوط به سیستم‌های ذخیره انرژی به شرح زیر می‌باشد:

$$SOC(t) = 0.999SOC(0|t=1) + 0.999SOC(t-1|t>1) + \eta_{ch} E_{ch}(t) - \frac{E_{dch}(t)}{\eta_{dch}}, \forall t \in T \quad (22)$$

$$0.2SOC_{max} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (23)$$

$$E_{ch}(t) = \eta_{ee}^{Tr} E_{1,net}(t) + P_{ch}^{CHP}(t) + P_{ch}^{PV}(t), \forall t \in T \quad (24)$$

$$0 \leq E_{dch}(t) \leq 0.2SOC_{dchmax} \quad (25)$$

$$0 \leq E_{ch}(t) \leq 0.2SOC_{chmax} \quad (26)$$

$H_1^{CHP}(t)$ ، $H_2^{CHP}(t)$ به ترتیب میزان گرمای تولیدی، سهم بار گرمایی کل از آن و سهم چیلر است؛ پارامتر η_{gh}^{CHP} بازدهی تولید حرارت و $G_1(t)$ میزان توان دریافتی از شبکه‌ی سراسری گاز در ورودی CHP است. قید محدودکننده در ورودی CHP اعمال شده که در بخش مربوطه بیان خواهد شد.

• مشعل (Fr)

مشعل‌ها، گرمکن‌ها و پکیج‌ها تجهیزاتی هستند که امروزه در بسیاری از ساختمان‌ها استفاده می‌شود. خروجی مشعل نیز به دو بخش تقسیم شده است. معادلات مربوطه به شرح زیر است:

$$H_{Fr}(t) = H_1^{Fr}(t) + H_2^{Fr}(t), \forall t \in T \quad (12)$$

$$H_{Fr}(t) = \eta_{gh}^{Fr} G_2(t), \forall t \in T \quad (13)$$

در رابطه (۱۲)، متغیر $H_1^{Fr}(t)$ برای تأمین مستقیم بار گرمایی و $H_2^{Fr}(t)$ به عنوان منبع ورودی چیلر استفاده می‌شود.

• چیلر (Ch)

از چیلر برای تأمین نیاز سرمایی ساختمان استفاده می‌شود. از این تجهیز به تنهایی یا همراه با سایر تجهیزات تهویه‌ی مطبوع مانند هواسازها و پمپ‌های حرارتی و ... می‌توان استفاده کرد. معادلات عملکردی آن را در ادامه خواهید دید:

$$C_{Ch}(t) = \eta_{hc}^{Ch} (H_2^{Fr}(t) + H_2^{CHP}(t)), \forall t \in T \quad (14)$$

$$0 \leq C_{Ch}(t) \leq C_{max}^{Ch} \quad (15)$$

در رابطه (۱۴)، مقدار $C_{Ch}(t)$ میزان سرمای تولیدی چیلر برحسب کیلووات و η_{hc}^{Ch} بازدهی عملکردی آن است. رابطه (۱۵) نیز قید محدودکننده‌ی میزان تولیدی چیلر است.

• پمپ حرارتی (HP)

پمپ‌های حرارتی دارای قابلیت تولید گرما در فصول سرد و سرما در فصول گرم هستند و انواع مختلفی دارند؛ پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی، هوایی، آب و الکتریکی. در این پژوهش از پمپ حرارتی برقی (EHP) استفاده شده است. پمپ‌های حرارتی در زمان عملکرد قادر به فعالیت در یک حالت خود هستند، به بیان دیگر در زمان موردنظر خروجی یا گرما است یا سرما؛ بنابراین برای رعایت این ویژگی، دو

در رابطه بالا، $H_1^{CHP}(t)$ ، $H_1^{Fr}(t)$ و $H_{EHP}(t)$ به ترتیب گرمای تولیدی از CHP، مشعل و پمپ حرارتی است. $D_h(t)$ و $DHW(t)$ نیز بار گرمایشی و توان مورد نیاز برای تأمین آب گرم مصرفی هستند. معمولاً این دو کمیت را می‌توان یکجا نیز در نظر گرفت. متغیرهای $Q_d(t)$ و $Q_c(t)$ نیز مربوط به میزان توان ورودی و خروجی به انباره‌ی حرارتی است.

• **تأمین بار سرمایشی (D_c)**

معادله‌ی *Error! Reference source not found* بیانگر رابطه‌ی تعادل سرمایشی است:

$$C_{Ch}(t) + C_{EHP}(t) = D_c(t), \forall t \in T \quad (31)$$

$C_{EHP}(t)$ ، $C_{Ch}(t)$ و $D_c(t)$ به ترتیب توان سرمایشی خروجی از پمپ حرارتی و چیلر و بار سرمایشی ساختمان است.

• **میزان فروش برق به شبکه**

میزان فروش کلی برق به شبکه به صورت زیر است:

$$P_{exSell}(t) = P_{exSell}^{PV}(t) + P_{exSell}^{CHP}(t), \forall t \in T \quad (32)$$

• **سایر قیود**

برای کنترل میزان گاز ورودی به مشعل و CHP دو قید زیر در نظر گرفته شده است:

$$0 \leq G_1(t) \leq P_{max}^{CHP} \quad (33)$$

$$0 \leq G_2(t) \leq P_{max}^{Fr} \quad (34)$$

۵- نتایج مدل‌سازی و بهینه‌سازی

در ادامه به عنوان نمونه برخی نتایج حاصل از مدل‌سازی و بهینه‌سازی در چهار ساختار مختلف هاب انرژی در ۴ روز عنوان شده و دو روش قیمت‌گذاری ساعتی، زمان استفاده مورد استفاده در ایران آورده شده است. چهار ساختار پیشنهادی در جدول ۲ ارائه شده است. این روزها عبارتند از: ۸: فروردین، ۱۲: مرداد، ۲: آبان و ۲۳: اسفند.

۵-۱- ساختار اول

در این ساختار از صفحات خورشیدی و باتری استفاده نشده است. نتایج حاصل در ادامه ارائه شده است.

• **استفاده از قیمت‌گذاری ساعتی**

در روش قیمت‌گذاری ساعتی قیمت به‌طور پیوسته تغییر می‌کند و مستقیماً متأثر از قیمت‌های بازار عمده‌فروشی

$$I_{dch}(t) + I_{ch}(t) \leq 1, \forall t \in T \quad (27)$$

$$I_{ch}, I_{dch} \in \{0,1\} \quad (28)$$

دلیل ضرب عدد ۰/۹۹۹ در رابطه (۲۲) اعمال تلفات انرژی ناشی از گذشت زمان (E_{stdby}) است. این مقدار برای انباره-ی گرمایی ۰/۹۹۹ در نظر گرفته شده است. این دو عدد بیانگر این است که میزان افت سطح انرژی در باتری و انباره‌ی حرارتی به ترتیب ۰/۱ و ۱ درصد فرض شده است. سایر روابط مربوط به انباره‌ی حرارتی نیز مانند باتری است با این تفاوت که از متغیر SOW برای سطح موجودی مخزن و Q_c و Q_d برای نمایش توان ورودی و خروجی به انباره استفاده شده و ضریب ۰/۵ برای محدودیت ورود و خروج اعمال شده است [۳۲-۳۴]. همان‌گونه که در (۲۴) مشاهده می‌نمایید برای شارژ باتری سه منبع برق شهر، PV و CHP در نظر گرفته شده است.

• **تأمین بار الکتریکی (D_e)**

برای تأمین بار الکتریکی منابع مختلفی می‌توان در نظر گرفت. در کامل‌ترین حالت که از تمام تجهیزات استفاده شده باشد، می‌توان رابطه تعادل بار الکتریکی را به شکل معادله‌ی (۴-۵) نوشت.

$$\begin{aligned} \eta_{ee}^{Tr} E_{2,net}(t) + P_{use}^{CHP}(t) + P_{use}^{PV}(t) \\ + E_{dch}(t) \\ = D_e(t) \\ + E_{EHP}(t), \forall t \in T \end{aligned} \quad (29)$$

در رابطه بالا، η_{ee}^{Tr} ، $E_{2,net}(t)$ ، $E_{EHP}(t)$ ، $P_{use}^{CHP}(t)$ ، $P_{use}^{PV}(t)$ ، $E_{dch}(t)$ و $D_e(t)$ به ترتیب بیانگر بهره‌ی ترانسفورماتور، میزان برق مصرفی از شبکه، میزان توان الکتریکی مورد نیاز برای پمپ حرارتی، توان‌های الکتریکی تولیدی CHP و PV برای استفاده‌ی محلی، توان تخلیه‌شده (دشارژ) از باتری و میزان بار الکتریکی است. در صورت عدم استفاده از هر تجهیز بالطبع مقدار مربوطه از معادله حذف خواهد شد.

• **تأمین بار گرمایشی (D_h)**

سبک معادله‌ی تعادل حرارتی نیز مانند بار الکتریکی است؛ به شکل زیر:

$$\begin{aligned} H_1^{CHP}(t) + H_1^{Fr}(t) + H_{EHP}(t) \\ + Q_d(t) \\ = D_h(t) + DHW(t) \\ + Q_c(t), \forall t \in T \end{aligned} \quad (30)$$

استفاده است. هدف از این روش، تشویق مشترکین به انتقال برخی از مصارف خود به خارج از ساعات اوج مصرف یا پیک بار است. در این روش ساعات روز به سه دسته‌ی اوج بار (پیک)، میان‌باری و کم‌باری تقسیم می‌شود که بالطبع قیمت برق در پیک بیشترین و در کم‌باری کمترین مقدار خود را داراست. در ایران از این روش برای اعمال تشویق و جریمه بر مصرف کل یک دوره‌ی مصرف استفاده می‌شود. جدول ۶ شامل نتایج حاصل برای تأمین بار الکتریکی ساختمان و هزینه‌ها در حالت استفاده از روش قیمت‌گذاری زمان استفاده آمده است.

علت تفاوت توان موردنیاز با مقادیر جدول ۳ به خاطر عدم به‌کارگیری پمپ حرارتی برقی در کل زمان مدل‌سازی است. جدول ۶ نیز سهم هر تجهیز در تأمین بارهای گرمایشی را نشان می‌دهند. سهم تجهیزات برای تأمین بار گرمایشی در این حالت نیز مانند حالت قبل است.

برقی است که به‌شکل ساعتی یا آغاز هرروز برای برنامه‌ریزی اولیه ارسال می‌شود. این روش فقط برای مصرف‌کنندگان بزرگ استفاده می‌شود. در جدول ۳ خلاصه نتایج حاصل با استفاده از قیمت‌گذاری ساعتی آورده شده است. با توجه به روش قیمت‌گذاری ساعتی که قیمت برق در برخی روزها و بعضی ساعات صفر است، مشاهده می‌شود که به‌عنوان مثال در روز سوم تقریباً تمامی برق موردنیاز از شبکه تأمین شده است. در جداول ۴ و ۵ به ترتیب نحوه‌ی تأمین بارهای گرمایشی و سرمایشی توسط هاب انرژی آورده شده است. طبق جداول بالا مشاهده می‌شود که در تابستان به دلیل بالا بودن قیمت‌برق در سیستم ساعتی، برای سرمایش و گرمایش از انرژی الکتریکی استفاده نشده است.

• استفاده از قیمت‌گذاری زمان استفاده

یکی از ساده‌ترین این روش‌ها، قیمت‌گذاری به روش زمان

جدول ۲- ساختارهای مختلف هاب انرژی موردبررسی

ساختار	گازسوز	CHP	مشعل	فتوولتایی	چیلر	پمپ	باتری	آبشاری حرارتی
ساختار اول	✓	✓	✓	×	✓	✓	×	✓
ساختار دوم	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓
ساختار سوم	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ساختار چهارم	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

جدول ۳- خلاصه نتایج بهینه‌سازی در بخش مصرف برق با استفاده از قیمت‌گذاری ساعتی در ساختار اول

روز	توان موردنیاز (کیلووات ساعت)	E_{net} (کیلووات ساعت)	P_{use}^{CHP} (کیلووات)	P_{exSell}^{CHP} (کیلووات)	پرداخت (ریال)	دریافت (ریال)	هزینه بدون حضور هاب (ریال)
روز اول	۴۴/۹۱	۳۱/۰۳	۱۳/۵	۸/۱	۲۱۷۰۱۱۵۹/۵۸	۵۹۸۹۱۴۶/۷۷	۴۳۷۲۰۰۶/۵۶
روز دوم	۲۸/۱۵	۸/۶۱	۱۹/۷۱	۱/۸۹	۱۷۲۶۵۲۶۴/۵۰	۱۳۹۸۲۳۲/۴۸	۵۴۴۹۰۲۷۲/۱۲
روز سوم	۳۹/۰۷	۳۸/۰۳	۱/۸	۱۹/۸	۹۲۶۹۰۲۶/۹۰	۱۴۶۳۵۵۴۷/۱۸	۱۲۴۱۳۷۷۵/۱۵
روز چهارم	۳۲/۲۴	۱۷/۲۴	۱۵/۳۴	۶/۲۶	۱۰۹۶۳۵۲۹/۶۴	۴۶۲۸۱۳۹/۳۰	۳۰۶۴۱۲۸۰/۵۹

جدول ۴- سهم هر تجهیز در تأمین بار گرمایشی موردنیاز ساختمان با قیمت‌گذاری ساعتی

روز	توان موردنیاز (کیلووات ساعت)	E_{net} (کیلووات ساعت)	H_{CHP}	H_{Fr}	H_{EHP}	Q_d
روز اول	۵۸/۳۳	۸/۴۱	۱۶/۸	۳	۲۶/۹	۱۱/۶۲
روز دوم	۹/۴۳	۰	۲/۸	۶/۳۲	۰	۰/۳۱
روز سوم	۵۲/۱۱	۱۱/۵۵	۱۶/۸	۳/۴۹	۳۶/۹۷	۱۵/۵۲
روز چهارم	۶۶/۸۴	۲/۰۷	۱۶/۸	۴۴/۶۹	۶/۶۳	۳/۹۵

جدول ۵- سهم هر تجهیز در تأمین بار سرمایشی موردنیاز ساختمان با قیمت‌گذاری ساعتی

C_{Ch}	C_{EHP}	E_{net} (کیلووات ساعت)	توان موردنیاز (کیلووات ساعت)	
۰	۰	۰	۰	روز اول
۱۰۷/۲۶	۰	۰	۱۰۷/۲۶	روز دوم
۰	۰	۰	۰	روز سوم
۰	۰	۰	۰	روز چهارم

جدول ۶- خلاصه نتایج بهینه‌سازی در بخش مصرف برق با استفاده از قیمت‌گذاری زمان استفاده در ساختار اول

توان موردنیاز (کیلووات ساعت)	E_{net} (کیلووات ساعت)	P_{use}^{CHP} (کیلووات)	P_{exSell}^{CHP} (کیلووات)	پرداخت (ریال)	دریافت (ریال)	هزینه بدون حضور هاب (ریال)	روز
۳۵/۵	۳۶/۲۲	۰	۲۱/۶	۱۶۴۸۳۰۲۹/۴۰	۱۵۹۷۱۰۵۸/۰۷	۱۶۱۵۳۱۰۳/۶۵	روز اول
۲۸/۱۵	۲۸/۷۲	۰	۲۱/۶	۱۳۰۹۳۵۱۳/۹۸	۱۵۹۷۱۰۵۸/۰۷	۱۲۸۳۱۴۰۹/۱۴	روز دوم
۲۷/۵	۲۸/۰۷	۰	۲۱/۶	۱۲۹۹۶۱۱۷/۰۵	۱۵۹۷۱۰۵۸/۰۷	۱۲۷۳۶۵۶۱/۸۶	روز سوم
۳۰/۱۷	۳۰/۷۸	۰	۲۱/۶	۱۴۲۸۳۱۸۴/۴۳	۱۵۹۷۱۰۵۸/۰۷	۱۳۹۹۷۶۲۲/۷۳	روز چهارم

جدول ۷- سهم هر تجهیز در تأمین بار گرمایشی موردنیاز ساختمان با قیمت‌گذاری زمان استفاده

توان موردنیاز (کیلووات ساعت)	E_{net} (کیلووات ساعت)	H_{CHP}	H_{Fr}	H_{EHP}	Q_d	روز
۵۸/۳۳	۰	۱۶/۸	۲۷/۰۹	۰	۳/۰۲	روز اول
۹/۴۳	۰	۵/۲۶	۳/۸۶	۰	۰/۳	روز دوم
۵۲/۱۱	۰	۱۶/۸	۳۶/۳۷	۰	۲/۷	روز سوم
۶۶/۸۴	۰	۱۶/۸	۵۰/۸۸	۰	۲/۱۴	روز چهارم

جدول ۷- خلاصه نتایج بهینه‌سازی در بخش مصرف برق با استفاده از روش‌های قیمت‌گذاری ساعتی و زمان استفاده برای ساختار دوم

روز	توان موردنیاز (کیلووات ساعت)		E_{net} (کیلووات ساعت)		P_{use}^{CHP} (کیلووات)		E_{dch} (کیلووات ساعت)		P_{exSell}^{CHP} (کیلووات)		دریافت (سنت)	
	ساعتی	زمان استفاده	ساعتی	زمان استفاده	ساعتی	زمان استفاده	ساعتی	زمان استفاده	ساعتی	زمان استفاده	ساعتی	زمان استفاده
اول	۴۳/۹۱	۳۵/۵	۳۳/۶۳	۳۷/۲۵	۱۱/۴۳	۰	۶/۴	۴/۰۴	۸/۱	۲۱/۶	۱۳۷۰۵۹۴/۸۵	۱۵۹۷۱۰۵۸/۰۷
دوم	۲۸/۱۵	۲۸/۱۵	۹/۰۹	۲۹/۷۵	۱۶/۵۴	۰	۴/۰۱	۴/۰۴	۱/۳۴	۲۱/۶	۱۱۵۰۰۹۹۷/۵۶	۱۵۹۷۱۰۵۸/۰۷
سوم	۳۹/۰۷	۲۷/۵۱	۴۰/۷۲	۲۹/۵۷	۱	۰	۷/۶۱	۶/۰۴	۲۰/۵۹	۲۱/۶	۴۳۳۷۳۳۴/۸۸	۱۵۹۷۱۰۵۸/۰۷
چهارم	۳۲/۴۴	۳۰/۱۷	۱۷/۴۵	۳۲/۲۸	۱۴/۵۷	۰	۴/۲۵	۶/۰۴	۵/۴۳	۲۱/۶	۸۹۱۴۱۱۴/۵۰	۱۵۹۷۱۰۵۸/۰۷

جدول ۸- خلاصه نتایج بهینه سازی در بخش بارهای گرمایشی با استفاده از روش های قیمت گذاری ساعتی و زمان استفاده برای ساختار

دوم

Q_d	H_{EHP}		H_{Fr}		H_{CHP}		E_{net} (کیلووات ساعت)		توان مورد نیاز (کیلووات ساعت)		روز
	زمان استفاده	ساعتی	زمان استفاده	ساعتی	زمان استفاده	ساعتی	زمان استفاده	ساعتی	زمان استفاده	ساعتی	
۳/۰۲	۱۱/۶۲	۰	۲۷/۰۸	۲۶/۹	۱۶/۸	۱۶/۸	۰	۸/۴۱	۵۸/۳۳	۵۸/۳۳	اول
۰/۶۵	۰/۳۱	۰	۵/۲۶	۰	۳/۷۵	۴/۶۷	۰	۰	۹/۴۳	۹/۴۳	دوم
۲/۷	۱۵/۵	۰	۳۶/۳۷	۳۶/۹۷	۱۶/۸	۱۶/۸	۰	۱۱/۵۵	۵۲/۱۱	۵۲/۱۱	سوم
۲/۱۴	۳/۹۵	۰	۵۰/۸۸	۶/۶۳	۱۶/۸	۱۶/۸	۰	۲/۰۷	۶۶/۸۴	۶۶/۸۴	چهارم

بار سرمایشی صرفاً در روز دوم (۱۲ مرداد) وجود دارد که تماماً توسط چیلر تأمین می شود. در ادامه نتایج حاصل از بهینه سازی با اعمال قیمت گذاری ایران آورده شده اند. جداول ۹ و ۱۰ شامل نتایج بارهای الکتریکی و بارهای گرمایشی هستند.

۵-۲- ساختار دوم

در ساختار دوم صفحات خورشیدی حذف و باتری اضافه شده است. نتایج حاصل برای تأمین بار الکتریکی ساختار دوم در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج بار گرمایشی در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۹- سهم هر تجهیز در تأمین بار الکتریکی در ساختار دوم

دریافت (ریال)	پرداخت (ریال)	P_{exSell}^{CHP} (کیلووات)	E_{dch} (کیلووات ساعت)	P_{use}^{CHP} (کیلووات)	E_{net} (کیلووات ساعت)	توان مورد نیاز	
۹۱۴۲۰۵۳۹۲/۷۴	۱۴۲۰۶۶۹۴۶۹/۰۸	۱۸	۴/۰۴	۳/۶	۳۳/۶۱	۳۵/۵	روز اول
۷۳۱۳۴۴۳۹۱۶/۹۳	۸۱۲۰۶۶۰۹۰/۹۹	۱۴/۴	۴/۹۲	۷/۲	۲۲/۶۵	۲۸/۱۵	روز دوم
۹۱۵۱۷۴۴۲۶۲/۸۰	۱۰۳۷۲۵۱۸۹۰/۵۴	۱۸/۰۲	۳/۹۸	۳/۵۸	۲۵/۴۷	۲۷/۵۱	روز سوم
۹۱۴۲۰۵۳۹۲/۷۴	۱۲۱۴۷۰۸۰۹۱/۲۸	۱۸	۴/۹۲	۳/۶	۲۸/۱۷	۳۰/۱۷	روز چهارم

جدول ۱۰- سهم هر تجهیز در تأمین بار حرارتی در ساختار دوم

Q_d	H_{EHP}	H_{Fr}	H_{CHP}	E_{net} (کیلووات ساعت)	توان مورد نیاز (کیلووات ساعت)	
۳/۰۲	۰	۲۷/۰۸	۱۶/۸	۰	۵۸/۳۳	روز اول
۰/۳۱	۰	۵/۵۶	۳/۵۶	۰	۹/۴۳	روز دوم
۲/۷	۰	۳۶/۳۷	۱۶/۸	۰	۵۲/۱۱	روز سوم
۲/۱۴	۰	۵۰/۸۸	۱۶/۸	۰	۶۶/۸۴	روز چهارم

• اعمال قیمت‌گذاری‌های ایران

نتایج حاصل از مدل‌سازی با اعمال روش قیمت‌گذاری مورد استفاده در ایران بدون احتساب، مالیات، آبونمان و عوارض در ادامه آورده شده است. در ایران براساس نرخ نامی سال ۱۳۹۵ هر کیلووات برق تولیدی

ژنراتورهای مقیاس کوچک و CHP ها به قیمت ۹۹۶ ریال خریداری می‌شود همچنین مبلغ هر مترمکعب گاز مصرفی یک‌پنجم حالت معمول محاسبه می‌شود. نرخ خرید برق خورشیدی خانگی نیز ۸۰۰۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت است. نحوه‌ی تأمین بار سرمایشی در این حالت نیز مشابه دو حالت قبل است.

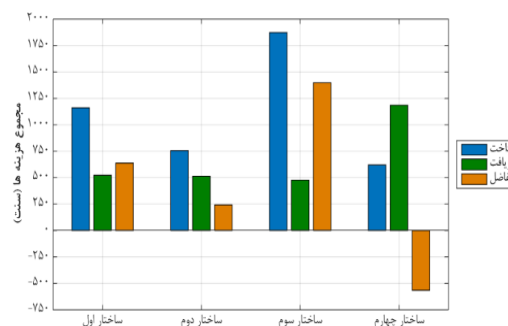
جدول ۱۱- خلاصه نتایج بهینه‌سازی در بخش مصرف برق با استفاده از روش قیمت‌گذاری داخل ایران در ساختار اول

روز اول	توان موردنیاز (کیلووات ساعت)	E_{net} (کیلووات ساعت)	P_{use}^{CHP} (کیلووات)	P_{exSell}^{CHP} (کیلووات)	پرداخت (ریال)	دریافت (ریال)	هزینه بدون حضور هاب (ریال)
روز اول	۳۵/۵	۳۲/۵۵	۳/۶	۱۸	۲۹۸۵۳	۱۷۹۱۰	۳۴۲۰۶
روز دوم	۲۸/۱۵	۲۱/۳۸	۷/۲	۱۴/۴	۱۸۲۵۴	۱۴۳۴۲/۴	۲۷۳۲۱
روز سوم	۲۷/۵	۲۴/۴	۳/۶	۱۸	۲۲۲۷۱	۱۷۹۱۰	۲۶۸۳۳
روز چهارم	۳۰/۱۷	۲۷/۱۱	۳/۶	۱۸	۲۵۷۷۵	۱۷۹۱۰	۳۰۳۳۹

جدول ۱۲- سهم هر تجهیز در تأمین بار گرمایشی موردنیاز ساختمان با قیمت‌گذاری ایران

روز اول	توان موردنیاز (کیلووات ساعت)	E_{net} (کیلووات ساعت)	H_{CHP}	H_{Fr}	H_{EHP}	Q_d
روز اول	۵۸/۳۳	۰	۱۸/۸	۳۶/۵	۰	۳
روز دوم	۹/۴۳	۰	۲/۵۶	۶/۵۷	۰	۰/۳۱
روز سوم	۵۲/۱۱	۰	۱۶/۸	۳۶/۳۷	۰	۲/۷
روز چهارم	۶۶/۸۴	۰	۱۶/۸	۵۰/۸۸	۰	۲/۱۴

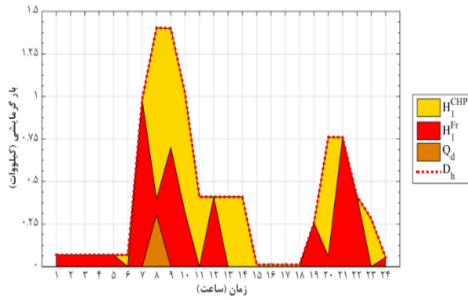
نتایج ساختارهای سوم و چهارم هم از روند دو ساختار اول تا حد زیادی پیروی می‌کنند و تفاوت در سطح هزینه‌ها است. در ادامه شکل (۳) نتایج مقایسه‌ی مجموع هزینه‌ها و دریافتی کل ۴ روز مربوط به برق به تفکیک ساختار و اعمال روش قیمت‌گذاری ساعتی مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مقایسه‌ی هزینه‌های کل ۴ روز به تفکیک ساختار هاب انرژی براساس قیمت‌گذاری ساعتی

همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شد، هزینه‌های پرداختی خالص بوده و بدون احتساب عوارض و مالیات است.

هزینه‌ی معمول این ۴ روز بدون حضور هاب ۱۴۱۲۵۱۰۵۶/۳۳ ریال است. مشاهده می‌شود که باتوجه به ثابت بودن تعرفه‌ی خرید گاز و فروش برق به شبکه، نوع قیمت‌گذاری برق بیشترین تأثیر را بر کاهش یا افزایش استفاده از سایر منابع تولید برق دارد. همچنین استفاده از چند منبع تولید انرژی و همین‌طور ذخیره سازهای انرژی نیز در کاهش هزینه‌ها مؤثر خواهند بود. در ساختار سوم به دلیل حذف CHP، منبع ورودی برای چیلر کاهش یافته که عامل افزایش بار سرمایشی بر روی منابع تأمین برق شده است؛ باتوجه به بالا بودن قیمت برق در تابستان در سیستم قیمت دهی ساعتی و وجود عمده بار سرمایشی در آن روز، شاهد بالا بودن مصرف برق و افزایش هزینه‌های پرداختی هستیم. این مورد در ساختار چهارم با توجه به تعدد منابع تولید انرژی تا حد زیادی برطرف شده است. هزینه‌ی کل این ۴ روز بدون حضور هاب حدود ۱۴۱۲۵۱۰۵۶/۳۳ ریال است.



شکل ۸- سهم هریک از تجهیزات در تأمین نیاز گرمایشی ساختمان

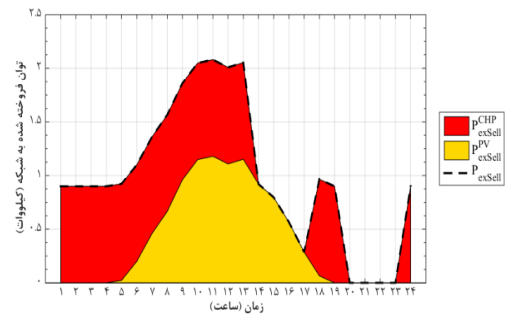
در ادامه نتایج عملکرد ساختار چهارم سامانه‌ی هاب انرژی در روز ۱۲ مرداد با اعمال قیمت‌گذاری ایران آورده شده است. در این روز همانگونه که مشاهده نمودید ترجیح سامانه بر فروش کامل برق خورشیدی تولیدی و بخش عمده‌ی تولید به CHP شبکه است که سود بیشتری برای مشترک به همراه دارد.

در تمام موارد نیازهای انرژی مصرف‌کنندگان به خوبی تأمین شده‌است. علاوه بر اینکه در تمام موارد ما شاهد کاهش هزینه‌های پرداختی روزانه به شبکه هستیم که در مقیاس بزرگتر و مدت یک سال یا چندسال می‌تواند مبلغ قابل توجهی در هزینه‌ها صرفه‌جویی شود و شاهد بازگشت سرمایه باشیم.

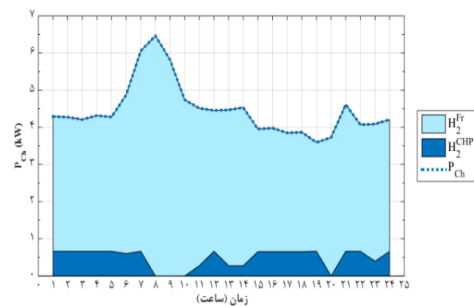
در بخش شارژ و دشارژ در تمام حالات براساس شکل (۶) مشاهده می‌شود که باتری در زمان‌های کم‌باری شارژ و در ساعات پرباری دشارژ می‌شود که مطلوب‌ترین حالت عملکرد باتری است.

۶- نتیجه‌گیری

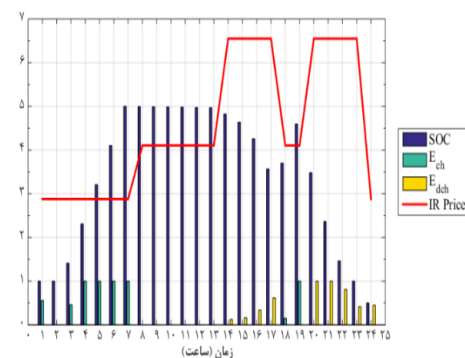
مقوله‌ی مدیریت انرژی و به‌ویژه هاب انرژی از دیدگاه‌های مختلف بسیار گسترده و انعطاف‌پذیر است. طی سالیان اخیر پژوهش‌های گوناگون در خصوص جنبه‌های مختلف آن انجام شده و همچنان نیز در حال انجام است. در این پژوهش، بخش کوچکی از قابلیت‌های قابل ارائه‌ی هاب انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. مصرف‌کنندگان خانگی به‌تنهایی در قیاس با سایر مصرف‌کنندگان مصرف کمی دارند، اما تعداد بیشتری را شامل می‌شوند که باعث ایفای نقشی مهم در شبکه‌ی توزیع برق و مصرف انرژی می‌شود. طی بررسی‌های انجام شده و با توجه به سیاست‌های قیمت‌گذاری مختلف که توسط دولت‌ها و سایر دستگاه‌های



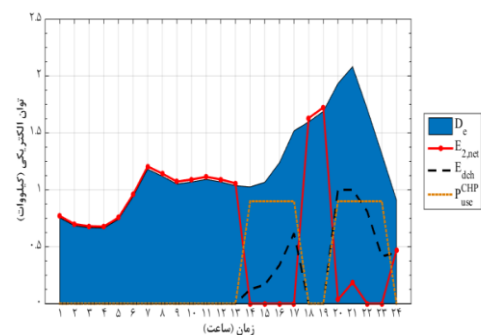
شکل ۴- سهم منابع مختلف در تأمین بار الکتریکی موردنیاز توسط ساختار چهارم در ۱۲ مرداد



شکل ۵- میزان برق تولیدی توسط مشترک و سهم هر کدام از منابع در آن



شکل ۶- تغییرات سطح انرژی ذخیره شده در باتری و میزان شارژ و دشارژ آن



شکل ۷- سهم هریک از منابع گرمایی در تأمین انرژی موردنیاز چیلر برای پاسخگویی مناسب به تقاضای سرمایشی ساکنین

مختلف در طول دوره‌ی مورد بررسی شده است. روش زمان استفاده به دلیل ثابت بودن نرخ‌ها موردی مناسب برای پیش‌بینی نسبتاً دقیق هزینه‌ها در بحث پیش‌بینی بار و تخمین هزینه‌هاست. روش مورد استفاده در ایران با وجود عادلانه‌تر بودن قیمت‌گذاری انعطاف کمتری در مقابل برنامه‌های مدیریت مصرف از خود نشان می‌دهد زیرا براساس میزان متوسط مصرف طی دوره‌های مشخص محاسبه می‌گردد؛ که این موضوع برای برآورد روزانه و لحظه‌ای هزینه‌ها مشکل ساز است و نیازمند به اجرای برنامه‌های پیش‌بینی قیمت براساس اطلاعات قبلی یا برنامه‌های شبیه‌ساز مصرف است که حجم اطلاعات و محاسبات بالاتری را به دنبال خواهد داشت.

اجرای مسئول در بخش خانگی، این بخش زمینه‌ی مناسبی برای اجرای برنامه‌های مدیریت انرژی و مصرف است، همان‌گونه که روش‌های قیمت‌گذاری اعمالی نیز در پی تحقق این امر هستند. با توجه به تنوع فصل در کشور ایران، استفاده از پنل‌های فتوولتائیک و مزارع بادی به دلیل ارزان بودن قیمت فروش آن‌ها در مکان‌های نصب مناسب می‌تواند از هزینه‌های هاب انرژی به ویژه در شرایط پرباری بکاهد.

از میان روش‌های قیمت‌گذاری استفاده شده در این مطالعه، روش قیمت‌گذاری ساعتی با توجه به ساختارش امکان‌مانور و آزادی عمل بیشتری را در اختیار هاب قرار می‌دهد که خود باعث عملکرد بهتر هاب و شرکت مناسب‌تر تجهیزات

مراجع

- [1] Favre-perrod P, Geidl M, Kl B, Koeppl G, "A Vision of Future Energy Networks," Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa. Durban, South Africa, 2005.
- [2] Mohammadi M, Noorollahi Y, Mohammadi-ivatloo B, Hosseinzadeh M, Yousefi H, Khorasani ST, "Optimal management of energy hubs and smart energy hubs – A review," *Renew Sustain Energy Rev*, Vol. 89, 2018, pp.33–50.
- [3] Mohammadi M, Noorollahi Y, Mohammadi-ivatloo B, Yousefi H, "Energy hub: From a model to a concept – A review," *Renew Sustain Energy Rev*, Vol.80, 2017, pp.1512–1527.
- [4] Geidl M, Koeppl G, Favre-Perrod P, Klöckl B, Andersson G, Fröhlich K, "Energy Hubs for the Future," *IEEE Power & Energy Magazine*. 2007, pp.24–30.
- [5] Ha T, Zhang Y, Thang V V., Huang J, "Energy hub modeling to minimize residential energy costs considering solar energy and BESS," *J Mod Power Syst Clean Energy*, Vol.5, NO.3, 2017, pp.389–399.
- [6] Ter-Gazarian AG, "Energy Storage for Power Systems: The Institution of Engineering and Technology," 2nd ed. IET Power and Energy Series. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology (IET); 2011, pp. 31-39.
- [7] Aljabery, A. A. M., Mehrjerdi, H., Mahdavi, S., & Hemmati, R, "Multi carrier energy systems and energy hubs: Comprehensive review, survey and recommendations," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.46, 2021, pp. 23795-23814.
- [8] Javadi, M. S., Nezhad, A. E., Jordehi, A. R., Gough, M., Santos, S. F., & Catalão, J. P, "Transactive energy framework in multi-carrier energy hubs: A fully decentralized model," *Energy*, Vol.238, 2022, pp. 121717.
- [9] Son, Y.-G., Oh, B.-C., Acquah, M. A., Fan, R., Kim, D.-M., & Kim, S.-Y, "Multi energy system with an associated energy hub: a review," *IEEE Access*, Vol.9, 2021, pp.127753-127766.
- [10] Jordehi, A. R., Javadi, M. S., Shafie-khah, M., & Catalão, J. P, "Information gap decision theory (IGDT)-based robust scheduling of combined cooling, heat and power energy hubs," *Energy*, Vol.231, 2021, pp.120918.
- [11] Mokaramian, E., Shayeghi, H., Sedaghati, F., Safari, A., & Alhelou, H. H, "An Optimal Energy Hub Management Integrated EVs and RES Based on Three-Stage Model Considering Various Uncertainties. *IEEE Access*, Vol.10, 2022, pp.17349-17365.
- [12] Lei, J., Zhou, C., Li, X., Huang, A., Bai, H., Yuan, Z., & Zhou, L, "Energy management considering energy storage and demand response for smart energy hub in Internet of Things," *IEEE Access*, 2020.
- [13] M. H. Nikkhah, H. Lotfi, M. Samadi, and M. E. Hajiabadi, "Energy Hub Management considering Demand Response, Distributed Generation, and Electric Vehicle Charging Station," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 2023, 2023, pp.1-16.

- [14] Dehnavi E, Abdi H, "Optimal pricing in time of use demand response by integrating with dynamic economic dispatch problem," *Energy*, vol.109, 2016, pp.1086–94.
- [15] Lujano-Rojas JM, Monteiro C, Dufo-López R, Bernal-Agustín JL, "Optimum residential load management strategy for real time pricing (RTP) demand response programs," *Energy Policy*, Vol.45, 2012, pp. 671–679.
- [16] XH.~Li, SH~Hong, "User-expected price-based demand response algorithm for a home-to-grid system," *Energy*, Vol.64, 2014, pp.437–449.
- [17] Samadi, Mahdi, and Sajjad Yousefzadeh, "Optimal Scheduling of Interconnected Energy Hubs Considering Responsive Loads," 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2020, pp. 1-5.
- [18] Aghamohamadi, M., M. Samadi, and M. Pirnahad. "Modeling and evaluating the energy hub effects on a price responsive load." *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering* 15, NO. 1 (2019): 65-75.
- [19] Joung M, Kim J, "Assessing demand response and smart metering impacts on long-term electricity market prices and system reliability," *Appl Energy*, Vol.101, 2013, pp.441–448.
- [20] X. Zhang, L. Che, M. Shahidehpour, A. S. Alabdulwahab, and A. Abusorrah, "Reliability-based optimal planning of electricity and natural gas interconnections for multiple energy hubs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 8, NO. 4, 2017, pp. 1658–1667, .
- [21] A. Najaf, H. Falaghi, J. Contreras, and M. Ramezani, "A stochastic bilevel model for the energy hub manager problem," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 8, NO.5 ,2017, pp. 2394–2404.
- [22] Arun SL, Selvan MP, "Intelligent Residential Energy Management System for Dynamic Demand Response in Smart Buildings," *IEEE Syst J*, Vol.12, 2017, pp.1–12.
- [23] Arun SL, Selvan MP, "Dynamic demand response in smart buildings using an intelligent residential load management system," *IET Gener Transm Distrib*, Vol.11, 2017, pp. 4348–4357
- [24] Arun SL, Selvan MP, "Smart residential energy management system for demand response in buildings with energy storage devices," *Frontiers in Energy*, 2018, pp.1–16.
- [25] Rotger-Griful S, Welling U, Jacobsen RH, "Implementation of a building energy management system for residential demand response," *Microprocess Microsyst*, Vol.55, 2017, pp.100–110.
- [26] Huang Y, Tian H, Wang L, "Demand response for home energy management system," *Int J Electr Power Energy Syst*," Vol.73, 2015, pp.448–455.
- [27] Da Silva R V., Affonso CM, "Demand side management of a residential system using simulated annealing. *IEEE Lat Am Trans*," Vol.15, 2015, pp.1355–1360.
- [28] Vilar DB, Affonso CDM, "Residential energy management system with photovoltaic generation using simulated annealing," 13th International Conference on the European Energy Market (EEM), 2016.
- [29] Pradhan V, Khaparde SA, "An Effective Model for Demand Response Management Systems of Residential Electricity Consumers," *IEEE Syst J*, 2014, pp.1–12.
- [30] Muratori M, Rizzoni G, "Residential Demand Response : Dynamic Energy Management and Time-Varying Electricity Pricing," *IEEE Trans Power Syst*, 2015, pp.1–10.
- [31] Pipattanasomporn M, Kuzlu M, Rahman S, "An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis Manisa," *IEEE Trans Smart Grid*. 2012, pp.1–8.

[۳۲] احمد قاسمی و گلنام کریمی، "ارائه مدلی جدید برای مدیریت بهینه انرژی یک ریزشبه مسکونی با هدف بهبود شاخص های تاب آوری و انعطاف پذیری"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۲۰، شماره ۷۱، مهر ۱۴۰۱، صفحات ۶۱-۷۷.

[۳۳] جمشید آقائی، امین رحیمی رضایی و محمدرضا کریمی، "هماهنگی نیروگاه های بادی و دستگاه های ذخیره ساز سیستم قدرت در مسئله برنامه ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها با استفاده از بهینه سازی استوار"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تیر ۱۳۹۷، صفحات ۲۰۷-۲۲۰.

[۳۴] محمد علیزاده، میثم جعفری نوکنندی و یامین سلطان مرادی، "مدلسازی و بهینه سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخ گویی بار"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تیر ۱۳۹۸، صفحات ۲۱۵-۲۲۶.