



Improvement of the Energy Hub System Performance by Considering the Consumer Welfare Index under Adverse Weather Conditions

Ali Khodadadi¹, Taher Abedinzadeh^{2*}, Hasan Alipour³, Jaber Pouladi⁴

¹PhD Student, Department of Electrical Engineering, Shabestar Branch, Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

^{2,3,4}Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Shabestar Branch, Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 11.24.2022

Revised: 03.01.2023

Accepted: 04.10.2023

Keyword:

Energy hub system

Multi-objective optimization

Pareto solutions

Resiliency

Adverse weather conditions

*Corresponding Author:

Taher Abedinzadeh

Email:

taherabedinzade@yahoo.com

ABSTRACT

Economical and resilient operation of energy systems has always been one of the important and main priorities of the energy systems operators. However, with the progress made in various fields of energy systems, particularly power systems, the discussion of resilience and reduction of energy not supplied has become of greater importance. Therefore, in this paper, a bi-objective optimization model is proposed to improve the economic performance of the energy hub system and to improve the resilience of electric consumers under adverse weather conditions, in which the operational cost of the hub energy is minimized and on the other hand, the consumer welfare index, which is a function of the energy not supplied index of the system, is maximized. It was assumed that the electrical part of the hub system can be affected by weather conditions and have an incident similar to distribution networks. The epsilon constraint method was used as one of the effective methods in solving multi-objective problems in order to solve the proposed model. It is noteworthy that the fuzzy Max-Min method was used to select the optimal solution among the obtained solutions.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In the current study, recent research on the economic performance of resilient energy hub systems during adverse weather conditions was discussed. A bi-objective optimization model for the optimal performance of the energy hub system was presented from the point of view of economic performance and resilience in which the total cost of operating the energy hub system, including the cost of interaction with electric, gas and water networks and the cost of local energy resource operation, is minimized, and simultaneously, the welfare index of electric consumers, which is a function of the energy not supplied index, is maximized. In the presented model, the studied objective functions, which is the total hub cost of the system and the welfare index of electric consumers, were in conflict with each other, which is not considered in most of the models studied in previous research.

Methodology

In this study, by proposing the epsilon constraint method, the bi-objective model with opposite objective functions was solved and pareto solutions were obtained, which are all optimal. Each of the pareto solutions had one cost and index that could be selected depending on the expectations. In fact, each answer was considered a strategy that could be selected as a solution to the problem depending on the expected aims. According to the purpose of the model studied in this paper, which was to meet the economic and resilience purposes simultaneously and considering their opposite nature, fuzzy max-min method was used to obtain optimal purpose between objective functions. By implementing this method, an optimal solution that satisfied both objective functions were obtained. In addition, in the proposed model, the effect of providing demand response programs and the participation of electric consumers in these programs on the performance of the model was studied. Thus, in summary, the innovations of this research study can be stated as follows:

- 1- Presenting a bi-objective optimization mathematical model for the optimal performance of the energy hub system from the point of view of economic performance and resiliency
- 2- Minimizing the energy cost of the hub system and maximizing the welfare index of electric consumers as objective functions of the problem considering their opposite natures
- 3- Presenting the epsilon constraint method for solving the bi-objective problem with the opposite objective function and extracting the optimal pareto solutions
- 4- Using fuzzy Max-Min method to gain optimal state between opposite objective functions
- 5- Investigating the effect of providing demand response programs to electric consumers on the performance of the proposed model

In order to model the shiftable electric loads, the time of use model was used, based on which, a part of the electric loads was transferred from peak intervals to non-peak intervals and leads to the peak shaving of the load.

Results

In this part, the optimal performance of the energy hub system (shown in Figure 1) under the objective functions of operating cost and welfare index was numerically simulated under a mixed linear programming and the output results presented.

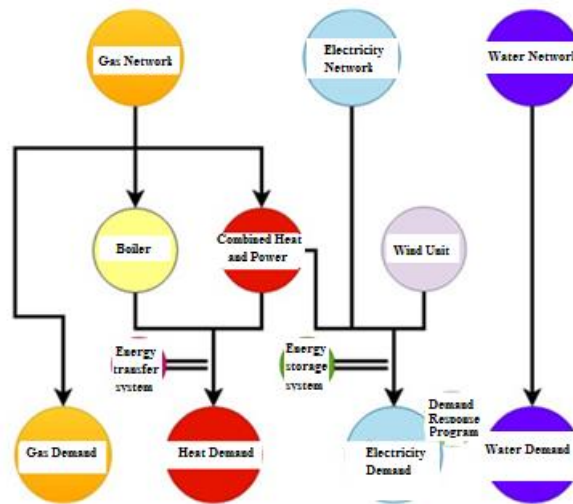


Figure 1. The studied energy hub system.

In order to optimally use the power and heat produced in the energy hub system, electrical and thermal storage systems helped to improve the performance of the energy hub system from the point of view of energy efficiency and economic performance by timely storage of energy and use at the right time.

Conclusion

Optimum use of energy sources with high efficiency has always been of particular importance because this improves the efficiency of energy consumption and economic performance of the system. In this paper, the concept of energy hub system was used to supply electrical, thermal, gas and water loads. Energy conversions in these systems allowed optimal supply of energy loads with the lowest operating cost and the highest level of consumer satisfaction. In this study, a bi-objective optimization model was presented for the economic performance of the energy hub system as well as the resilience of electric consumers in which the total operating cost of the system was minimized and the consumer's welfare index, which is a function of the system's energy not supplied index, was maximized.

The method was based on estimating the amount of electrical outages in presence of atmospheric changes and managing changes in the load and output of resources in the network. By using the epsilon constraint method, the proposed model with and without considering the possibility of participation of electric consumers in demand-side

management programs was solved and pareto solutions were obtained. According to the obtained results, without considering demand-side management programs, the operating cost of the all system was equal to 2279.190 dollars and the welfare index was equal to 81.5% which indicated compromised conditions between the mentioned aims. By applying demand-side management programs, the system cost was 2258.173 dollars and the welfare index was 81.1%. By comparing these results with the case where the demand-side management programs were not included, it was observed that under the demand-side management programs, the economic performance improved while the welfare index decreased. In fact, with the improvement of the economic performance of the system under demand response programs, the welfare index decreased, which can be effective in determining planning priorities and the participation of consumers in demand-side management programs.



شاپای الکترونیک: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



بهبود عملکرد سیستم هاب انرژی با در نظر گرفتن شاخص رفاه مصرف‌کنندگان در شرایط نامساعد جوی

علی خدادادی^۱، طاهر عابدین‌زاده^{۲*}، حسن علیپور^۳، جابر پولادی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران.
۲ و ۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

بهره‌برداری اقتصادی و تاب‌آور از سیستم‌های انرژی همواره جزء اولویت‌های مهم و اصلی بهره‌برداران بوده است. با این حال، با پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌های مختلف مجموعه‌های انرژی خصوصاً سیستم‌های قدرت، بحث تاب‌آوری و کاهش انرژی تامین نشده اهمیت بیشتری یافته است. به عبارت دیگر، علاوه بر تامین مصرف‌کنندگان انرژی، بحث رفاه انرژی مطرح می‌گردد که تابعی از شاخص انرژی تامین نشده می باشد و مطابق آن مصرف‌کننده انتظار دارد انرژی که دریافت می‌کند یا حداکثر کیفیت توان ممکن و حداقل خاموشی باشد. بدین منظور، در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه جهت بهبود عملکرد اقتصادی سیستم هاب انرژی و بهبود وضعیت تاب‌آوری مصرف‌کنندگان الکتریکی در شرایط نامساعد جوی پیشنهاد گردیده است که در آن هزینه بهره‌برداری سیستم انرژی هاب کمینه گردیده و از سوی دیگر شاخص رفاه مصرف‌کنندگان که تابعی از شاخص انرژی تامین نشده سیستم است بیشینه گردیده است. فرض شده است که نرخ خروج خطوط الکتریکی می‌تواند تحت تاثیر شرایط جوی قرار گیرد. برای حل مساله بهینه‌سازی از روش اپسیلون کانسترنیت استفاده شده است و در ادامه از روش ماکس-مین فازی جهت انتخاب جواب بهینه از میان مجموعه جواب استفاده گردیده است.

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۰۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱

کلید واژگان:

سیستم هاب انرژی
بهینه‌سازی چند هدفه
جواب‌های پارتو
تاب‌آوری
شرایط نامساعد جوی

*نویسنده مسئول: طاهر عابدین‌زاده

پست الکترونیک:

taherabedinzade@yahoo.com



مقدمه

ادغام شبکه‌های مختلف انرژی با منابع انرژی مختلف با راندمان کاری بالا تحت مفهوم هاب انرژی، می‌تواند منجر به سیستم‌های انرژی با انعطاف‌پذیری بالا و عملکرد مطلوب گردد. سیستم‌های چندحاملی انرژی یا به اصطلاح هاب انرژی می‌توانند با بهره‌گیری از منابع متعدد انرژی و تبدیلات انرژی موجود که منجر به افزایش انعطاف‌پذیری آنها می‌گردد اقدام به تامین بهینه تقاضاهای مختلف انرژی نمایند، درحالی‌که سایر اهداف مورد انتظار نظیر شاخص‌های رفاه انرژی مصرف‌کنندگان تا حد ممکن برآورده گردند.

در سال‌های اخیر، سیستم‌های هاب انرژی از جنبه‌های مختلف نظیر عملکرد اقتصادی، کنترل عدم قطعیت، پایداری، قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و سایر موضوعات مطالعه شده‌اند. با توجه به موضوع مورد مطالعه در این مقاله، تحقیقات اخیر انجام گرفته در زمینه عملکرد اقتصادی سیستم‌های هاب انرژی تاب‌آور در حین شرایط جوی نامساعد بحث گردیده‌اند. عملکرد بهینه سیستم‌های هاب انرژی متصل به هم با در نظر گرفتن تاب‌آوری تجهیزات سیستم در مرجع [۱] مطالعه شده است که در آن روش حداقل قطع - حداکثر جریان جهت بررسی شارش انرژی در مجموعه هاب انرژی بکار رفته است. در مرجع اشاره شده، شاخص احتمال قطع بار جهت ارزیابی تاب‌آوری سیستم توان تامین تولیدی برای تامین بار استفاده شده است. عملکرد بهینه سیستم هاب انرژی سباز متوسط و سباز بزرگ تحت یک برنامه‌نویسی خطی - عددی آمیخته در مرجع [۲] بررسی شده است که در آن هزینه کل سیستم هاب انرژی شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، کمینه شده و شاخص انرژی تامین نشده جهت بررسی تاب‌آوری سیستم محاسبه شده است. دیسپاچینگ بهینه سیستم هاب انرژی تحت روشی مبتنی بر بهبود قابلیت اطمینان و تاب‌آوری برای خروج برخی از خطوط گاز در مرجع [۳] مطالعه شده است که در آن از شاخص‌هایی نظیر انرژی تامین نشده و احتمال قطع بار استفاده گردیده است. عملکرد بهینه سیستم هاب انرژی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم و عدم قطعیت‌های مربوط به منابع تجدیدپذیر، بار و قیمت تحت یک برنامه‌نویسی ریاضی در مراجع [۴؛ ۵] مطالعه شده است.

با تاکید بر تنوع انرژی جهت انتخاب توسط مصرف‌کنندگان، عملکرد بهینه سیستم چندحاملی انرژی با در نظر گرفتن احتمال قطعی ظرفیت منابع در مرجع [۶] بررسی شده است. با هدف تامین قابلیت اطمینان و تاب‌آوری موثر برای بارهای مختلف، طراحی سیستم هاب انرژی با در نظر گرفتن شاخص‌های قابلیت اطمینان تحت یک مدل خطی در مرجع [۷] مطالعه گردیده است. در مراجع [۸؛ ۹]، یک مدل بهینه‌سازی جهت برنامه‌ریزی بهینه سیستم هاب انرژی متشکل از شبکه‌های انرژی مختلف ارائه شده است که در آن هزینه سرمایه‌گذاری واحدهای تولیدی تحت قیود مختلف نظیر زیست‌محیطی، راندمان انرژی و تاب‌آوری بخش حرارتی کمینه شده است. عملکرد بهینه سیستم هاب انرژی ساختمانی با در نظر گرفتن تامین تقاضای انرژی در مرجع [۱۰] بررسی شده است که در آن برخلاف سایر تحقیقات انجام گرفته، رفتار دینامیکی بارهای حرارتی در ارزیابی تاب‌آوری سیستم تحت مفاهیم زنجیره مارکو در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی عملکرد بهینه شبکه‌های توزیع فعال، یک مدل بهینه‌سازی تحت مفهوم هاب انرژی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر در مرجع [۱۱] ارائه گردیده است که در آن تاب‌آوری مربوط به منابع تولید پراکنده و همچنین خودروهای برقی قابل متصل به شبکه تحت روش‌های احتمالاتی مطالعه شده است. با هدف جایابی و تعیین اندازی بهینه سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت در شبکه ادغام شده الکتریکی-گازی، یک مدل بهینه‌سازی در مرجع [۱۲] ارائه شده است که در آن هزینه سیستم، تلفات توان و تاب‌آوری لحاظ شده‌اند. یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی جهت برنامه‌ریزی بهینه سیستم هاب انرژی در مرجع [۱۳] ارائه شده است که در آن قابلیت اطمینان تامین تقاضای انرژی توسط روش مقاوم چنس-کانسترینت در نظر گرفته شده است. با هدف بررسی تاثیر سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر روی تاب‌آوری ریز شبکه چندحاملی انرژی، روش ادغام شده تجزیه و تحلیل حالت‌ها و اثرات عدم موفقیت و مونت کارلو در مرجع [۱۴] ارائه شده است که در آن استراتژی‌های مختلف بهره‌برداری سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی بررسی شده‌اند.

سرانجام در مرجع [۱۵]، یک روش تحلیلی جدید جهت ارزیابی سیستم‌های ادغام شده گاز - برق ارائه شده است که در آن تاثیر قابلیت تبادل انرژی بین سیستم‌های برقی و گازی بر روی تاب‌آوری سیستم بررسی شده و سپس تاب‌آوری شبکه‌های برق و گاز توسط روش‌های مسیر کوتاه و ساده‌سازی توپولوژی ارزیابی شده است. به طور کلی برخی از خلاهای تحقیقاتی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- عدم در نظر گرفتن شرایط جوی بر عملکرد سیستم هاب انرژی
- بهبود تاب‌آوری بخش الکتريکال سیستم‌های هاب در شرایط نامساعد جوی با استفاده از همبستگی میان بخش حرارتی و الکتريکی
- بررسی تغییرات در برنامه بهره‌برداری از سیستم هاب انرژی و مدیریت بار در حین شرایط اضطراری سیستم هاب انرژی
- استفاده از توابع هدف متضاد با توجه به ماهیت بهینه‌سازی برای بهبود تاب‌آوری سیستم هاب

در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه جهت عملکرد بهینه سیستم هاب انرژی از نقطه نظر عملکرد اقتصادی و تاب‌آوری ارائه شده است که در آن کل هزینه بهره‌برداری سیستم هاب انرژی شامل هزینه تعامل با شبکه‌های الکتريکی، گازی و آبی و هزینه بهره‌برداری منابع انرژی محلی کمینه شده و در عین حال شاخص رفاه مصرف‌کنندگان الکتريکی که تابعی از شاخص انرژی تامین نشده می‌باشد بیشینه گردیده است. در مدل ارائه شده، توابع هدف مورد مطالعه یعنی هزینه کل هاب سیستم و شاخص رفاه مصرف‌کنندگان الکتريکی در تضاد با یکدیگر هستند که این امر در اکثر مدل‌های مطالعه شده در تحقیقات قبلی در نظر گرفته نشده است. در این مقاله، با پیشنهاد روش اپسیلون کانسترنیت مدل دوهدفه با توابع هدف متضاد حل شده و جواب‌های پارتو که همگی بهینه هستند بدست می‌آید. هر یک از جواب‌های پارتو دارای یک هزینه و شاخص است که بسته به انتظارات می‌تواند انتخاب گردد. در حقیقت، هر جواب یک استراتژی محسوب می‌گردد که بسته به اهداف مورد انتظار می‌تواند به عنوان راه حل مسئله انتخاب گردد. با توجه به هدف مدل مورد مطالعه در این مقاله که برآورده ساختن همزمان اهداف اقتصادی و تاب‌آوری و با در نظر گرفتن ماهیت متضاد آنها، روش ماکس-مین فازی جهت برقراری شرایط مصالحه بین توابع هدف بکار رفته است. با پیاده‌سازی این روش، جواب مصالحه که هر دو توابع هدف را برآورده می‌سازد، بدست می‌آید. همچنین در مدل پیشنهادی تاثیر ارائه برنامه‌های پاسخگویی بار و مشارکت مصرف‌کنندگان الکتريکی در این برنامه‌ها بر روی عملکرد مدل پیشنهادی مورد مطالعه بررسی شده است. پس بطور خلاصه نوآوری‌های این مقاله را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- ارائه یک مدل ریاضی بهینه‌سازی دوهدفه جهت عملکرد بهینه سیستم هاب انرژی از نقطه نظر عملکرد اقتصادی و تاب‌آوری.
 - کمینه ساختن هزینه کل سیستم هاب انرژی و بیشینه کردن شاخص رفاه مصرف‌کنندگان الکتريکی به عنوان توابع هدف مسئله با در نظر گرفتن ماهیت متضاد آنها.
 - ارائه روش اپسیلون کانسترنیت جهت حل مسئله دوهدفه با تابع هدف متضاد و استخراج جواب‌های بهینه پارتو.
 - بکارگیری روش ماکس-مین فازی جهت برقراری شرایط مصالحه بین توابع هدف متضاد.
 - بررسی تاثیر ارائه برنامه‌های پاسخگویی بار به مصرف‌کنندگان الکتريکی بر روی عملکرد مدل پیشنهادی.
- سایر قسمت‌های مقاله به شرح زیر دسته‌بندی شده است: فرمولاسیون ریاضی مدل پیشنهادی در بخش ۲ ارائه شده است. شبیه‌سازی‌ها و نتایج در بخش ۳ ارائه شده و تحلیل شده‌اند. سرانجام، نتیجه‌گیری‌های مربوطه در بخش ۴ ارائه شده است.

فرمولاسیون ریاضی

در این بخش، مسئله بهره‌برداری اقتصادی سیستم هاب انرژی با در نظر گرفتن شاخص رفاه مصرف‌کنندگان الکتریکی تحت برنامه زمان-استفاده، برنامه پاسخگویی بار بصورت ریاضی تحت یک برنامه‌نویسی خطی آمیخته مدل‌سازی شده است.

توابع هدف

به منظور بهره‌برداری اقتصادی سیستم هاب انرژی، کل هزینه سیستم شامل هزینه خرید توان الکتریکی از شبکه بالادست، هزینه خرید گاز از شبکه گاز، هزینه خرید آب از شبکه آبی و هزینه بهره‌برداری منابع انرژی محلی بایستی کمینه گردد که در معادله (۱) بیان شده است.

$$\phi 1 = MinOC = \sum_{t=1}^T \left(\lambda_t^{net} \times P_t^{net} + \lambda^g \times G_t^{net} + \lambda_{ST}^h \times (P_t^{c,hs} + P_t^{d,hs}) \right. \\ \left. + \lambda_{ST}^e \times (P_t^{c,es} + P_t^{d,es}) + \lambda^{wind} \times P_t^w \right. \\ \left. + \lambda^{wr} \times W r_t^{net} \right) \quad (1)$$

به عنوان تابع هدف دوم سیستم مورد مطالعه، شاخص رفاه مصرف‌کنندگان الکتریکی که تابعی است از میزان انرژی تامین نشده بر کل بار تقاضا شده بایستی بیشینه گردد که در معادلات (۲) تا (۴) بیان شده است.

$$\phi 2 = Max\Gamma = 1 - \frac{ENS}{\sum_{t=1}^T L_t^e} \quad (2)$$

$$ENS = \sum_{t=1}^T LS_t^e \quad (3)$$

$$0 \leq LS_t^e \leq LS_{max}^{eLS} \quad (4)$$

مطابق رابطه (۲)، بیشینه مقدار شاخص ارائه شده مورد انتظار است چرا که در این حالت مقدار انرژی تامین نشده سیستم کمینه می‌گردد که امری مطلوب برای مصرف‌کنندگان الکتریکی سیستم هاب انرژی از نقطه نظر تاب‌آوری می‌باشد.

قیود فنی

معادلات بالانس بارهای الکتریکی، حرارتی، گازی و آبی به ترتیب در معادلات (۵) تا (۸) ارائه شده‌اند. مطابق معادله (۵)، بار الکتریکی تقاضا شده بایستی توسط توان الکتریکی خریداری شده از شبکه بالادست، توان تولیدی واحد تولید همزمان برق و حرارت، توان تولیدی سیستم بادی و همچنین توان دشارژ سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی تامین گردد.

$$L_t^{e,DRP} + P_t^{c,es} = P_t^{net} + P_t^{chp} + P_t^w + P_t^{d,es} + LS_t^e \quad (5)$$

طبق معادله (۶)، بار حرارتی سیستم هاب انرژی توسط حرارت تولیدی واحد تولید همزمان برق و حرارت و همچنین حرارت تولیدی بویلر و حرارت خروجی سیستم ذخیره‌ساز حرارتی تامین می‌گردد.

$$L_t^h + H_t^{c,hs} = H_t^{bo} + H_t^{chp} + H_t^{d,hs} \quad (۶)$$

بر اساس معادله (۷)، کل گاز خریداری شده از شبکه بالادست صرف تامین تقاضای گاز مصرفی و تامین واحد تولید همزمان برق و حرارت و بویلر می‌گردد.

$$L_t^g = G_t^{net} - G_t^{bo} - G_t^{chp} \quad (۷)$$

در نهایت مطابق معادله (۸)، آب خریداری شده از شبکه آبی بایستی تقاضای آب سیستم هاب انرژی را برآورده سازد.

$$L_t^w = W r_t^{net} \quad (۸)$$

توان تولیدی سیستم بادی که متناظر با سرعت ساعتی باد می‌باشد توسط رابطه (۹) بیان شده است.

$$P_t^w = \begin{cases} 0 & \text{if } s_{co} < s_t < s_{ci} \\ P_r(z - y \times s_t + x \times s_t^2) & \text{if } s_{ci} \leq s_t < s_r \\ P_r & \text{if } s_r \leq s_t < s_{co} \end{cases} \quad (۹)$$

محدودیت توان الکتریکی شبکه بالادست در رابطه (۱۰) ارائه شده است که مطابق آن توان الکتریکی تهیه شده از شبکه بالادست بایستی در محدوده نامی باشد.

$$0 \leq P_t^{net} \leq P_{max}^{net} \quad (۱۰)$$

توان و حرارت تولیدی توسط سیستم تولید همزمان برق و حرارت که رابطه مستقیم با گاز مصرفی این سیستم دارند توسط روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌گردند.

$$P_t^{chp} = \eta_{ge}^{chp} \times G_t^{chp} \quad (۱۱)$$

$$H_t^{chp} = \eta_{gh}^{chp} \times G_t^{chp} \quad (۱۲)$$

محدودیت توان تولیدی توسط سیستم تولید همزمان برق و حرارت توسط رابطه (۱۳) بیان شده است.

$$P_{min}^{chp} \leq P_t^{chp} \leq P_{max}^{chp} \quad (۱۳)$$

حرارت تولیدی توسط بویلر توسط رابطه (۱۴) ارائه شده و توسط رابطه (۱۵) محدود شده است.

$$H_t^{bo} = \eta^{bo} \times G_t^{bo} \quad (۱۴)$$

$$H_{\min}^{bo} \leq H_t^{bo} \leq H_{\max}^{bo} \quad (15)$$

جهت مدل‌سازی سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی، روابط (۱۶) تا (۲۰) به کار رفته‌اند. انرژی موجود در ذخیره‌ساز الکتریکی توسط رابطه (۱۶) بیان شده و توسط رابطه (۱۷) محدود شده است.

$$P_{t+1}^{es} = P_t^{es} + P_t^{c,es} \times \eta_c^{es} - \frac{P_t^{d,es}}{\eta_d^{es}}; \forall t < 24 \quad (16)$$

$$P_{\min}^{es} \leq P_t^{es} \leq P_{\max}^{es} \quad (17)$$

محدودیت‌های مربوط به توان‌های شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی توسط روابط (۱۸) و (۱۹) بیان شده‌اند.

$$P_{\min}^{c,es} \times B_t^{c,es} \leq P_t^{c,es} \leq P_{\max}^{c,es} \times B_t^{c,es} \quad (18)$$

$$P_{\min}^{d,es} \times B_t^{d,es} \leq P_t^{d,es} \leq P_{\max}^{d,es} \times B_t^{d,es} \quad (19)$$

به منظور جداسازی فرآیندهای شارژ و دشارژ، از رابطه (۲۰) استفاده شده است.

$$B_t^{c,es} + B_t^{d,es} \leq 1 \quad (20)$$

علاوه بر سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی، سیستم ذخیره‌ساز حرارتی نیز جهت مدیریت انرژی حرارتی در سیستم هاب انرژی مطالعه شده به کار رفته است. حرارت موجود در ذخیره‌ساز حرارتی توسط رابطه (۲۱) بیان شده است.

$$H_{t+1}^{hs} = H_t^{hs} + H_t^{c,hs} \times \eta_c^{hs} - \frac{H_t^{d,hs}}{\eta_d^{hs}}; \forall t < 24 \quad (21)$$

رابطه (۲۲) جهت محدود کردن حرارت موجود در ذخیره‌ساز حرارتی به کار رفته است.

$$H_{\min}^{hs} \leq H_t^{hs} \leq H_{\max}^{hs} \quad (22)$$

حرارت ورودی و خروجی ذخیره‌ساز حرارتی توسط روابط (۲۳) و (۲۴) محدود گشته است.

$$H_{\min}^{c,hs} \times B_t^{c,hs} \leq H_t^{c,hs} \leq H_{\max}^{c,hs} \times B_t^{c,hs} \quad (23)$$

$$H_{\min}^{d,hs} \times B_t^{d,hs} \leq H_t^{d,hs} \leq H_{\max}^{d,hs} \times B_t^{d,hs} \quad (24)$$

در نهایت، فرآیند شارژ/دشارژ همزمان ذخیره‌ساز حرارتی توسط رابطه (۲۵) محدود شده است.

$$B_t^{c,hs} + B_t^{d,hs} \leq 1 \quad (25)$$

محدودیت‌های مربوط به گاز و آب خریداری شده از شبکه‌های گازی و آبی توسط روابط (۲۶) و (۲۷) بیان شده است.

$$G_{\min}^{net} \leq G_t^{net} \leq G_{\max}^{net} \quad (26)$$

$$WR_{\min}^{net} \leq WR_t^{net} \leq WR_{\max}^{net} \quad (27)$$

در این مقاله فرض شده است که بخشی از بارهای بخش الکتریکال سیستم قابلیت اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار را دارند و بارهای حرارتی غیر قابل تغییر می‌باشند. به منظور مدل‌سازی بارهای الکتریکی قابل شیف‌ت، از مدل Time of Use (TOU) استفاده گردیده است که بر اساس آن، بخشی از بار الکتریکی از بازه‌های پیک به بازه‌های غیر پیک انتقال یافته و منجر به مسطح شدن سطح بار می‌گردند [۳؛ ۱۶-۱۸]. بار الکتریکی سیستم هاب انرژی با اعمال این برنامه بصورت زیر بیان می‌گردد.

$$L_t^{e,DRP} = L_t^e + P_t^{TOU,inc} - P_t^{TOU,dec} \quad (28)$$

میزان توان انتقال داده شده در این برنامه توسط روابط (۲۹) و (۳۰) محدود شده است.

$$0 \leq P_t^{TOU,inc} \leq B_t^{TOU,inc} \times P_{\max}^{TOU,inc} \times L_t^e \quad (29)$$

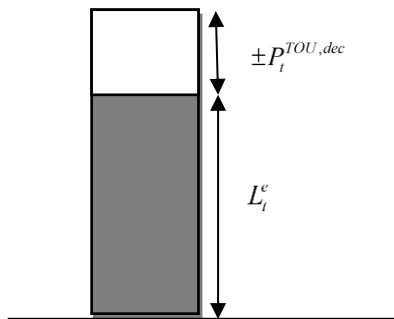
$$0 \leq P_t^{TOU,dec} \leq B_t^{TOU,dec} \times P_{\max}^{TOU,dec} \times L_t^e \quad (30)$$

لازم به ذکر است که در یک بازه زمانی، بار الکتریکی نمی‌تواند افزایش/کاهش همزمان داشته باشد که در رابطه (۳۱) بیان شده است.

$$B_t^{TOU,inc} + B_t^{TOU,dec} \leq 1 \quad (31)$$

همچنین، کل میزان افزایش بار با کل میزان کاهش آن در طول بازه برنامه‌ریزی بایستی برابر باشد که در رابطه (۳۲) بیان شده است.

$$\sum_{t=1}^T B_t^{TOU,inc} = \sum_{t=1}^T B_t^{TOU,dec} \quad (32)$$



شکل ۱. مدل‌سازی بار بر اساس برنامه مدیریت پاسخ بار

شکل ۱ شماتیک اجرای برنامه مدیریت بار و تغییر در میزان بار الکتریکی را در هر بازه زمانی نشان می‌دهد.

مدل بهینه‌سازی دو هدفه

مدل بهینه‌سازی دو هدفه به مسائلی اختصاص می‌یابد که در آن چندین تابع هدف بصورت همزمان بهینه می‌گردند. روش‌های متعدد برای حل اینگونه مسائل ابداع شده و به کار رفته‌اند که یکی از متداول‌ترین و مفیدترین آنها روش اپسیلون کانسترنیت می‌باشد [۱۹-۲۱]. از آنجایی که توابع هدف بهینه شده در مسائل چندهدفه معمولاً در تضاد با یکدیگر هستند، بایستی یک شرایط مصالحه بین آنها برقرار شود که این امر توسط روش ماکس-مین فازی انجام می‌گیرد [۱۹; ۲۲; ۲۳]. در این قسمت، روش‌های ذکر شده بر روی مسئله مورد مطالعه بصورت قدم به قدم اعمال شده و توضیح داده می‌شوند.

بر اساس روش اپسیلون کانسترنیت، یکی از توابع هدف (تابع هزینه در این مقاله) که اولویت بیشتری نسبت به دیگری دارد به عنوان تابع هدف پایه یا اصلی انتخاب می‌شود. سپس، تابع هدف دوم (تابع شاخص رفاه در این مقاله) به عنوان قید برای تابع هدف پایه در نظر گرفته می‌شود که توسط عامل اپسیلون از کمینه مقدارش تا بیشینه مقدارش متغیر است و در نتیجه مدل بهینه‌سازی دوهدفه تبدیل به یک مسئله بهینه‌سازی تک هدف می‌گردد:

$$OF = MinOC \quad (33)$$

$$\Gamma \leq \varepsilon \quad (34)$$

$$Allconstraints \quad (35)$$

قدم بعدی تعیین شرایط مصالحه بین تابع هزینه و تابع شاخص رفاه توسط روش ماکس-مین فازی می‌باشد. از آنجایی که جنس توابع هدف مورد مطالعه در این مقاله یکسان نیست، بایستی مقادیر پروپونیت آنها محاسبه شود. بدین منظور از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$OC_{pu}^n = \begin{cases} 1 & \text{if } OC^n \leq OC^{\min} \\ \frac{OC^{\max} - OC^n}{OC^{\max} - OC^{\min}} & \text{if } OC^{\min} \leq OC^n \leq OC^{\max} \\ 0 & \text{if } OC^n \geq OC^{\max} \end{cases} \quad (36)$$

$$\Gamma_{pu}^n = \begin{cases} 1 & \text{if } \Gamma^n \leq \Gamma^{\min} \\ \frac{\Gamma^{\max} - \Gamma^n}{\Gamma^{\max} - \Gamma^{\min}} & \text{if } \Gamma^{\min} \leq \Gamma^n \leq \Gamma^{\max} \\ 0 & \text{if } \Gamma^n \geq \Gamma^{\max} \end{cases} \quad (37)$$

قدم بعدی، مقایسه مقادیر پرونیوت شده توابع هدف در هر تکرار است تا کمترین مقدار بین دو تابع هدف در هر تکرار مشخص شود:

$$\mu_{pu}^n = \text{Min}(OC_{pu}^n, \Gamma_{pu}^n) \quad (38)$$

قدم آخر، انتخاب بیشترین مقدار در بین کمینه مقادیر انتخاب شده در مرحله قبلی می‌باشد:

$$\mu_{pu}^{\max} = \text{Max}(\mu_{pu}^1, \dots, \mu_{pu}^N) \quad (39)$$

مدل خاموشی‌های ناشی از شرایط جوی

با توجه به ماهیت سیستم‌های هاب انرژی، خطوط و لوله‌های قسمت حرارتی دارای امنیت بالا می‌باشند و معمولاً در معرض شرایط جوی قرار ندارند. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که شرایط آب و هوایی نامطلوب (سرعت باد بالا و صاعقه) دلیل اصلی بیش از نیمی از خطاهای سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی است [۲۴]. در یک شبکه هوشمند ثبت داده‌های مربوط به این وقایع می‌تواند به بهبود عملکرد این شبکه‌ها در شرایط فوق یاری کند. با این حال در همه شبکه‌ها چنین فن‌آوری وجود ندارد. در این مطالعه قطعی برق در دو دسته مطالعه می‌شود. بخش اول خطاهای ناشی از آلودگی محیط، نقش حیوانات و سایر خطاها با دلایل ناشناخته را در بر می‌گیرد. ضریب این نوع وقایع ثابت در نظر گرفته می‌شود. در بخش دوم، خطاهای ناشی از شرایط جوی (طوفان یا رعد و برق) مد نظر است. به منظور تجزیه و تحلیل مناسب برای ارزیابی اثر شرایط جوی بر میزان قطعی‌ها، همبستگی‌هایی که در [۲۵] ارائه شده است برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. از آنجا که متاسفانه، شبکه‌های تست استاندارد توزیع اطلاعات مربوط به رویدادهای ناشی از آب و هوا را ندارند، بنابراین داده‌های نرمال واقعی در شبیه‌سازی‌ها برای ارزیابی رفتار شبکه‌های انعطاف‌پذیر در شرایط مختلف آب و هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرض بر این است که میانگین سرعت باد و احتمال صاعقه در فواصل زمانی یک ساعت قابل پیش‌بینی است. در [۲۵] رابطه بین وقایع و سرعت باد برای فواصل کوتاه مدت با استفاده از رابطه (۴۰) و همبستگی بین وقایع و تعداد صاعقه در رابطه (۴۱) ارائه شده است.

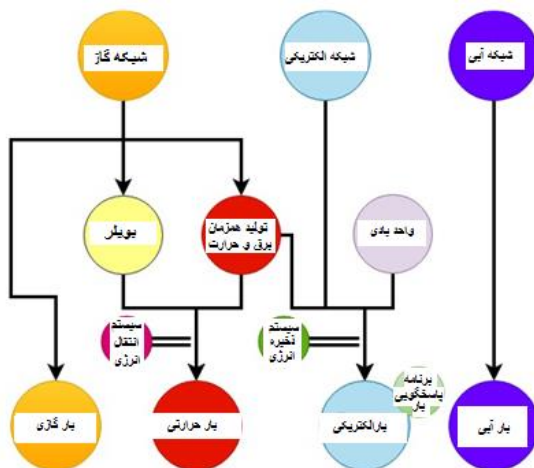
$$N_{wind} = 0/0012W_{speed}^2 - 0/0131W_{speed} \quad (40)$$

$$N_{lightning} = 0/0001L + 0/7014 \quad (۴۱)$$

در روابط بالا W سرعت باد و L تعداد صاعقه می‌باشد. در این مقاله، برای هر بازه زمانی، مقدار متوسط سرعت باد و تعداد صاعقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرعت باد بر تعداد قطعی‌ها و در نتیجه تولید انرژی برق توربین‌های بادی تاثیر می‌گذارد. واضح است که الگوهای جریان باد و پروفیل‌های سرعت باد، متغیر با زمان است و لازم است این الگوها برای هر منطقه برآورد شود. در این مطالعه برای بررسی اثر باد، در طول روز متغیر فرض شده است تا میزان حساسیت شبکه برق به این عامل بررسی شود. از سوی دیگر تعداد صاعقه در ساعات طوفانی بیشتر در نظر گرفته می‌شود و در سایر ساعات روز این تعداد بسیار کمتر خواهد بود. در صورت بروز قطعی در شبکه، مدت زمان مورد نیاز برای تعمیرات بستگی به نوع قطعی، محل آن و نیز شرایط جوی دارد. بدیهی است که در شرایط نامطلوب جوی زمان بیشتری برای تعمیرات مورد نیاز خواهد بود [۲۴]. در یک تحقیق زمان تعمیرات شرایط عادی ۴ ساعت است و در شرایط بد به طور متوسط ۶ ساعت برآورد شده است [۲۵]. بنابراین سرعت باد و تعداد صاعقه بر مدت زمان تعمیر و میزان انرژی توزیع نشده تاثیر خواهند داشت.

شبیه‌سازی و نتایج عددی

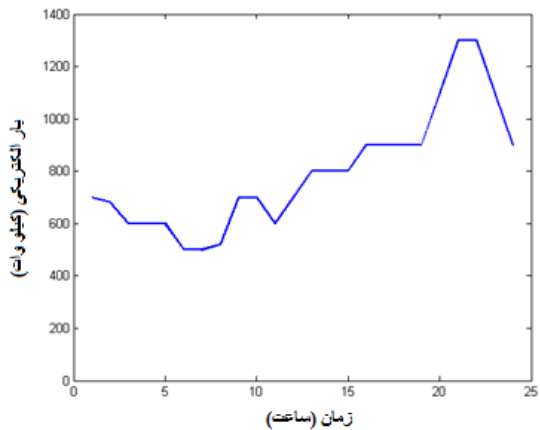
در این قسمت، عملکرد بهینه سیستم هاب انرژی (نشان داده شده در شکل ۲) تحت توابع هدف هزینه بهره‌برداری و شاخص رفاه به صورت عددی تحت یک برنامه نویسی خطی آمیخته شبیه‌سازی شده و نتایج خروجی ارائه گردیده‌اند.



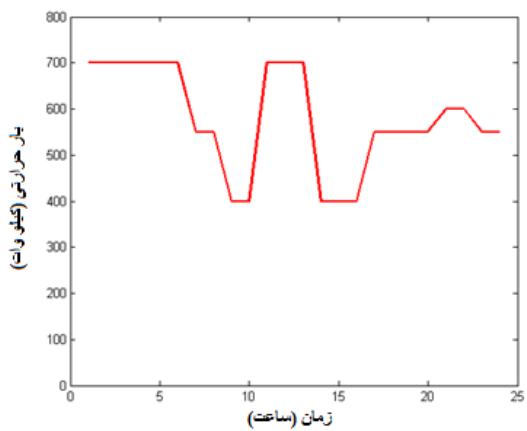
شکل ۲. سیستم هاب انرژی مورد مطالعه

پارامترهای ورودی شبیه‌سازی

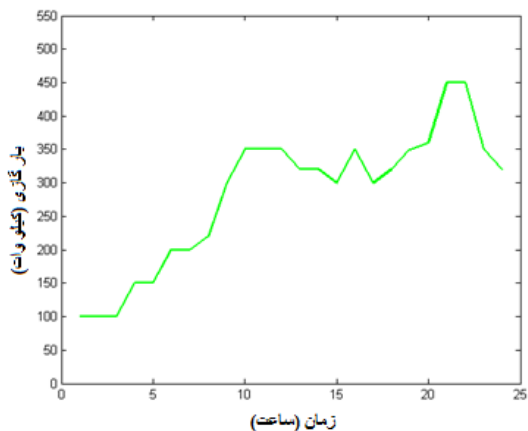
پارامترهای ورودی استفاده شده در شبیه‌سازی‌های مربوطه در این قسمت ارائه شده‌اند. سیستم هاب انرژی مورد مطالعه بایستی ۴ بار مختلف الکتریکی، حرارتی، گازی و آبی را پاسخگو باشد که به ترتیب در شکل‌های ۳ تا ۶ ارائه شده‌اند [۴، ۵].



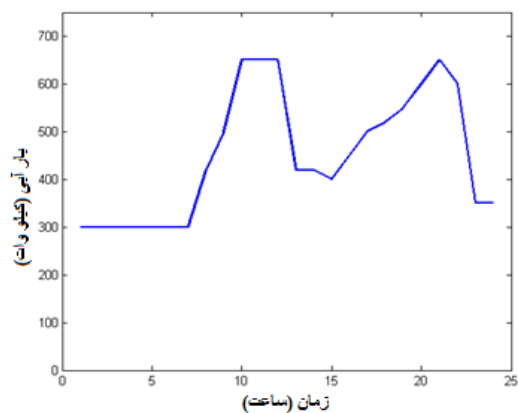
شکل ۳. بار الکتریکی سیستم هاب انرژی



شکل ۴. بار حرارتی سیستم هاب انرژی

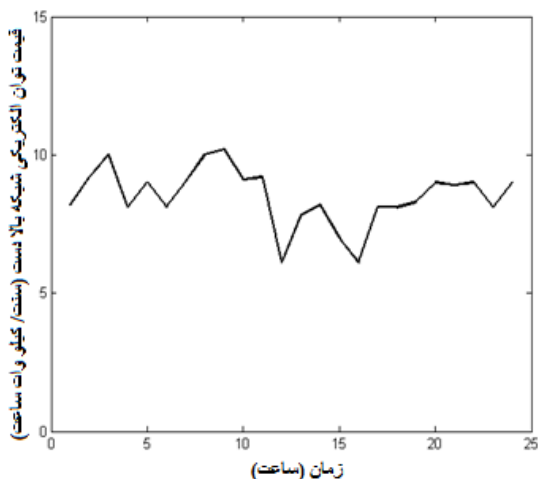


شکل ۵. بار گازی سیستم هاب انرژی



شکل ۶. بار آبی سیستم هاب انرژی

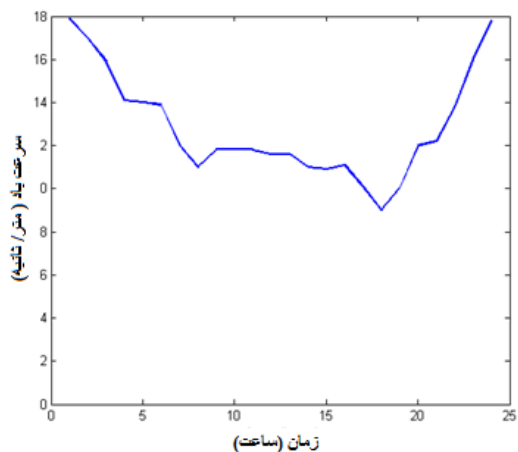
قیمت توان الکتریکی شبکه بالادست در شکل ۷ ارائه شده است [۴؛ ۵]. لازم به ذکر است که قیمت گاز و آب خریداری شده از شبکه‌های گازی و آبی به ترتیب برابر ۶ سنت بر کیلووات ساعت و ۴ سنت بر کیلووات ساعت می‌باشد [۴؛ ۵]. همچنین فرض شده است که جریمه خاموشی انرژی الکتریکی ۴ برابر بیشتر از قیمت ساعتی انرژی الکتریکی است.



شکل ۷. قیمت توان الکتریکی شبکه بالادست

در نهایت، سرعت ساعتی باد در شکل ۸ ارائه شده است [۴؛ ۵]. با توجه به روابط ۴۰ و ۴۱ فرض شده است که تغییر در سرعت باد منجر به تغییر در نرخ خروج خطوط الکتریکی خواهد شد و به تبع آن ریسک خروج خطوط در سرعت‌های بالای باد بیشتر خواهد شد [۲۶]. لازم به ذکر است که افزایش سرعت باد لزوماً به معنی وقوع حادثه نمی‌باشد و فقط احتمال وقوع آن افزایش پیدا می‌کند. لذا در شرایط نامساعد جوی سعی خواهد شد تا با استفاده از برنامه‌های مدیریت بار و باز برنامه‌ریزی منابع موجود در شبکه، منحنی تولید و مصرف انرژی الکتریکی به نحوی تغییر پیدا کند که میزان احتمال انرژی تامین نشده در خاموشی‌ها کاهش یابد و به تبع آن شاخص رفاه افزایش یابد.

پارامترهای فنی مربوط به سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی در جداول ۱ و ۲ ارائه شده‌اند [۴؛ ۵]. پارامترهای فنی مربوط به شبکه‌های بالادست، گازی و آبی در جدول ۳ ارائه شده‌اند [۴؛ ۵]. اطلاعات فنی واحدهای محلی سیستم هاب انرژی در جداول ۴ ارائه شده‌اند [۴؛ ۵]. هزینه‌های بهره‌برداری واحدهای محلی در جدول ۵ ارائه شده‌اند [۴؛ ۵]. لازم به ذکر است که بیشینه محدودیت افزایش/کاهش بار الکتریکی در برنامه پاسخگویی بار، ۲۰ درصد بار پایه در نظر گرفته شده است. همچنین، جهت حل مدل مورد مطالعه از نرم‌افزار گمز استفاده گردیده است [۲۴].



شکل ۸. سرعت باد

جدول ۱. پارامترهای فنی سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی

ذخیره‌ساز الکتریکی		
#	واحد	مقدار
p_{min}^{es}	کیلو وات ساعت	۱۵
p_{max}^{es}	کیلو وات ساعت	۲۷۰
$p_{min}^{c,es}$	کیلو وات	۱۵
$p_{max}^{c,es}$	کیلو وات	۲۷۰
$p_{min}^{d,es}$	کیلو وات	۱۵
$p_{max}^{d,es}$	کیلو وات	۲۷۰
η_c^{es}	درصد	۹۰
η_d^{es}	درصد	۹۰

جدول ۲. پارامترهای فنی سیستم ذخیره‌ساز حرارتی

ذخیره‌ساز حرارتی		
#	واحد	مقدار
H_{min}^{hs}	کیلو وات ساعت	۱۰
H_{max}^{hs}	کیلو وات ساعت	۱۸۰
$H_{min}^{c,hs}$	کیلو وات	۱۰
$H_{max}^{c,hs}$	کیلو وات	۱۸۰
$H_{min}^{d,hs}$	کیلو وات	۱۰
$H_{max}^{d,hs}$	کیلو وات	۱۸۰
η_c^{hs}	درصد	۹۰
η_d^{hs}	درصد	۹۰

جدول ۳. پارامترهای فنی شبکه‌های بالادست، گازی و آبی

شبکه بالادست، گازی و آبی		
#	واحد	مقدار
Wr_{min}^{net}	کیلو وات	۰
Wr_{max}^{net}	کیلو وات	۱۰۰۰
G_{min}^{net}	کیلو وات	۰
G_{max}^{net}	کیلو وات	۱۸۰۰
p_{max}^{net}	کیلو وات	۱۸۰۰

جدول ۴. اطلاعات فنی واحدهای محلی

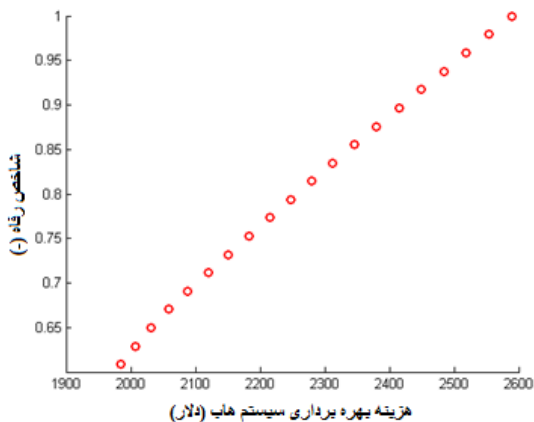
پارامترهای فنی واحدهای تولید همزمان برق و حرارت و بویلر			پارامترهای فنی واحد بادی		
#	واحد	مقدار	#	واحد	مقدار
η_{ge}^{chp}	درصد	۴۰	P_T	کیلو وات	۴۰۰
η_{gh}^{chp}	درصد	۳۵	x, y, z	-	۰/۰۳ و ۰/۰۱ و ۰/۰۷
p_{min}^{chp}	کیلو وات	۰	S_T	متر بر ثانیه	۱۰
p_{max}^{chp}	کیلو وات	۸۰۰	S_{ci}	متر بر ثانیه	۴
η^{bo}	درصد	۸۵	S_{co}	متر بر ثانیه	۲۲
H_{min}^{bo}	کیلو وات	۰	-	-	-
H_{max}^{bo}	کیلو وات	۸۰۰	-	-	-

جدول ۵. هزینه بهره‌برداری واحدهای محلی

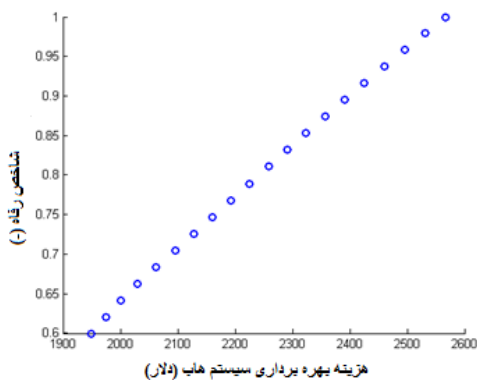
#	واحد	مقدار
λ^g	سنت بر کیلو وات ساعت	۶
λ^{wr}	سنت بر کیلو وات ساعت	۴
λ^{wind}	سنت بر کیلو وات ساعت	۰
λ_{ST}^e	سنت بر کیلو وات ساعت	۲
λ_{ST}^h	سنت بر کیلو وات ساعت	۲

نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آنها

با انجام شبیه‌سازی‌های مربوطه در حالت‌های مختلف، جواب‌های بهینه پارتو در حالات مختلف حاصل شده‌اند. منحنی جواب‌های بهینه پارتو در حالتی که برنامه پاسخگویی بار در نظر گرفته نشده است در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹. جواب‌های بهینه پارتو بدون برنامه پاسخگویی بار

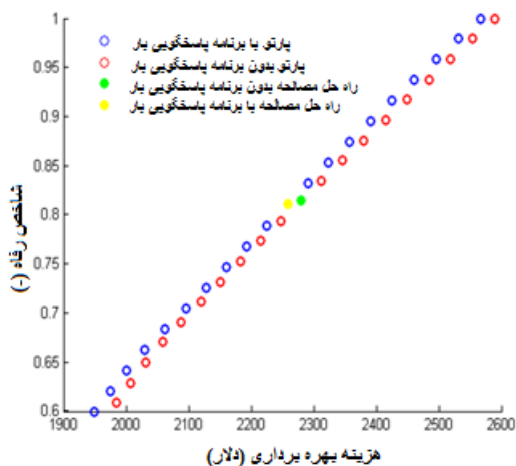


شکل ۱۰. جواب‌های بهینه پارتو با برنامه پاسخگویی بار

مطابق نتایج بدست آمده در شکل ۹، در حالتی که تابع هدف فقط تابع هزینه بهره‌برداری سیستم هاب انرژی باشد، هزینه بهره‌برداری سیستم برابر ۱۹۸۳/۸۷۶ دلار خواهد بود. در چنین حالتی، مقدار شاخص رفاه برابر ۰/۶۰۹ معادل ۶۰/۹ درصد خواهد بود. در طرف مقابل، با در نظر گرفتن شاخص رفاه به‌عنوان تابع هدف، هزینه بهره‌برداری سیستم برابر ۲۵۸۹۰۰۲۸ دلار و شاخص رفاه برابر ۱ یا به عبارتی ۱۰۰ درصد خواهد بود. این نتایج بخشی از جواب‌های بهینه پارتو می‌باشند که بسته با انتظارات مختلف، می‌توانند حاصل شوند. با به‌کارگیری روش ماکس-مین فازی، راه‌حل شماره ۱۱ به‌عنوان جواب مصالحه در این حالت انتخاب می‌شود که مطابق آن، هزینه بهره‌برداری سیستم برابر ۲۲۷۹/۱۹۰ دلار و شاخص رفاه برابر ۰/۸۱۵ یا به عبارتی ۸۱/۵ درصد خواهد بود. منحنی جواب‌های بهینه پارتو در حالتی که برنامه پاسخگویی بار در نظر گرفته شده است در شکل ۱۰ ارائه شده است.

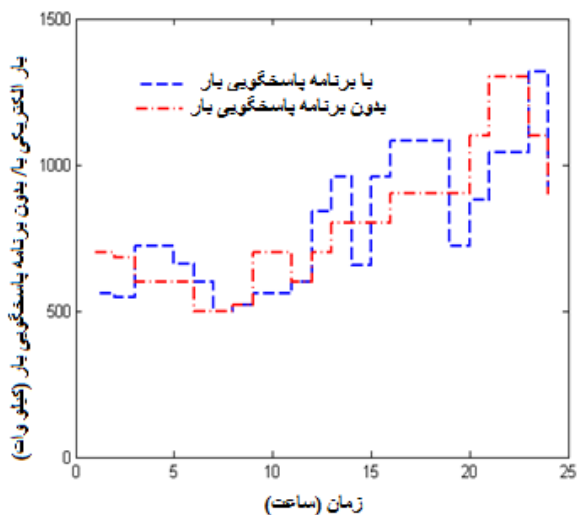
مطابق این شکل، با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار و در نظر گرفتن تابع هزینه به‌عنوان تابع هدف، هزینه بهره‌برداری سیستم برابر ۱۹۴۹/۸۰۸ دلار و شاخص رفاه برابر ۰/۶۰۰ معادل ۶۰ درصد خواهد بود. از طرفی با در نظر

گرفتن شاخص رفاه به‌عنوان تابع هدف، شاخص رفاه برابر ۱۰۰ درصد و هزینه سیستم برابر ۲۵۶۷/۴۱۱ دلار خواهد بود. با برقراری شرایط مصالحه بین توابع هدف، هزینه بهره‌برداری سیستم و شاخص رفاه برابر ۲۲۵۸/۱۷۳ دلار و ۸۱/۱ درصد خواهند بود. به منظور مقایسه بهتر نتایج حاصل شده، جواب‌های پارتو و مصالحه با/ بدون برنامه پاسخگویی بار در شکل ۱۱ ارائه شده‌اند.



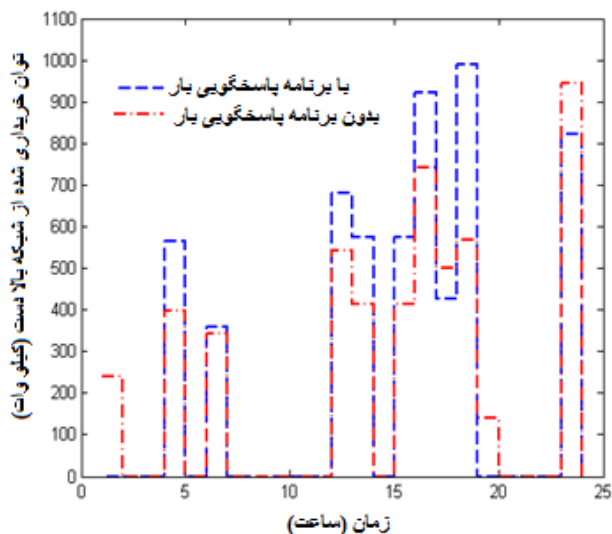
شکل ۱۱. جواب‌های پارتو با/ بدون برنامه پاسخگویی بار

با مقایسه این نتایج می‌توان فهمید در صورت مشارکت بارهای قابل شیف‌ت در برنامه پاسخگویی بار، هزینه بهره‌برداری سیستم در مقایسه با حالتی که این برنامه‌ها ارائه نشده‌اند کاهش ۲۱/۰۱۷ دلاری معادل ۰/۹۲۲۱ درصدی داشته است که امری مطلوب برای بهره‌بردار مربوطه سیستم هاب انرژی از نقطه‌نظر اقتصادی به شمار می‌رود. به منظور مشاهده تاثیر ارائه برنامه‌های مدیریت مصرف بر روی پروفیل بار، بار الکتریکی سیستم هاب انرژی با/ بدون لحاظ کردن امکان مشارکت بارهای قابل شیف‌ت در برنامه پاسخگویی بار در شکل ۱۲ ارائه شده است.



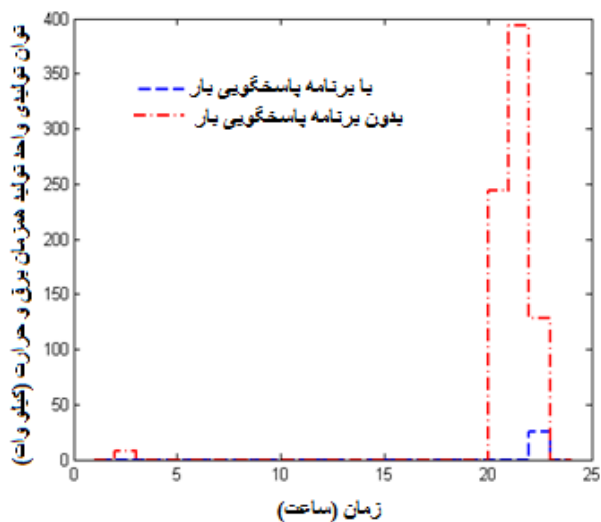
شکل ۱۲. بار الکتریکی با/ بدون برنامه پاسخگویی بار

به منظور تامین بار الکتریکی فوق در حالت‌های با/ بدون برنامه پاسخگویی بار، بهره‌بردار سیستم هاب انرژی اقدام به خرید توان از شبکه بالادست نموده است که پروفیل مربوط به آن در شکل ۱۳ ارائه شده است. قابل ذکر است توان خریداری شده در حضور برنامه‌های پاسخگویی بار متناسب با پروفیل جدید بار تحت این برنامه‌ها می‌باشد که با توجه به قیمت‌های ساعتی برق می‌تواند در هزینه‌های بهره‌برداری سیستم هاب انرژی تاثیرگذار باشد.



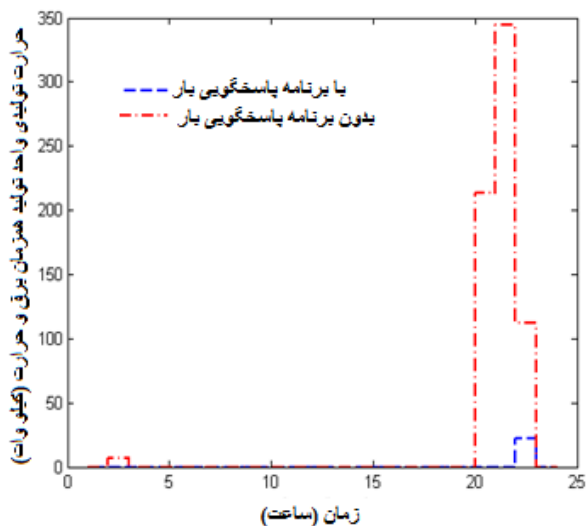
شکل ۱۳. توان خریداری شده از شبکه بالادست

علاوه بر توان شبکه بالادست، توان تولیدی توسط واحدهای تولید همزمان برق و حرارت نیز بهره‌بردار سیستم هاب انرژی را در تامین بار الکتریکی یاری می‌کند که پروفیل مربوط به آن در شکل ۱۴ ارائه شده است.



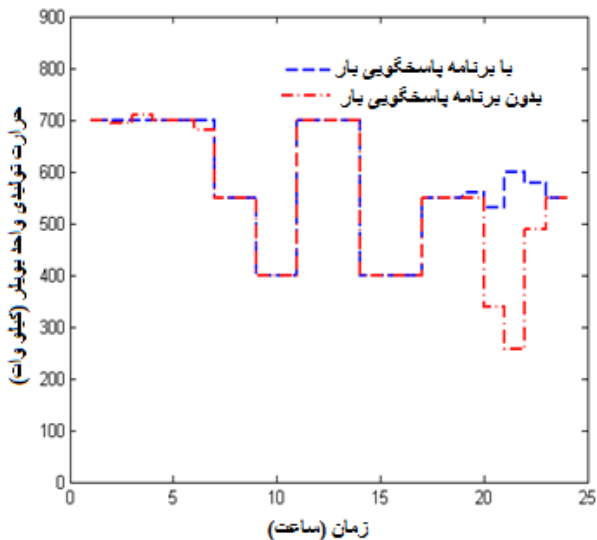
شکل ۱۴. توان تولیدی واحد تولید همزمان برق و حرارت

با توجه به روابط بین توان و حرارت تولیدی واحد تولید همزمان برق و حرارت، حرارت تولید شده بواسطه این واحد جهت تامین بار حرارتی سیستم هاب انرژی در شکل ۱۵ ارائه شده است.



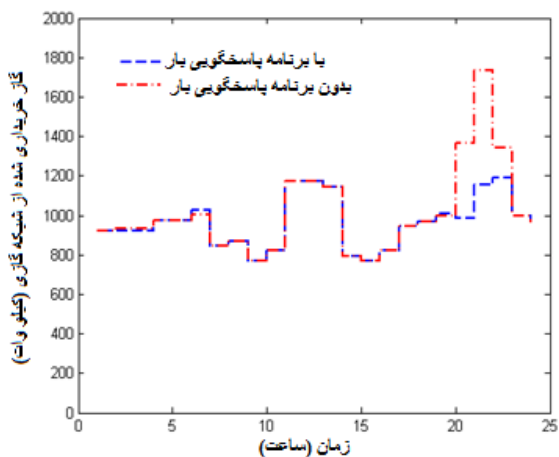
شکل ۱۵. حرارت تولیدی واحد تولید همزمان برق و حرارت

علاوه بر واحد تولید همزمان برق و حرارت، واحد بویلر نیز نقشی موثر در تامین بار حرارتی سیستم هاب انرژی دارد. با توجه به ساختار واحدهای حرارتی و همچنین راندمان‌های کاری، عمده بار حرارتی سیستم هاب انرژی توسط واحد بویلر که واحدی مختص تولید حرارت است تامین می‌شود. حرارت تولیدی توسط این واحد در شکل ۱۶ ارائه شده است.

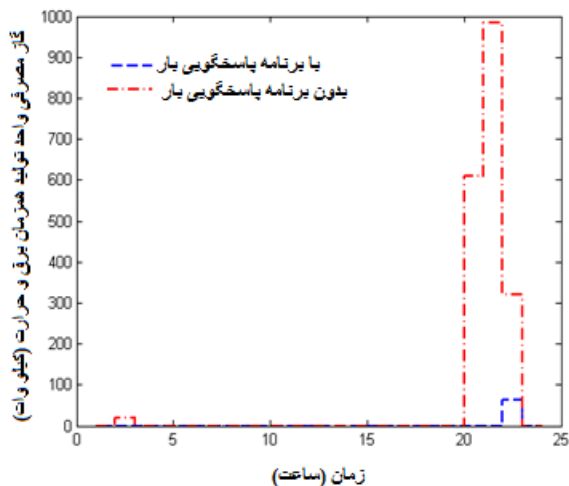


شکل ۱۶. حرارت تولیدی واحد بویلر

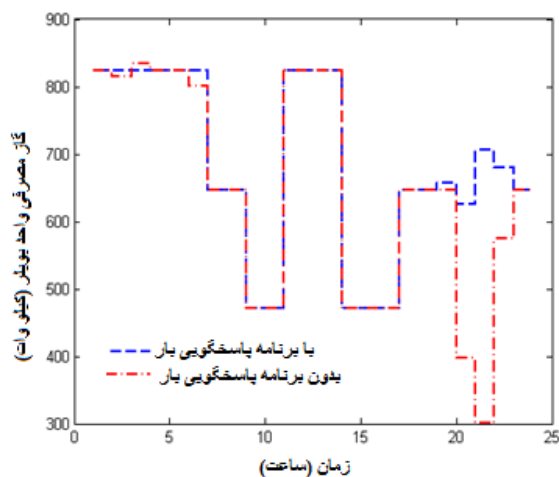
به منظور بهره‌برداری و تولید انرژی بواسطه واحدهای اشاره شده در بالا (واحد تولید همزمان برق و حرارت و واحد بویلر) گاز از شبکه گازی خریداری شده به میزان مطلوب توسط این واحدها مصرف می‌شود. کل گاز خریداری شده از شبکه گازی به همراه گاز مصرفی واحد تولید همزمان برق و حرارت و واحد بویلر در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ ارائه شده‌اند.



شکل ۱۷. گاز خریداری شده از شبکه گازی

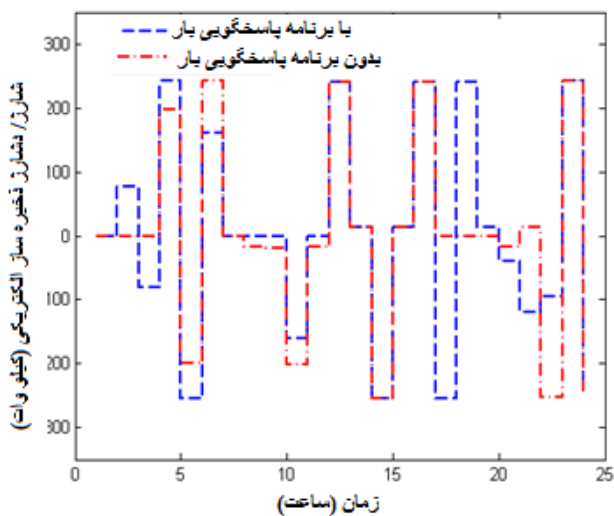


شکل ۱۸. گاز مصرفی واحد تولید همزمان برق و حرارت

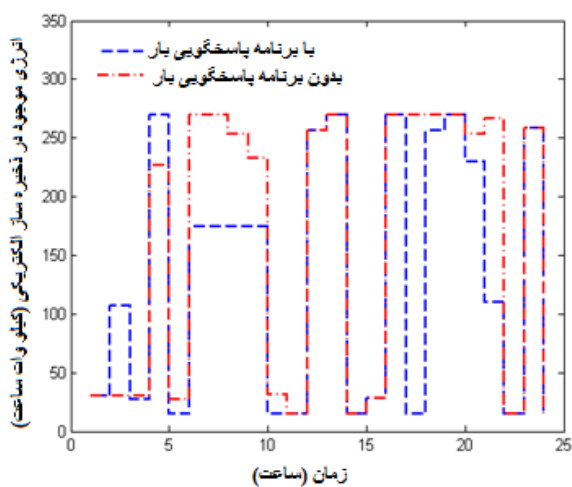


شکل ۱۹. گاز مصرفی واحد بویلر

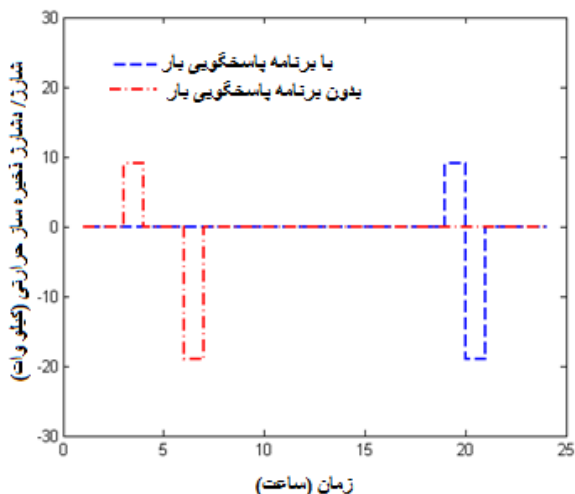
جهت استفاده بهینه از توان و حرارت‌های تولید شده در سیستم هاب انرژی، سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی به کار رفتند تا با ذخیره به موقع انرژی و استفاده آن در ساعات مناسب نسبت به بهبود بهره‌برداری سیستم هاب انرژی از نقطه نظر راندمان انرژی و عملکرد اقتصادی کمک کنند. توان‌های شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی به همراه انرژی موجود در آن در شکل‌های ۲۰ تا ۲۳ ارائه شده‌اند.



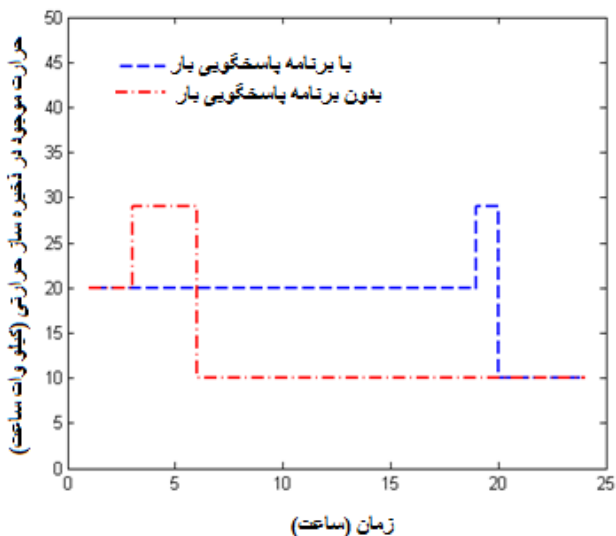
شکل ۲۰. شارژ و دشارژ ذخیره ساز الکتریکی



شکل ۲۱. انرژی موجود در ذخیره ساز الکتریکی



شکل ۲۲. شارژ و دشارژ ذخیره ساز حرارتی

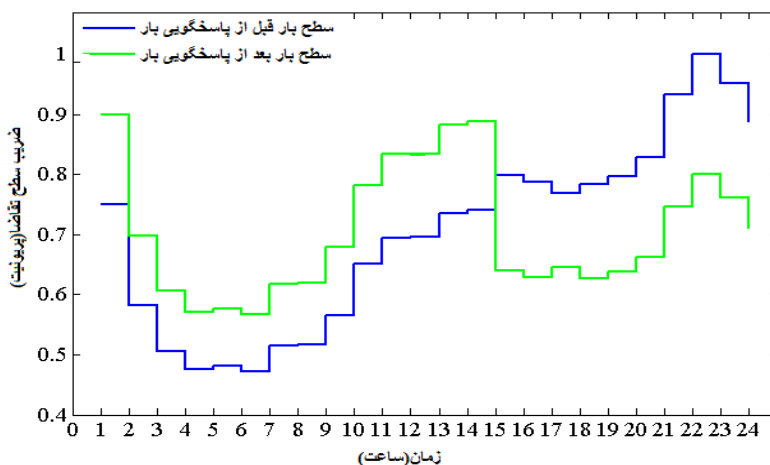


شکل ۲۳. حرارت موجود در ذخیره ساز حرارتی

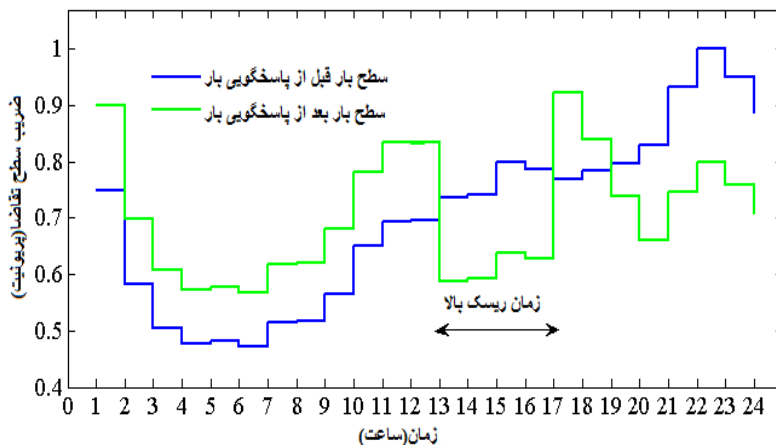
در ادامه سعی گردید به منظور مقایسه روش پیشنهادی و رفتار سیستم در بهره برداری با روش های مشابه بدون در نظر گرفتن شاخص رفاه بررسی گردد. در این راستا، با استفاده از توابع هدف و تخمین برخی پارامترها و قیود، نتایج بر اساس تابع هدف با و بدون در نظر گرفتن تاب آوری بررسی گردد که با توجه به مقادیر قابل توجه فقط تغییرات منحنی بار در مدیریت بار نسبت به حالت اولیه و نیز تاثیر در نظر گرفته نشدن تاب آوری و رفاه مصرف کنندگان در شکل های

۲۴ و ۲۵ نشان داده شده‌اند. در این خصوص مشاهده می‌شود که تاثیر اعمال قابلیت تاب‌آوری به تابع هدف منجر به تاثیر مستقیم آن بر روی برنامه پاسخگویی بار نیز شد. در این دو شکل مشخص است که با در نظر گرفتن شرایط بحرانی ناشی از طوفان، بر خلاف حالت بهره‌برداری عادی (بار از ساعات پیک به غیر پیک منتقل می‌شود) بار را از ساعات بحرانی که احتمال خاموشی و جریمه انرژی تامین نشده بیشتر است به ساعات دیگر منتقل می‌نماید.

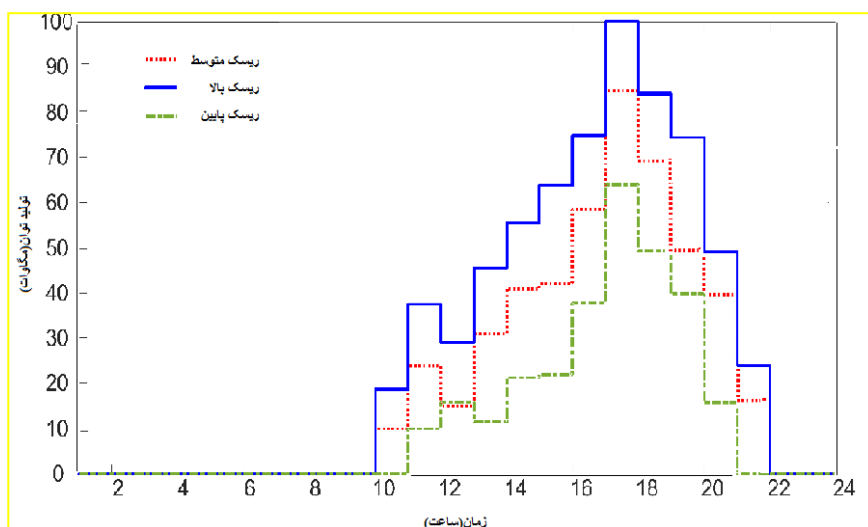
جهت بررسی حساسیت روش پیشنهادی به مهمترین پارامتر مقاله (میزان احتمال خروج خطوط در شرایط نامساعد) سه سطح مختلف از نرخ خروج خطوط (متناظر با سه وضعیت هوایی متفاوت) در نظر گرفته شد. در این حالت رفتار برنامه مدیریت بار در هر سه حالت تقریباً مشابه بود (انتقال بار از ساعات با احتمال خروج بالا و هزینه خاموشی بالا به ساعات دیگر)، ولی میزان حساسیت در واحد تولید همزمان برق و حرارت بر اساس هزینه واقعی سیستم و نرخ خروج خطوط متفاوت تغییر محسوس داشت که در شکل ۲۶ ارائه گردید. دلیل تفاوت در میزان تولید واحد تولید همزمان برق و حرارت مربوط به افزایش قیمت واقعی انرژی (با در نظر گرفتن جریمه ناشی از انرژی تامین نشده) می‌باشد که با افزایش ریسک سیستم، میزان خروجی آن نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۲۴. منحنی بار در بهره‌برداری نرمال بدون در نظر گرفتن شرایط جوی



شکل ۲۵. منحنی بار در بهره‌برداری پیشنهادی با در نظر گرفتن شرایط جوی



شکل ۲۶. تغییرات در خروجی الکتریکی واحد تولید همزمان برق و حرارت در سطوح مختلف ریسک

نتیجه‌گیری

استفاده بهینه از منابع انرژی با راندمان‌های بالا جهت تامین بار همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است چرا که این امر موجب بهبود راندمان انرژی مصرفی و عملکرد اقتصادی سیستم می‌گردد. در این مقاله، از مفهوم سیستم هاب انرژی جهت تامین بارهای الکتریکی، حرارتی، گازی و آبی استفاده گردیده است. تبدیلات انرژی در این سیستم‌ها امکان تامین بهینه بارهای انرژی تحت کمترین هزینه بهره‌برداری و بیشترین سطح رضایت‌مندی مصرف‌کنندگان را می‌دهد.

در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه جهت عملکرد اقتصادی سیستم هاب انرژی و همچنین تاب‌آوری مصرف‌کنندگان الکتریکی ارائه گردید که در آن کل هزینه بهره‌برداری سیستم کمینه شده و شاخص رفاه مصرف‌کنندگان که تابعی از شاخص انرژی تامین نشده سیستم است بیشینه شد. اساس روش بر پایه تخمین میزان خاموشی‌های قسمت الکتریکی با تغییرات جوی و تغییر در نحوه مدیریت بار و خروجی منابع موجود در شبکه استوار بود به نحوی که کمترین احتمال برای خاموشی‌های قسمت الکتریکی در شرایط نامساعد جوی اتفاق بیافتد. با بکارگیری روش اسپیلون کانسترنیت، مدل پیشنهادی با/ بدون در نظر گرفتن امکان مشارکت مصرف‌کنندگان الکتریکی در برنامه‌های مدیریت مصرف حل شده و جواب‌های پارتو حاصل گردید. سپس با اعمال روش ماکس-مین فازی، جواب مصالحه از بین جواب‌های پارتو انتخاب گردید. مطابق نتایج بدست آمده بدون لحاظ کردن برنامه‌های مدیریت مصرف، هزینه بهره‌برداری کل سیستم برابر $2279/190$ دلار و شاخص رفاه برابر $81/5$ درصد بدست آمد که نشان از پدید آمدن شرایط مصالحه بین اهداف ذکر شده می‌باشد. با اعمال برنامه‌های مدیریت مصرف، هزینه سیستم برابر $2258/173$ دلار و شاخص رفاه برابر $81/1$ درصد بدست آمد. با مقایسه این نتایج با حالتی که برنامه‌های مدیریت مصرف لحاظ نشدند، می‌توان پی برد که تحت برنامه‌های مدیریت مصرف، عملکرد اقتصادی بهبود یافته در حالی که شاخص رفاه کاهش یافته است. در حقیقت، با بهبود عملکرد اقتصادی سیستم تحت برنامه‌های پاسخگویی بار، شاخص رفاه کاهش می‌یابد که این امر می‌تواند در تعیین اولویت‌های برنامه‌ریزی و مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های مدیریت مصرف تاثیرگذار باشد. همچنین تاثیر روش پیشنهادی بر روی برنامه مدیریت بار و تغییر در اولویت انتقال بار (از شیفت بار ساعات پیک به شیفت بار ساعات پر ریسک) نشان داده شد. مبنای این تغییر در اولویت انتقال هزینه واقعی سیستم (قیمت شبکه و جریمه ناشی از خاموشی) بود. همچنین تغییر در تولید انرژی الکتریکی واحد تولید همزمان برق و حرارت نیز بررسی شد و مشاهده گردید افزایش هزینه‌های انرژی (به علت افزایش هزینه خاموشی) منجر به افزایش خروجی واحد تولید همزمان برق و حرارت و کاهش نیاز به شبکه بالاسری در شرایط اضطراری می‌گردد.

References

- [1] Cong, H., Wang, X., & Jiang, C. (2019). Robust coalitional game theoretic optimisation for cooperative energy hubs with correlated wind power. *Institution of Engineering and Technology Renewable Power Generation*, 13(13), 2391-2399. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.6232>
- [2] Zhao, P., Gu, C., Huo, D., Shen, Y., & Hernando-Gil, I. (2020). Two-Stage Distributionally Robust Optimization for Energy Hub Systems. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industrial Informatics*, 16(5), 3460-3469. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2938444>
- [3] Cao, Y., Wei, W., Wang, J., Mei, S., Shafie-khah, M., & Catalão, J. P. S. (2020). Capacity Planning of Energy Hub in Multi-Carrier Energy Networks: A Data-Driven Robust Stochastic Programming Approach. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Sustainable Energy*, 11(1), 3-14. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2878230>
- [4] Moradi, S., Ghaffarpour, R., Ranjbar, A. M., & Mozaffari, B. (2017). Optimal integrated sizing and planning of hubs with midsize/large CHP units considering reliability of supply. *Energy Conversion and Management*, 148, 974-992. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.008>
- [5] Zhang, X., Che, L., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A. S., & Abusorrah, A. (2017). Reliability-Based Optimal Planning of Electricity and Natural Gas Interconnections for

- Multiple Energy Hubs. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Smart Grid*, 8(4), 1658-1667. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2498166>
- [6] Lei, Y., Hou, K., Wang, Y., Jia, H., Zhang, P., Mu, Y., Jin, X., & Sui, B. (2018). A new reliability assessment approach for integrated energy systems: Using hierarchical decoupling optimization framework and impact-increment based state enumeration method. *Applied Energy*, 210, 1237-1250. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.099>
- [7] Pazouki, S., & Haghifam, M-R. (2016). Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind, storage and demand response under uncertainty. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 80, 219-239. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.01.044>
- [8] Ambia, M. N., Meng, K., Xiao, W., & Dong, Z. Y. (2021). Nested Formation Approach for Networked Microgrid Self-Healing in Islanded Mode. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Delivery*, 36(1), 452-464. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.2977769>
- [9] Wen, Y., AlHakeem, D., Mandal, P., Chakraborty, S., Wu, Y. K., Senjyu, T., Paudyal, S., & Tseng, T. L. (2020). Performance Evaluation of Probabilistic Methods Based on Bootstrap and Quantile Regression to Quantify PV Power Point Forecast Uncertainty. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 31(4), 1134-1144. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2019.2918795>
- [10] Song, Y., Liu, Y., Wang, R., & Ming, M. (2019). Multi-Objective Configuration Optimization for Isolated Microgrid With Shiftable Loads and Mobile Energy Storage. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*, 7, 95248-95263. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928619>
- [11] Bao, M., Ding, Y., Singh, C., & Shao, C. (2019). A Multi-State Model for Reliability Assessment of Integrated Gas and Power Systems Utilizing Universal Generating Function Techniques. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Smart Grid*, 10(6), 6271-6283. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2900796>
- [12] Zamani-Gargari, M., Kalavani, F., Abapour, M., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2018). Reliability assessment of generating systems containing wind power and air separation unit with cryogenic energy storage. *Journal of Energy Storage*, 16(7), 116-124. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.12.013>
- [13] Moradi, A., Salehi, J., & Ravadanagh, S. N. (2022). Risk-based optimal decision-making strategy of a Power-to-Gas integrated energy-hub for exploitation arbitrage in day-ahead electricity and Natural Gas markets. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 31, 100781. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100781>
- [14] Araujo, D., Batista, N., Carvalho, P., Reges, J., Costa, D., Dias, R., Freitas, D., Lima, S., Ramos, K., Ribeiro, S., & Soares, F. (2020). Renewable Hybrid Systems: Characterization and Tendencies. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Latin America Transactions*, 18(01), 102-112. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9049467>
- [15] Senemar, S., Seifi, A. R., Rastegar, M., & Parvania, M. (2020). Probabilistic Optimal Dynamic Planning of Onsite Solar Generation for Residential Energy Hubs. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Systems Journal*, 14(1), 832-841. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2901844>
- [16] Ge, S., Sun, H., Liu, H., Li, J., Zhang, X., & Cao, Y. (2019). Reliability Evaluation of Multi-energy Microgrids: Energy Storage Devices Effects Analysis. *Energy Procedia*, 158, 4453-4458. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.769>

- [17] Juanwei, C., Tao, Y., Yue, X., Xiaohua, C., Bo, Y., & Baomin, Z. (2019). Fast analytical method for reliability evaluation of electricity-gas integrated energy system considering dispatch strategies. *Applied Energy*, 242(2), 260-272. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.106>
- [18] Moeini-Aghtaie, M., Dehghanian, P., & Davoudi, M. (2022). Energy management of Plug-In Hybrid Electric Vehicles in renewable-based energy hubs. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 32, 100932. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100932>
- [19] Al-Ammar, E. A., Habib, H. U. R., Kotb, K. M., Wang, S., Ko, W., Elmorshedy, M. F., & Waqar, A. (2020). Residential Community Load Management Based on Optimal Design of Standalone HRES With Model Predictive Control. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*, 8, 12542-12572. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965250>
- [20] Bose, S., De, A., & Chakrabarti, I. (2020). Framework for Automated Earthquake Event Detection Based on Denoising by Adaptive Filter. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 67(9), 3070-3083. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.2984960>
- [21] Lei, J., Zhou, C., Li, X., Huang, A., Bai, H., Yuan, Z., & Zhou, L. (2016). Energy Management Considering Energy Storage and Demand Response for Smart Energy Hub in Internet of Things. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*, 4, 1-9. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976781>
- [22] Liu, T., Zhang, D., Wang, S., & Wu, T. (2019). Standardized modelling and economic optimization of multi-carrier energy systems considering energy storage and demand response. *Energy Conversion and Management*, 182(1), 126-142. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.073>
- [23] Shahrabi, E., Hakimi, S. M., Hasankhani, A., Derakhshan, G., & Abdi, B. (2021). Developing optimal energy management of energy hub in the presence of stochastic renewable energy resources. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 26(1), 100428. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100428>
- [24] Nazari-Heris, M., Abapour, S., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2017). Optimal economic dispatch of FC-CHP based heat and power micro-grids. *Applied Thermal Engineering*, 114, 756-769. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.016>
- [25] Esmaeel Nezhad, A., Ahmadi, A., Javadi, M. S., & Janghorbani, M. (2015). Multi-objective decision-making framework for an electricity retailer in energy markets using lexicographic optimization and augmented epsilon-constraint. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 25(12), 3660-3680. <https://doi.org/10.1002/etep.2059>
- [26] Babatunde, O. M., Munda, J. L., & Hamam, Y. (2020). A Comprehensive State-of-the-Art Survey on Hybrid Renewable Energy System Operations and Planning. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*, 8, 75313-75346. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988397>

فهرست علائم و اختصارات

توابع

$\phi 1$	تابع هدف اول مسئله بهینه‌سازی دوهدفه
$\phi 2$	تابع هدف دوم مسئله بهینه‌سازی دوهدفه
OF	تابع هدف مسئله بهینه‌سازی تک هدفه منتج از مسئله بهینه‌سازی دوهدفه

اندیس‌ها

t	اندیس زمان
n	اندیس تکرار روش اپسیلون کانسترنیت

پارامترها

ε	عامل اپسیلون
λ_t^{net}	قیمت توان الکتریکی شبکه بالادست
λ^g	قیمت گاز
λ_{ST}^h	هزینه بهره‌برداری ذخیره‌ساز حرارتی
λ_{ST}^e	هزینه بهره‌برداری ذخیره‌ساز الکتریکی
λ^{wind}	هزینه بهره‌برداری سیستم بادی
λ^{wr}	قیمت آب
η_{ge}^{chp}	راندمان الکتریکی واحد تولید همزمان برق و حرارت
η_{gh}^{chp}	راندمان حرارتی واحد تولید همزمان برق و حرارت
η_{he}^{chp}	راندمان مبدل حرارتی
η^{bo}	راندمان بویلر
η_c^{es}	راندمان شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
η_d^{es}	راندمان دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
η_c^{hs}	راندمان شارژ ذخیره‌ساز حرارتی
η_d^{hs}	راندمان دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی
G_{min}^{net}	کمینه محدودیت گاز قابل خرید از شبکه بالادست
G_{max}^{net}	بیشینه محدودیت گاز قابل خرید از شبکه بالادست
H_{min}^{bo}	کمینه محدودیت حرارت تولیدی بویلر
H_{max}^{bo}	بیشینه محدودیت حرارت تولیدی بویلر
H_{min}^{hs}	کمینه محدودیت حرارت موجود در ذخیره‌ساز حرارتی
H_{max}^{hs}	بیشینه محدودیت حرارت موجود در ذخیره‌ساز حرارتی

$H_{min}^{c,hs}$	کمینه محدودیت حرارت ورودی ذخیره‌ساز حرارتی
$H_{max}^{c,hs}$	بیشینه محدودیت حرارت ورودی ذخیره‌ساز حرارتی
$H_{min}^{d,hs}$	کمینه محدودیت حرارت خروجی ذخیره‌ساز حرارتی
$H_{max}^{d,hs}$	بیشینه محدودیت حرارت خروجی ذخیره‌ساز حرارتی
HPR^{chp}	نسبت حرارت به توان واحد تولید همزمان برق و حرارت
L_t^e	بار الکتریکی سیستم هاب انرژی
L_t^h	بار حرارتی سیستم هاب انرژی
L_t^g	بار گازی سیستم هاب انرژی
L_t^w	بار آبی سیستم هاب انرژی
LS_{max}^e	بیشینه محدودیت قطع بار الکتریکی
N	تعداد تکرار در روش اسپیلون کانسترنیت
N_w	تعداد قطعی‌های ناشی از سرعت باد
P_r	توان نامی سیستم بادی
p_{max}^{net}	توان نامی شبکه بالادست
p_{min}^{chp}	کمینه محدودیت توان تولیدی واحد تولید همزمان برق و حرارت
p_{max}^{chp}	بیشینه محدودیت توان تولیدی واحد تولید همزمان برق و حرارت
P_{min}^{es}	کمینه محدودیت انرژی موجود در ذخیره‌ساز الکتریکی
P_{max}^{es}	بیشینه محدودیت انرژی موجود در ذخیره‌ساز الکتریکی
$p_{min}^{c,es}$	کمینه محدودیت توان شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
$p_{max}^{c,es}$	بیشینه محدودیت توان شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
$p_{min}^{d,es}$	کمینه محدودیت توان دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
$p_{max}^{d,es}$	بیشینه محدودیت توان دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
$p_{max}^{TOU,inc}$	بیشینه محدودیت بار قابل شیفت (افزایش)
$p_{max}^{TOU,dec}$	بیشینه محدودیت بار قابل شیفت (کاهش)
S_t	سرعت باد
S_{co}	سرعت خروج از کار باد
S_{ci}	سرعت شروع به کار باد
S_r	سرعت نامی باد
T	تعداد ساعات برنامه‌ریزی
x	ضریب استفاده شده در مدل سیستم بادی
W	میانگین سرعت باد
Wr_{min}^{net}	کمینه محدودیت آب قابل خرید از شبکه آبی
Wr_{max}^{net}	بیشینه محدودیت آب قابل خرید از شبکه آبی
y	ضریب استفاده شده در مدل سیستم بادی
z	ضریب استفاده شده در مدل سیستم بادی

متغیرها

Γ^{max}	بیشینه مقدار شاخص رفاه
Γ^{min}	کمینه مقدار شاخص رفاه
μ_{pu}^n	کمینه مقدار انتخاب شده بین توابع هدف در هر تکرار
μ_{pu}^{max}	بیشینه مقدار انتخابی از بین کمینه‌های انتخاب شده در روش ماکس - مین فازی
Γ	شاخص رفاه
Γ^n	شاخص رفاه در هر تکرار
Γ_{pu}^n	مقدار پریونیت شده شاخص رفاه در هر تکرار
ENS	مقدار انرژی قطع شده
G_t^{bo}	گاز مصرفی توسط بویلر
G_t^{chp}	گاز مصرفی توسط واحد تولید همزمان برق و حرارت
G_t^{net}	گاز خریداری شده از شبکه گازی
H_t^{hs}	حرارت موجود در ذخیره‌ساز حرارتی
H_t^{bo}	مقدار گرمای موجود در بویلر
H_t^{chp}	مقدار گرمای موجود در واحد تولید همزمان برق و حرارت
LS_t^e	بار قطع شده
$L_t^{e,DRP}$	بار الکتریکی سیستم هاب انرژی با در نظر گرفتن بارهای قابل شیفت
$H_t^{c,hs}$	حرارت ورودی ذخیره‌ساز حرارتی
$H_t^{d,hs}$	حرارت خروجی ذخیره‌ساز حرارتی
OC^{max}	بیشینه مقدار هزینه بهره‌برداری سیستم هاب انرژی
OC^{min}	کمینه مقدار هزینه بهره‌برداری سیستم هاب انرژی
OC	هزینه بهره‌برداری سیستم هاب انرژی
OC^n	هزینه بهره‌برداری سیستم هاب انرژی در هر تکرار
OC_{pu}^n	مقدار پریونیت شده هزینه بهره‌برداری سیستم هاب انرژی در هر تکرار
P_t^{chp}	انرژی موجود در واحد تولید همزمان برق و حرارت
P_t^{net}	توان خریداری شده از شبکه بالادست
P_t^{es}	انرژی موجود در ذخیره‌ساز الکتریکی
$P_t^{c,es}$	توان شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
$P_t^{d,es}$	توان دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
$P_t^{c,hs}$	توان شارژ ذخیره‌ساز حرارتی
$P_t^{d,hs}$	توان دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی
P_t^w	توان سیستم بادی
$P_t^{TOU,inc}$	بار افزایش یافته در برنامه زمان - استفاده
$P_t^{TOU,dec}$	بار کاهش یافته در برنامه زمان - استفاده
$W\tau_t^{net}$	آب خریداری شده از شبکه آبی

متغیرهای باینری

$B_t^{TOU,inc}$	متغیر باینری افزایش بار در برنامه زمان - استفاده
$B_t^{TOU,dec}$	متغیر باینری کاهش بار در برنامه زمان - استفاده
B_t^{LS}	متغیر باینری قطع بار
$B_t^{c,es}$	متغیر باینری شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
$B_t^{d,es}$	متغیر باینری دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
$B_t^{c,hs}$	متغیر باینری شارژ ذخیره‌ساز حرارتی
$B_t^{d,hs}$	متغیر باینری دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی