

Optimal operation of energy hub with the presence of electricity to gas technology and hydrogen loads, considering demand response programs and air pollution

Amin Namvar¹, Javad Salehi², Navid Taghizadegan Kalantari³

1- Ph.D. Student, Department of Electrical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, a.namvar@azaruniv.ac.ir

2- Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, (Corresponding author) j.salehi@azaruniv.ac.ir

3- Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, taghizadegan@azaruniv.ac.ir

Abstract:

Energy supply is the most important need of human societies because life is impossible without energy. Therefore, the operation of energy resources is a substantial subject in the management of these resources. On the other hand, energy resources are often interdependent, which can help their management. In other words, the integrated operation of energy resources can be useful in energy management. In this regard, "the energy hub" has been introduced as a new concept for the integrated operation of energy resources. Using the concept of an energy hub, this paper tries to reduce the energy supply costs of consumers and manage these resources by integrated and simultaneous operation of electricity, natural gas, and water. In modeling, various pieces of equipment, such as energy storage devices, combined heat and power systems, and renewable sources, are used. Power-to-gas technology is also used to produce hydrogen and natural gas from water and electricity to supply hydrogen loads and inject the natural gas produced into the gas network. Power-to-gas technology uses excess electricity produced by renewable sources to produce hydrogen, which is obtained from the breakdown of water molecules. Given that the technology requires carbon dioxide to produce natural gas, this can reduce air pollution. In addition, a demand response program is implemented to shift a part of the electricity and heat consumption from peak hours to off-peak hours in order to reduce operating costs. Load transfer can be done with different methods, such as incentive plans or load management on the demand side. This modeling is a mixed integer linear programming. As mentioned, the model presented in this article is linear, so it is necessary to linearize the nonlinear equations. In this modeling, a method called "the Cartesian" method is used for linearization. After linearization of the nonlinear equations, this problem has been solved by GAMS software using the CPLEX solver. The results show that the proposed model has a significant impact on reducing operating costs and air pollution. In other words, devices such as electric heaters, combined heat and power, and power-to-gas units could reduce operating costs by 22% by converting energy carriers into different forms of energy, thereby significantly reducing pollutant emissions into the air so that, in the presence of the power-to-gas unit, the amount of pollution in the air can be decreased by 26%.

Keywords:

Air pollution, Demand response program, Electricity to gas, Energy hub, Hydrogen loads.

Submit date: 2022/02/10

Accepted date: 2023/01/28

Corresponding author Name: Javad Salehi

Corresponding author address: Department of Electrical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

بهره‌برداری بهینه‌ی هاب انرژی با حضور فناوری برق به گاز و بارهای هیدروژنی با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخگویی به بار و آلودگی هوا

نوع مطالعه: پژوهشی

- امین نامور^۱، دانشجوی دکتری، جواد صالحی^۲، دانشیار، نوید تقی زادگان کلانتری^۳، دانشیار
- ۱- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران
a.namvar@azaruniv.ac.ir
- ۲- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران
j.salehi@azaruniv.ac.ir
- ۳- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران
taghizadegan@azaruniv.ac.ir

چکیده: تامین انرژی مورد نیاز که برای ادامه‌ی حیات جوامع نیاز است باید با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و اقتصادی انجام پذیرد. از آنجایی که حامل‌های مختلف انرژی نسبت به هم وابستگی‌هایی دارند، بهره‌برداری از این منابع بصورت همزمان و یکپارچه هم هزینه‌های بهره‌برداری کاهش می‌دهد و هم از هدررفت این منابع جلوگیری می‌کند. این مقاله با بهره‌گیری از مفهوم هاب انرژی تلاش می‌کند تا با بهره‌برداری یکپارچه و همزمان از حامل‌های انرژی برق، گاز طبیعی و آب، هزینه‌های تامین انرژی مصرف‌کنندگان را کاهش داده و این منابع را مدیریت کند. در مدلسازی انجام گرفته از تجهیزات مختلف از جمله ذخیره‌سازهای انرژی، سیستم تولید همزمان برق و حرارت و منابع تجدیدپذیر استفاده شده است. همچنین از فناوری برق به گاز برای تولید هیدروژن و گاز از آب و برق استفاده شده تا هم بارهای هیدروژنی تامین شوند و هم گاز طبیعی تولید شده به شبکه‌ی گاز تزریق شود و با توجه به اینکه این فناوری برای تولید گاز به کربن دی اکسید نیاز دارد باعث کاهش انتشار آلودگی در هوا می‌شود. در کنار موارد گفته شده، برنامه‌ی پاسخگویی به بار به منظور انتقال بخشی از مصرف برق و حرارت از ساعت‌های پرمصرف به زمان‌های کم‌مصرف به منظور کاهش هزینه‌ها اعمال شده است. این مدلسازی یک مدلسازی خطی آمیخته با عدد صحیح است که توسط نرم افزار GAMS و با استفاده از حل کننده‌ی CPLEX حل شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی تاثیر قابل توجهی در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار آلودگی در هوا دارد.

واژه‌های کلیدی: هاب انرژی، بارهای هیدروژنی، برنامه پاسخگویی به بار، برق به گاز، آلودگی هوا.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۰/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۱/۱۰/۲۶

نام نویسنده‌ی مسئول : جواد صالحی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران

۱- مقدمه

شده، برای تعیین وابستگی بین سیستم توزیع توان و گاز توسعه داده شده‌اند. سپس، قابلیت اطمینان بصورت جداگانه در دو زیر سیستم با توجه به فرق آنها در مشخصه‌های بهره‌برداری ارزیابی می‌شوند. مقاله (Gu et al., 2019) تاثیر هیدروژن تبدیل شده از توان باد بر روی کیفیت گاز طبیعی را بررسی می‌کند. دو شاخص کلیدی برای اندازه-گیری کیفیت گاز طبیعی به نام شاخص W_1 و پتانسیل اشتعال برای بررسی تاثیر آن بکار گرفته شده‌اند. مقاله (Ma et al., 2018) مد معامله‌ی تعاونی برای سیستم انرژی اشتراکی را پیشنهاد می‌کند که شامل هاب انرژی و پنل‌های خورشیدی با قابلیت پاسخگویی به بار بصورت اتوماتیک است. مقاله (Wang et al., 2017) روش مدلسازی ماتریس استاندارد شده مبتنی بر مفهوم هاب انرژی را برای ساختن ماتریس مزدوج بصورت اتوماتیک ارائه می‌دهد. در این روش اجزا و ساختار سیستم چندگانه انرژی اول با استفاده از تئوری گراف تعریف می‌شوند و سپس ماتریس‌های بیان کننده‌ی توپولوژی سیستم‌های چندگانه‌ی انرژی و مشخصه‌های مبدل‌های انرژی توسعه پیدا می‌کنند که بر همین اساس، معادلات پخش انرژی فرمول بندی می‌شوند. مقاله (Liu et al., 2019) یک روش مدلسازی چند مرحله‌ای استاندارد شده و بهینه‌سازی خطی شده را برای هاب انرژی پیشنهاد می‌کند. در این مدل هاب‌های انرژی پیچیده به هاب‌های انرژی ساده‌تر تقسیم می‌شوند، سپس ماتریس کوپلاژ هر کدام از این هاب‌ها نوشته می‌شود و از روی آن ماتریس هاب انرژی پیچیده به دست می‌آید. مقاله (Zhang & Yu, 2019) یک روش کنترل هماهنگ انرژی را برای سیستم‌های یکپارچه انرژی ارائه می‌کند که در آن ویژگی کامل اتصالات بین حامل‌های انرژی گاز طبیعی، برق و حرارت در نظر گرفته شده است. این مدل برای مشارکت با سیستم کنترل تولید خودکار برای بهبود عملکرد پاسخ دینامیکی تحت اختلالات انرژی الکتریکی به کار گرفته می‌شود. در مقاله (Wang et al., 2019) یک مدل جدید بهینه‌سازی برای طراحی سیستم‌های انرژی یکپارچه با زیرسیستم‌های حرارتی، سرمایشی و برقی ارائه شده است تا بصورت هم‌زمان اهداف زیست محیطی، فنی و اقتصادی را محقق کند. در این پژوهش تلاش شده است تا با اندازه‌سازی بهینه برای هر کدام از اجزا از قبیل پنل‌های خورشیدی، توربین بادی و باتری، عملکرد اقتصادی و زیست محیطی سیستم را بهبود ببخشد. در مقاله (Zhang et al., 2019) یک مدل برنامه‌ریزی مبتنی بر تئوری بازی‌ها برای سیستم‌های یکپارچه انرژی شامل سیستم گاز طبیعی، سیستم برق و سیستم تولید گاز طبیعی از برق ارائه شده است. سیستم تولید گاز طبیعی از برق به عنوان یک مشترک مستقل در سیستم یکپارچه انرژی در محیط بازار مقررات زدایی شده در نظر گرفته شده است. مقاله (Zhang et al., 2021) یک چارچوب مدیریت انرژی در قالب هاب انرژی ارائه کرده است که مبتنی بر زیست گاز، آب، باد و خورشید بوده و با کاهش هزینه‌ها و افزایش بازده عملکرد، نیازهای مناطق روستایی که منفصل از شبکه هستند را تامین می‌کند. مقاله (Hou et al., 2020) یک مدل هاب انرژی را پیشنهاد کرده است که از ذخیره‌سازی

انرژی یکی از اساسی‌ترین نیازهای انسان بشمار می‌رود بطوریکه بدون آن ادامه زندگی برای بشر غیرممکن خواهد بود. منابع مختلفی برای تامین انرژی وجود دارد که می‌توان از آنها برای برآورده کردن نیازها استفاده کرد. اما امروزه برق، گاز طبیعی و آب حامل‌های انرژی مهمی هستند که بیشترین کاربرد را در زمینه‌های مختلف از جمله صنعتی، تجاری و خانگی دارند. بهره‌برداری جداگانه از این حامل‌های انرژی علاوه بر اینکه هزینه‌های بهره‌برداری را افزایش می‌دهد، باعث کاهش ذخیره‌ی منابع آنها می‌شود. برای بهره‌برداری از حامل‌های انرژی مختلف مفهومی به نام هاب انرژی (Kienzle et al., 2008) معرفی شده است. در واقع، هاب انرژی یک ابر گرهی است (در شکل ۱ قابل مشاهده است (Mohammadi et al., 2017)) که حامل‌های مختلف انرژی به آن وارد می‌شوند، سپس در آن پردازش شده و طبق برنامه‌ریزی در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرند (Geidl et al., 2006) که این موضوع هم باعث کاهش هزینه و آلودگی هوا شده و هم قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهد.

تحقیقات و پژوهش‌های مختلفی در زمینه هاب انرژی انجام شده است. در مقاله (Amiri & Honarvar, 2018) مدل ریاضی چندهدفه برای برنامه‌ریزی هاب انرژی با در نظر گرفتن سیاست‌های حفاظتی پیشگیرانه ارائه شده است. در این مدلسازی تجهیزات در معرض خطای تصادفی فرض شده‌اند و اقدام حفاظت پیشگیرانه‌ی دوره‌ای برنامه‌ریزی شده است. در مقاله (Huang et al., 2017) مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح دوسطحی در قالب هاب انرژی برای برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی چندگانه چندناحیه‌ای با در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. در مقاله (Alipour et al., 2017) یک مدل برنامه‌ریزی احتمالاتی بهینه برای بهره‌برداری از هاب انرژی ارائه شده است. این برنامه‌ریزی تعیین می‌کند که حامل‌های انرژی چه مقدار خریداری، تبدیل یا ذخیره شوند تا نیازهای مصرف‌کنندگان را تأمین کنند و در عین حال هزینه‌ی کل حداقل شود. مقاله (Huo et al., 2018) روش حل مسئله‌ی پخش بار بهینه در هاب‌های انرژی مجاور را برای کاهش هزینه‌های انرژی با استفاده از انعطاف منابع انرژی در شهر هوشمند در حضور عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر ارائه می‌دهد. مقاله (Qu et al., 2018) یک روش جدید برای پخش انرژی چندگانه بهینه‌ی غیرمتمرکز در سیستم‌های انرژی یکپارچه بزرگ-مقیاس در بازار تجارت کربن برای بهره‌برداری کامل از مزیت‌های اقتصادی و زیست محیطی سیستم ارائه می‌کند. در مقاله (Juanwei et al., 2019) یک روش جدید برای ارزیابی قابلیت اطمینان در سیستم‌های یکپارچه‌ی انرژی ارائه شده است. در ابتدا مدل‌های قابلیت اطمینان تجهیزات متصل

۲-۲-۱- ذخیره‌ساز انرژی

برق و حرارت تو سطر این واحدها به چه مقدار خواهد بود. تابع سوخت یک واحد تولید همزمان برق و حرارت یک تابع درجه دوم است که بصورت زیر نوشته می‌شود.

$$G_{CHP}^t = a.P_{CHP}^{t2} + b.P_{CHP}^t + c + d.T_{CHP}^{t2} + e.T_{CHP}^t + f.P_{CHP}^t.T_{CHP}^t \quad (7)$$

$$P_{CHP}^{min} \leq P_{CHP}^t \leq P_{CHP}^{max} \quad (8)$$

$$T_{CHP}^{min} \leq T_{CHP}^t \leq T_{CHP}^{max} \quad (9)$$

همانطور که گفته شد، مدل ارائه شده در این مقاله یک مدل خطی است، پس لازم است تا معادله‌ی (۷) خطی‌سازی شود. برای خطی‌سازی از روشی به نام روش «کارتزین» (Šumbera, 2012) استفاده شده است. در این روش شکل تابع درجه ۲ که بصورت سهمی است، به وسیله خط‌های کوچک، تقریب زده می‌شود. روابط ریاضی مربوط به مدل خطی شده تابع سوخت بصورت زیر است (Moradi et al., 2017). رابطه (۱۰) تابع سوخت خطی شده واحد تولید همزمان برق و حرارت را نشان می‌دهد. در روابط (۱۱) و (۱۲) نیز به ترتیب توان و حرارت تولید شده برای هر ساعت نشان داده شده است. بازه توان و حرارت بدست آمده در هر کدام از تکه‌های تقریب‌زده شده توسط رابطه (۱۳) و (۱۴) نمایش داده می‌شود. همچنین مقدار سوخت مصرفی در حداقل توان واحد تولید همزمان برق و حرارت از رابطه (۱۵) بدست می‌آید. در نهایت رابطه‌های (۱۶) تا (۱۹) به ترتیب حداکثر و حداقل ظرفیت تولید این واحد را نشان می‌دهند.

$$G^t = A_0 + \sum_{j=1}^J m_j e_j^t + \sum_{k=1}^K n_k h_k^t \quad (10)$$

$$P_{CHP}^t = Eb^0 + \sum_{j=1}^J e_j^t \quad (11)$$

$$T_{CHP}^t = \sum_{k=1}^K h_k^t \quad (12)$$

$$0 \leq e_j^t \leq (Eb_j - Eb_{j-1}) \quad (13)$$

$$0 \leq h_k^t \leq (Hb_k - Hb_{k-1}) \quad (14)$$

$$C_0 = a.(P_0)^2 + b.P_0 + c \quad (15)$$

$$Eb_j = P_{CHP}^{max} \quad (16)$$

$$Eb_0 = P_{CHP}^{min} \quad (17)$$

$$Hb_k = H_{CHP}^{max} \quad (18)$$

$$Hb_0 = 0 \quad (19)$$

سیستم تولید همزمان برق و حرارت دارای یک ناحیه عملکرد است که این سیستم می‌تواند در محدوده‌ی این ناحیه کار کند و برق و حرارت تولید نماید. ناحیه عملکرد یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت

ذخیره‌سازهای انرژی یکی از کلیدی‌ترین اجزای سیستم‌های مدیریت انرژی هستند، چراکه باعث افزایش قابلیت اطمینان در سیستم‌های انرژی می‌شود. از طرف دیگر، استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه است زیرا استفاده از این ذخیره‌سازها در کنار منابع تجدیدپذیر باعث افزایش کارایی این منابع می‌شود. به عبارت دیگر، زمانی که تولید منابع تجدیدپذیر زیاد است، ذخیره‌ساز این انرژی را ذخیره می‌کند تا در زمان نیاز آن را در اختیار مصرف‌کنندگان قرار دهد (Gazijahani & Salehi, 2017). همچنین ذخیره‌سازها در ساعت‌های کم‌باری که قیمت حامل‌های انرژی کم است آن را ذخیره می‌کنند تا در ساعت‌های پرباری در اختیار سیستم قرار دهند که این موضوع تاثیر قابل توجهی در کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان سیستم دارد. روابط ریاضی مربوط به باتری بصورت شکل زیر هستند (Xu et al., 2012). که رابطه (۱) وضعیت شارژ باتری یا همان مقدار انرژی ذخیره شده در باتری را نشان می‌دهد. رابطه (۲) نشان دهنده‌ی بازه مجاز انرژی است که باتری می‌تواند ذخیره کند. رابطه (۳) بر این موضوع دلالت دارد که میزان انرژی ذخیره شده در باتری در ساعت ۲۴ با مقدار اولیه آن برابر است. رابطه‌های (۴) و (۵) به ترتیب بیانگر حداکثر توان قابل شارژ و دشارژ توسط باتری در هر ساعت هستند و رابطه (۶) بیانگر مقدار باینری است که از شارژ و دشارژ همزمان باتری جلوگیری می‌کند.

$$E_{bat}^{t+1} = E_{bat}^t + (\eta_{ch} P_{ch}^t - \frac{P_{dch}^t}{\eta_{dch}}) \Delta t \quad (1)$$

$$E_{bat}^{min} \leq E_{bat}^t \leq E_{bat}^{max} \quad (2)$$

$$E_{bat}^{24} = E_{bat}^0 \quad (3)$$

$$0 \leq P_{ch}^t \leq P_{ch}^{max} I_{ch}^t \quad (4)$$

$$0 \leq P_{dch}^t \leq P_{dch}^{max} I_{dch}^t \quad (5)$$

$$I_{ch}^t + I_{dch}^t \leq 1 \quad (6)$$

لازم به ذکر است که در این مقاله از ذخیره‌سازهای مختلف استفاده شده است، ولی از آنجایی که روابط ریاضی حاکم بر باتری در مورد سایر ذخیره‌سازها هم صدق می‌کند، از تکرار روابط ریاضی سایر ذخیره‌سازها پرهیز می‌شود.

۲-۲-۲- سیستم تولید همزمان برق و حرارت

سیستم تولید همزمان برق و حرارت به عنوان مهم‌ترین فاکتور در ارتباط میان برق و گاز، نقش تاثیرگذاری در هاب انرژی دارد (Gazijahani et al., 2018). سیستم تولید همزمان برق و حرارت دارای یک ناحیه عملکرد است که در شکل زیر نشان داده شده است. در واقع این ناحیه نشان می‌دهد که حداکثر و حداقل ظرفیت تولید

۲-۲-۴- برنامه پاسخگویی به بار

برای کاهش بخشی از مصرف در ساعاتی پرباری نیاز است تا مصرف‌کنندگان بخشی از مصارف غیرضروری خود را به ساعاتی کم‌باری منتقل کنند. انتقال بار می‌تواند با روش‌های مختلفی نظیری طرح‌های تشویقی یا مدیریت بار در سمت مصرف انجام پذیرد (Gazijahani & Salehi, 2018) که این کار باعث کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. در این مقاله نیز برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از برنامه پاسخگویی به بار استفاده شده است که روابط ریاضی آن بصورت زیر است (Pazouki et al., 2014). رابطه (۲۵) نشان می‌دهد که مقدار باری که از ساعاتی پرباری کم می‌شود و به ساعاتی کم‌باری اضافه می‌شود باید با هم برابر باشد. روابط (۲۶) و (۲۷) مقدار حداکثر توانی را می‌تواند منتقل شود را نشان می‌دهد. رابطه (۲۸) نیز بیان می‌کند که کاهش و افزایش بار نباید بصورت همزمان اتفاق بیفتد.

$$\sum_{t=1}^{24} P'_{down} = \sum_{t=1}^{24} P'_{up} \quad (25)$$

$$0 \leq P'_{down} \leq \alpha_{down} P'_{load} I'_{down} \quad (26)$$

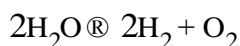
$$0 \leq P'_{up} \leq \alpha_{up} P'_{load} I'_{up} \quad (27)$$

$$I'_{down} + I'_{up} \leq 1 \quad (28)$$

با توجه به اینکه روابط حاکم بر برنامه پاسخگویی به بار در بارهای برقی و حرارتی یکسان است از تکرار این روابط برای بارهای حرارتی پرهیز می‌شود.

۲-۲-۵- برق به گاز

یکی از فناوری‌هایی که در سیستم‌های یکپارچه انرژی به کار گرفته می‌شود، فناوری برق به گاز است که اخیراً مورد توجه قرار گرفته و هدف آن استفاده از توان تولیدی توسط منابع تجدیدپذیر برای تولید گاز طبیعی و هیدروژن است (Eveloy & Gebreegziabher, 2018; Lewandowska-Bernat & Desideri, 2018). به عبارت دیگر، فناوری برق به گاز از برق اضافی تولید شده توسط منابع تجدیدپذیر برای تولید هیدروژن که از تجزیه مولکول‌های آب بدست می‌آید استفاده می‌کند. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، منابع تجدیدپذیر بخشی از توان تولیدی خود را در اختیار شبکه قرار می‌دهند و مازاد آن به الکترولیز داده می‌شود تا با استفاده از آن و مطابق با واکنش زیر مولکول‌های آب را به هیدروژن و اکسیژن تجزیه کنند.



شکل ۳ نشان داده شده است و همچنین قيود مربوط به آن در روابط (۲۰) تا (۳۰) نمایش داده شده است (Moradi et al., 2017).

$$P'_{CHP} - P_A - \frac{P_A - P_B}{T_A - T_B} (T'_{CHP} - T_A) \leq 0 \quad (20)$$

$$P'_{CHP} - P_B - \frac{P_B - P_C}{T_B - T_C} (T'_{CHP} - T_B) \geq 0 \quad (21)$$

$$P'_{CHP} - P_C - \frac{P_C - P_D}{T_C - T_D} (T'_{CHP} - T_C) \geq 0 \quad (22)$$

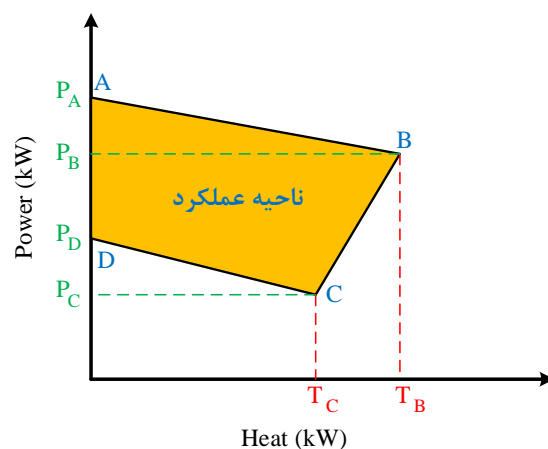
۲-۲-۳- توربین بادی

آلودگی هوا یکی از نگرانی اصلی در جوامع است. این نگرانی باعث شده است تا افراد برای تولید انرژی به استفاده از منابع پاک گرایش پیدا کنند. یکی از این منابعی که برای تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرد، توربین بادی است. در این مقاله نیز از توربین بادی به عنوان منبع تجدیدپذیر استفاده شده است که رابطه ریاضی آن بصورت زیر است (Weng & Hsu, 2016):

$$P'_{WT} = \begin{cases} 0 & v' < v_{in}, v' > v_{out} \\ \frac{v' - v_{in}}{v_n - v_{in}} P_n & v_{in} \leq v' < v_n \\ P_n & v_n \leq v' < v_{out} \end{cases} \quad (23)$$

از آنجایی که سرعت باد بصورت دقیق قابل پیش بینی نیست در نتیجه خروجی توربین بادی نیز دارای عدم قطعیت خواهد بود. در این مقاله از تابع توزیع احتمال ویبول^۲ برای تولید سناریو برای توربین بادی استفاده شده است که این تابع در رابطه (۲۴) نشان داده شده است.

$$f(s) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{s}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{s}{\lambda}\right)^k} \quad \forall s \geq 0, \lambda > 0, k > 0 \quad (24)$$



شکل ۳: ناحیه عملکرد واحد سیستم تولید همزمان برق به گاز

$$P_{grid}^t + P_{CHP}^t + P_{WT}^t + P_{dch}^t + P_{down}^t = P_{load}^t + P_{P2G}^t + P_{heater}^t + P_{ch}^t + P_{up}^t \quad (34)$$

$$T_{CHP}^t + T_{heater}^t + T_{P2G}^t + T_{dch}^t + T_{down}^t = T_{load}^t + T_{up}^t + T_{ch}^t \quad (35)$$

$$H_2^t + H_{dth}^t = H_{load}^t + H_{P2G}^t + H_{ch}^t \quad (36)$$

$$G_{grid}^t + G_{P2G}^t = G_{CHP}^t \quad (37)$$

$$W_{sea}^t + W_{P2G}^t + W_{dch}^t = W_{refinery}^t + W_{elect}^t + W_{ch}^t \quad (38)$$

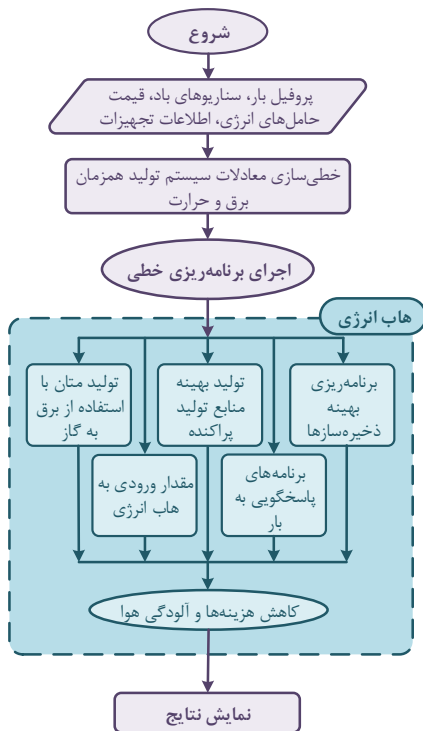
همچنین مدل‌سازی تعدادی از تجهیزات بکار رفته در این شبیه‌سازی نیز در زیر آمده است. رابطه (۳۹) مربوط به گرمکن برقی است که حرارت تولیدی توسط این گرمکن با ضریبی از مقدار توان ورودی به آن برابر است. رابطه (۴۰) مقدار توان مصرفی برای تصفیه آب توسط تصفیه کننده آب را نشان می‌دهد.

$$T_{heater}^t = h_{heater} P_{heater}^t \quad (39)$$

$$P_{purified}^t = h_{purify} W_{purified}^t \quad (40)$$

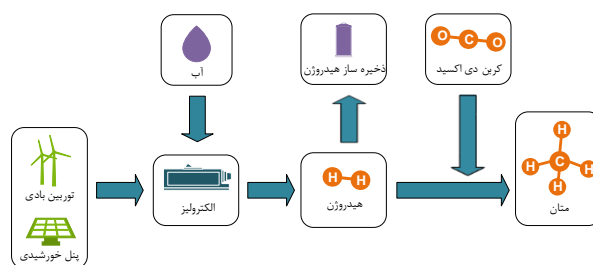
۲-۲-۷- توابع هدف

مدل پیشنهادی یک مسئله بهینه‌سازی است که تابع هدف آن کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش انتشار کربن است. هزینه‌های بهره‌برداری شامل هزینه خرید برق از شبکه، هزینه خرید گاز و هزینه انتشار کربن



شکل ۵: فلوچارت مدل‌سازی پیشنهادی

اکسیژن آزاد شده را می‌توان در جو آزاد کرد یا آن را به صنایع مختلف از جمله صنایع شیمیایی فروخت. اما محصول اصلی که هیدروژن است که می‌تواند مصارف صنعتی مختلفی داشته باشد، مثلاً به عنوان سوخت برای وسایل حمل و نقل و یا برای تولید برق در پیل‌های سوختی مورد استفاده قرار گیرد. در فناوری برق به گاز، هیدروژن اولین ماده اصلی این فرآیند است که نقش اصلی را بازی می‌کند. در مرحله آخر، برای تولید متان، هیدروژن و کربن دی‌اکسید طی یک واکنش شیمیایی که در زیر نشان داده شده است با هم ترکیب می‌شوند که خروجی آن متان و بخار آب است.



شکل ۴: مراحل تولید متان در واحد برق به گاز

مدلسازی ریاضی مربوط به فناوری برق به گاز در روابط (۲۹) تا (۳۳) قابل مشاهده است (Jiang & Guo, 2019).

$$H_2^t = a_{elect} W_{elect}^t \quad (29)$$

$$P_{P2G}^t = b_{elect} W_{elect}^t \quad (30)$$

$$G_{P2G}^t = a_{P2G} H_{P2G}^t \quad (31)$$

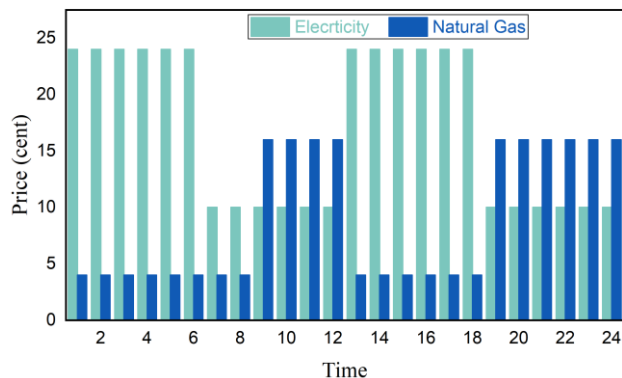
$$W_{P2G}^t = b_{P2G} H_{P2G}^t \quad (32)$$

$$T_{P2G}^t = g_{P2G} G_{P2G}^t \quad (33)$$

۲-۲-۶- قید تعادل توان

محدودیت تعادل توان یکی از اساسی‌ترین و مهم‌ترین قیود مسئله است و بیان می‌کند که مقدار مصرف انرژی در هر ساعت باید با مقدار تولید انرژی برابر باشد. در این مقاله حامل‌های انرژی مورد استفاده برق، حرارت و آب و هیدروژنی که از تجزیه آب توسط برق بدست می‌آید، هستند که باید برای هر کدام از آنها این قید لحاظ شود. روابط ریاضی مربوط به قیود تعادل انرژی در روابط (۳۴) تا (۳۸) نشان داده شده که به ترتیب تعادل برق، حرارت، هیدروژن، گاز و آب هستند.

برق و حرارت مورد استفاده در مدلسازی را نشان می‌دهد. همچنین هاب انرژی نمی‌تواند بیش از ۴۰ کیلووات آب را در ورودی خود بپذیرد.



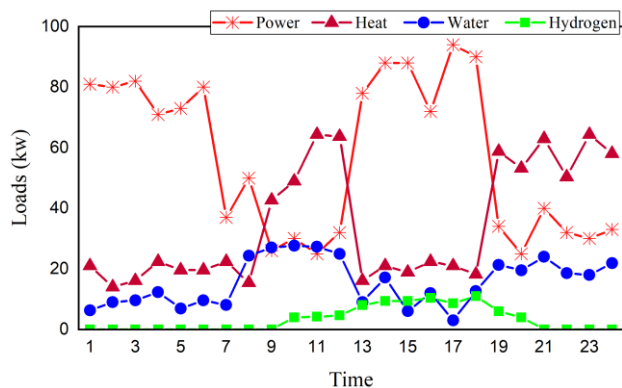
شکل ۶: قیمت حامل‌های انرژی

جدول ۱: اطلاعات ذخیره‌سازها

P_{ch}^{max}	P_{dch}^{max}	E_{bat}^{max}	E_{bat}^{min}	E_{bat}^0	h_{ch}^{bat}	h_{dch}^{bat}	برق
۱۵	۱۵	۱۵۰	۱۰	۱۵۰	۰/۸	۰/۸	
H_{ch}^{max}	H_{dch}^{max}	E_{hyd}^{max}	E_{hyd}^{min}	E_{hyd}^0	h_{ch}^{hyd}	h_{dch}^{hyd}	هیدروژن
۱۵	۱۵	۵۰	۷	۲۰	۱	۱	
T_{ch}^{max}	T_{dch}^{max}	E_{heat}^{max}	E_{heat}^{min}	E_{heat}^0	h_{ch}^{heat}	h_{dch}^{heat}	حرارت
۱۰	۱۰	۷۰	۱۰	۴۰	۰/۹	۰/۹	
W_{ch}^{max}	W_{dch}^{max}	E_w^{max}	E_w^{min}	E_w^0	h_{ch}^w	h_{dch}^w	آب
۱۱	۱۱	۱۲۰	۱۰	۱۰۰	۱	۱	

جدول ۲: اطلاعات برنامه پاسخگویی به بار

برق		حرارت	
α_{down}	α_{up}	α_{down}	α_{up}
۰/۱	۰/۱	۰/۰/۵	۰/۰/۵



شکل ۷: پروفیل بارهای متصل به هاب انرژی

است. روابط ریاضی مربوط به تابع هدف بصورت زیر است. رابطه (۴۱) نشان دهنده مجموع هزینه‌های بهره‌برداری است و رابطه (۴۲) و (۴۳) بیانگر هزینه‌های خرید حامل‌های انرژی از شبکه بوده و رابطه (۴۴) به هزینه‌های ناشی از انتشار کربن اشاره دارد.

$$OF = C_{gas} + C_{power} + C_{pollution} \quad (41)$$

$$C_{gas} = \sum_{t=1}^{24} \pi_{gas}^t G_{grid}^t \quad (42)$$

$$C_{power} = \sum_{t=1}^{24} \pi_{power}^t P_{grid}^t \quad (43)$$

$$C_{pollution} = \pi_{pollution} \sum_{t=1}^{24} \alpha_{gas} G_{grid}^t + \alpha_{power} P_{grid}^t \quad (44)$$

$$S.t \quad (1)-(6), (9)-(17), (29), (31)-(40)$$

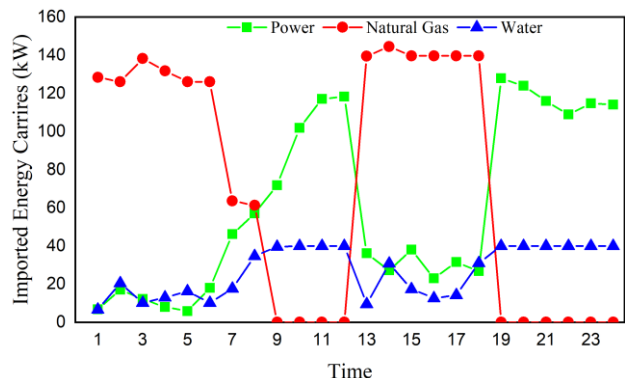
۳- نتایج عددی

به منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی و تاثیر آن بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی هوا، از یک سیستم آزمایشی به عنوان هاب انرژی، که در شکل ۲ نشان داده شده، استفاده می‌شود. سیستم آزمایشی نشان داده شده از تجهیزات مختلفی از جمله ذخیره‌سازهای انرژی، سیستم تولید همزمان برق و حرارت، سیستم برق به گاز و سایر مواردی که در شکل ۲ قابل مشاهده هستند، تشکیل شده است که هدف آن تامین نیاز مصرف‌کنندگان با کمترین هزینه و کمترین انتشار آلودگی در هوا است. لازم به ذکر است که این مدلسازی یک مدلسازی خطی است که با برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح (MIP) توسط حل‌کننده CPLEX در محیط نرم‌افزار GAMS اجرا شده است. همچنین روند مدلسازی در این مقاله در شکل ۵ نشان داده شده است.

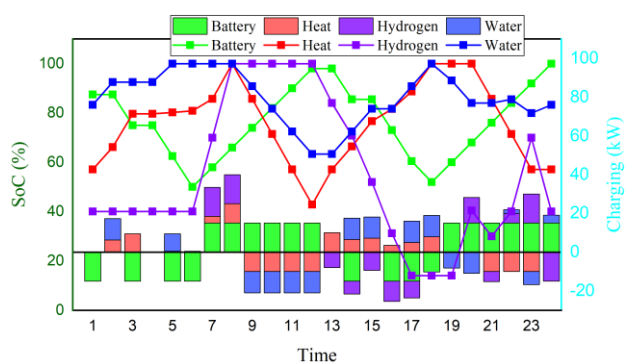
۳-۱- اطلاعات مسئله

در این بخش اطلاعات مربوط به مدلسازی هاب انرژی پیشنهادی ارائه می‌شود. شکل ۶ قیمت حامل‌های انرژی شامل گاز طبیعی و برق که با تعرفه زمان استفاده تعیین شده را نشان می‌دهد که در آن قیمت برق و گاز طبیعی هر دو بصورت دوسطحی قیمت‌گذاری شده‌اند. در شکل ۷ پروفیل بارهای برقی، حرارتی، آبی و هیدروژنی نشان داده شده است، البته لازم به ذکر است که برای راحت‌تر شدن محاسبات و مقایسه‌ها همه حامل‌های انرژی با واحد کیلووات (kW) در نظر گرفته شده‌اند. همچنین شکل ۸ توان تولیدی توسط توربین بادی را در سناریوهای مختلف به نمایش می‌گذارد. جدول ۱ نیز اطلاعات مربوط به ذخیره‌سازهای برق، آب، حرارت و هیدروژن را ارائه می‌دهد و جدول ۲ درصد مجاز انتقال بار توسط برنامه پاسخگویی به بار را نشان می‌دهد. در نهایت جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب اطلاعات سیستم تولید همزمان

کم است، مقدار آبی که به هاب انرژی وارد می‌شود نیز کاهش می‌یابد. البته همانطور که گفته شد، هاب انرژی نمی‌تواند بیش از ۴۰ کیلووات آب در ورودی خود دریافت کند.

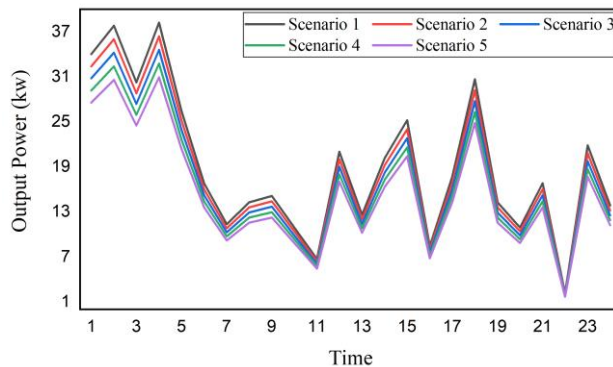


شکل ۹: مقدار ورودی هاب انرژی



شکل ۱۰: وضعیت ذخیره‌سازهای انرژی

شکل ۱۰ نیز وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای انرژی را نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است، از ساعت ۱ تا ۶ و ساعت ۱۳ تا ۱۸ که قیمت برق زیاد است باتری دشارژ می‌شود تا نیاز مصرف کنندگان را تامین کند و در بقیه ساعات که قیمت برق کم است، باتری شارژ می‌شود. بطور مشابه ذخیره‌ساز حرارت نیز در ساعاتی که قیمت گاز طبیعی زیاد است دشارژ می‌شود، مثلاً از ساعت ۱ تا ۸ که قیمت گاز طبیعی کم است، ذخیره‌ساز دشارژ شده و از ساعت ۹ تا ۱۲ با کاهش قیمت گاز طبیعی، ذخیره‌ساز شروع به شارژ شدن کرده است. همچنین به دلیل محدودیت در ورود آب به هاب انرژی ذخیره‌سازهای آب آشامیدنی و هیدروژن، این ذخیره‌سازها در زمان افزایش نیاز دشارژ می‌شوند. مثلاً از ساعت ۱۳ تا ۱۸ که بار هیدروژنی افزایش قابل توجهی دارد، ذخیره‌ساز هیدروژن دشارژ می‌شود تا پاسخگوی نیاز مصرف‌کننده باشد. از طرف دیگر هیدروژن به برق نیز وابسته است زیرا هیدروژن از تجزیه مولکول‌های آب توسط الکترولایزر بدست می‌آید، از ساعت ۱۹ به بعد که قیمت برق کم است ذخیره‌ساز شروع به شارژ شدن می‌کند. به طور مشابه، در ذخیره‌ساز آب در ساعاتی که بار افزایش می‌یابد، ذخیره‌ساز دشارژ می‌شود، مثلاً از



شکل ۸: میزان تولید توان توسط توربین بادی

جدول ۳: اطلاعات سیستم تولید همزمان برق و حرارت

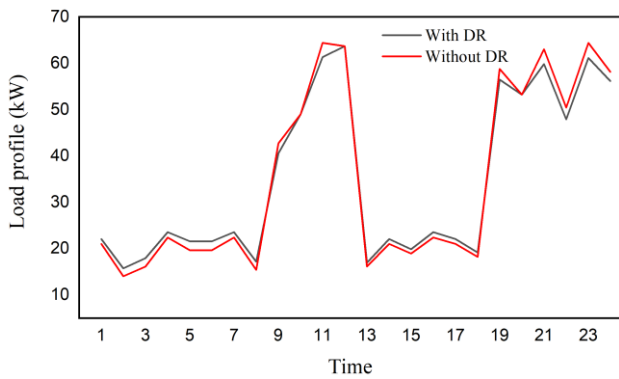
k	Hb_k	n_k	j	Eb_j	m_j
۰	۰	-	۰	۵	-
۱	۶	۰.۶۰۶	۱	۱۱	۱.۸۳۴
۲	۱۲	۱.۴۵۸	۲	۱۷	۲.۷۲۲
۳	۱۸	۲.۳۱	۳	۲۳	۳.۶۱
۴	۲۴	۳.۱۶۲	۴	۲۹	۴.۴۹۸
۵	۳۰	۴.۰۱۴	۵	۳۵	۵.۳۸۶

جدول ۴: اطلاعات مربوط به ناحیه عملکرد سیستم همزمان برق و حرارت

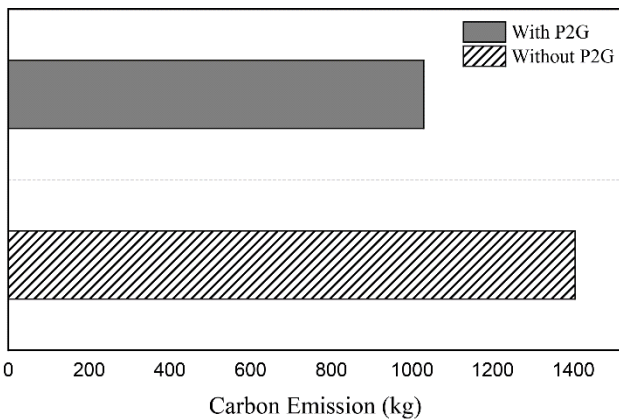
P_A	P_B	P_C	P_D	H_A	H_B	H_C	H_D
۳۵	۳۰	۵	۱۰	۰	۳۰	۲۲	۰

۲-۳- نتایج شبیه‌سازی

پس از مدل‌سازی ریاضی طرح پیشنهادی و همچنین ارائه اطلاعات شبیه‌سازی، در این قسمت به تحلیل و بررسی نتایج بدست آمده پرداخته می‌شود. شکل ۹ مقدار حامل‌های انرژی ورودی به هاب انرژی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در ساعاتی که قیمت یکی از حامل‌های انرژی زیاد است، مقدار ورودی آن حامل انرژی کاهش می‌یابد و زمانی که قیمت حامل انرژی کم است، مقدار ورودی آن نیز افزایش می‌یابد. مثلاً در ساعات ۱ تا ۸ و ۱۳ تا ۱۸ که قیمت گاز طبیعی کم است، میزان خرید آن توسط هاب انرژی افزایش یافته است و در مابقی ساعات که قیمت گاز طبیعی زیاد است، میزان خرید به صفر رسیده است. همچنین در ساعات ۱ تا ۶ و ۱۳ تا ۱۸ که قیمت برق زیاد است مقدار خرید آن توسط هاب انرژی کاهش یافته و در ساعات ۷ تا ۱۲ و ۱۹ تا ۲۴ که با کاهش قیمت برق همراه است، میزان خرید افزایش یافته است. مقدار آب ورودی نیز به میزان برق خریداری شده بستگی دارد چراکه آب به هنگام ورودی به هاب انرژی یا به الکترولایزر برای تجزیه و یا به تصفیه آب برای تولید آب آشامیدنی می‌رود و هر دو مورد مستلزم استفاده از برق است. به همین دلیل زمانی که ورودی برق به هاب انرژی



شکل ۱۳: برنامه پاسخگویی به بار برای بارهای حرارتی

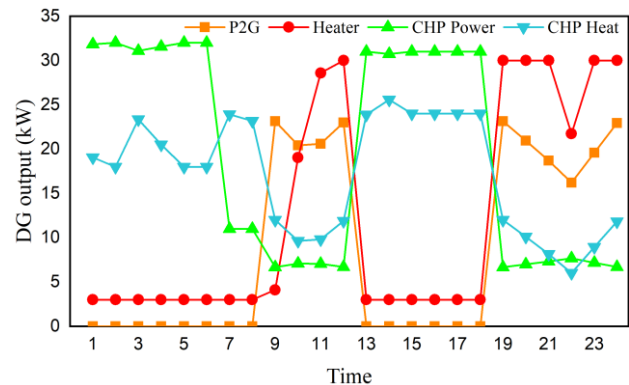


شکل ۱۴: مقدار آلودگی تولید شده با و بدون واحد برق به گاز

شکل ۱۲ و ۱۳ نیز به ترتیب پروفیل بارهای برقی و حرارتی را به هنگام به کارگیری برنامه پاسخگویی به بار نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است، بخشی از بارهای برقی از ساعت‌هایی که قیمت برق زیاد است به ساعت‌هایی که قیمت برق کم است منتقل شده‌اند. این انتقال بار از ساعات ۱ تا ۶ و ۱۳ تا ۱۸ به ساعات ۷ تا ۱۲ و ۱۹ تا ۲۴ منتقل شده است. بطور مشابه در شکل ۱۳ که مربوط به پروفیل بارهای حرارتی است می‌توان دید که بارها از زمان‌هایی که قیمت گاز طبیعی زیاد است به زمان‌هایی که قیمت آن کم است منتقل شده‌اند. این انتقال باز نیز از ساعات ۹ تا ۱۲ و ۱۹ تا ۲۴ به ساعات ۱ تا ۸ و ۱۳ تا ۱۸ بوده است.

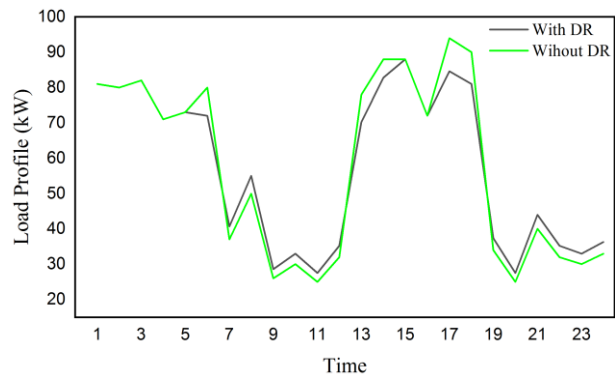
در نهایت، شکل ۱۴ بیان می‌کند که مدل پیشنهادی با بکارگیری واحد برق به گاز توانسته است بطور قابل توجهی از آلودگی هوا کم کند. همانطور که گفته شد، واحد برق به گاز می‌تولند با بهره‌گیری از کربن دی اکسید آزاد شده که منشأ اصلی آلودگی است، آن را به یک ماده پرمصرف صرف به نام متان تبدیل کند و هم از آلودگی هوا بکاهد. همچنین جدول ۵ هزینه بهره‌برداری در مدل پیشنهادی و بهره‌برداری به صورت جداگانه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، هزینه‌های

ساعت ۸ تا ۱۲ که بار افزایش یافته است، ذخیره‌ساز دشارژ شده است و از ساعت ۱۴ تا ۱۸ که مقدار بار کم شده، ذخیره‌ساز شارژ می‌شود تا در زمان نیاز دوباره آب مورد نیاز را در اختیار مصرف‌کنندگان قرار دهد.



شکل ۱۱: خروجی منابع تولید پراکنده

شکل ۱۱ میزان تولید منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، متان تولید شده توسط فناوری برق به گاز در ساعاتی که قیمت گاز طبیعی زیاد است، یعنی ساعات ۹ تا ۱۲ و ۱۹ تا ۲۴، در اختیار مصرف‌کنندگان گاز طبیعی قرار می‌گیرد تا وابستگی هاب انرژی به خرید گاز طبیعی از شبکه در این زمان‌ها کاهش پیدا کند. همچنین خروجی گرمکن برقی زمانی که قیمت برق کمتر از قیمت گاز طبیعی است برای کاهش هزینه‌های خرید حامل‌های انرژی، افزایش می‌یابد. در این شکل خروجی واحد تولید همزمان برق و حرارت نیز قابل مشاهده است که مطابق با آن، با توجه به اینکه ورودی این واحد گاز طبیعی است، زمانی که قیمت گاز طبیعی کم است میزان تولیدات این کاهش می‌یابد و زمانی که قیمت گاز طبیعی زیاد است، واحد تولید همزمان برق و حرارت تولید خود را افزایش می‌دهد تا انرژی در ذخیره‌ساز حرارت و باتری ذخیره شود و در صورت لزوم در اختیار مصرف‌کنندگان قرار گیرد.



شکل ۱۲: برنامه پاسخگویی به بار برای بارهای برقی

بهره‌برداری در مدل پیه شنهادهی ؛ صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

جدول ۵: هزینه بهره‌برداری هاب انرژی

مدل پیشنهادی	جداگانه
۲۴۸۸۵/۵۲	۳۲۴۷۳

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های یکپارچه انرژی در حضور منابع و تجهیزات و فناوری‌های مختلف به منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی هوا در حضور برنامه پاسخگویی به بار ارائه شد. در این مدل سازی یک هاب انرژی، سه حامل انرژی مخلف شامل برق، آب و گاز طبیعی را در ورودی خود دریافت می‌کرد. ساختمان این هاب انرژی از تجهیزاتی از جمله، ذخیره‌سازهای انرژی، گرمکن برقی، واحد تولید همزمان برق و حرارت و واحد برق به گاز تشکیل شده بود که هر کدام از این تجهیزات و فناوری‌ها نقش تاثیرگذاری در مدیریت حامل‌های انرژی وارد شده به هاب انرژی ایفا کردند تا هاب انرژی بتواند مصرف کنندگان خود را که شامل مصرف کنندگان برق، حرارت، آب آشامیدنی و هیدروژن بودند را تغذیه کند. همچنین به دلیل خطی بودن این مدل سازی، معادله مربوط به تابع سوخت واحد تولید همزمان برق و حرارت که یک معادله غیرخطی است، خطی سازی شد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی نشان دادند که مدل پیه شنهادهی یک مدل کارآمد در مدیریت و بهره‌برداری بهینه از حامل‌های مختلف انرژی است. مطابق با این نتایج می‌توان مشاهده کرد که ذخیره‌سازها با ذخیره انرژی در ساعت‌های کم باری و تحویل انرژی ذخیره شده خود در ساعت‌های پر باری و همچنین برنامه پاسخگویی به بار با انتقال بخشی از بار مصرفی از ساعت‌های پر باری به ساعت‌های کم باری، نقش مهمی در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری ایفا کردند. از طرف دیگر، تجهیزاتی مانند گرمکن برقی و واحد تولید همزمان برق و حرارت و واحد برق به گاز با تبدیل حامل‌های انرژی به صورت‌های مختلف انرژی توانستند هم باعث کاهش ۲۲ درصدی هزینه‌های بهره‌برداری شده و هم به طور قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش انتشار آلودگی در هوا بشوند بطوریکه با حضور واحد برق به گاز میزان انتشار آلودگی در هوا به میزان ۲۶ درصد کاهش پیدا کند.

فهرست علائم و اختصارات

اندیس‌ها

t	اندیس زمان
c	اندیس بارهای قابل کنترل
ch	اندیس شارژ باتری
dch	اندیس دشارژ باتری

اندیس هیدروژن	hyd
اندیس باتری	bat
اندیس آلودگی	pol
اندیس تصفیه آب	$puri$
اندیس بار	$load$
اندیس سیستم تولید همزمان برق و حرارت	CHP
اندیس وضعیت شارژ باتری	SOC
اندیس واحد برق به گاز	$P2G$
اندیس توربین بادی	WT

پارامترها

هزینه کمترین توان تولیدی توسط واحد تولید همزمان برق و حرارت	A_0
انرژی اولیه ذخیره شده در ذخیره‌ساز	E^0
انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز در ساعت ۲۴	E^{24}
کمترین انرژی قابل ذخیره در ذخیره‌ساز	E^{min}
بیشترین انرژی قابل ذخیره در ذخیره‌ساز	E^{max}
بیشترین توان شارژ ذخیره‌ساز هیدروژن	H_{ch}^{max}
بیشترین توان دشارژ ذخیره‌ساز هیدروژن	H_{dch}^{max}
بارهای هیدروژنی	H_{load}^t
شیب خطوط در خطی سازی واحد تولید همزمان برق و حرارت	m_j, n_k
بیشترین توان شارژ باتری	P_{ch}^{max}
بیشترین توان دشارژ باتری	P_{dch}^{max}
کمترین توان تولیدی توسط واحد تولید همزمان برق و حرارت	P_{CHP}^{min}
بیشترین توان تولیدی توسط واحد تولید همزمان برق و حرارت	P_{CHP}^{max}
توان نامی تولیدی توسط توربین بادی	P_n
بیشترین توان شارژ ذخیره‌ساز حرارت	T_{ch}^{max}
بیشترین توان دشارژ ذخیره‌ساز حرارت	T_{dch}^{max}
کمترین توان تولیدی توسط واحد تولید همزمان برق و حرارت	T_{CHP}^{min}
بیشترین توان تولیدی توسط واحد تولید همزمان برق و حرارت	T_{CHP}^{max}
بارهای حرارتی	T_{load}^t
سرعت وصل	v_{in}
سرعت قطع	v_{out}
سرعت در توان نامی	v_n
بیشترین توان شارژ ذخیره‌ساز آب	W_{ch}^{max}
بیشترین توان دشارژ ذخیره‌ساز آب	W_{dch}^{max}
آب تصفیه شده مورد نیاز	W_{pur}^t

توان تولیدی توسط توربین بادی	P_{WT}^t	درصد بار کم شده در برنامه پاسخگویی به بار	α_{down}
توان مصرف شده در گرمکن برقی	P_{heater}^t	درصد بار اضافه شده در برنامه پاسخگویی به بار	α_{up}
توان شارژ ذخیره‌ساز حرارت	T_{ch}^t	ضریب تبدیل مقدار آب تجزیه شده به هیدروژن	α_{elect}
توان دشارژ ذخیره‌ساز حرارت	T_{dch}^t	ضریب تبدیل مقدار هیدروژن به گاز در واحد برق به گاز	α_{P2G}
حرارت کم شده از ساعت‌های پرباری	T_{down}^t	ضریب انتشار کربن واحدهای تولید گاز	α_{gas}
توان اضافه شده به ساعت‌های کم باری	T_{up}^t	ضریب انتشار کربن نیروگاه‌های شبکه	α_{power}
حرارت تولید شده در واحد برق به گاز	T_{P2G}^t	ضریب تبدیل مقدار آب تجزیه شده به برق مصرفی	β_{elect}
حرارت تولید شده در گرمکن برقی	T_{heater}^t	ضریب تبدیل مقدار هیدروژن مصرف شده به آب تولید شده	β_{P2G}
توان شارژ ذخیره‌ساز آب	W_{ch}^t	ضریب تبدیل مقدار گاز تولید شده به گرمای تولید شده	γ_{P2G}
توان دشارژ ذخیره‌ساز آب	W_{dch}^t	بازده شارژ ذخیره‌ساز	η_{ch}
مقدار آب ورودی به الکترولیز	W_{elect}^t	بازده دشارژ ذخیره‌ساز	η_{dch}
آب تولید شده در واحد برق به گاز	W_{P2G}^t	بازده گرمکن برقی	η_{heater}
آب ورودی به هاب انرژی	W_{sea}^t	ضریب تبدیل مقدار آب تصفیه شده به برق م صرف شده	η_{pur}
مقدار آب تصفیه شده	W_{pur}^t		
تابع‌ها			
تابع هدف	OF		
هزینه خرید گاز طبیعی	C_{gas}	قیمت خرید گاز از شبکه	π_{gas}^t
هزینه خرید برق	C_{power}	قیمت خرید برق از شبکه	π_{power}^t
هزینه آلودگی هوا	$C_{pollution}$	قیمت انتشار آلودگی در هوا	$\pi_{pollution}$

متغیرها

انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز	E^t
توان هر خط در خطی سازی واحد تولید همزمان برق و حرارت	e'_j, h'_k
مقدار گاز م صرفی تو سط واحد تولید همزمان برق و حرارت	G_{CHP}^t
گاز طبیعی تولید شده در واحد برق به گاز	G_{P2G}^t
گاز خریداری شده از شبکه	G_{grid}^t
توان شارژ ذخیره‌ساز هیدروژن	H_{ch}^t
توان دشارژ ذخیره‌ساز هیدروژن	H_{dch}^t
هیدروژن تولید شده از تجزیه آب	H_2^t
هیدروژن مورد استفاده برای تولید گاز طبیعی	H_{P2G}^t
مقادیر باینری برای جلوگیری از شارژ/د شارژ همزمان ذخیره‌ساز	l'_{ch}, l'_{dch}
توان شارژ باتری	P_{ch}^t
توان دشارژ باتری	P_{dch}^t
توان عملکرد بارهای قابل کنترل	P_{CHP}^t
توان کم شده از ساعت‌های پرباری	P_{down}^t
توان اضافه شده به ساعت‌های کم باری	P_{up}^t
توان مصرف شده برای تجزیه آب	P_{P2G}^t
توان خریداری شده از شبکه	P_{grid}^t

مراجع

- Alipour, M., Zare, K., & Abapour, M. (2017). MINLP probabilistic scheduling model for demand response programs integrated energy hubs. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(1), 79-88.
- Amiri, S., & Honarvar, M. (2018). Providing an integrated Model for Planning and Scheduling Energy Hubs and preventive maintenance. *Energy*, 163, 1093-1114.
- Eveloy, V., & Gebreegziabher, T. (2018). A review of projected power-to-gas deployment scenarios. *Energies*, 11(7), 1824.
- Gazijahani, F. S., Ravadanegh, S. N., & Salehi, J. (2018). Stochastic multi-objective model for optimal energy exchange optimization of networked microgrids with presence of renewable generation under risk-based strategies. *ISA transactions*, 73, 100-111.
- Gazijahani, F. S., & Salehi, J. (2017). Robust design of microgrids with reconfigurable topology under

- Lewandowska-Bernat, A., & Desideri, U. (2018). Opportunities of power-to-gas technology in different energy systems architectures. *Applied Energy*, 228, 57-67.
- 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, 126-142.
- Ma, L., Liu, N., Zhang, J., & Wang, L. (2018). Real-time rolling horizon energy management for the energy-hub-coordinated prosumer community from a cooperative perspective. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(2), 1227-1242.
- Mohammadi, M., Noorollahi, Y., Mohammadi-Ivatloo, B., & Yousefi, H. (2017). Energy hub: from a model to a concept—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1512-1527.
- 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.
- Pazouki, S., Haghifam, M.-R., & Moser, A. (2014). Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 61, 335-345.
- Qu, K., Yu, T., Huang, L., Yang, B., & Zhang, X. (2018). Decentralized optimal multi-energy flow of large-scale integrated energy systems in a carbon trading market. *Energy*, 149, 779-791.
- Šumbera, J. (2012). Modelling generator constraints for the self-scheduling problem. *Vedecký seminár doktorandu FIS—únor*.
- Wang, X., Liu, Y., Liu, C., & Liu, J. (2020). Coordinating energy management for multiple energy hubs: From a transaction perspective. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 121, 106060.
- severe uncertainty. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(2), 559-569.
- Gazijahani, F. S., & Salehi, J. (2018). Integrated DR and reconfiguration scheduling for optimal operation of microgrids using Hong's point estimate method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 481-492.
- Geidl, M., Koeppel, G., Favre-Perrod, P., Klockl, B., Andersson, G., & Frohlich, K. (2006). Energy hubs for the future. *IEEE power and energy magazine*, 5(1), 24-30.
- Gu, C., Tang, C., Xiang, Y., & Xie, D. (2019). Power-to-gas management using robust optimisation in integrated energy systems. *Applied Energy*, 236, 681-689.
- Hou, W., Liu, Z., Ma, L., & Wang, L. (2020). A Real-Time Rolling Horizon Chance Constrained Optimization Model for Energy Hub Scheduling. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102417.
- Huang, W., Zhang, N., Yang, J., Wang, Y., & Kang, C. (2017). Optimal configuration planning of multi-energy systems considering distributed renewable energy. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(2), 1452-1464.
- Huo, D., Gu, C., Ma, K., Wei, W., Xiang, Y., & Le Blond, S. (2018). Chance-constrained optimization for multienergy hub systems in a smart city. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(2), 1402-1412.
- Jiang, Y., & Guo, L. (2019). Research on wind power accommodation for an electricity-heat-gas integrated microgrid system with power-to-gas. *IEEE Access*, 7, 87118-87126.
- 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, 260-272.
- Kienzle, F., Favre-Perrod, P., Arnold, M., & Andersson, G. (2008). Multi-energy delivery infrastructures for the future. 2008 First international conference on infrastructure systems and services: building networks for a brighter future (INFRA),

- Zhang, K., Zhou, B., Li, C., Voropai, N., Li, J., Huang, W., & Wang, T. (2021). Dynamic modeling and coordinated multi-energy management for a sustainable biogas-dominated energy hub. *Energy*, 220, 119640.
- Zhang, X., Chan, K., Wang, H., Hu, J., Zhou, B., Zhang, Y., & Qiu, J. (2019). Game-theoretic planning for integrated energy system with independent participants considering ancillary services of power-to-gas stations. *Energy*, 176, 249-264.
- Zhang, X., & Yu, T. (2019). Fast stackelberg equilibrium learning for real-time coordinated energy control of a multi-area integrated energy system. *Applied Thermal Engineering*, 153, 225-241.
- Wang, Y., Wang, X., Yu, H., Huang, Y., Dong, H., Qi, C., & Baptiste, N. (2019). Optimal design of integrated energy system considering economics, autonomy and carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 225, 563-578.
- Wang, Y., Zhang, N., Kang, C., Kirschen, D. S., Yang, J., & Xia, Q. (2017). Standardized matrix modeling of multiple energy systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(1), 257-270.
- Weng, Y.-T., & Hsu, Y.-Y. (2016). Reactive power control strategy for a wind farm with DFIG. *Renewable energy*, 94, 383-390.
- Xu, Z., Guan, X., Jia, Q.-S., Wu, J., Wang, D., & Chen, S. (2012). Performance analysis and comparison on energy storage devices for smart building energy management. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 2136-2147.

زیر نویس

³Weibull

¹Wobbe index

²Cartesian