Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 68-80

Vol. 11/ No. 2/ Summer 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

Network load management by optimal designing of an energy hub in the presence of wind and photovoltaic energies and responsible loads: The application of an intelligent algorithm

Abolfazl Mandegari Bamakan[1], Ph.D. Student, Farivar Fazelpour [1], Associated Professor, Gevork B. Gharehpetian [2] Professor,

1- Department of Energy Systems Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Email: mandegari54@yahoo.com (Corresponding author)
Email: F_Fazelpour@azad.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
Email: grptian@aut.ac.ir

Abstract:

Multi-carrier energy systems have systematic flexibility for energy and load management. The integration of different types of energy under the concept of energy hub in multiple energy infrastructures such as electricity, natural gas, and heat in an integrated way results in the supply of load demand at a lower cost. The energy hub creates a great opportunity for energy system operators to achieve a system with higher efficiency and better performance. Hub energy, which is known as the unit of generation, conversion, storage, and consumption of different energy carriers, is considered a hopeful solution to integrated management of multi-carrier energy systems. On the other hand, the tendency to use distributed generation systems has increased due to many economical and technical benefits, as well as the technical development of generation systems along with the alleviation of environmental pollution. The profitability of energy hubs in the presence of various uncertainties, which are intensified by the presence of different types of energy carriers, is one of the issues in this field. The optimal performance of a power system depends on the optimal performance of each energy hub component. One of the most important components is combined heat and power (CHP) generation. CHP is a small power generation unit that can supply power and heat for industrial, commercial, residential, and military applications. CHP units reduce power loss and increase service reliability in distribution networks. This paper deals with modeling the optimal operation of an energy hub with a novel load response planning in an industrial complex based on collected field data, including electrical loads and heating and cooling demands, considering electricity market prices and renewable energies such as wind and photovoltaic, as well as intelligent algorithms for responsive loads. According to the simulation results, comparing the total cost of energy in the presence and absence of responsive loads, the presence of a responsive load next to the energy hub significantly reduces the annual economic cost. This also implies that more attention should be paid to the optimization of small industrial energy units as hub energy and using CHP equipment by considering load response capability.

Keywords: Responsible load, energy hub, intelligent algorithm, load management, renewable energies

Submit date: 2021/11/02
Accepted date: 2022/01/17

Corresponding author Name: Farivar Fazelpour
Corresponding author address: Department of Energy Systems Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Email: mandegari54@yahoo.com

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۸۰-۶۸

Vol. 11 / No. 2/ Summer 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

مدیریت بار شبکه با طراحی بهینه یک هاب انرژی در حضور انرژی باد و فتوولتائیک و بارهای پاسخگو با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند

نوع مطالعه: پژوهشی

ابوالفضل ماندگاری بامکان [۱]، فریور فاضلپور [۱]، گئورگ قره پتیان [۲]

۱- دانشکده مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهرن جنوب، تهران، ایران
mandegari54@yahoo.com

F_Fazelpour@azad.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
grptian@aut.ac.ir

چکیده: سیستم‌های انرژی چند حاملی دارای انعطاف‌پذیری سیستماتیک برای مدیریت انرژی و بار می‌باشد. ادغام انواع مختلف انرژی تحت عنوان هاب انرژی در زیرساخت‌های چندگانه انرژی از جمله برق، گاز طبیعی و حرارت به‌صورت یکپارچه موجب تأمین دیماند با هزینه پایین‌تر می‌شود. هاب انرژی فرصت بزرگی را برای بهره‌برداران سیستم‌های انرژی برای رسیدن به سیستمی با بازده بالاتر و عملکرد بهتر به وجود می‌آورد. هاب انرژی که طبق تعریف به عنوان محلی که در آن تولید، تبدیل، ذخیره سازی و مصرف حاملهای مختلف انرژی اتفاق میافتد، شناخته میشود به عنوان راهکاری امیدوارکننده به منظور مدیریت یکپارچه سیستمهای انرژی چندگانه مورد توجه می باشد. از طرف دیگر تمایل به سیستم‌های تولید پراکنده، بدلیل مزایای اقتصادی و فنی فراوان انها و همچنین توسعه فنی سیستم‌های تولیدی بهمراه کاهش الودگی محیط زیست، افزایش پیدا کرده است. سودآوری هاب‌های انرژی در حضور عدم قطعیت‌های مختلفی که با حضور انواع حامل‌های انرژی شدت بیشتری نیز می‌یابد از مسائل مورد توجه در این حوزه است. عملکرد کلی سیستم قدرت بستگی به عملکرد بهینه هرکدام از اجزای هاب انرژی دارد. یکی از مهم‌ترین این اجزاء، تولید هم‌زمان برق و گرما (CHP) است. CHP یک سیستم تولید برق کوچک و جامع است که می‌تواند برق و حرارت را برای کاربردهای صنعتی، تجاری، خانگی، نظامی و ... فراهم نماید. سیستم هایCHP تلفات توان را کاهش و قابلیت اطمینان خدمات را در سیستم‌های توزیع افزایش می دهند. این مقاله به مدلسازی چگونگی بهره‌برداری بهینه از یک هاب انرژی با یک مدل جدید برنامه ریزی پاسخگویی بار در یک مجتمع صنعتی بر اساس داده‌های میدانی جمع‌آوری‌شده پرداخته و یک هاب انرژی شامل بارهای الکتریکی، گرمایش و سرمایش با در نظر گرفتن قیمت‌های بازار برق و منابع تجدیدپذیر بادی و فتوولتائیک و بارهای پاسخگو با الگوریتم هوشمند بهینه‌سازی شده است و به مقایسه هزینه کل انرژی در حضور و عدم حضور بارهای الکتریکی پاسخگو پرداخته است. طبق نتایج شبیه‌سازی، حضور بار پاسخگو در کنار هاب انرژی، باعث کاهش قابل توجه هزینه اقتصادی سالیانه می‌گردد. و لزوم توجه بیشتر به بهینه سازی انرژی صنایع کوچک و متوسط در قالب هاب انرژی و استفاده از تجهیزات CHP و توجه به قابلیت بارپاسخگو آشکار می گردد

کلمات کلیدی: بار پاسخگو- هاب انرژی- الگوریتم هوشمند- مدیریت بار- انرژی‌های تجدیدپذیر

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷

نام نویسنده‌ی مسئول: فریور فاضلپور

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران- دانشگاه آزاد اسلامی- واحد تهران جنوب- دانشکده مهندسی سیستم‌های انرژی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

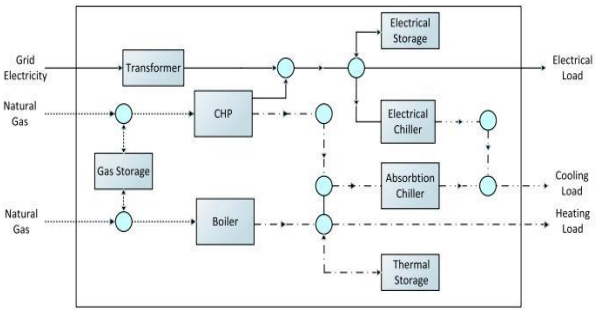
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]

۱- مقدمه

مفهوم هاب انرژی در سال ۲۰۰۵ توسط تیم تحقیقاتی دانشگاه زوریخ در قالب پروژه VoFEN ارائه گردید (Froehlich, 2006). همچنین در سال ۲۰۰۷ گیدل و همکاران این مفهوم را توسعه دادند (Geidl, 2007). او در این مقاله از هاب انرژی به‌عنوان سیستم‌های انرژی نسل آینده نام برده است. در هاب انرژی تجمیع زیرساخت‌های انرژی مانند برق، گاز، آب گرم و سرد صورت می‌گیرد. بعد از ارائه این مفاهیم مطالعات زیادی بر روی این موضوع صورت گرفت و از سال ۲۰۱۳ حجم این مطالعات به‌شدت افزایش یافت. به‌عنوان مثال در سال ۲۰۱۵ یک تحقیق جامع در خصوص برنامه‌ریزی توسعه هاب انرژی انجام گرفت (Zhang, Shahidehpour, Alabdulwahab, & Abusorrah, 2015). گیدل و اندرسون یک مدل غیرخطی برای پخش بار بهینه در سیستم‌های انرژی چند حامله بر اساس مفهوم هاب انرژی ارائه دادند. آن‌ها یک چارچوب بهینه‌سازی برای مسئله پخش بار بهینه هاب انرژی با توجه به مفهوم هاب انرژی را توسعه دادند. و یک مدل OPF را برای زیرساخت‌های مختلف انرژی مانند برق، گاز و آب گرم را معرفی کردند. آن‌ها همچنین یک روش بهینه‌سازی ساختاری جهت یافتن ماتریس کوپلینگ هاب انرژی را بر اساس تقاضا و توابع هدف مشخص پیشنهاد دادند (Geidl, 2007).

مصرف‌کنندگان صنعتی، تجاری و مسکونی با شبکه‌های حامل انرژی مانند برق، گاز طبیعی، گرمایش یا سرمایش محله‌ای در ارتباط هستند. شبکه‌های گاز طبیعی دارای قابلیت ذخیره‌سازی انرژی به شیوه ساده و ارزان می‌باشند. از سوی دیگر سیستم برق دارای قابلیت انتقال انرژی از فواصل دور با تلفات نسبتاً کم می‌باشد؛ بنابراین مجتمع کردن این دو شبکه با یکدیگر و استفاده از محاسن هر یک باعث افزایش کارایی و قابلیت اطمینان سیستم و همچنین عملکرد بهینه خواهد شد. چنین قابلیت انعطافی در ساختار و بهره‌برداری نیازمند یک چارچوب جامع به‌منظور تشریح تأثیرات ترکیب حامل‌های انرژی گوناگون بر روی شاخص‌های اقتصادی و فنی مربوط به سیستم‌های انرژی می‌باشد. مرجع (Froehlich & Andersson, 2008) به بررسی یک هاب انرژی پرداخته است. شکل ۱ ساختار کامل یک هاب انرژی را نشان می‌دهد.

پس از مدل‌سازی مسئله، روابط تبدیل انرژی در گره‌های مختلف و تعادل انرژی در نقاط خروجی هاب را به دست آورده و بدین ترتیب ماتریس تبدیلی بین بردار حامل انرژی ورودی و بردار انرژی نهایی به دست آمده است. در (Geidl et al., 2007) یک روش مدل‌سازی برای به‌کارگیری سیستم‌های حامل‌های چندگانه انرژی در داخل ساختمان‌ها، بر اساس مفهوم هاب انرژی ارائه شده است و روش تکمیل شده آن در (Feng, Dai, Mo, & Shi, 2019) بررسی شده است.



شکل ۱: ساختار کامل یک هاب انرژی

در مرجع (Chen, Duan, Cai, Liu, & Hu, 2011) و تکمیل آن (Dinghuan, Rui, & Hug-Glanzmann, 2010) مسئله مشارکت واحدها در فضای چند حاملی انرژی مطرح شده است و یک استراتژی کنترلی دوسطحی برای برنامه روشن و خاموش شدن واحدها در ۲۴ ساعت آینده در فضای یک هاب ارائه شده است. امروزه با گسترش شبکه‌های گاز طبیعی و همچنین مزایایی معقول این حامل انرژی مانند انتشار کمتر آلودگی و قیمت پایین‌تر، تکنولوژی‌های CHP به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی پراکنده، از محبوبیت بی‌سابقه‌ای برخوردار شده‌اند و یکی از فاکتورهای تأثیرگذار در رابطه با انتخاب یک سیستم CHP مجموع هزینه‌های آن است که به میزان بسیار زیادی به سایز آن بستگی دارد و از این‌رو پیدا کردن سایز بهینه یک CHP از نظر اقتصادی بسیار مهم است. به‌طور کلی یک CHP بهینه می‌تواند به‌وسیلهٔ آنالیز دو فاکتور اصلی هزینه و سود، مورد ارزیابی قرار گیرد. هزینه تقریباً یک مؤلفه اصلی در ارزیابی تمام منابع تولید پراکنده است اما برای ارزیابی کامل کافی نیست. علاوه بر این افزایش قابلیت اطمینان (Geidl & Andersson, 2006) درآمد حاصل از کاهش هزینه توان، کاهش انتشار آلودگی و تلفات توان نیز از المان‌های کلیدی در تصمیم‌گیری انتخاب CHP نصب شود هستند. هزینه تولید برق و گرما از یک CHP می‌تواند در هزینه سرمایه‌گذاری ثابت، هزینه‌های تعمیر و بهره‌برداری و هزینه سوخت طبقه‌بندی شود (Mirzaei et al., 2020). از طرف دیگر مزایای جایابی بهینه CHP می‌تواند در کاهش تلفات و هزینه توان و به میزان بسیار زیادی در کاهش انرژی مورد انتظار تأمین نشده که یک اثر مطلوب در سیستم قدرت است، طبقه‌بندی شود. CHP می‌تواند به‌صورت مستقیم توانش را به فیدرهای توزیع تزریق کند و به‌وسیلهٔ کاهش تلفات انتقال برق مزیت کاهش تلفات توان کاملاً مشخص می‌شود (Fabrizio,

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

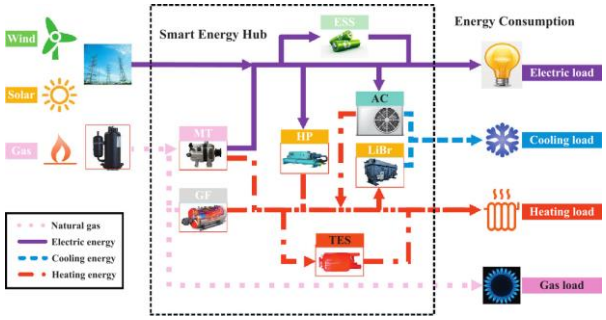
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]

(Corrado, & Filippi, 2010). علاوه بر این افزایش قابلیت اطمینان توجه بسیار زیادی را به خود جلب کرده است چرا که هزینه‌های تلفات ایجادشده به‌وسیلهٔ مصرف‌کنندگان شبکه برق در نتیجه قطع برق را کاهش می‌دهد (Roustai, Rayati, Sheikhi, & Ranjbar, 2018). با توجه به مطالب ذکرشده می‌توان فهمید که در یک سیستم قدرت مقررات زدایی شده، هر شرکت توزیع تمایل دارد که هزینه و مزایایی برنامه‌ریزی منابع تولید را با روش‌ها و تصمیم‌های گوناگونی، تعیین کند. پیدا کردن یک ساختار و روش برنامه‌ریزی واحد که اهداف تمام شرکت‌ها را به‌طور هم‌زمان برآورده کند، سخت است. مسئله توزیع اقتصادی چندین سیستم هاب انرژی از طریق یادگیری انتخاب خودکار با الگوریتم جستجوی ضریب-گرانشی شتاب زمان متغیر در (Rayati, Sheikhi, & Ranjbar, 2015) مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم هاب انرژی به‌صورت بهینه با هدف به دست آوردن حداکثر سود، در (Ha, Zhang, Thang, & Huang, 2017) طراحی شده است. تأثیر شبکه‌های انتقال بهینه‌سازی روی عملکرد سیستم هاب انرژی در (Dolatabadi, Mohammadi-ivatloo, Abapour, & Tohidi, 2017) ارزیابی شده است. با استفاده از یک روش جدید، مسئله شار توان بهینهٔ سیستم‌های هاب انرژی در (Vahid-Pakdel, Nojavan, Mohammadi-ivatloo, & Zare, 2017) مورد بررسی قرار گرفته است. فرمول‌های جدیدی برای مدل‌سازی دقیق سیستم انرژی هاب با توجه به محدودیت‌های فنی در (Dababneh & Li, 2019) ارائه شده‌اند. با به کار بردن ساختار کنترلی به نام ساختار کنترل سلسله مراتبی، عملیات اقتصادی یک سیستم انرژی چندحاملی در (A. Sheikhi, Rayati, & Ranjbar, 2015; Soroudi & Keane, 2015; Xu, Kai, Jia, & Yu, 2015; Yang, Xiong, Qiu, Qiu, & Dong, 2016) ارزیابی شده است. عملکرد بهینهٔ سیستم انرژی چندحاملی و اندازه بندی بهینه منابع سیستم در (Zhang et al., 2015) بررسی شده‌اند. عملکرد اقتصادی سیستم انرژی چندحاملی به‌شرط رفتار غیرقطعی منابع تجدیدپذیر در (Moghaddam, Saniei, & Mashhour, 2016) مورد مطالعه قرار گرفته است. استفاده از الگوریتم تکاملی در (Aras Sheikhi, Rayati, & Ranjbar, 2016) برای بهینه‌سازی سیستم انرژی چند حامل بررسی شده است. بهینه‌سازی یک سیستم چند حامل انرژی روی شبکه با انواع مختلف منابع انرژی تجدیدپذیر در (Pazouki & Haghifam, 2016) ارزیابی شده است.

محتوای این مقاله در ۷ بخش سازمان‌دهی می‌شود. برای پیدا کردن نقطه کار بهینه، مفهوم هاب انرژی و مرور مختصری از مدل‌سازی هاب انرژی و فرایند تولید کاغذ در بخش ۲ ارائه می‌شود. بخش ۳ و ۴ فرمول‌بندی ریاضی مجزایی را در مورد مسئله ارائه می‌دهد و در بخش ۵ الگوریتم جستجوی گرگ خاکستری به‌عنوان یک راه حل برای یافتن پاسخ مسئله موضوع مورد مطالعه به‌صورت مجزا بیان شده است و در بخش ۶ مطالعه موردی و نتایج بهینه‌سازی بحث می‌شود. سرانجام نتیجه‌گیری در بخش ۷ استخراج می‌شود.

۲- مفهوم و مدل‌سازی هاب انرژی

یک هاب انرژی بیانگر یک واسط بین زیرساخت‌های گوناگون انرژی و بارها است. هاب‌های انرژی توان را در پورت‌های ورودی‌اش که به آن‌ها متصل می‌شود مصرف می‌کند، در هاب‌ها تجهیزاتی مانند (CHP)، ترانسفورماتور، تجهیزات الکترونیک قدرت، بویلرها، مبدل‌های حرارتی و... به اقتضای بار مورد نیاز قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال الکتریسیته و گاز طبیعی سرویس‌های انرژی مورد نیاز مانند برق، گرمایش، سرمایش و هوای فشرده را در پورت‌های خروجی‌شان مهیا می‌کنند. هاب‌های انرژی دارای دو المان اصلی هستند: اتصالات مستقیم و مبدل‌ها. اتصالات مستقیم برای تحویل یک توان ورودی به خروجی بدون تبدیل استفاده می‌شوند. المان مبدل برای تغییر حامل‌های انرژی به شکل‌ها یا کیفیت‌های دیگر استفاده می‌شود. شکل ۲ مثالی از هاب انرژی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: یک نمونه هاب انرژی با مصارف متعدد (Wang, Zhong, Ma, Xia, & Kang, 2017)

مطابق شکل فوق ممکن است اجزای داخل هاب اتصالات اضافی بین ورودی و خروجی ایجاد کنند. به‌عنوان مثال بار الکتریکی متصل شده به هاب می‌تواند به‌صورت مستقیم از شبکه برق یا بخش تولیدی یا تمام برق مورد نیاز از گاز طبیعی، ارضاء شود. این سیستم افزونه در تغذیه منتج به یک سود بسیار زیاد می‌شود که دستیابی به آن از طریق هاب امکان‌پذیر شده است. نیروگاه‌های مجزا یا ساختمان‌های صنعتی و مسکونی همچنین مناطق جغرافیایی محدود مانند یک شهر کامل می‌تواند به‌عنوان هاب‌های انرژی مدل شود. در این مقاله یک کارخانه صنعتی تولید کاغذ به‌عنوان هاب انرژی در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]

۳- مدل‌سازی ریاضی هاب انرژی تولید کاغذ

به‌طور خلاصه مطابق شکل برای تهیه کاغذ، خمیر چوب را با آب مخلوط می‌کنند تا خمیر صاف و یکدست شود و سپس آن را در داخل ماشین تصفیه‌کننده می‌ریزند. این عمل برای جدا کردن لیگنین و کاهش رنگ خمیر صورت می‌گیرد. در این ماشین الیاف‌ها به‌طور یکنواخت صاف و مرتب می‌شوند و آب خمیر گرفته می‌شود. در واقع از درهم رفتن الیاف سلولوزی و پرس آن‌ها، ورقه‌های کاغذ ایجاد می‌شود. در این ماشین، صفحات حاوی خمیرکاغذ بر اثر ارتعاش می‌لرزند و خمیر کاغذ را صاف و یکنواخت می‌کنند و در مرحله بعد خشک کردن کاغذ است که به‌وسیلهٔ دستگاهی با چند استوانه به نام خشک‌کن صورت می‌گیرد. در واقع خمیر حاوی آب از توری‌هایی با سوراخ‌های دو تا سه میلی‌متری عبور داده می‌شود تا بخش عمده آب خود را از دست بدهد و سپس آن را از پرس‌های قوی با بخار خشک داغ عبور می‌دهند تا باقیمانده آب آن نیز از بین رفته و کامل خشک شود. خمیر خشک‌شده را از میان غلتک‌های ویژه عبور می‌دهند تا به‌صورت صفحات کاغذ درآید. شکل ۳ فرایند تولید کاغذ را به تصویر می‌کشد. در نتیجه از دید مدیریت انرژی می‌توان فرایند تولید کاغذ را به‌صورت یک هاب دارای حداکثر سه بویلر با انرژی ورودی ترکیبی گازی و الکتریکی برحسب طراحی و غلظت شیمیایی مخلوط خمیر در مسیر در نظر گرفت که انرژی مورد نیاز خود را از گاز و برق به دست می‌آورند.

از طرفی صنایع کاغذسازی یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان منابع آب شیرین در تمام جهان می‌باشند که بخش عمدهٔ این مصارف مربوط به فرآیندهای آماده‌سازی خمیر و رنگ‌زدایی (سفید کردن) است. این حجم از مصرف آب منجر به تولید مقدار بسیار زیادی فاضلاب و لجن می‌گردد؛ اما تصفیه فاضلاب این بخش از صنعت همواره کار دشواری بوده است. الکتروکواگولاسیون یا انعقاد الکتریکی روشی کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای تصفیه بازه گسترده‌ای از فاضلاب‌های صنعتی و غیرصنعتی می‌باشد. قاعدهٔ اصلی مورد استفاده در این روش، اکسیداسیون صفحات فلزی یا همان آندها در زمان تماس با فاضلاب است. بدین ترتیب انرژی الکتریکی نقش مهمی در چرخه بازیافت فاضلاب با روش الکترولیزاسیون بر عهده دارد و در این تحقیق نیز چرخه کاهش پسماند و فاضلاب کاغذ با روش الکترولیزاسیون به‌عنوان یک بار الکتریکی در هاب انرژی گنجانده شده است.

مدل سیستم خط تولید کاغذ از دید هاب انرژی در شکل زیر فرمول‌بندی می‌شود که بر این اساس منابع الکتریکی تجدیدپذیر و شبکه الکتریکی و گاز طبیعی و آب تصفیه‌شده شهری به‌عنوان ورودی سیستم در نظر گرفته می‌شوند و بارهای خروجی شبکه شامل مصرف موتورهای الکتریکی در فرایند خط تولید (موتورهای نوار غلطان و موتورهای پرس و خشک‌کن) و سیستم بویلر و سیستم سرمایشی و سیستم خشک‌کننده و بار گرمایشی است.

درصورتی‌که بارهای خروجی هاب را با L و حامل‌های ورودی به هاب را با p نشان دهیم، می‌توان رابطه ورودی و خروجی هاب را با فرض خطی بودن مبدل‌ها به‌صورت رابطه زیر بیان کرد.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_\alpha \\ \vdots \\ L_\omega \end{bmatrix}}_{L} = \begin{bmatrix} C_{\alpha\alpha} & \dots & C_{\omega\alpha} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{\alpha\omega} & \dots & C_{\omega\omega} \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} P_\alpha \\ \vdots \\ P_\omega \end{bmatrix}}_{P} \quad (۱)$$

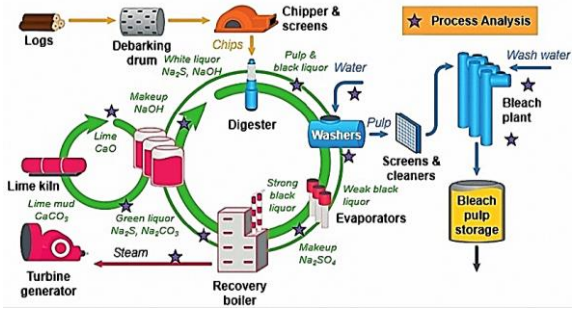
در رابطه بالا، Cij ها آرایه‌های ماتریس تزویج C می‌باشند که با توجه به خصوصیات عناصر موجود، ورودی‌ها و خروجی‌های هاب را به یکدیگر مرتبط می‌نمایند که در آن:

$$0 \le C_{\alpha\beta} \le 1 \quad (۲)$$

بطوریکه $\alpha, \beta \in \varepsilon = \{\text{حرارت، گاز طبیعی، الکتریسیته و ...}\}$

از نظر الکتریکی در هاب پیشنهادی، قدرت باد از طریق توربین باد و توان تابشی از طریق پنل خورشیدی و حامل‌های انرژی گاز و آب در ورودی هاب به‌منظور تأمین تقاضای فرایند تولید کاغذ دریافت می‌گردد و ساختار هاب خط تولید کاغذ به‌صورت شکل ۶ است.

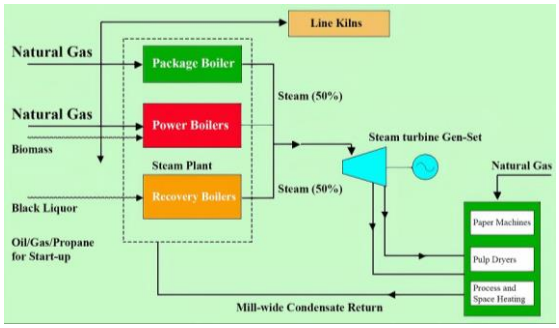
به‌طور کلی روش‌های پاسخگویی بار را می‌توان به دو دستهٔ کلی تقسیم‌بندی کرد برنامه‌های پاسخگویی بار مبتنی بر تشویق و برنامه‌های پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت برق که این برنامه از متداول‌ترین برنامه‌های تعرفه متغیر در زمان می‌باشد. این روش از طریق تغییر در قیمت برق در ساعات مختلف مشتریان را به بهبود الگوی مصرف برقشان (مصرف در ساعات غیر پیک و کاهش مصرف در ساعات پیک) تشویق می‌کند. در قسمت بعد مدل‌سازی منابع به‌صورت مختصر ارائه شده است.



شکل ۳: فرایند خط تولید کاغذ (Butler, 2020)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]



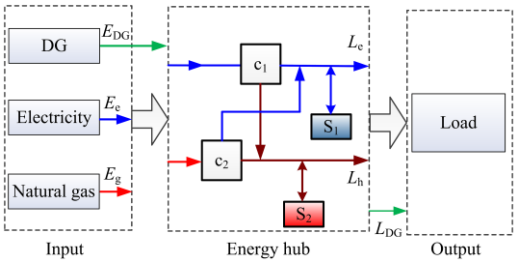
شکل ۴- شماتیک خط تولید کاغذ از دید منابع انرژی (Energy Solutions Center Inc., 2015)

۳-۱- هاب انرژی

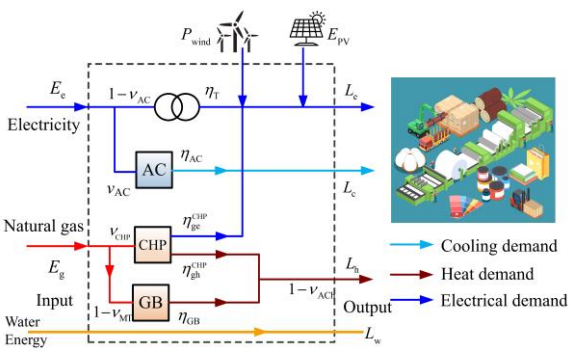
هاب موجود در شبکه مطابق شکل فوق شامل ترانسفورماتور، CHP، بویلر و دو منبع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی است. مدل ریاضی هاب به‌صورت رابطه (۳) ارائه می‌شود. در این رابطه ϑ ضریب پخش توان گاز طبیعی بین CHP و بویلر است. بدیهی است این ضریب عددی بین صفر و یک خواهد بود. در رابطهٔ (۳) EL_i^t و TL_i^t به ترتیب میزان بار الکتریکی و حرارتی- سرمایشی مورد نیاز مصرف‌کننده i اُم در ساعت t است. $\eta_{CHP,e}$، $\eta_{CHP,h}$، η_{BO} به ترتیب بازده الکتریکی و حرارتی CHP و بازده بویلر است. P_{ei}^t و P_{gi}^t به ترتیب توان الکتریکی و گاز طبیعی ورودی به هاب در ساعت t برحسب kw است.

$$\begin{bmatrix} E_i^t \\ TL_i^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{T\vartheta_i^t} \times \eta_{CHP,e} \\ (\vartheta_i^t \times \eta_{CHP,h} +)1 - \vartheta_i^t) \times \eta_{BO} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_{ei}^t \\ P_{gi}^t \end{bmatrix} \quad (۳)$$

۳-۲- مولد بادی



شکل ۵: مدل‌سازی ورودی و خروجی هاب انرژی (Ha et al., 2017)



شکل ۶: شماتیک الکتریکی هاب انرژی پیشنهادی خط تولید کاغذ

مبنای تبدیل انرژی در توربین‌های بادی بر اساس کاهش انرژی جنبشی باد بنا شده است. در واقع به همان میزان که انرژی جنبشی باد کاسته می‌شود، پره‌های توربین بادی انرژی را دریافت می‌کنند. با توجه به ساختار توربین‌های بادی و محدودیت‌های آن‌ها برای قطع در سرعت‌های خیلی کم و یا خیلی زیاد، می‌توان گفت اگر سرعت‌های قطع پایین و بالای یک توربین بادی v_{in} و v_{out} در نظر گرفته شوند و P_r توان نامی مزرعه بادی و P_t توان توربین باشد و v سرعت باد و v_r سرعت بحرانی آنگاه در یک مزرعه بادی توربین تحت تابع (۴) توان تولید می کند.

$$P_{wt}^t = \begin{cases} P_{wt,r} & v_r < v^t < v_{cout} \\ P_{wt,r} \dfrac{v^t - v_{cin}}{v_r - v_{cin}} & v_{cin} < v^t < v_r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۴)$$

۳-۳- مولد خورشیدی

توان خروجی پنل‌های فتوولتائیک بر اساس میزان تابش تابیده‌شده به سطح آن‌ها برای سطوح مختلف در این بازه زمانی بر اساس رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$P_{pv}^t = \eta_{pv} r^t S_{pv} \quad (۵)$$

۳-۴- مدل پاسخگویی بار

در مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی شبکه، امکان مشارکت انواع بار در برنامه پاسخگویی بار در نظر گرفته شده است. مدل پاسخگویی بار بر مبنای تشویق موجب می‌شود تا انگیزه کافی برای مشترکین برای شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار فراهم شود. این برنامه موجب ایجاد انگیزه برای مشترکین برای ارائه پیشنهاد کاهش بار در یک قیمتی که برای آن‌ها مطلوب است می‌شود.

۴- تابع هدف و قیدهای مسئله هاب انرژی

با توجه به تأثیرپذیری انتخاب روش‌های مختلف تولید ترکیبی برق و حرارت از شرایط محیطی، پیشنهاد می‌شود مطالعات میدانی هر پروژه اجرایی به‌صورت موردی انجام شود. لازم است در این مطالعات، سازوکارهای فروش یا استفاده حرارت نیز به‌دقت مورد بررسی قرار گیرد زیرا بازار مطمئن فروش حرارت تأثیر مهمی بر انتخاب جایگزین‌های موجود در تولید هم‌زمان دارد ولی آنچه بدیهی به نظر می‌رسد، استفاده از تولید ترکیبی برق و حرارت به‌منظور بالا بردن بازده بخش عرضه انرژی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]

است. برای انتخاب سیستم CHP موارد زیر باید کاملاً مشخص شود تا سیستم سودآور باشد.

- پروفایل بار الکتریکی و حرارتی مورد نیاز روزانه و سالانه که نشان‌دهنده حداکثر، حداقل و متوسط توان الکتریکی و حرارتی مورد نیاز باشد.
- امکان خرید و فروش توان الکتریکی و حرارتی همراه قیمت آن.
- قیمت سوخت و هزینه انتقال و نگهداری آن.
- در صورت نصب CHP از ابتدا بدون وجود هرگونه تجهیزات حرارتی، هزینه‌های مشترک با سیستم حرارتی جداگانه باید از محاسبات سرمایه‌گذاری حذف شود.

بیشتر مزایای تکنولوژی‌های CHP به علت بازده نسبتاً بالای این سیستم‌ها در مقایسه با دیگر روش‌ها است. به دلیل اینکه سیستم‌های CHP به‌طور هم‌زمان انرژی‌های حرارتی و الکتریکی تولید می‌کنند، بازدهی CHP به گونه‌های مختلفی اندازه‌گیری و بیان می‌گردد که در جدول ۱ اندازه‌گیری بازدهی سیستم‌های CHP آمده است. در جدول ۱ P توان خالص الکتریکی خروجی و Q توان خالص حرارتی خروجی و F انرژی سوخت ورودی در نظر گرفته می‌شود. در سیستم‌های CHP محاسبه بازده نهایی مستلزم در نظر گرفتن هم‌زمان سوخت مصرفی برای تولید هم‌زمان توان الکتریکی و حرارت بوده و برابر است با: خروجی خالص توان الکتریکی بعلاوه خروجی حرارت مفید حاصله تقسیم بر ارزش حرارتی سوخت مصرف‌شده. گرچه بازده نهایی CHP معیاری را برای به دست آوردن میزان سوخت مصرفی برای تولید الکتریسیته و حرارت ارائه می‌دهد، اما واقعیت این است که الکتریسیته و حرارت کیفیت‌های متفاوتی دارند. با توجه به اینکه الکتریسیته قابل انتقال به فواصل دور بوده و قابلیت تبدیل شدن به سایر فرم‌های انرژی را دارد، کیفیت و ارزش الکتریسیته تولیدی بیش از حرارت تولیدی خواهد. به‌منظور محاسبه این تفاوت‌ها سند سیاست‌گذاری تنظیم صنایع همگانی در سال ۱۹۷۸ نیمی از انرژی حرارتی را در فرمول بازده استاندارد FERC خود کاهش داد.

جدول ۱: فرمول میزان بازده در سیستم CHP

نوع سیستم تولید		میزان بازده
تولید جداگانه حرارت و نیروی الکتریکی	بازده حرارتی بویلر	$E_Q = \frac{Q}{F}$
	فقط تولید الکتریکی	$E_P = \frac{P}{F}$
	بازده کلی سیستم تولید جداگانه حرارت و نیرو	$E_T = \frac{P+Q}{P/E_P + Q/E_Q}$
تولید ترکیبی نیروی الکتریکی و حرارت CHP	بازده کلی سیستم CHP	$E_T = \frac{P+Q}{F}$
	بازده استاندارد FERC	$E_{FERC} = \frac{P+Q/2}{F}$
	بازده الکتریکی مؤثر (بازده مصرف سوخت FUE)	$FUE = \frac{P}{F - Q/E_{Thermal}}$
مقایسه دو سیستم	درصد صرفه‌جویی سوخت	$s = 1 - \frac{F}{P/E_P + Q/E_Q}$

مفهوم دیگری در بازده CHP عبارت بازده الکتریکی مؤثر است که با عنوان تأثیرگذاری مصرف سوخت نیز بیان می‌شود. این معیار، بازده CHP را توسط نسبت تولید خالص الکتریکی به مصرف خالص سوخت بیان می‌کند، به‌طوری‌که مصرف خالص سوخت، آن بخش از سوخت را که برای تولید حرارت مفید بکار می‌رود شامل نمی‌شود. سوختی که به‌منظور تولید حرارت مفید مصرف می‌شود با فرض بازده معمول بویلر به میزان ۸۰ درصد محاسبه می‌گردد.

در امور مالی میزان بازده عبارت است از نسبت پول به دست آمده در سرمایه‌گذاری به مقدار سرمایه اولیه. مقدار پول به دست آمده ممکن است مربوط به بهره، سود یا درآمد خالص باشد و شامل همه عناصر سودآوری (درآمد، هزینه و سرمایه‌گذاری) می‌باشد و معمولاً به‌صورت درصد بیان می‌شود. با این تفاسیر به‌صورت تجربی و بر اساس بررسی منابع متعدد متوسط راندمان یک مولد برق در حدود ۳۵٪ و متوسط راندمان یک بویلر ۸۰٪ است. درحالی‌که یک سیستم CHP با تولید هردوی این محصولات راندمانی به‌طور متوسط بیش از ۸۵٪ دارد؛ یعنی راندمان الکتریکی آن به‌طور متوسط حدود ۳۵٪ و راندمان حرارتی ۵۰٪ است. از طرف دیگر در مقایسه با سیستم‌های تولید برق و تولید حرارت متشابه رایج که به‌صورت مجزا هستند، حدود ۳۵٪ سوخت کمتری مصرف می‌کند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]

از آنجا که نرخ تورم، ارزش پول ملی، تغییر قیمت‌ها و عوامل دیگر اثرگذار در محاسبات یک سرمایه‌گذاری بسیار متغیر است لذا نحوه محاسبات مالی در این گزارش سود حاصل از کاهش هزینه انرژی موردمحاسبه قرار می‌گیرد تا با پتانسیل‌های دیگر سرمایه‌گذاری به لحاظ سودآوری مقایسه شود. تابع هدف پیشنهادی طبق رابطه (۹) با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از شبکه با زیرساخت چند حاملی انرژی بر اساس گره الکتریکی شکل ۴ و تعادل مجموعه روابط (۶) تا (۹) ارائه شده است.

$$L_e(t) = E_e(t)\big(1 - v_{AC}(t)\big)\eta_T + E_g(t)v_{CHP}(t)\eta_{ge}^{CHP} \quad (۶)$$

$$L_h(t) = \big|E_g(t)v_{CHP}(t)\eta_{ge}^{CHP} + (1 - v_{CHP}(t))\eta_{GB}\big| \quad (۷)$$

$$L_c(t) = E_c(t)v_{AC}(t)\eta_e^{AC} \quad (۸)$$

$$Minimize\ \ F = \sum_{t=1}^{T}\{P_{e,net}^t \times \pi_e^t + P_{g,grid}^t \times \pi_g^t\} \quad (۹)$$

در رابطه فوق $P_{e,net}^t$ و $P_{g,grid}^t$ به ترتیب توان برق و گاز طبیعی خریداری‌شده از شبکه بالادست در ساعت t برحسب kw است؛ π_e^t و π_g^t به ترتیب قیمت برق و گاز خریداری‌شده از شبکه برای ساعت t است و در ذیل قیود برنامه‌ریزی برای مدل پیشنهادی ارائه شده است.

۴-۱- قیود هاب

استفاده از سیستم‌های CHP نسبت به سیستم‌های تولید جداگانه حرارت و استفاده از برق شبکه دارای مزایای همچون افزایش راندمان، کاهش مصرف سوخت و قیمت انرژی مصرفی، در اختیار داشتن منبع تأمین انرژی با ضریب حفاظتی بالا، حذف تلفات انتقال و کاهش تلفات توزیع برق در قیاس با نیروگاه‌های بزرگ و متمرکز دارد. ضریب پخش گاز ورودی به هاب در واقع متغیر تقسیم گاز بین بویلر و CHP است که عددی بین صفر و یک است. محدودیت توان الکتریکی و حرارتی خروجی CHP و توان خروجی بویلر به‌صورت (۱۰) تا (۱۲) تعریف شده است:

$$P_{CHP,e,n}^{min} \le P_{CHP,e.n}^t \le P_{CHP,e,n}^{max} \quad (۱۰)$$

$$P_{CHP,h,n}^{min} \le P_{CHP,h.n}^t \le P_{CHP,h,n}^{max} \quad (۱۱)$$

$$P_{Bo}^{min} \le P_{Bo}^t + P_{Bo,r}^t \le P_{Bo}^{max} \quad (۱۲)$$

۴-۲- قیود پاسخگویی بار

برنامه‌های پاسخگویی بار دربرگیرنده روش‌هایی است که به تغییر میزان مصرف مشتریان در اثر تغییر قیمت برق در بازار اطلاق می‌شود. این‌گونه قیمت گزاری برق سبب ایجاد دو تغییر بلندمدت و کوتاه‌مدت در الگوی مصرف بار می‌شود. کاهش بار برنامه‌ریزی‌شده و رزرو کاهش برای هر قسمت باید کوچک‌تر یا مساوی با حداکثر میزان مجاز در هر بازه زمانی در فرایند تولیدی باشد.

$$EDR_d^t \le EDR_{max}^t \quad (۱۳)$$

۴-۳- قید تعادل توان الکتریکی در شبکه

در رابطه (۱۴) قید تساوی تولید الکتریکی با مصرف در شبکه در هر ساعت آورده شده است:

$$P_{e,net}^t + \sum_{wt=1}^{WT} P_{wt}^t + \sum_{pv=1}^{PV} P_{pv}^t + \sum_{n=1}^{N} P_{CHP,e.n}^t = \sum_{i=1}^{I} EL_i^t \quad (۱۴)$$

که توان خروجی CHP برحسب راندمان گرمایی و الکتریکی کمی کاهش می‌یابد و ضریب راندمان الکتریکی نیز از جدول ۱ بر اساس داده‌های کارخانه سازنده CHP به دست می‌آید.

$$P_{CHP,e,n}^t = \vartheta_i^t \times \eta_{CHP,e} \times P_{gi}^t \quad (۱۵)$$

۴-۴- قید تعادل توان حرارتی

توان خروجی CHP و توان خروجی بویلر در هر زمانی باید برابر بار حرارتی TL موردنیاز فرایند خط تولید کاغذ باشد

$$\sum_{n=1}^{N} P_{CHP,H,N}^t + \sum_{n=1}^{N} P_{Bo}^t = \sum_{i=1}^{I} TL_i^t \quad (۱۶)$$

۴-۵- قیود شبکه بالادست

میزان برق و گاز طبیعی خریداری‌شده از شبکه بالادست دارای محدودیت (۱۷) است:

$$P_{g,net}^{min} \le P_{g,net}^t \le P_{g,net}^{max}, P_{e,net}^{min} \le P_{e,net}^t \le P_{e,net}^{max} \quad (۱۷)$$

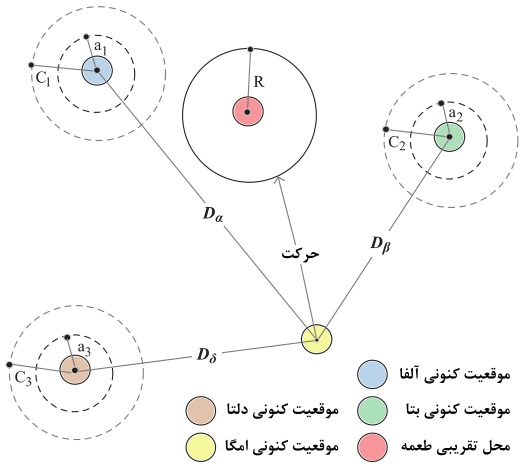
۵- الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

به‌طور سنتی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو بخش تقسیم می‌شوند: الگوریتم‌های قطعی و الگوریتم‌های تصادفی. الگوریتم‌های قطعی به‌راحتی در بهینه‌های محلی به دام می‌افتند. الگوریتم‌های تصادفی در مقابل می‌توانند با ارائه راه‌حل‌های تصادفی از دام محلی اجتناب کنند. امروزه الگوریتم‌های تصادفی موردتوجه بیشتری قرارگرفته‌اند. در میان

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]

تحقیقاتی که در حیطه الگوریتم‌های تصادفی صورت گرفته است، ارائه‌ها، پیشرفت‌ها و کاربردهای الگوریتم‌های نشاءت گرفته از طبیعت یک موضوع داغ تخصصی است. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری یا الگوریتم تجمع ذرات پرندگان ازجمله این الگوریتم‌ها است. الگوریتم گرگ خاکستری GWO، بر اساس جستجو، رفتار شکار و سلسله‌مراتب اجتماعی گرگ‌های خاکستری ارائه‌شده است. گرگ‌های خاکستری به‌صورت دسته‌جمعی زندگی و شکار می‌کند. گرگ‌های خاکستری برای شکار کردن ابتدا دور طعمه حلقه زده و طعمه را محاصره می‌کند و به تنگ‌تر کردن حلقه محاصره شروع به خسته کردن طعمه می‌کنند سپس به‌صورت نوبتی و با دستور گرگ رهبر به طعمه حمله کرده و در نهایت طعمه را از پای در می‌آورند.



شکل ۷: موقعیت شکار و شکارچی در الگوریتم گرگ خاکستری (Rodríguez, Castillo, & Soria, 2017)

گرگ‌های خاکستری توانایی تشخیص موقعیت طعمه و دور زدن آن‌ها را دارند. شکار کردن معمولاً توسط گرگ رهبر بنام آلفا راهنمایی می‌شود. همچنین گرگ‌های ضعیف‌تر در دو گروه با نام‌های بتا و دلتا ممکن است بعضی اوقات در شکار مشارکت کنند؛ بنابراین، در یک فضای جستجوی مطلق هیچ راه حلی درباره موقعیت بهینه شکار نداریم. برای شبیه‌سازی ریاضی رفتار شکار گرگ‌های خاکستری فرض می‌کنیم که آلفا بهترین راه حل شکار را در خود دارد و گرگ‌های بتا و دلتا آگاهی کافی درباره موقعیت بالقوه شکار دارند؛ بنابراین، اولین سه راه حل بهتر به دست آمده تا اینجا را ذخیره می‌کنیم و گرگ‌های ضعیف‌تر جستجو با نام گرگ‌های اُمگا را مجبور می‌کنیم تا موقعیت خودشان را نسبت به موقعیت بهترین عامل‌های جستجو مشابه شکل ۷ بروز کنند؛ بنابراین روند جستجو و شکار در الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری را می‌توان به شرح زیر توصیف کرد.

۱) اگر طعمه‌ای پیدا شود، ابتدا آن‌ها را ردیابی و تعقیب کرده و به آن نزدیک می‌شوند.

۲) اگر طعمه در حال حرکت یا فرار باشد، گرگ‌های خاکستری طعمه را دنبال می‌کنند؛ محاصره می‌کنند و مورد حمله قرار می‌دهند.

۳) سرانجام حمله شروع می‌شود.

برای مدل کردن روش شکار گرگ خاکستری، از روابط (۱۸) تا (۲۱) استفاده می‌شود.

$$\vec{D} = \left|\vec{C}.\overrightarrow{X_P}(t) - \vec{X}(t)\right| \quad (۱۸)$$

$$\vec{X}(t+1) = \overrightarrow{X_P}(t) - \vec{A}.\vec{D} \quad (۱۹)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a}.\overrightarrow{r_1} - \vec{a} \quad (۲۰)$$

$$\vec{C} = 2.\overrightarrow{r_2} \quad (۲۱)$$

که در آن t برابر تکرار الگوریتم و بردارهای A و C ضرایب بردار مکان طعمه و X بردار مکان گرگ خاکستری است a به‌صورت خطی و در طی تکرارها از مقدار ۲ به ۰ کاهش می‌یابد و بدین‌صورت حلقه محاصره تنگ‌تر می‌گردد. r_1 و r_2 بردارهای تصادفی در بازهٔ $[0,1]$ هستند.

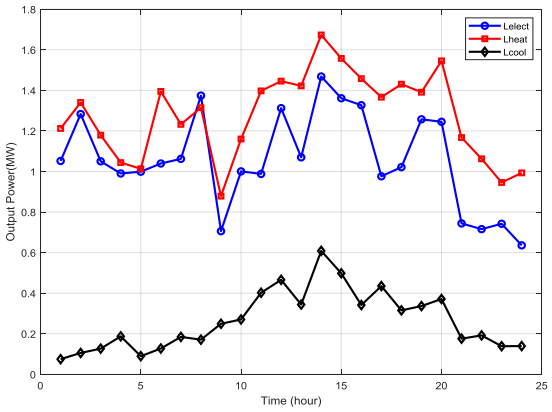
۶- مطالعه موردی

به‌منظور مدل‌سازی واقعی‌تر فرایند خط تولید کاغذ از دیدگاه هاب انرژی، پس از بازدید اولیه یک کارخانه تولید کاغذ در منطقه شهرک صنعتی یزد، داده‌های مصرف مورد نیاز منبع انرژی آب و گاز و برق در بازهٔ ده‌ساله استخراج شد و پروفیل شبانه‌روزی فصلی تقریبی توان الکتریکی و توان گرمایشی و توان سرمایشی بر اساس توان مصرفی موتورهای الکتریکی و تأسیسات بکار رفته در فرایند خط تولید استخراج گردید که به‌صورت شکل ۸ قابل رؤیت می‌باشد که بیانگر توان گرمایی پیوسته در طول شبانه‌روز بویلرهای اولیه و ثانویه است و حداکثر توان گرمایی تقریبی برابر ۱.۸ مگاوات در ساعات پیک بار الکتریکی و حداقل توان گرمایی برابر ۰.۹ مگاوات مورد نیاز است و توان سرمایشی مربوط به کوپلینگ پاورها و سیستم تهویه سالن خط تولید در بازه ۰.۱ تا ۰.۶ مگاوات نوسان پیدا می‌کند و توان الکتریکی با توجه به کاهش توان واحدهای الکتریکی در ساعات اوایل صبح و اواخر شب در بخش‌های متعدد از قبیل واحد بسته‌بندی و خمیرسازی و تصفیه فاضلاب در محدوده ۰.۷ تا ۱.۵ مگاوات نوسان پیدا می‌کند. بر این اساس بیشترین سهم مصرف انرژی مربوط به بویلرهای تولید بخار و آب داغ برای واحد خمیر سازی کاغذ و بویلر بازگشتی خمیرهای تصفیه‌شده در سیکل حلقه بسته برای استفاده مجدد در خط تولید می‌باشد و در مرحله بعد موتورهای الکتریکی قسمت انتقال و قسمت سفیدسازی و قسمت آبگیری و پرس فشاری است و بایستی مصرف ترکیب گاز و برق را با

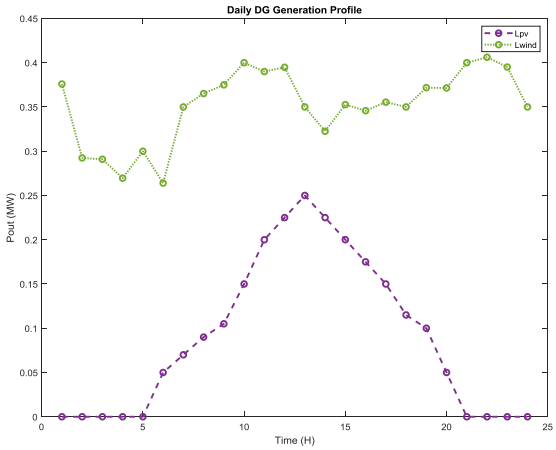
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]

تعویض بویلرها با تجهیز CHP بهینه‌سازی کرد و برحسب میزان مصرف و قیمت پایه برق و گاز، توان خروجی الکتریکی و حرارتی را تنظیم کرد. بدین ترتیب توان الکتریکی مورد نیاز از طریق شبکه بالادست، مولد بادی و خورشیدی، CHP و توان بار حرارتی نیز از طریق CHP تأمین می‌شود و توان سرمایشی و خنک‌کنندگی هم توسط توان الکتریکی تأمین می‌گردد. نمودار توان تابش پانل‌های خورشیدی و توان توربین بادی به‌صورت شکل ۹ است.



شکل ۸: پروفایل بار متوسط الکتریکی و حرارتی در یک شبانه‌روز (ماندگاری، ۱۳۹۲)



شکل ۹: پروفایل روزانه توان خورشیدی و بادی (ماندگاری، ۱۳۹۲)

جدول ۲: مشخصات فنی تجهیزات اصلی هاب انرژی

$P_{wt,r} = 400$ $v_{cin} = 3$		توربین بادی
$P_{g.net}^{min} = 0$ $P_{g,net}^{max} = 4400$		شبکه
$\eta_{CHP,h} = 0.47$ $P_{CHP,h}^{min} = 156$	$\eta_{CHP,e} = 0.42$ $P_{CHP,e}^{min} = 140$	CHP
$P_{CHP,h}^{max} = 1646$	$P_{CHP,e}^{max} = 1002$	
$\eta_{pv} = 0.18$ $S_{pv} = 280$		PV
$\eta_b = 0.8$ $P_{Boiler,h}^{max} = 1600$		بویلر

با توجه به شرایط جغرافیای کویری شهر یزد و وزش باد آرام کویری و تابش نسبتاً خوب خورشیدی، بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر برای تأمین توان صنایع در بلندمدت از نظر اقتصادی بسیار مقرون‌به‌صرفه می‌باشد و توان حداکثر بادی و خورشیدی بکار رفته در این کارخانه برابر ۰.۴ و ۰.۲۵ مگاوات می‌باشد و قیمت ساعتی برق خریداری‌شده از شبکه در ساعات پیک بار (۱۵-۱۲) برابر ۱۲ دلار و در ساعات غیر پیک برابر ۸ دلار برآورد شده است. قیمت گاز طبیعی خریداری‌شده برابر ۵ سنت برای هر کیلووات ساعت است و قیمت پیشنهادی مصرف‌کنندگان جهت کاهش بار الکتریکی و حرارتی به میزان ثابت برای تمام ساعات و به ترتیب برابر ۵ و ۴ سنت در هر کیلووات ساعت است.

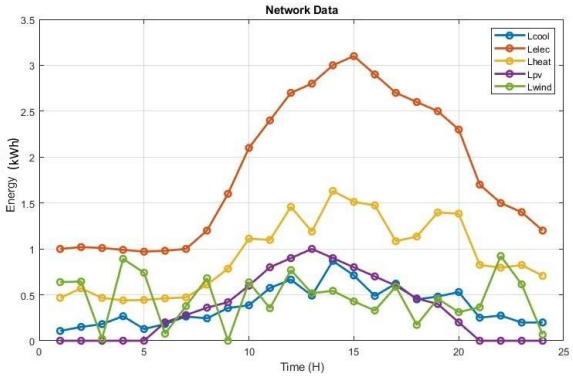
در این شبیه‌سازی یک شبکه هاب انرژی با منابع بادی، خورشیدی، بارهای الکتریکی، سرمایی و گرمایی تعریف گردیده و در قالب ۵ سناریو با سه روش بهینه‌سازی ژنتیک و الگوریتم تجمع ذرات پرندگان و الگوریتم گرگ خاکستری را بهینه‌سازی می‌کنیم که این ۵ سناریو شامل سناریوهای زیر می‌باشد.

- بدون مدیریت هاب انرژی و با در نظر گرفتن بویلر
- مدیریت هاب انرژی با جایگزینی بویلر با CHP
- مدیریت هاب انرژی با در نظر گرفتن منابع انرژی بادی و خورشیدی
- مدیریت هاب انرژی با در نظر گرفتن CHP و انرژی بادی و خورشیدی
- مدیریت هاب انرژی با منابع انرژی با در نظر گرفتن پاسخ بار

دیتای بارهای شبکه به‌صورت شکل ۱۰ است که بارها و منابع بادی و خورشیدی را نشان می‌دهد. نتایج بهینه‌سازی سناریوهای دوم تا پنجم که نیاز به بهینه‌سازی دارد با سه الگوریتم بهینه‌سازی در شکل ۱۱ نشان داده شده است که بر این اساس برای هر سناریو دو نمودار توان گازی ورودی و نمودار توان الکتریکی منبع ورودی نمایش داده می‌شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]



شکل ۱۰: داده‌های بارهای شبکه (de Jong, Sánchez, Esquerre, Kalid, & Torres, 2013de Jong, Sánchez, Esquerre, Kalid, & Torres, 2013)

با توجه به بهینه‌سازی انجام‌شده با سه روش مشخص‌شده نمودار هزینه کل هر سناریو به‌صورت شکل ۱۲ می‌باشد که کارایی الگوریتم گرگ خاکستری را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به نتایج شبیه‌سازی بهینه‌سازی انجام‌شده، هزینه‌های هر سناریو به‌صورت جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳: هزینه در سناریوهای مختلف (دلار)

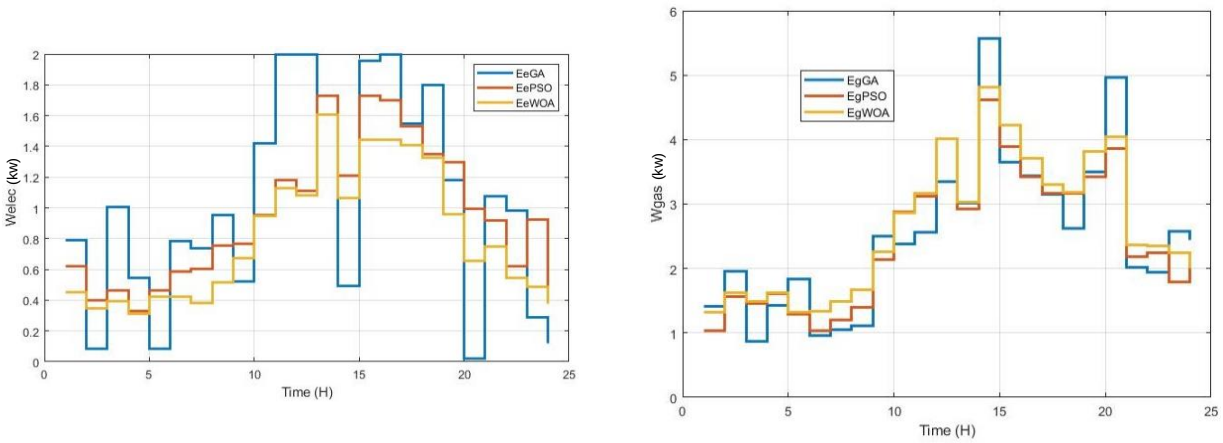
	سناریو دوم	سناریو سوم	سناریو چهارم	سناریو پنجم
الگوریتم ژنتیک	۰.۴۶۶۱	۰.۳۳۸۸	۰.۳۵۵۵	۰.۲۲۸۱
الگوریتم تجمع پرندگان	۰.۲۳۲۹	۰.۱۴۸۲	۰.۱۶۶۲	۰.۰۶۳۳
الگوریتم گرگ خاکستری	۰.۲۰۵۲	۰.۱۱۰۹	۰.۱۱۲۴	۰.۰۴۰۰

۷- نتیجه‌گیری

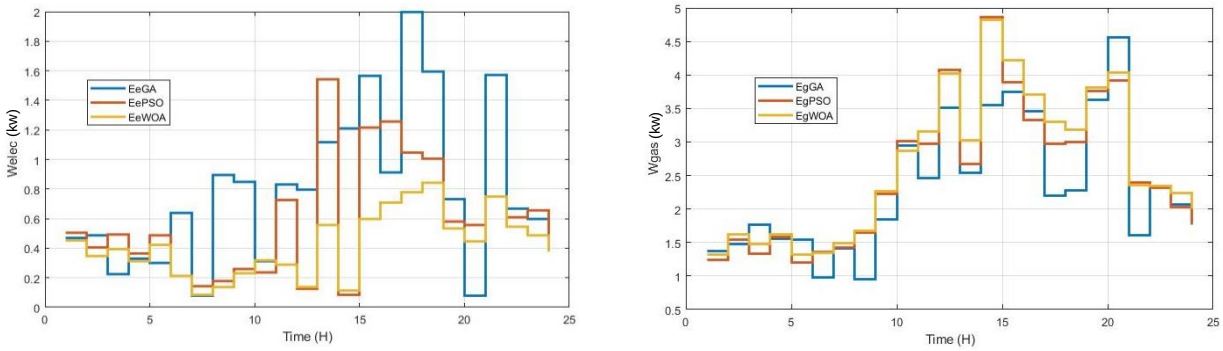
در این مقاله با مدل‌سازی و تحلیل اثرات حضور بار پاسخگو در یک سیستم انرژی چند حاملی، اثرات حضور یا عدم حضور بار پاسخگو و هاب انرژی بررسی گردیده است. در این پژوهش مدلی جهت برنامه‌ریزی بهره‌برداری از یک شبکه صنعتی مرتبط با تولید کاغذ در یک شهرک صنعتی با زیرساخت چند حاملی انرژی (برق– گاز– آب) برای ۲۴ ساعت شبانه روز ارائه شد و با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند، بهینه‌سازی هاب انرژی در جهت مدیریت توان CHP و بویلرها در فرایند خط تولید کاغذ صورت گرفت که نتایج حاکی از کاهش هزینه‌ها در صورت مشارکت بارهای پاسخگو است. البته لازم به ذکر است که قیمت برق مهم‌ترین پارامتر مؤثر در میزان سوددهی می‌باشد. درصورتی‌که منحنی هزینه توان برق و گاز خطی در نظر گرفته شود، دو برابر شدن قیمت برق سوددهی پروژه را بیش از دو برابر افزایش می‌دهد. همچنین افزایش قیمت گاز و برق به‌صورت هم‌زمان و به یک نسبت نیز منجر به افزایش سوددهی پروژه (با شیب کمتر) می‌گردد و از طرفی افزایش قیمت سوخت منجر به افزایش سود می‌شود که سودهی CHP را در مقابل سیستم جداگانه بویلر توجیه‌پذیرتر می‌کند. به‌نحوی‌که نصف شدن قیمت سوخت این اختلاف را نصف و دو برابر شدن قیمت سوخت اختلاف سوددهی بین حالت سیستم تولید برق جداگانه و CHP کامل را دو برابر می‌کند. طبق نتایج شبیه‌سازی، پاسخگویی بار یا هاب انرژی هرکدام به‌تنهایی، قابلیت کاهش هزینه‌ها را دارند ولی بهترین عملکرد در حضور هر دو عامل در کنار هم به دست می‌آید. در واقع می‌توان گفت هاب انرژی در کنار بار پاسخگو می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در جهت کاهش خاموشی و هزینه‌های بهره‌برداری و همچنین تأمین مناسب‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر دیماند واحدهای صنعتی مطرح شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

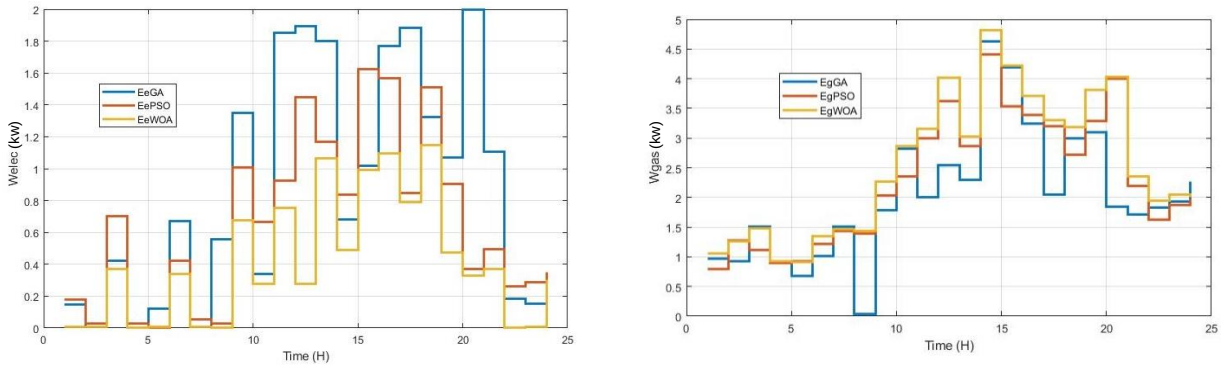
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]



۱۱-الف: سناریو دوم؛ راست توان ورودی گاز و چپ توان الکتریکی ورودی منبع



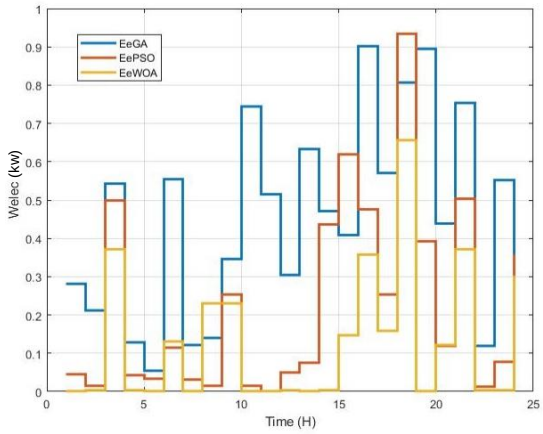
۱۱-ب: سناریو سوم؛ راست توان ورودی گاز و چپ توان الکتریکی ورودی منبع

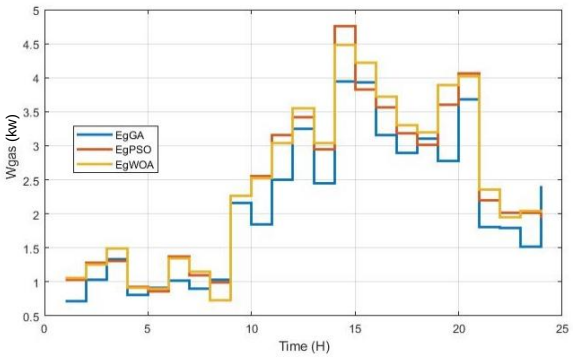


۱۱-ج: سناریو چهارم؛ راست توان ورودی گاز و چپ توان الکتریکی ورودی منبع

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

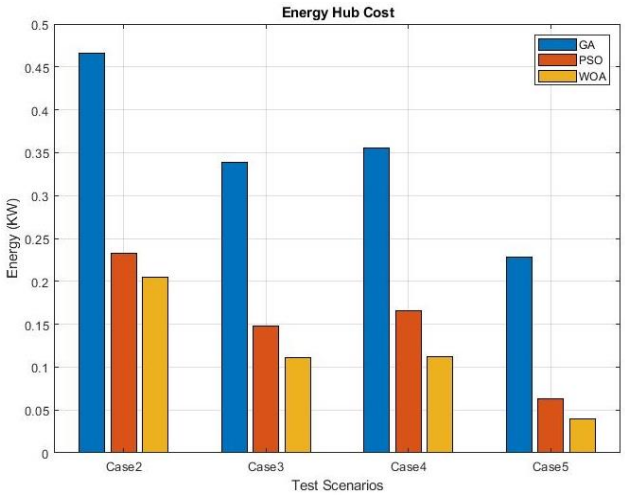
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]





۱۱-د: سناریو پنجم؛ راست توان ورودی گاز و چپ توان الکتریکی ورودی منبع

شکل ۱۱: نتایج شبیه‌سازی در سناریوهای مختلف



شکل ۱۲: هزینه کل سناریوهای مختلف

مراجع

Butler, J. (2020). Liquor Cycle Optimization - no more silo mentality. Retrieved from https://www.valmet.com/media/articles/up-and-running/new-technology/LiquorCycleOptWebinar/

Chen, C., Duan, S., Cai, T., Liu, B., & Hu, G. (2011). Optimal Allocation and Economic Analysis of Energy Storage System in Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *26*(10), 2762-2773. doi:https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2116808

Dababneh, F., & Li, L. (2019). Integrated Electricity and Natural Gas Demand Response for Manufacturers in the Smart Grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *10*(4), 4164-4174. doi:https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2850841

de Jong, P., Sánchez, A. S., Esquerre, K., Kalid, R. A., & Torres, E. A. (2013). Solar and wind energy production in relation to the electricity load curve and hydroelectricity in the northeast region of Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *23*, 526-535. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.050

Dinghuan, Z., Rui, Y., & Hug-Glanzmann, G. (2010). *Managing microgrids with intermittent resources: A two-layer multi-step optimal control approach.* Paper presented at the North American Power Symposium 2010.

Dolatabadi, A., Mohammadi-ivatloo, B., Abapour, M., & Tohidi, S. (2017). Optimal Stochastic Design of Wind Integrated Energy Hub. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *13*(5), 2379-2388. doi:https://doi.org/10.1109/TII.2017.2664101

Energy Solutions Center Inc. (2015). Paper Manufacturing Overview. Retrieved from http://gaspaperdryer.org/learn-about-paper-drying/paper-manufacturing-overview/

Fabrizio, E., Corrado, V., & Filippi, M. (2010). A model to design and optimize multi-energy systems in buildings at the design concept stage. *Renewable Energy*, *35*(3), 644-655.

Feng, L., Dai, X., Mo, J., & Shi, L. (2019). Performance assessment of CCHP systems with different cooling supply

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]

modes and operation strategies. *Energy Conversion and Management*, *192*, 188-201.

Froehlich, K., & Andersson, G. (2008). *Vision of Future Energy Networks (VoFEN)*. Retrieved from Switzerland: https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21555118

Geidl, M. (2007). *Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems.* ETH Zurich.

Geidl, M., & Andersson, G. (2006). *Optimal power dispatch and conversion in systems with multiple energy carriers*. Paper presented at the 15th Power Systems Computation Conference, August 22-26, 2005. http://hdl.handle.net/20.500.11850/48048

Geidl, M., Koeppel, G., Favre-Perrod, P., Klöckl, B., Andersson, G., & Fröhlich, K. (2007). *The Energy Hub: A Powerful Concept for Future Energy Systems*. Paper presented at the 3rd Annual Carnegie Mellon Conference on the Electricity Industry: Ensuring that the Industry has the Physical and Human Resources Needed for the Next Thirty Years, Pittsburgh, PA, USA. http://hdl.handle.net/20.500.11850/3133

Ha, T., Zhang, Y., Thang, V. V., & Huang, J. (2017). Energy hub modeling to minimize residential energy costs considering solar energy and BESS. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, *5*(3), 389-399. doi:https://doi.org/10.1007/s40565-017-0281-4

Mirzaei, M. A., Zare Oskouei, M., Mohammadi-Ivatloo, B., Loni, A., Zare, K., Marzband, M., & Shafiee, M. (2020). Integrated energy hub system based on power-to-gas and compressed air energy storage technologies in the presence of multiple shiftable loads. *IET Generation, Transmission & Distribution*, *14*(13), 2510-2519. doi:https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1163

Moghaddam, I. G., Saniei, M., & Mashhour, E. (2016). A comprehensive model for self-scheduling an energy hub to supply cooling, heating and electrical demands of a building. *Energy*, *94*, 157-170.

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.

Rayati, M., Sheikhi, A., & Ranjbar, A. M. (2015). Optimising operational cost of a smart energy hub, the reinforcement learning approach. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, *30*(4), 325-341.

Rodríguez, L., Castillo, O., & Soria, J. (2017). A study of parameters of the grey wolf optimizer algorithm for dynamic adaptation with fuzzy logic *Nature-inspired design of hybrid intelligent systems* (pp. 371-390): Springer.

Roustai, M., Rayati, M., Sheikhi, A., & Ranjbar, A. (2018). A scenario-based optimization of Smart Energy Hub operation in a stochastic environment using conditional-value-at-risk. *Sustainable cities and society*, *39*, 309-316.

Sheikhi, A., Rayati, M., & Ranjbar, A. M. (2015). *Energy Hub optimal sizing in the smart grid; machine learning approach*. Paper presented at the 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT).

Sheikhi, A., Rayati, M., & Ranjbar, A. M. (2016). Demand side management for a residential customer in multi-energy systems. *Sustainable cities and society*, *22*, 63-77.

Soroudi, A., & Keane, A. (2015). Risk Averse Energy Hub Management Considering Plug-in Electric Vehicles Using Information Gap Decision Theory. In S. Rajakaruna, F. Shahnia, & A. Ghosh (Eds.), *Plug In Electric Vehicles in Smart Grids: Energy Management* (pp. 107-127). Singapore: Springer Singapore.

Vahid-Pakdel, M. J., Nojavan, S., Mohammadi-ivatloo, B., & Zare, K. (2017). Stochastic optimization of energy hub operation with consideration of thermal energy market and demand response. *Energy Conversion and Management*, *145*, 117-128. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.074

Wang, J., Zhong, H., Ma, Z., Xia, Q., & Kang, C. (2017). Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system. *Applied Energy*, *202*, 772-782.

Xu, X., Kai, H., Jia, H., & Yu, X. (2015). *A reliability assessment approach for the urban energy system and its application in energy hub planning.* Paper presented at the 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting.

Yang, H., Xiong, T., Qiu, J., Qiu, D., & Dong, Z. Y. (2016). Optimal operation of DES/CCHP based regional multi-energy prosumer with demand response. *Applied Energy*, *167*, 353-365.

Zhang, X., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A., & Abusorrah, A. (2015). Optimal Expansion Planning of Energy Hub With Multiple Energy Infrastructures. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *6*(5), 2302-2311. doi:https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2390640

ماندگاری, ا. (۱۳۹۲). ارزیابی فنی-اقتصادی احداث سیستم‌های فتوولتائیک در راستای ایجاد شبکه هوشمند برق و پیکسایی آن در استان یزد. (کارشناسی ارشد), دانشگاه آزاد تهران جنوب.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.2.2.6]