
	Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology Vol. 14/ No. 54/ Summer 2023 P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://jipet.iaun.ac.ir/
---	---

 20.....
Research Article

Dual-Objectives Energy and Load Management for an Energy Hub by Considering Diverse Plannings and in the Presence of CCUS Technology and the TOU Program

Fardin Niazvand, *Ph.D. Student*, Saeed Kharrati, *Assistant Professor*, Farshad Khosravi, *Assistant Professor*, Abdollah Rastgou, *Assistant Professor*

Department of Electrical Engineering- Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran
fardin.niaazvand@gmail.com, dr.kharrati@iauksh.ac.ir, fkhosravi@iauksh.ac.ir, a.rastgou@iauksh.ac.ir

Abstract

This paper presents energy and load management by using a scenario-based assessment strategy for the optimal scheduling of a proposed hub by considering uncertain parameters (electricity price and wind turbine output power). Carbon capture utilization and storage (CCUS) technology and demand response programs (DRP), especially the time of use (TOU) program are investigated. Carbon technology helps to overcome pollution issues, on the one hand, and earn revenue for the power system, on the other hand. Also, the demand response programs help to reduce costs and pollution, make the load curve flatter, increase the reliability and power quality of the network. The proposed energy hub consists of various renewable and non-renewable distributed energy resources, as well different planning horizons, include deterministic and robust ones. The presented hub consists of diverse energy sectors like electricity, heat, cooling, gas, and water at the input and output sections. The problem is then modeled as a MILP and solved using the CPLEX solver in GAMS software. Epsilon constraint method with the fuzzy satisfying approach is used to obtain and select the best solution. The final results show that the cost and the pollution in the robust planning experience the increment by about 12.3% and 1.9% respectively in comparison to deterministic, as well, demand response programs and CCUS technology are had a significant impact on the objective functions. In addition, the load curve has become flatter and the reward by using a carbon system is obtained for the hub.

Keywords: carbon capture storage systems, distributed energy resources, demand response programs, hub energy management, load control, multi-objective planning, deterministic-robust planning

Received: 2 November 2021

Revised: 7 January 2022

Accepted: 20 February 2022

Corresponding Author: Dr. Saeed Kharrati

Citation: F. Niazvand, S. Kharrati, F. Khosravi, A. Rastgou, "Dual-objectives energy and load management for an energy hub by considering diverse plannings and in the presence of CCUS technology and the TOU program", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 54, pp. 31-58, September 2023 (in Persian).

مدیریت بار و انرژی دو هدفه یک هاب انرژی با در نظرگیری برنامه‌ریزی‌های گوناگون و در حضور فناوری CCUS و برنامه TOU

فردین نیازوند، دانشجوی دکتری، سعید خراطی، استادیار، فرشاد خسروی، استادیار، عبدالله راستگو، استادیار

گروه مهندسی برق - واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

fardin.niaazvand@gmail.com, dr.kharrati@iauaksh.ac.ir, fkhosravi@iauaksh.ac.ir, a.rastgou@iauaksh.ac.ir

چکیده: این مقاله یک مدیریت انرژی و بار با استفاده از یک استراتژی سناریو محور را برای ارزیابی عملکرد و برنامه‌ریزی هاب و با در نظرگیری عوامل نامعینی (قیمت الکتریسیته و توان توربین بادی) ارائه نموده است. سیستم جذب و ذخیره‌سازی کربن و نیز برنامه پاسخ‌گویی بار، به‌طور ویژه برنامه زمان استفاده مورد بررسی قرار گرفته است. فناوری جذب کربن افزون بر حل مسئله آلودگی واحدهای تولیدی از یکسو، درآمد قابل توجه را نیز برای سیستم‌های قدرت از سوی دیگر به ارمغان می‌آورد. همچنین برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به بهبود پروفیل بار و کاهش هزینه‌ها و آلودگی هاب، افزایش قابلیت اطمینان و کیفیت توان کمک شایانی می‌نمایند. هاب پیشنهادی در برگیرنده ادوات تولیدی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، تبدیلی و ذخیره‌کننده‌های گوناگون است، همچنین برنامه‌ریزی‌هایی مانند نوع قطعی و مقاوم در نظر گرفته شده است. هاب مفروض در قسمت ورودی و خروجی از حامل‌های گوناگون انرژی شامل الکتریسیته، حرارت، سرما، گاز طبیعی و آب پشتیبانی می‌کند. مسئله به‌صورت یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مدل شده و به‌وسیله سالور سیپلکس در نرم‌افزار گمز حل گردیده است. در ادامه، از روش افسیلون و تکنیک رضایت‌بخشی فازی جهت انتخاب راه‌حل بهینه استفاده شده است. نتایج نهایی نشان می‌دهد که هزینه و آلودگی کلی در نمونه مقاوم به‌ترتیب به‌اندازه ۱/۹ درصد و ۱۲/۳ درصد بیشتر از نمونه قطعی است، همچنین برنامه پاسخ‌گویی بار و فناوری جذب کربن تأثیر چشم‌گیری بر روی تابع‌های هدف دارند. همچنین منحنی بار مسطح گردیده و سود خوبی با استفاده از فناوری جذب کربن برای هاب پیشنهادی به‌دست آمده است.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی چندهدفه، برنامه‌ریزی قطعی-مقاوم، سیستم‌های جذب و ذخیره‌سازی کربن، کنترل بار، مدیریت انرژی هاب، منابع تولید پراکنده، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سعید خراطی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: کرمانشاه - میدان فردوسی - انتهای شهرک متخصصین - دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه

۱- مقدمه

ایجاد تحولات موجود در نیاز بشر به انرژی و نیز محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی در کنار افزایش بی‌سابقه گرمایش کره زمین سبب بازنگری در ساختار شبکه‌های انرژی کنونی و نیز تغییر سیاست‌های مرتبط با آن گردیده است [۱]. به‌طور سنتی، بهره‌برداری از زیرساخت‌های سیستم‌های گاز، برق، آب و ... جداگانه است، گرچه گذر زمان نشان داد که یکپارچه‌سازی و آمیختن انواع انرژی در قالب یک مجموعه متمرکز می‌تواند راه‌کار حل بسیاری از دغدغه‌های موجود تأمین انرژی در جهان باشد [۲،۳]. در راستای تحقق این اهداف، سیستم‌های تولید پراکنده^۱ (DER) که در نزدیکی تقاضا واقع شده‌اند، می‌توانند به‌عنوان راه‌حل مناسبی برای چیرگی بر پیشامدها و مشکلاتی همچون تلفات زیاد الکتریسیته در حین انتقال، تولید و انتشار آلودگی‌های زیست‌محیطی زیاد، نیاز به صرف هزینه‌های زیاد برای ساخت نیروگاه‌های مرسوم و ... که اغلب شبکه‌های انرژی و نیروگاه‌های بزرگ با آن مواجه هستند، مورد استفاده قرار بگیرند [۴،۵].

سیستم‌های تولید پراکنده‌ای که استفاده می‌گردد را می‌توان به دو دسته منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر^۲ (RER) و نیز نوع تجدیدناپذیر تقسیم‌بندی نمود. از منابع تجدیدپذیر می‌توان به توربین‌های بادی^۳ (WT)، سیستم‌های فتوولتائیک^۴ (PV)، توربین‌های جزر و مدی^۵، پیل سوختی^۶، ریفورمر^۷ اشاره نمود. در طرف مقابل از منابع مبتنی بر سوخت‌های فسیلی می‌توان به میکرو توربین‌ها^۸ (MT)، بویلرها^۹ و سیستم‌های برق و حرارت^{۱۰} (CHP) اشاره نمود. افزون بر استفاده از راه‌کارهای جدید و نوین و لزوم توجه کافی به منابع تولیدکننده توان تجدیدپذیر به‌منظور دستیابی به اهداف اقتصادی و زیست محیطی، لزوم توجه به برنامه‌های کم‌هزینه‌تر مانند برنامه‌های پاسخ‌گویی بار^{۱۱} (DRP) که یکی از بهترین راه‌کارها جهت افزایش انعطاف‌پذیری سیستم قدرت، کاهش نسبی هزینه‌های تحمیلی بر شبکه قدرت و نیز مسطح شدن منحنی بار بدون نیاز به صرف هزینه‌های بسیار و مباحث توسعه و برنامه‌ریزی سیستم است، مهم جلوه می‌نماید. این برنامه و ساختار، با جابه‌جایی و انتقال بارهای قابل تعویض، از ساعات و دوره‌های پیک به دوره‌ها و ساعات غیر پیک می‌تواند نقش بسزایی در کاهش مصرف و در نتیجه آن کاهش توان تولیدی واحدهای تولیدی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی به‌منظور تأمین توان موردنیاز بارها، کاهش آلودگی و هزینه کلی را داشته باشد [۶،۷].

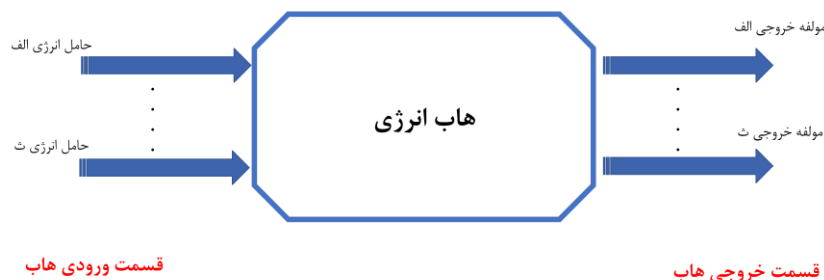
از دیگر سیستم‌ها و فناوری‌های مورد توجه در این مقاله، فناوری جذب، ذخیره‌سازی و به‌کارگیری کربن دی‌اکسید منتشر شده از واحدها و منابع است. در دهه‌های گذشته، به‌ویژه در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش آلودگی زیست محیطی و در نتیجه آن گرمایش زمین، توجه زیادی به کنترل و کاهش این آلاینده‌ها، به‌ویژه دی‌اکسید کربن، شده است. یکی از روش‌هایی که به‌تازگی در بسیاری از کشورها و مقالات مورد بحث قرار گرفته است، فناوری جذب و جداسازی و استفاده از کربن یا به‌اختصار^{۱۲} CCUS است. این فناوری یک گزینه مهم و کاربردی برای دستیابی به اهداف متعدد است؛ به‌عبارت‌دیگر، افزون بر کاهش آلاینده‌های زیست محیطی، می‌توان از آن برای افزایش کارایی میدان‌های نفتی و زغال‌سنگ که به‌ترتیب به‌عنوان بهبود بازیافت نفت^{۱۳} (EOR) و بهبود متان بستر زغال سنگ^{۱۴} (ECBM) شناخته می‌شوند، استفاده نمود. سود حاصل با استفاده از این روش، می‌تواند هزینه‌های مصرف برق و نصب آن را پوشش دهد. افزون بر این، کاربردهای قابل توجه در سیستم‌های قدرت دارد، مانند (۱) مقابله با انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از نیروگاه‌های موجود؛ تقویت بخش برق با فناوری‌های جذب کربن باعث حذف انتشار گازهای گلخانه‌ای از ناوگان موجود نیروگاه‌های سوخت فسیلی می‌گردد. این مقاومت‌سازی به صاحبان نیروگاه‌های موجود اجازه می‌دهد تا هزینه‌های سرمایه‌ای خود را بازیابی کرده و در نتیجه هزینه‌های گسترش و توسعه سیستم قدرت را کاهش دهند. (۲) انعطاف‌پذیری برای سیستم قدرت پایدار؛ بسیاری از مناطق سهم فزاینده و گوناگونی از منابع انرژی تجدیدپذیر دارند و برای اطمینان از عملکرد پایدار سیستم‌های قدرت به قابلیت اطمینان بیشتری نیاز دارند. نیروگاه‌های مجهز به این فناوری می‌توانند این انعطاف‌پذیری اضافی و قابلیت اطمینان را در طیف گسترده‌ای از دوره‌های کوتاه تأمین نمایند. (۳) انتشار آلودگی صفر و حتی منفی ارائه دهند. هزینه بنیادین سیستم بازیافت کربن (بیش از ۷۰ درصد) مربوط به گرفتن و جداسازی کربن منتشر شده از فرایندها است. روش‌های گوناگونی برای جداسازی دی‌اکسید کربن خروجی هاب‌های انرژی وجود دارد که شامل روش‌هایی تحت عنوان، روش پس از احتراق^{۱۵}، روش پیش احتراق^{۱۶}، روش سوختن اکسیژن^{۱۷} و احتراق حلقه شیمیایی^{۱۸} می‌گردد [۸،۹]. همان‌طوری که در ابتدای مقدمه نیز بیان گردید، ادغام انواع حامل‌های انرژی و تشکیل

شبکه‌ای که توانایی بهره‌برداری هم‌زمان و تبدیل و تحویل انواع توان را در لحظه فراهم آورد کلید حل بسیاری از مسائل و مشکلاتی است که شبکه‌های توزیع متمرکز و سیستم‌های متداول با آن روبرو هستند، از همین رو محققین به دنبال تعریف و تشکیل این چنین شبکه‌هایی، مفهوم شبکه‌های هاب انرژی را پدید آورده‌اند [۱۰، ۱۱]. در ادامه، به بررسی دقیق هاب انرژی و تحقیقات اخیر پیرامون آن پرداخته می‌شود.

۱-۱- هاب انرژی و مروری بر نوآوری‌ها و تحقیقات اخیر آن

هاب‌های انرژی که از آن‌ها با عناوینی همچون سیستم‌های متشکل از چند انرژی^{۱۹} (MCHES)، سیستم‌های چند محصولی چندمنظوره، سیستم‌های انرژی ترکیبی، سیستم‌های چند-ورودی و چند-خروجی و ... در مقالات و تحقیقات مختلف یاد می‌شود را می‌توان سیستم‌های انرژی یکپارچه و جامعی توصیف نمود که تمامی مراحل تولید، تبدیل، انتقال و ذخیره انرژی را در خود جای داده‌اند [۱۲]. این سیستم‌ها را می‌توان رابط بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی و توان معرفی نمود که به‌منظور تأمین نیاز مشترکین و با رفع مسائل و مشکلات سیستم‌های متداول پا به عرصه ظهور نهادند. یک هاب انرژی حامل‌های مختلف انرژی را در ورودی خود دریافت می‌کند این حامل‌ها می‌توانند شامل، برق، هیدروژن، گرما، بیوگاز، آب، گاز باشند اما به این موارد ذکر شده محدود نمی‌گردند. این پلتفرم‌ها، توانایی تبدیل انواع انرژی به یکدیگر را در درون خود دارند. در خروجی نیز با توجه به طراحی‌های صورت گرفته و نظر بهره‌برداران، حامل‌های گوناگون انرژی را تحویل مصرف‌کنندگان می‌دهند [۱۳]. هاب‌های انرژی می‌توانند به‌منظور تولید توان‌های مورد نیاز، از واحدهای مختلف تجدیدپذیر همانند، توربین‌های بادی، سیستم‌های فتوولتائیک، سیستم‌های جزر و مدی، پیل‌های سوختی و تجدیدناپذیر مانند، بویلر، CHP، کوره‌ها^{۲۰}، میکرو توربین‌ها استفاده نمایند. می‌توان به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان و مقاومت شبکه تحت مطالعه از انواع سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی^{۲۱} (ES) مانند باتری‌ها، سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده^{۲۲} (CAES)، ذخیره‌سازهای حرارتی و یا در قالب هیدروژن در تانک‌های هیدروژن بهره برد [۱۴]. در شکل (۱) نمایی کلی از ساختار یک هاب انرژی نشان داده شده است.

به‌منظور فهم نقش هاب‌های انرژی در شکل جدید سیستم‌های قدرت، مروری کلی بر موضوعات اخیر پیرامون این موضوع ضروری به نظر می‌رسد. در تحقیقات اخیر، هاب‌های انرژی و ساختمان‌های هوشمند از دیدگاه‌های گوناگونی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. برای نمونه، در نظریه‌ری برنامه‌ریزی توسعه ادغام شده با شبکه‌های گاز و الکتریسیته [۱۵، ۱۶] در نظریه‌ری برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال ادغام شده با حامل‌های انرژی همانند گاز و الکتریسیته [۱۷، ۱۸]، برنامه‌ریزی بهره‌برداری از هاب‌های انرژی به‌منظور کاهش در انتشار آلودگی‌های زیست محیطی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری [۱۹، ۲۰]، بازار رقابتی حامل‌های انرژی در همکاری با هاب‌های انرژی و با در نظریه‌ری پارامترهای نامعینی [۲۱]، گسترش ریز شبکه‌ها و شبکه‌های هوشمند در قالب هاب‌های انرژی [۲۲، ۲۳]، در نظریه‌ری مدیریت انرژی ساختمان‌های هوشمند در قالب هاب‌های انرژی [۲۴، ۲۵]، از جمله موضوعات مورد مطالعه در سالیان گذشته بوده است. در همین راستا در ادامه به‌طور مفصل و دقیق به بررسی چندین مقاله منتشرشده پیرامون این محور پرداخته شده است.



شکل (۱): ساختار کلی یک هاب انرژی
Figure (1): The overall scheme of the energy hub

در مرجع [۲۶] مدیریت هماهنگ انرژی در شبکه‌های مختلف را درباره بازار روز آینده پیشنهاد داده‌اند. مدل پیشنهادی شامل حامل‌های برق و گاز به‌عنوان ورودی و همچنین برق و گرما به‌عنوان خروجی بوده است. در این پژوهش، واحدهای مختلف تولیدی و ذخیره‌سازها همانند، واحدهای برق و حرارت، ذخیره‌ساز الکتریکی^{۲۳} (ES)، دیگ بخار، خودروهای برقی^{۲۴} (EV) و سایر منابع انرژی تجدیدپذیر شرکت داده شده‌اند. تابع هدف این مسئله حداکثر سازی سود هاب مفروض در بازار روز آینده در حضور محدودیت‌های شبکه و هاب‌های گوناگون بوده است. افزون بر این، پارامترهای نامعینی همانند میزان بارهای مصرفی، قیمت‌های روز آینده، توان خروجی منابع تجدیدپذیر و در دسترس‌پذیری خودرو الکتریکی در برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است. این مسئله به‌عنوان برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو مدل‌سازی شده و توسط نرم‌افزار گمز حل گردیده است. نتایج شبیه‌سازی کارایی مناسب و مدیریت بهینه انرژی هاب مورد نظر را تأیید کرده‌اند. در مرجع [۲۷]، یک شبکه هوشمند در برگیرنده پنج هاب انرژی برای جامعه کانادایی در نظر گرفته شده است. توابع هدف، هزینه‌های کلی انرژی و آلودگی زیست محیطی در نظر گرفته شده است که باید به‌طور هم‌زمان به حداقل می‌رسیدند. مرکز مورد مطالعه، شامل ساختمان‌ها و مکان‌های گوناگون، مانند ساختمان‌های مسکونی، مدارس ابتدایی، رستوران‌ها، سوپر مارکت‌ها و غیره بوده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که ادغام ساختمان‌های گوناگون در مراکز می‌تواند کارایی کل سیستم را افزایش دهد. همچنین این امر سبب گشت تا هزینه‌های انرژی و آلودگی زیست محیطی به میزان قابل توجه کاهش یابد. این پژوهش همچنین نشان داد که استقرار واحدهای ذخیره‌ساز الکتریکی در کنار سیستم‌های فتوولتائیک منجر به کاهش ۴۳ درصدی گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. در مرجع [۲۸] یک شبکه و سیستم چند انرژی متشکل از توربین گازی، دیگ بخار، توربین‌های بادی، فتوولتائیک، مبدل‌های حرارتی و چیلر الکتریکی جذبی^{۲۵} در کنار دیگر منابع تولیدی و ذخیره‌کننده انرژی به‌منظور نیل به اهداف اقتصادی و زیست محیطی و تحت برنامه پاسخ‌گویی بار و عدم قطعیت در قیمت برق مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، بازگشت سرمایه^{۲۶} (ROA)، جهت حل و رسیدگی به بحث نامعینی قیمت بازار مورد استفاده بوده است. نتایج نشان داد که هزینه کلی سیستم تحت مطالعه و با در نظرگیری حالت خوش‌بینانه ROA، در مقایسه با حالت قطعی^{۲۷} (دیترمینستیک) کاهش یافته است. همچنین با در نظرگیری حالت بدبینانه ROA، هزینه کلی سیستم در مقایسه با حالت قطعی (دیترمینستیک) اندکی افزایش را تجربه کرده است. در این مقاله از برنامه‌های زمان استفاده^{۲۸} (TOU) و زمان قیمت واقعی^{۲۹} (RTP) در بحث پاسخ-گویی بار استفاده شده که در موارد بدبینانه TOU، در نظرگیری ROA باعث شد که هزینه بهره‌برداری ۰/۷۸ درصد کاهش یابد. همچنین استفاده از RTP سبب گشت تا هزینه کلی سیستم در مقایسه با حالتی که در آن برنامه پاسخ‌گویی بار لحاظ نشده بود ۱/۵ درصد کاهش یابد. در مرجع [۲۹] با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۳۰} (PSO)، بحث بهینه‌سازی حامل‌های انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۳۰] یک مدل چندهدفه به‌منظور ارزیابی ابعاد اقتصادی و زیست محیطی یک سیستم چند انرژی را در حضور برنامه پاسخ‌گویی بار زمان استفاده مورد مطالعه قرار داده‌اند. همچنین بحث هاب‌های انرژی در ساختمان‌های مسکونی یکپارچه و به هم‌پیوسته با در نظرگیری تأثیر تبادل توان با شبکه اصلی بر توابع هدف مورد مطالعه برنامه‌ریزان و نیز تأثیر ذخیره‌سازهای حرارتی خورشیدی بر عملکرد هاب‌های انرژی در مرجع [۳۱] مورد تحقیق قرار گرفته‌اند. در مرجع [۳۲] یک مدل هاب انرژی را با در نظرگیری اهداف اقتصادی و زیست محیطی در حضور برنامه‌های مدیریت بار بررسی و در نظر گرفته‌اند. در مرجع [۳۳] یک برنامه‌ریزی تصادفی با در نظر گرفتن حامل‌های گوناگون انرژی و نیز عدم قطعیت‌های گوناگون، اجرا و ارائه شده است. در همین راستا و با توجه به مقالات بررسی شده، در این مقاله مدل جدید و کاملی از هاب انرژی ارائه شده است. همچنین در نظرگیری برنامه‌ریزی‌های قطعی و مقاوم در کنار فناوری‌های جذب کربن و برنامه پاسخ‌گویی بار به‌طور هم‌زمان و تحت سناریوهای گوناگون از مباحثی بوده که در پژوهش‌های گذشته به این صورت جامع و کامل مورد بحث و مطالعه قرار نگرفته است، لذا نویسندگان به دنبال کشف تأثیر این نوع برنامه‌ریزی بر هاب انرژی و نتایج مهم آن مقاله پیش رو را به انجام رسانیده‌اند.

این مقاله یک مدیریت بار-انرژی و راهبرد متشکل از برنامه‌ریزی مبتنی بر سناریو را به منظور عملکرد و زمان‌بندی بهینه یک هاب انرژی (دربرگیرنده ساختمان‌های هوشمند) با در نظرگیری پارامترهای نامعینی و دارای عدم قطعیت شامل (قیمت برق و توان خروجی توربین بادی)، در کنار استفاده از فناوری نوین جذب، ذخیره و استفاده از کربن دی‌اکسید^{۳۱} و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به‌طور هم‌زمان ارائه می‌دهد. به‌منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، از برنامه زمان استفاده در پژوهش‌ها استفاده گردیده است. برنامه‌ریزی‌های گوناگونی همچون برنامه‌ریزی قطعی و مقاوم به‌منظور درک بهتر سیستم تحت مطالعه صورت گرفته است. توابع هدف این مسئله، آلاینده‌گی و هزینه کلی هاب تحت مطالعه در نظر گرفته شده است. مسئله مفروض به‌صورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی مدل‌سازی شده و توسط روش قیود اِپسیلون و روش رضایت بخشی فازی در نرم‌افزار گمز حل گردیده است. نویسندگان این مقاله، به‌منظور ادامه کار انجام شده در مرجع [۱۰] که توسط خود ایشان صورت گرفته، در این نوشتار سعی در بررسی و کشف ابعاد دیگر پیش روی برنامه‌ریزی هاب انرژی مورد نظر پرداخته‌اند. به‌طور کلی نوآوری‌های مقاله پیشنهادی را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- در نظر گرفتن مدل چندهدفه اقتصادی-زیست محیطی با همکاری برنامه پاسخ‌گویی بار.
- در نظرگیری انواع منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر و بارهای الکتریکی، حرارتی و سرمای.
- در نظرگیری پارامترهای نامعینی به‌منظور جامع و کامل بودن برنامه‌ریزی مفروض.
- اجرای برنامه‌ریزی قطعی و مقاوم در کنار سیستم جذب کربن و برنامه پاسخ‌گویی بار به‌طور هم‌زمان.
- تأثیر چشم‌گیر فناوری جذب و جداسازی کربن و نیز برنامه پاسخ‌گویی بار بر توابع هدف مورد مطالعه.
- تأثیر سازنده و مؤثر برنامه‌ریزی‌های مفروض در جلوگیری از انتشار آلودگی و رفتن به سمت اقتصاد سبز جهانی.

۳-۱- ساختار مقاله

در ادامه، قسمت‌های گوناگون مقاله به شرح زیر مرتب و طبقه‌بندی شده است، در بخش ۲ به مدل‌سازی انواع تجهیزات به‌کاررفته در هاب تحت مطالعه پرداخته شده است. بخش ۳ به بیان توابع هدف چندگانه مورد نظر نویسندگان و قیود و محدودیت‌های مرتبط با آن پرداخته است. بخش ۴ به توضیحاتی پیرامون روش حل و بهینه‌سازی توابع هدف مورد نظر اختصاص یافته است. بخش ۵ به بیان ریز جزئیات شبکه تحت مطالعه و همچنین تعداد و ظرفیت انواع ادوات مرتبط با هاب مورد مطالعه و نیز داده‌های آماری استفاده شده در این مقاله می‌پردازد. بخش ۶ به بیان نتایج شبیه‌سازی با در نظرگیری سناریوهای گوناگون شبکه تحت مطالعه اختصاص یافته است و در پایان در بخش ۷ نتیجه‌گیری کلی مقاله آورده شده است.

۲- مدل‌سازی مسئله

هاب انرژی پیشنهادی از بخش‌ها و قسمت‌های مختلف تشکیل شده است. برای مدل‌سازی و فرمول‌بندی هاب، هر بخش باید به‌طور کامل و با دقت مورد بحث و بررسی قرار گیرد. بر این اساس، در این قسمت به بررسی مدل‌سازی ادوات مختلف تولیدی و ذخیره‌کننده‌های موجود، نیز سیستم‌های جذب و ذخیره‌کننده کربن، همچنین برنامه‌های پاسخ‌گویی بار پرداخته شده است.

۲-۱- مدل‌سازی توربین بادی

هاب انرژی به‌خودی‌خود بستری عالی برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کاهش هزینه‌ها به دلیل توانایی تبدیل انواع گوناگون انرژی به یکدیگر فراهم می‌نماید؛ گرچه برای استفاده از مزایای دیگر همانند کاهش آلودگی، استفاده از فناوری‌های تجدیدپذیر ضروری است. در همین حال، توربین‌های بادی حداکثر توجه را در هاب‌های انرژی به خود جلب نموده‌اند که دلیل آن ظرفیت تولید مناسب این منابع در مقایسه با سایر انرژی‌های تجدیدپذیر است. توان خروجی توربین‌های بادی به عوامل مختلفی همانند سرعت باد، نوع توربین، سطح مساحت پرها، ارتفاع محل نصب توربین و غیره بستگی دارد. بر این اساس، در رابطه (۱)، توان خروجی توربین‌های بادی معمولی ارائه شده است [۳۴،۳۵].

$$G_{WT}(t) = \begin{pmatrix} 0 & \forall t : V^{Cut-in-WT} \geq V_t \\ 0 & \forall t : V^{Cut-out-WT} \leq V_t \\ 0.5 \times \rho \times A_{WT} \times \eta^W \times V_t^3 & \forall t : V^{Cut-in-WT} \leq V_t \leq V^{Cut-out-WT} \end{pmatrix} \quad (1)$$

۲-۲- مدل سازی ذخیره ساز الکتریکی

ذخیره سازهای الکتریکی از دسته عناصری هستند که در بیشتر مقالات مربوط به هاب های انرژی استفاده می شوند. برتری بزرگ ذخیره سازهای الکتریکی؛ ذخیره انرژی در صورت تولید مازاد واحدها به منظور تأمین انرژی مورد نیاز در زمان اوج مصرف و یا تأمین انرژی مورد نیاز به دلیل کمبود توان تولیدی واحدها، مانند عدم قطعیت های مربوط به توان تولیدی حاصل از منابع انرژی های تجدیدپذیر است. همچنین، این عناصر می توانند نقش مؤثری در افزایش کیفیت توان و قابلیت اطمینان سیستم داشته باشند. بسته به مکان و نوع دستگاه های ذخیره ساز، ذخیره سازهای گوناگون و با کاربردهای متنوع در هاب های انرژی استفاده می گردد؛ بنابراین، در این مقاله، به منظور در نظرگیری نقش دستگاه های ذخیره ساز در برنامه ریزی هاب پیشنهادی، از عناصر ذخیره ساز الکتریکی همانند باتری استفاده شده است. رابطه های (۲) الی (۵) به ترتیب معادلات این نوع از عناصر مورد استفاده در مقاله حاضر را نشان می دهد. به دلیل وجود واحدهای تولیدی گوناگون حرارتی با ظرفیت مناسب در هاب مفروض، فقط از ذخیره ساز الکتریکی استفاده شده و نوع حرارتی در نظر گرفته نشده است [۳۶،۳۷].

$$G_{ESS}(t) = E_{SS}(t) - E_{SS}(t-1) \quad t = 1, 2, 3, \dots, T \quad (2)$$

$$E_{SS}^{min} \leq E_{SS}(t) \leq E_{SS}^{max} \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{SS}^{min} - E_{SS}(0) \leq \sum_{k=1}^t G_{ESS}(k) \leq E_{SS}^{max} - E_{SS}(0) \\ (\forall t = 1, 2, \dots, T) \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$E_{SS}(0) = E_{SS}(T) \quad (5)$$

بنابراین، توان خروجی ذخیره ساز الکتریکی توسط رابطه (۲) نشان داده می شود. باتری باید در محدوده مجاز خود شارژ و تخلیه شود تا عمر مفید خود را داشته و کارایی خود را در این مدت حفظ نماید که این با استفاده از رابطه (۳) بیان شده است. همچنین میزان شارژ باتری در دوره های زمانی اول و آخر باید برابر باشد؛ به عبارت دیگر، باتری باید برای روز بعد آماده به کار باشد. این توسط معادله های (۴) و (۵) نشان داده شده است.

۲-۳- مدل سازی سیستم های جذب، ذخیره سازی و استفاده از کربن

همان طوری که پیش تر نیز بیان شد، فناوری جذب و جداسازی کربن راه حل مناسبی جهت جلوگیری از انتشار آلاینده ها و در نتیجه آن جلوگیری از گرمایش زمین است. همچنین فروش کربن ذخیره شده و به کارگیری در صنایع گوناگون می تواند سود مناسبی را برای هاب مفروض به ارمغان آورد. روابط مرتبط با این سیستم و نحوه مدل سازی آن در معادله های (۶) و (۷) آورده شده است که به ترتیب هزینه و سود کل این نوع از سیستم ها را نمایش می دهند. شایان ذکر است که برای کاربردی تر و ملموس تر بودن نتایج، کارایی سیستم حدود ۹۰ درصد در نظر گرفته شد و یا به عبارت دیگر ۹۰ درصد از دی اکسید کربن منتشر شده توسط واحدهای تولیدی مبتنی بر سوخت های فسیلی موجود در هاب پیشنهادی جذب و جداسازی می گردد [۳۸].

$$Z_{CCUS}(t) = \sum_{i=1}^T (GG_i(t) \times EMF_i \times STP \times \phi) \quad (6)$$

$$R_{CCUS}(t) = \sum_{i=1}^T (GG_i(t) \times EMF_i \times RP \times \phi) \quad (7)$$

۲-۴- مدل سازی برنامه پاسخ گویی بار مبتنی بر زمان استفاده TOU

در این مقاله، برنامه پاسخ‌گویی بار مبتنی بر زمان استفاده در نظر گرفته شده است. این برنامه به مشتری این توانایی را می‌دهد تا بخشی از مصرف برق خود را به فاصله‌های زمانی دیگر انتقال دهد تا بدین گونه هزینه‌های کلی سیستم کاهش یابد و منحنی بار مسطح گردد [۳۹]. برنامه پاسخ‌گویی بار مفروض توسط رابطه (۸) بیان می‌گردد:

$$E_{ld}^{Prim}(t) = E_{ld}(t) + Shifted_Load(t) \quad (8)$$

که در آن:

$$Shifted_Load(t) = DR_{factor}^{Shift}(t) \times E_{ld}(t) \quad (9)$$

شایان ذکر است که ضریب جابه‌جایی بارها در این مقاله برابر ۳۰ درصد کل بارها در نظر گرفته شده است.

۳- فرمول نویسی مسئله توابع هدف و قیود مسئله

همان‌گونه که در آغاز مقاله بیان شد، اپراتورهای هاب‌های انرژی به دنبال تحقق اهداف گوناگونی در برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم مورد مطالعه خود هستند. در این مقاله، توابع هدف شامل به حداقل رسانیدن هزینه کلی هاب پیشنهادی، تحت مدل‌ها و برنامه‌ریزی‌های گوناگون و همچنین به حداقل رسانیدن آلودگی منتشره توسط عناصر تولیدی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی موجود در هاب به‌طور هم‌زمان است؛ به‌عبارت‌دیگر، هدف دستیابی به رضایت نسبی در هر دو تابع هدف به‌طور هم‌زمان است.

۳-۱- تابع هدف مرتبط با هزینه کلی هاب انرژی تحت مطالعه

هزینه کلی هاب تحت مطالعه برای چهار حالت مختلف ارائه شده است. حالت اول، هزینه کلی برای هاب پیشنهادی بدون همکاری فناوری کربن و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته می‌شود. در حالت دوم، تنها تأثیر وجود فناوری جذب و جداسازی کربن بر تابع هدف هزینه، بررسی و اعمال می‌گردد. در حالت سوم هزینه کلی هاب با در نظرگیری برنامه‌های پاسخ-گویی بار به تنهایی در نظر گرفته شده و در پایان در حالت چهارم هزینه کلی هاب پیشنهادی با در نظرگیری هم‌زمان سیستم‌های جذب و جداسازی کربن و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار صورت گرفته است. این چهار حالت به ترتیب در زیر با رابطه-های (۱۰) الی (۱۳) نشان داده شده‌اند.

$$TC(cost) = \sum_{t=1}^T \left(\begin{matrix} Z_{CHP}(t) + Z_{CB}(t) + Z_{WT}(t) + Z_{MT}(t) \\ + Z_{EHP}(t) + Z_F(t) + Z_{Boiler}(t) + Z_G(t) \\ + Z_W(t) + Z_{ESS}(t) + Z_{Buy}(t) - Z_{Sell}(t) \end{matrix} \right) \quad (10)$$

$$TC(cost) = \sum_{t=1}^T \left(\begin{matrix} Z_{CHP}(t) + Z_{CB}(t) + Z_{WT}(t) + Z_{MT}(t) \\ + Z_{EHP}(t) + Z_F(t) + Z_{Boiler}(t) + Z_G(t) \\ + Z_W(t) + Z_{ESS}(t) + Z_{Buy}(t) - Z_{Sell}(t) \\ + Z_{CCUS}(t) - R_{CCUS}(t) \end{matrix} \right) \quad (11)$$

$$TC(cost) = \sum_{t=1}^T \left(\begin{matrix} Z_{CHP}(t) + Z_{CB}(t) + Z_{WT}(t) + Z_{MT}(t) \\ + Z_{EHP}(t) + Z_F(t) + Z_{Boiler}(t) + Z_G(t) \\ + Z_W(t) + Z_{ESS}(t) + Z_{Buy}(t) - Z_{Sell}(t) \end{matrix} \right) \quad (12)$$

$$TC(cost) = \sum_{t=1}^T \left(\begin{matrix} Z_{CHP}(t) + Z_{CB}(t) + Z_{WT}(t) + Z_{MT}(t) \\ + Z_{EHP}(t) + Z_F(t) + Z_{Boiler}(t) + Z_G(t) \\ + Z_W(t) + Z_{ESS}(t) + Z_{Buy}(t) - Z_{Sell}(t) \\ + Z_{CCUS}(t) - R_{CCUS}(t) \end{matrix} \right) \quad (13)$$

که در روابط فوق:

$$Z_{CHP}(t) = \left(\sum_{t=1}^T \left(\frac{N_{Fuel} \times G_{CHP}(t) \times \phi}{\eta_{CHP}} + Z_{OP-CHP} \times G_{CHP}(t) \times \phi \right) + \right) \quad (14)$$

$$Z_{Boiler}(t) = \left(\sum_{t=1}^T \left(\frac{N_{Fuel} \times G_{Boiler}(t) \times \phi}{\eta_{Boiler}} + Z_{OP-Boiler} \times G_{Boiler}(t) \times \phi \right) + \right) \quad (15)$$

$$Z_{MT}(t) = \left(\sum_{t=1}^T \left(\frac{N_{Fuel} \times G_{MT}(t) \times \varphi}{\eta_{MT}} + Z_{OP-MT} \times G_{MT}(t) \times \varphi \right) + Z_{M-MT} \right) \quad (16)$$

$$Z_F(t) = \left(\sum_{t=1}^T \left(\frac{N_{Fuel} \times G_{Furnace}(t) \times \varphi}{\eta_{ghf}} + Z_{OP-Furnace} \times G_{Furnace}(t) \times \varphi \right) + Z_{M-Furnace} \right) \quad (17)$$

$$Z_{WT}(t) = \sum_{t=1}^T Z_{OP-WT} \times G_{WT}(t) \times \varphi + Z_{CONS-WT} \quad (18)$$

$$Z_{CB}(t) = \sum_{t=1}^T Z_{OP-CB} \times G_{CB}(t) \times \varphi + Z_{CONS-CB} \quad (19)$$

$$Z_{EHP}(t) = \sum_{t=1}^T Z_{OP-EHP} \times G_{EHP}(t) \times \varphi + Z_{CONS-EHP} \quad (20)$$

$$Z_{ESS}(t) = \sum_{t=1}^T Z_{OP-ESS} \times G_{ESS}(t) \times \varphi + Z_{M-ESS} \quad (21)$$

$$Z_W(t) = \sum_{t=1}^T N_{Water} \times W(t) \times \varphi \quad (22)$$

$$Z_G(t) = \sum_{t=1}^T N_{Fuel} \times G_5(t) \times \varphi \quad (23)$$

$$Z_{Buy}(t) = \sum_{t=1}^T Z_{Buy} \times P_{Buy}(t) \times \varphi \quad (24)$$

$$Z_{Sell}(t) = \sum_{t=1}^T Z_{Sell} \times P_{Sell}(t) \times \varphi \quad (25)$$

هزینه کلی واحد برق و حرارت، دیگ بخار، میکرو توربین، کوره، توربین بادی، چیلر بویلر، پمپ حرارتی-الکتریکی^{۳۲} (EHP)، ذخیره‌ساز، آب مصرفی و گاز مصرفی به ترتیب توسط رابطه‌های (۱۴) الی (۲۳) بیان شده است. اولین عبارت در رابطه‌های (۱۴) الی (۱۷) به ترتیب هزینه سوخت واحد برق و حرارت، دیگ بخار، میکرو توربین و کوره را نشان می‌دهد. هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری این واحدها با عبارت‌های دوم و سوم در روابط نشان داده شده است. هزینه بهره‌برداری و هزینه ثابت توربین بادی، چیلر بویلر و پمپ حرارتی-الکتریکی به ترتیب توسط رابطه‌های (۱۸) الی (۲۰) مشخص شده است. هزینه بهره‌برداری و نگهداری ذخیره‌ساز الکتریکی توسط رابطه (۲۱) ارائه شده است. رابطه‌های (۲۲) و (۲۳) هزینه قبض پرداختی را برای مصرف‌کنندگان محاسبه می‌نمایند و باید در هزینه کلی هاب مفروض شرکت داده شود. هزینه‌های خرید و فروش برق به شبکه بالادستی توسط رابطه‌های (۲۴) و (۲۵) محاسبه می‌گردد.

۲-۳- تابع هدف مرتبط با آلودگی کلی هاب انرژی تحت مطالعه

آلودگی کلی که توسط آلاینده‌های گوناگون محیطی (کربن دی‌اکسید، گوگرد دی‌اکسید^{۳۳} و ...) منتشر شده توسط عناصر تولیدی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی موجود در هاب پیشنهادی (واحد برق و حرارت، میکرو توربین، کوره، به بویلر و شبکه اصلی)، تولید می‌گردند، توسط رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود:

$$TP(\text{Emission}) = \sum_{t=1}^T (\text{Con}_{CHP}(t) + \text{Con}_{MT}(t) + \text{Con}_{Furnace}(t) + \text{Con}_{Boiler}(t) + \text{Con}_{MG}(t)) \quad (26)$$

که در آن:

$$\text{Con}_{CHP}(t) = \sum_{t=1}^T G_{CHP}(t) \times \text{EMF}_{CHP} \times \varphi \quad (27)$$

$$\text{Con}_{MT}(t) = \sum_{t=1}^T G_{MT}(t) \times \text{EMF}_{MT} \times \varphi \quad (28)$$

$$\text{Con}_{Furnace}(t) = \sum_{t=1}^T G_{Furnace}(t) \times \text{EMF}_{Furnace} \times \varphi \quad (29)$$

$$\text{Con}_{Boiler}(t) = \sum_{t=1}^T G_{Boiler}(t) \times \text{EMF}_{Boiler} \times \varphi \quad (30)$$

$$\text{Con}_{MG}(t) = \sum_{t=1}^T P_{Buy}(t) \times \text{EMF}_{MG} \times \varphi \quad (31)$$

میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط واحدهای برق و حرارت، میکرو توربین، کوره، بویلر و شبکه اصلی توسط رابطه‌های (۲۷) الی (۳۱) بیان می‌گردد.

۳-۳- قیود و محدودیت‌های هاب انرژی تحت مطالعه

بهینه‌سازی و مدیریت بهینه زمانی معنا پیدا می‌کند که ساختار پیشنهادی مورد بحث بتواند تحت شرایط و رویدادهای تعریف شده کار نماید، به عبارت دیگر سیستم مورد مطالعه باید تحت محدودیت‌ها و قیود خاصی بهینه‌سازی گردد تا به درستی کار کند و نتایج مورد نظر برنامه‌ریزان را تحقق ببخشد. بر این اساس، در ادامه محدودیت‌هایی که قسمت‌های مختلف سیستم تحت مطالعه را از تولید تا انتقال و توزیع پوشش می‌دهد، مورد بحث قرار گرفته است:

$$\left\{ \sum_{t=1}^T D_E(t) = \sum_{t=1}^T (A^{Wind} \times G_{WT}(t) + A^{Net} \times G_{MG}(t) + A^{MT} \times G_{MT}(t) + A^{CHP} \times G_{CHP}(t) - P_{Sell}(t) - E_3(t)) \right\} \quad (32)$$

$$\left\{ \sum_{t=1}^T D_H(t) = \sum_{t=1}^T (A^{CHP} \times RF_{CHP} \times G_{CHP}(t) + A^{Boiler} \times G_{Boiler}(t) + A^{Furnace} \times G_{Furnace}(t) + A^{EHP} \times COP \times G_{EHP}(t)) \right\} \quad (33)$$

$$\left\{ \sum_{t=1}^T D_C(t) = \sum_{t=1}^T (A^{CB} \times G_{CB}(t) + A^{EHP} \times G_{EHP}(t)) \right\} \quad (34)$$

$$\left\{ \sum_{t=1}^T Water_{LD}(t) = \sum_{t=1}^T (W(t)) \right\} \quad (35)$$

$$\left\{ \sum_{t=1}^T Gas_{LD}(t) = \sum_{t=1}^T (G_s(t)) \right\} \quad (36)$$

$$G_{CHP} \leq G_{CHP}^{max} \quad (37)$$

$$G_{Boiler} \leq G_{Boiler}^{max} \quad (38)$$

$$G_{MT} \leq G_{MT}^{max} \quad (39)$$

$$G_{Furnace}(t) \leq G_{Furnace}^{max} \quad (40)$$

$$G_{CB}(t) \leq G_{CB}^{max} \quad (41)$$

$$G_{EHP}(t) \leq G_{EHP}^{max} \quad (42)$$

$$C_{EHP}(t) \leq C_{EHP}^{max} \quad (43)$$

$$H_{EHP}(t) \leq H_{EHP}^{max} \quad (44)$$

$$W(t) \leq Water^{max}(t) \quad (45)$$

$$P_{Gas}(t) \leq P_{Gas}^{max} \quad (46)$$

$$P_{Sell}(t) \leq P_{Sell_Line}^{max} \quad (47)$$

$$P_{Buy}(t) \leq P_{Buy_Line}^{max} \quad (48)$$

$$E(t) = E_{Grid}(t) + E_{Wind}(t) \quad (49)$$

$$P_{Buy}(t) = P_{Buy}^{Real-Time}(t) + P_{Buy}^{Day-Ahead}(t) \quad (50)$$

$$G(t) = G_1(t) + G_2(t) + G_3(t) + G_4(t) + G_5(t) \quad (51)$$

$$G_{Furnace}(t) = H_1(t) + H_2(t) \quad (52)$$

$$C_{EHP}(t) + H_{EHP}(t) = E_3(t) \times COP \quad (53)$$

$$H_{EHP}(t) \leq H_{EHP}^{max}(t) \times I_h(t) \quad (54)$$

$$C_{EHP}(t) \leq C_{EHP}^{max}(t) \times I_c(t) \quad (55)$$

$$I_h(t) + I_c(t) \leq 1, \quad \in \{0,1\} \quad (56)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{ESS}(t) / \eta_D^E \leq G_{E-dech}^{max} \quad \text{for disch}(G_{ESS}(t) > 0) \\ -\eta_C^E \times G_{ESS}(t) \leq G_{E-ch}^{max} \quad \text{for ch}(G_{ESS}(t) < 0) \end{array} \right\} \quad (57)$$

$$\left\{ E_{id}^{prim}(t) = \sum_{t=1}^T (\eta_{ee} \times E_2(t) + \eta_{MT} \times A^{MT} \times G_1(t) + \eta_{ge} \times A^{CHP} \times G_2(t) - P_{Sell}(t) - E_3(t) + P_{ES}(t)) \right\} \quad (58)$$

$$\sum_{t=1}^T \text{Shifted_Load}(t) = -DR_{\text{factor}}^{\text{off}} \times E_{\text{ld}}(t) \quad (59)$$

$$DR_{\text{factor}}^{\text{Min}} \leq DR_{\text{factor}} \leq DR_{\text{factor}}^{\text{Max}} \quad (60)$$

معادله‌های (۳۲) الی (۳۶) به ترتیب محدودیت قیود تعادل و برابری توان را برای دیماند الکتریکی، حرارتی، سرمایش، گاز و آب بیان می‌کنند. وجود این محدودیت اجتناب‌ناپذیر است تا به این وسیله اطمینان حاصل گردد که هاب مورد مطالعه به درستی کار می‌کند و قابلیت اطمینان کل شبکه در نظر گرفته می‌شود. حداکثر محدودیت توان تولیدی واحدهای مختلف و همچنین خطوط انتقال خرید و فروش توسط رابطه‌های (۳۷) الی (۴۸) ارائه شده است. به طور دقیق، حداکثر ظرفیت تولیدی خروجی واحد برق و حرارت توسط رابطه (۳۷)، بویلر توسط رابطه (۳۸)، میکرو توربین توسط رابطه (۳۹)، کوره توسط رابطه (۴۰)، چیلر بویلر توسط رابطه (۴۱)، پمپ حرارتی-الکتریکی توسط رابطه (۴۲)، توان سرمایشی پمپ حرارتی-الکتریکی توسط رابطه (۴۳) و توان حرارتی پمپ حرارتی-الکتریکی توسط رابطه (۴۴) بیان شده است. در ادامه، حداکثر مقدار حجم، آب و گازی که شبکه بالادستی می‌تواند به هاب برساند به ترتیب توسط رابطه‌های (۴۵) و (۴۶) تعیین می‌شود. علاوه بر این، حداکثر توان مبادله‌ای خطوط انتقال برای خرید یا فروش توان از/ به شبکه بالادست، به ترتیب توسط رابطه‌های (۴۷) و (۴۸) ارائه گردیده است. در ادامه توضیحات مربوط به روابط قیود و محدودیت‌های مسئله، رابطه (۴۹) مرتبط با جمع توان خروجی توربین بادی و میزان توان خریداری شده از شبکه اصلی است. رابطه (۵۰) میزان توان خریداری شده از شبکه بالادست را نشان می‌دهد که شامل میزان توان خریداری شده از بازار در زمان واقعی و نیز بازار روز بعد (پیش رو) است. رابطه (۵۱) بیان می‌کند که مجموع گازی که توسط تمام تجهیزات برای تولید برق مصرف می‌شود باید برابر مقدار گاز ورودی به هاب مورد مطالعه باشد (معادل بودن گاز ورودی به هاب و گاز مصرفی). برابری توان خروجی حرارتی کوره توسط رابطه (۵۲) مشخص گردیده است. به طور مشابه، برابری توان خروجی سرمایی و حرارتی پمپ حرارتی-الکتریکی توسط رابطه (۵۳) نشان داده شده است. معادله‌های (۵۴) الی (۵۶) مربوط به حالت‌های مختلف کاری پمپ حرارتی-الکتریکی است و عملکرد این تجهیز توسط آن‌ها کنترل می‌گردد، به طوری که می‌تواند در هر زمان فقط در یک حالت (سرمایش یا گرمایش) توان مورد نیاز مصرف‌کنندگان را تولید و تأمین نماید. محدودیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی توسط رابطه (۵۷) محاسبه و تعیین می‌گردد. رابطه‌های (۵۸) الی (۶۰) مربوط به برنامه‌ریزی پاسخ‌گویی بار است، به طوری که رابطه (۵۸)، قید برابری تولید و تقاضا را در حالتی که برنامه پاسخ-گویی زمان استفاده در نظر گرفته شده است بیان می‌دارد. همچنین قیود (۵۹) و (۶۰) به ترتیب، میزان بار مجاز قابل انتقال در بازه‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد و تعیین می‌نماید.

۴- روش و نحوه حل مسئله

همواره در مسائل مدیریت انرژی و برنامه‌ریزی در هاب‌های انرژی، برنامه‌ریزان به دنبال تحقق اهداف گوناگونی هستند، از این رو در پاره‌ای از مقاله‌ها یک تابع هدف و در پاره‌ای دیگر چندین تابع هدف باید به منظور تحقق هدفی خاص بیشینه و یا کمینه گردند. در همین راستا، انتخاب نوع روش حل و تکنیک بهینه‌سازی برای حل این‌گونه مسائل به عامل‌های مختلفی بستگی دارد. در این مقاله هدف، حداقل‌سازی مقادیر هزینه و آلودگی زیست‌محیطی به طور هم‌زمان است. از همین رو، روش محدودیت قیود اپسیلون به همراه تکنیک رضایت‌بخشی فازی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش که می‌توان استفاده وسیع آن را در مقاله‌ها مشاهده نمود، یک حل‌کننده قدرتمند برای حل مسائل چندهدفه است. دلیل استقبال و استفاده زیاد از این نوع روش، مزیت‌های متنوع و متعددی است که دارا است که می‌توان به تغییر ناحیه عملی اولیه، تولید راه‌حل‌های کارآمد و نیز عدم وابستگی به مقیاس و اندازه توابع هدف اشاره نمود [۹،۴۰].

۴-۱- روش قیود اپسیلون و رضایت بخشی فازی

در روش محدودیت قیود اپسیلون، یکی از توابع هدف به عنوان تابع اصلی بهینه می‌گردد در حالی که تابع یا توابع دیگر به عنوان قید برای تابع هدف اولیه در نظر گرفته می‌شود. این مورد توسط رابطه (۶۱) در زیر نشان داده شده است:

$$\begin{aligned}
 & \max OF_1(x) \\
 & \text{s.t.} \\
 & OF_2(x) \geq \varepsilon_2 \\
 & OF_3(x) \geq \varepsilon_3 \\
 & \dots\dots\dots \\
 & OF_k(x) \geq \varepsilon_k \\
 & x \in S
 \end{aligned} \tag{۶۱}$$

که در آن x بردار متغیرهای تصمیم‌گیری نامیده می‌شود و S به‌عنوان منطقه امکان‌پذیر^{۳۵} شناخته می‌شود [۴۱]. در ادامه و با استفاده از روش رضایت‌بخشی فازی و به‌منظور انتخاب بهترین راه‌حل از میان راه‌حل‌های مجموعه جواب‌های پارتو به این‌صورت عمل می‌گردد. مطابق رابطه (۶۲)، در این روش، عضو x_c در تابعی مانند $\mu^{fk}(X_c)$ به‌عنوان راه‌حل در مجموعه جواب‌های پارتو در نظر گرفته خواهد شد. مقدار عنوان‌شده میزان موفقیت تابع را در به حداقل رساندن تابع هدف نشان می‌دهد و از ۰ تا ۱ متغیر خواهد بود. شکل (۲) نمونه‌ای از این مجموعه جواب‌ها را به‌صورت کلی مشخص کرده است.

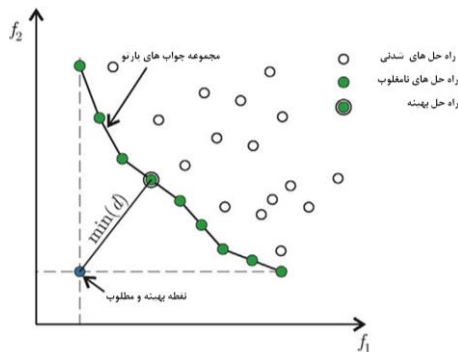
$$\mu^{fk}(X_c) = \begin{cases} 0 & \text{Otherwise} \\ \frac{f_k^{\max} - f_k(X_c)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} & f_k^{\min} \leq f_k(X_c) \leq f_k^{\max} \end{cases} \tag{۶۲}$$

در آخر، باید حداقل رضایت حداکثر گردد و یا حداکثر نارضایتی به حداقل برسد، درنهایت، بهینه‌ترین پاسخ از میان مجموعه پاسخ‌های موجود توسط رابطه (۶۳) محاسبه و مشخص می‌گردد [۴۲، ۸].

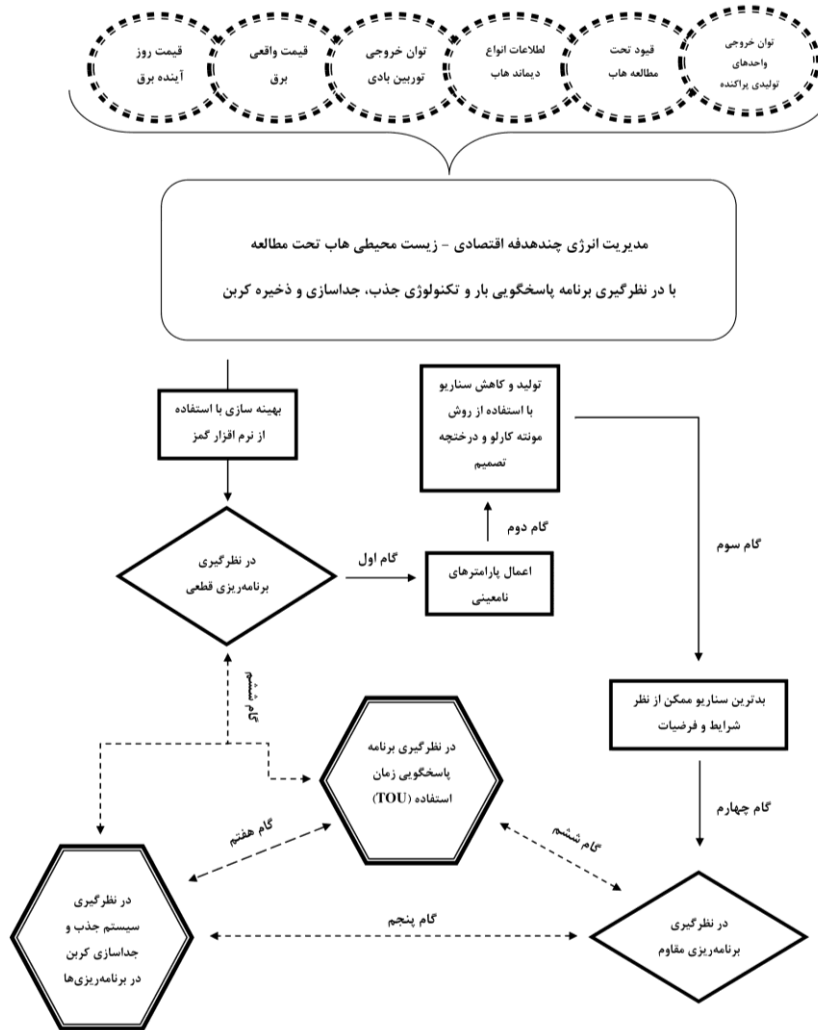
$$\max_{c=1:11} (\min_{k=1:2} \mu^{fk}(X_c)) \tag{۶۳}$$

۴-۲- روش تولید سناریو و انتخاب آن برای برنامه‌ریزی مقاوم

در این مقاله توان خروجی توربین بادی و همچنین قیمت انرژی در زمان واقعی به‌عنوان پارامترهای نامعلوم و نامعین در نظر گرفته شده‌اند. برای مدل‌سازی این پارامترها در برنامه‌ریزی مقاوم، از روش تولید و کاهش سناریو استفاده شده است. نرخ انحراف استاندارد برای پارامترهای نامعینی برابر ۳۰ درصد از مقدار حقیقی و قطعی آن‌ها فرض گردیده است. در ابتدا، فرض بر این است که این پارامترهای نامعین، دارای توزیع احتمال پیوسته هستند. سپس، این توابع احتمال پیوسته به تعداد N گام و پله مجزا تقسیم می‌شوند. در این حالت، اگر تعداد k پارامتر نامعین وجود داشته باشد و هر پارامتر توسط M_m پله (تبدیل تابع احتمال پیوسته به احتمال گسسته) تخمین زده شود، تعداد $N_{n(A \times M_m)}$ سناریو به‌دست خواهد آمد که در آن A_a فاصله‌ها و بازه‌های زمانی را نشان می‌دهد. در روش کاهش سناریو، سناریوهای تنگاتنگ و نزدیک به یکدیگر از دیدگاه پارامترهای احتمالی (فاصله بین سناریوها) ترکیب و ادغام می‌گردند. این عمل دقت بهینه‌سازی را کاهش می‌دهد، اما در مقابل زمان مورد نیاز برای شبیه‌سازی را به میزان قابل توجه کاهش می‌دهد [۴۴، ۳۷]. در برنامه‌ریزی مقاوم، بدترین سناریویی که امکان وقوع را داراست، انتخاب می‌گردد، (بدترین شرایط برای پارامترهای نامعین) در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۳) فلوچارت کلی برنامه‌ریزی صورت گرفته مقاله، به‌منظور درک بهتر ارائه گردیده است.



شکل (۲): مجموعه جواب پارتو و انتخاب بهترین جواب با استفاده از روش رضایت‌بخشی فازی [۴۳]
 Figure (2): The Pareto front responses and choosing the best answer using the fuzzy satisfying approach [43]



شکل (۳): فلوچارت کلی برنامه ریزی پیشنهادی
Figure (3): The overall flowchart of the proposed planning

۵- هاب پیشنهادی تحت مطالعه

هاب تحت مطالعه شامل عناصر و واحدهای تولیدی گوناگونی مانند واحد تولیدی برق و حرارت، بویلر، میکرو توربین، توربین بادی، ذخیره سازهای الکتریکی، ترانسفورماتور، چیلر بویلر، کوره و پمپ حرارتی-الکتریکی است. سیستم تحت مطالعه توانایی خرید و یا فروش توان از/ به شبکه بالادست را داراست. تبادل توان با شبکه بالادست به دو طریق بازار واقعی و بازار روز بعد (پیش رو) امکان پذیر است که این دو در قیمت با یکدیگر تفاوت دارند. این شبکه هاب، حامل های انرژی گوناگونی را در ورودی و خروجی پشتیبانی و تأمین می نماید، به طوری که در ورودی آب و الکتریسیته و گاز را دریافت می کند. پس از تبدیل، ذخیره و انتقال، حامل های انرژی متشکل از الکتریسیته، آب، گاز، انرژی حرارتی و انرژی سرمایی در خروجی قابل دست یابی و حصول است. نمایی کلی از هاب تحت مطالعه و اجزای آن به صورت کلی در شکل (۴) نشان داده شده است. به منظور افزایش دقت و اعتبار نتایج، برنامه ریزی ساعت به ساعت در نظر گرفته شده است (۲۴ ساعت شبانه روز). شایان ذکر است که بدترین سناریو از لحاظ درصد امکان وقوع به منظور استفاده در برنامه ریزی مقاوم در نظر گرفته شده است، به عبارت دیگر بدترین مقادیر ممکن پارامترهای نامعین سیستم که می تواند سبب گردد که هاب مورد مطالعه در بدترین وضعیت خود قرار گیرد. هزینه گاز، هزینه آب، ضرایب راندمانی ادوات واحد برق و حرارت و پمپ حرارتی-الکتریکی، حد بیشینه توان قابل انتقال خطوط انتقال، هزینه های نصب و بهره برداری سیستم جذب گرین، همچنین سود حاصله از این سیستم به ازای هر کیلوگرم گرین دی اکسید جذب شده، به ترتیب برابر مقادیر ۳۵ دلار بر مگاوات ساعت، ۴ دلار بر مگاوات ساعت، ۱/۳، ۲/۵، ۱۵۰۰ کیلووات، ۴۰۰

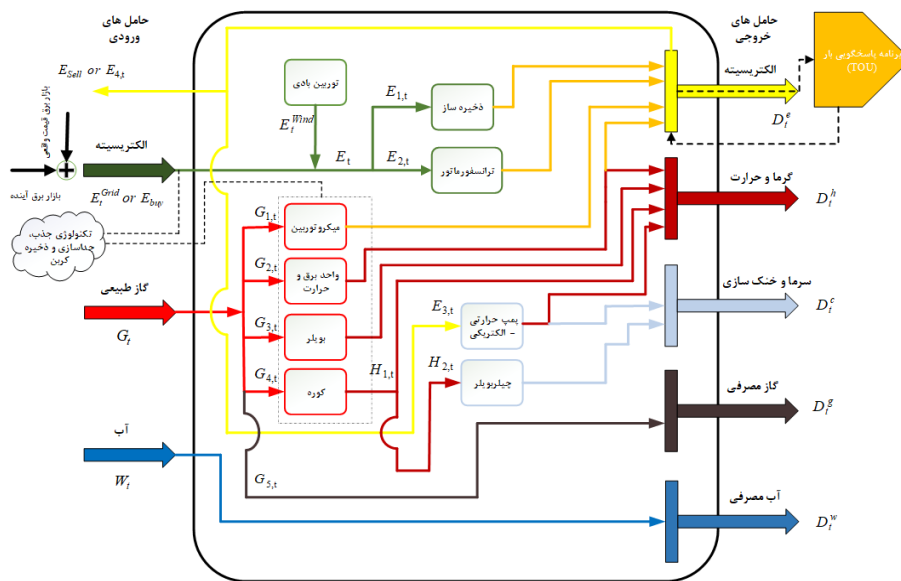
کیلووات، ۱۵ دلار بر مگاوات ساعت و ۲۰ دلار بر مگاوات ساعت، در نظر گرفته شده است، همچنین در برنامه پاسخ‌گویی بار فرض شده است که ۳۰ درصد از کل بارها قابلیت جابه‌جایی دارند و همچنین ۵ درصد از کل بارها قابلیت خاموشی را دارا هستند. اطلاعات بیشتر در مورد مقدار دیماندهای الکتریکی، سرمایه‌ی، حرارتی و ... توان خروجی توربین بادی، قیمت واقعی و قیمت روز بعد الکتریسیته، میزان آلاینده‌ی تجهیزات گوناگون و سایر اطلاعات مربوطه در مرجع‌های [۳۶] و [۴۵] آورده شده است. همچنین اطلاعات مربوط به حداقل و حداکثر ظرفیت واحدها و نیز داده‌های شبکه مورد بررسی در پیوست موجود در انتهای مقاله ارائه گردیده است.

۶- نتایج بهینه‌سازی و ارزیابی سناریوها

در این قسمت، نتایج برنامه‌ریزی‌های گوناگون انجام گرفته در مورد هاب تحت مطالعه آورده شده است. در ابتدا و در سناریو اول، هیچ‌یک از سیستم‌های جذب کربن و برنامه پاسخ‌گویی بار لحاظ نشده است. در سناریو دوم، به بررسی تأثیر فناوری جذب و ذخیره‌سازی کربن در توابع هدف و نیز هاب انرژی پیشنهادی پرداخته شده است. شایان ذکر است در این سناریو برنامه‌های پاسخ‌گویی بار اعمال نگردیده است. در سناریو سوم تنها به بررسی تأثیر و نقش برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر توابع هدف و نیز پروفیل بار توجه شده، به عبارت دیگر در این سناریو، فناوری جذب کربن لحاظ نشده است. در آخر و در سناریو ۴، فناوری جذب کربن در کنار برنامه پاسخ‌گویی بار به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده‌اند تا میزان تأثیر این دو عنصر بر توابع هدف به‌طور هم‌زمان بررسی و نتایج حاصله تحلیل گردد.

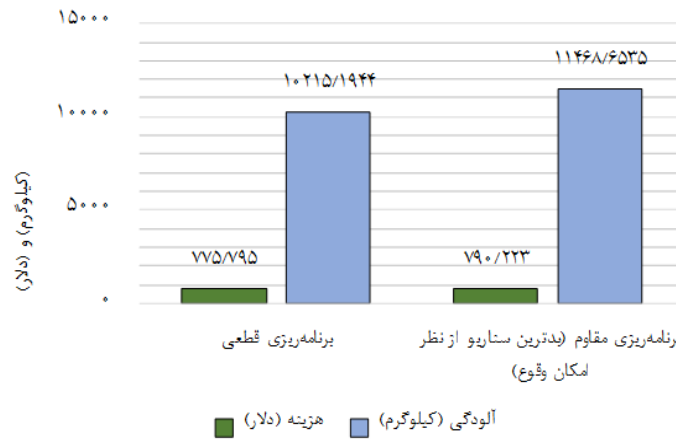
۱-۶- برنامه‌ریزی هاب بدون مشارکت فناوری جذب کربن و برنامه پاسخ‌گویی بار (سناریو اول)

در این بخش، یک بهینه‌سازی چندهدفه برای یک سیستم هاب انرژی چند حمله با در نظرگیری برنامه‌ریزی قطعی و مقاوم انجام گرفته است. همان‌طوری که در شکل (۵) نشان داده شده است، هزینه و آلودگی کلی منتشر شده در برنامه‌ریزی قطعی هاب تحت مطالعه، به ترتیب برابر ۷۷۵/۸ دلار و ۱۰۲۱۵/۲ کیلوگرم و برای برنامه‌ریزی مقاوم به ترتیب ۷۹۰/۳ دلار و ۱۱۴۶۸/۷ کیلوگرم به‌دست آمده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شده بود، در برنامه‌ریزی مقاوم، بدترین سناریو انتخاب و در نظر گرفته شده است، بنابراین هزینه و آلودگی کلی در این طرح، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشتر از مابقی برنامه‌ریزی‌ها بود. از آنجاکه اولویت بهره‌بردار و محققین در بهینه‌سازی، تابع هزینه در نظر گرفته شده، افزایش مقادیر به‌دست آمده خود را بیشتر در تابع هزینه نشان داده‌اند.



شکل (۴): نمای کلی از هاب پیشنهادی

Figure (4): The overall scheme of the proposed hub

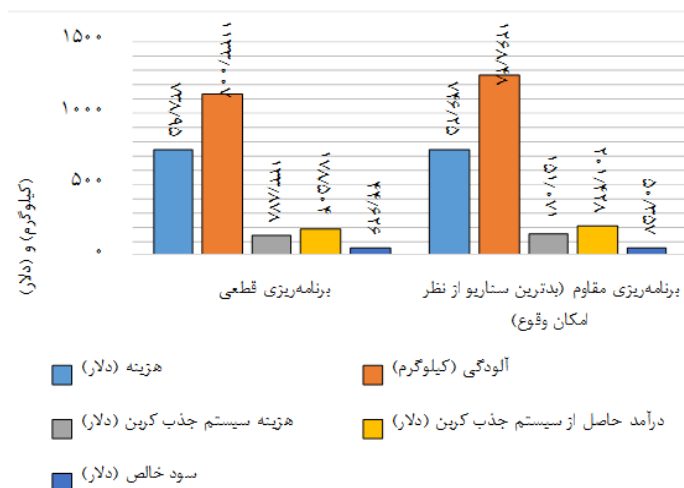


شکل (۵): نتایج حاصل از بهینه سازی چندهدفه در هاب با در نظرگیری برنامه ریزی های گوناگون
Figure (5): The results of the multi-objective optimization of the hub with considering various plannings

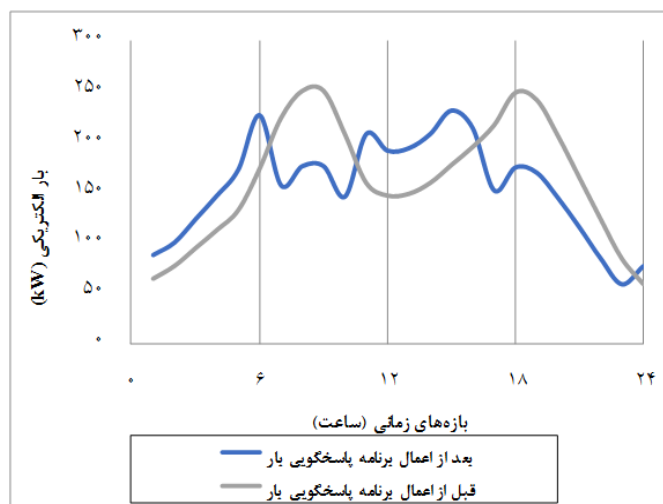
بر این اساس، در برنامه ریزی مقاوم آلودگی و هزینه روند افزایشی در حدود ۱۲/۳ درصد و ۱/۹ درصد را تجربه کرده اند. این افزایش در توابع هدف به دلیل در نظر گرفتن بدترین سناریو است، به عبارت دیگر توان تولیدی توربین بادی در کمترین مقدار و هزینه خرید انرژی (بازار زمان واقعی) در بالاترین مقدار آن از بین سناریوهای موجود برای همه بازه های زمانی انتخاب گردیده است.

۲-۶- برنامه ریزی هاب با مشارکت فناوری جذب کربن و بدون در نظرگیری برنامه پاسخگویی بار (سناریو دوم)
در این قسمت، به تأثیر استفاده از سیستم جذب کربن در هاب پرداخته شده است. شکل (۶) تأثیر استفاده از این نوع سیستم ها بر انواع برنامه ریزی و توابع هدف را نشان می دهد. بر اساس این نتایج، هزینه و آلودگی کلی زیست محیطی برای برنامه ریزی مقطعی به ترتیب ۷۳۸/۹۵ دلار و ۱۱۳۳ کیلوگرم و برای برنامه ریزی مقاوم، این مقادیر به ترتیب برابر ۷۴۶/۲۵ دلار و ۱۲۶۸/۵ کیلوگرم به دست آمده است. در مقایسه با مقادیر موجود در سناریو ۱ بدیهی است که هزینه و آلودگی کلی هاب مفروض به میزان قابل توجه کاهش یافته و حضور این سیستم نقش پررنگ و مثبتی داشته است، بنابراین، در برنامه ریزی مقطعی ۴/۷۵ درصد کاهش در هزینه ها و ۸۸/۹ درصد کاهش در آلودگی حاصل شده است. برای برنامه ریزی مقاوم، این مقادیر به ترتیب بیانگر ۵/۵۷ درصد کاهش در هزینه و ۸۸/۹۴ درصد کاهش در آلودگی بوده است. همان طور که انتظار می رفت، این سیستم عمدتاً تأثیر خود را بر تابع هدف آلودگی نشان می دهد. در کنار تمام این مزایا این سیستم سودآور بوده، به طوری که سود خالص به دست آمده در برنامه ریزی مقطعی و مقاوم به ترتیب معادل ۴۴/۶۳ دلار و ۵۰/۳۵۷ دلار برای هاب مورد نظر حساب و منظور شده است. دلیل میزان سود بیشتر در برنامه ریزی مقاوم در مقایسه با نوع مقطعی، میزان انتشار آلودگی بیشتر هاب در این برنامه ریزی خاص بوده است (به دلیل در نظرگیری بدترین سناریو احتمالی).

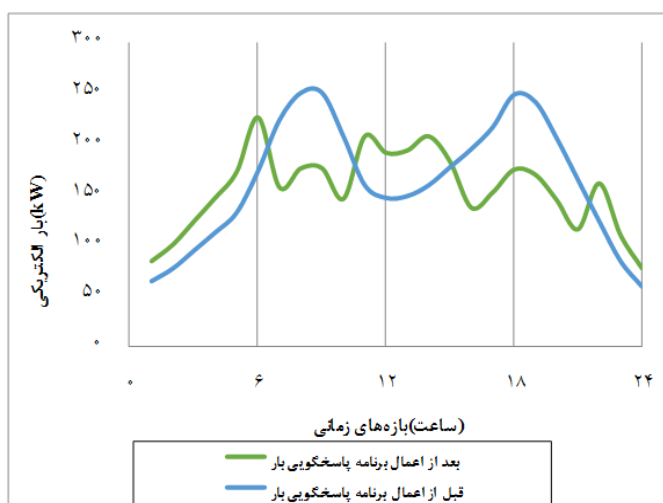
۳-۶- برنامه ریزی هاب بدون مشارکت فناوری جذب کربن و با در نظرگیری برنامه پاسخگویی بار (سناریو سوم)
در این بخش توجه نویسندگان به بررسی تأثیر استفاده از برنامه های پاسخگویی بار، به طور ویژه زمان استفاده (TOU)، معطوف گردیده است. همان طوری که در شکل های (۷) و (۸) نشان داده شده، برنامه پاسخگویی بار تأثیر مثبتی بر روی شکل منحنی بار هاب تحت مطالعه داشته، به طوری که فاصله بین دره و قله موج با استفاده از این برنامه، کمتر از حالت منحنی بار در حالت بدون در نظرگیری این برنامه ها بوده است، همچنین نتایج عددی به دست آمده با در نظرگیری این سناریو در شکل (۹) ارائه شده است. با توجه به این مقادیر مشاهده می گردد که هزینه کلی هاب پیشنهادی به ترتیب برای برنامه ریزی مقطعی و مقاوم از مقدار ۷۷۵/۷۹۵ دلار و ۷۹۰/۲۲۳ دلار به مقدار ۷۷۶/۹۵۲ دلار و ۷۹۰/۲۷۲ دلار رسیده است.



شکل (۶): نتایج بهینه‌سازی چندهدفه با در نظرگیری برنامه‌ریزی‌های گوناگون و با اعمال فناوری جذب کربن
 Figure (6): The results of the multi-objective optimization with considering various plannings and implementing CCUS technology



شکل (۷): تغییرات بارهای الکتریکی موجود در هاب با در نظرگیری برنامه‌ریزی قطعی بعد از اعمال برنامه پاسخگویی بار
 Figure (7): The variation in the hub's electrical demand with considering deterministic planning after the implementation of DR programs

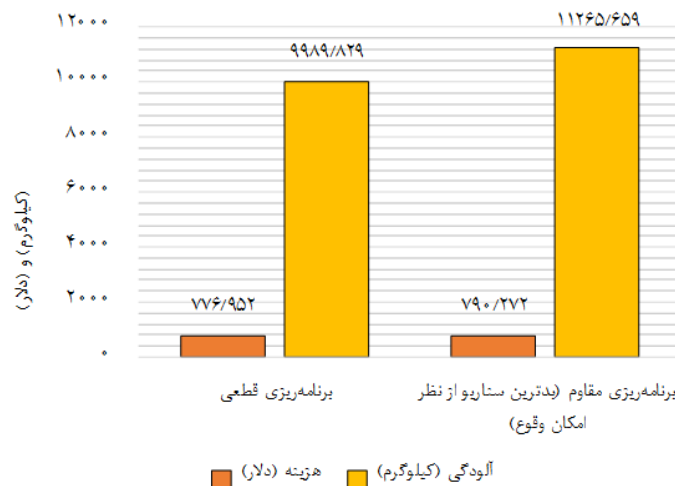


شکل (۸): تغییرات بارهای الکتریکی موجود در هاب با در نظرگیری برنامه‌ریزی مقاوم بعد از اعمال برنامه پاسخگویی بار
 Figure (8): The variation in the hub's electrical demand with considering robust planning after the implementation of DR programs

همان طوری که مشخص است، هزینه در مقایسه باحالت نامی به مقدار ناچیزی، افزایش نسبی را تجربه کرده است، اما باید دقت نمود که آلودگی در این حالت و با استفاده از برنامه پاسخگویی بار به میزان چشمگیری کاهش پیدا نموده به طوری که به ترتیب از مقدار ۱۰۲۱۵/۱۹۴۴ کیلوگرم و ۱۱۴۶۸/۶۵۳۵ کیلوگرم برای برنامه ریزی های قطعی و مقاوم به مقدار ۹۹۸۹/۸۲۹ کیلوگرم و ۱۱۲۶۵/۶۵۹ کیلوگرم، با استفاده از برنامه کنترل و پاسخگویی بار رسیده است. دلیل این کاهش، تغییر و جابه جایی بارها و انتقال آن ها به سایر بازه های زمانی بوده است، به طوری که واحدهای تولیدکننده توان به دلیل کاهش توان تولیدی خود که ناشی از انتقال بارها به سایر بازه های زمانی بوده، کاهش آلودگی منتشرشده را منجر شده اند و درعین حال تأمین مناسب دیمانند نیز حاصل گشته است. برنامه ریزی صورت گرفته نشان داده است که کنترل بار در هاب انرژی متشکل از ساختمان های هوشمند به خوبی توانسته اهداف محققین و نویسندگان را آشکار و اجرا سازد. این نتایج همچنین در مقایسه با نتایج بیان شده در مرجع [۱۰] حاکی از کسب دستاوردی مؤثر و مناسب برای هاب مورد مطالعه بوده است. در جدول (۱)، مقایسه ای بین نتایج سناریوهای اول، دوم و سوم از نظر هزینه، سود و درآمد انجام گرفته است.

۴-۶- برنامه ریزی هاب با مشارکت فناوری جذب کربن و برنامه پاسخگویی بار به صورت هم زمان (سناریو چهارم)

در این بخش، تمامی فناوری های مورد استفاده در این مقاله به طور هم زمان به کار گرفته شده تا تأثیر فناوری جذب کربن به عنوان یک فناوری نوین، در کنار سایر راه حل های موجود و پیش روی سیستم های قدرت ادغام و استفاده گردد؛ تا علاوه بر تأمین دیمانند، بهبود و مسطح کردن منحنی بار، افزایش قابلیت اطمینان، کاهش آلودگی و کسب حداکثر سود، برای هاب حاصل گردد. با توجه به نتایج حاصله که در شکل (۱۰) نیز نشان داده شده و مقایسه آن با شکل های (۵) و (۶)، مشاهده می گردد که مقدار آلودگی در هر ۲ برنامه ریزی مفروض کاهش پیدا کرده است. در مقابل نیز، هزینه و سود حاصل از نصب فناوری جذب کربن کم شده است، دلیل آن نیز انتقال بارها به سایر بازه های زمانی است، به طوری که با کاهش توان تولیدی واحدهای منتشرکننده آلودگی، سیستم جذب کربن نیز نسبت به حالت های قبل (سناریو ۲) کم فعالیت تر بوده است.



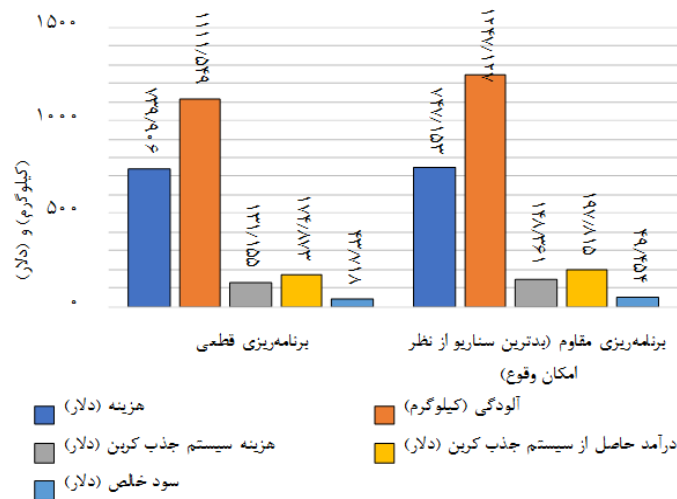
شکل (۹): نتایج بهینه سازی چندهدفه با در نظرگیری برنامه پاسخگویی بار تحت برنامه ریزی های گوناگون

Figure (9): The results of the multi-objective optimization with considering DR programs under various plannings

Table (1): The cost, revenue, and profit of the proposed hub in the first, second, and third scenarios

جدول (۱): هزینه، درآمد و سود حاصله برای هاب پیشنهادی در سناریوهای اول، دوم و سوم

سناریو سوم	سناریو دوم	سناریو اول	سناریوهای تحت مطالعه
			توابع مورد نظر
۷۷۶/۹۵۲	۷۳۸/۹۵	۷۷۵/۷۹۵	هزینه (دلار)
-۱/۱۵۷	+۱۷۸/۵۰۴	-	درآمد (دلار)
-۱/۱۵۷	+۴۴/۶۲۶	-	سود (دلار)



شکل (۱۰): نتایج بهینه‌سازی چندهدفه با در نظرگیری برنامه پاسخ‌گویی بار و با اعمال فناوری جذب کربن به صورت هم‌زمان
 Figure (10): The results of the multi-objective optimization with considering DR programs and implementing CCUS technology simultaneously

در مقایسه با سناریو ۱، هزینه و آلودگی کلی هاب، کمتر شده، به طوری که هزینه‌ها به ترتیب از مقدار، ۷۷۵/۷۹۵ دلار و ۷۹۰/۲۲۳ دلار برای برنامه‌ریزی مقطعی و مقاوم، به مقادیر ۷۳۹/۹۰۶ دلار و ۷۴۷/۱۵۳ دلار کاهش پیدا نموده است. همچنین از آلودگی‌های منتشر شده نیز به میزان قابل توجه کاسته شده است. در مقایسه با سناریو ۳، کاهش هزینه و آلودگی بیشتری رخ داده است. هزینه‌ها برای برنامه‌ریزی مقطعی و مقاوم به ترتیب از مقدار ۷۷۶/۹۵۲ دلار و ۷۹۰/۲۷۲ دلار به مقادیر ۷۳۹/۹۰۶ دلار و ۷۴۷/۱۵۳ دلار کاهش پیدا کرد. آلودگی کلی نیز در مقایسه با سناریو سوم از مقدار ۹۹۸۹/۸۲۹ کیلوگرم و ۱۱۲۶۵/۶۵۹ کیلوگرم به مقدار ۱۱۱۱/۵۴۹ کیلوگرم و ۱۲۴۷/۱۲۷ کیلوگرم برای هر ۲ برنامه‌ریزی مفروض رسیده است. به صورت کلی نتایج این سناریو بیانگر نقش مثبت و سازنده استفاده از فناوری‌های جذب کربن در کنار برنامه‌های پاسخ‌گویی بار (کنترل بار) بوده است. می‌توان گفت که این سناریو بهترین ترکیب برای نیل به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در هاب تحت مطالعه بوده، به صورتی که بهره‌برداران به تعادلی در کسب سود، کاهش هزینه و آلودگی و استفاده از فناوری‌های جدید رسیده‌اند. در ادامه و به منظور درک بهتر از نتایج به دست آمده، نویسندگان نتایج خود را با مقاله مشابه که توسط ایشان و در مرجع [۱۰] آورده شده است مورد ارزیابی و مقایسه قرار داده‌اند. هزینه و آلودگی در این سناریو و در مقایسه با نتایج به دست آمده از مرجع نام‌برده به ترتیب برای برنامه‌ریزی‌های مقطعی از مقدار ۷۳۸/۹۵ دلار و ۱۱۳۳ کیلوگرم به مقدار ۷۳۹/۹ دلار و ۱۱۱۱/۵۵ کیلوگرم رسیده است. همچنین برای برنامه‌ریزی مقاوم این مقادیر از ۷۴۶/۲۵ دلار و ۱۲۶۸/۴۸ کیلوگرم به مقدار ۷۴۷/۱ دلار و ۱۲۴۷/۱ کیلوگرم رسیده است. دلیل افزایش نسبی کم هزینه، استفاده از برنامه پاسخ‌گویی بار بوده است. این افزایش نسبی سبب کاهش قابل قبول آلودگی منتشر شده هاب مورد مطالعه گردیده است، همچنین سبب گشته تا منحنی بار مورد نظر مسطح گردد که از اهداف برنامه‌ریزان در این مقاله بوده است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، استراتژی مدیریت انرژی و بار شامل یک ارزیابی مبتنی بر سناریو چندهدفه برای مدیریت بهینه انرژی و برنامه‌ریزی مناسب یک هاب انرژی پیشنهادی، تحت مدل‌های مختلف برنامه‌ریزی در نظر گرفته شد. این برنامه‌ریزی شامل مدل‌های مقطعی و مقاوم بود. برنامه‌ریزی مقاوم با در نظرگیری عوامل نامعینی شامل پارامترهای قیمت انرژی در زمان واقعی و توان خروجی توربین بادی فرض شده بوده است. واحدهای تولیدی مختلفی همانند واحد برق و حرارت، بویلر، کوره، پمپ حرارتی-الکتریکی، چیلر بویلر، توربین بادی، ذخیره‌ساز الکتریکی و میکرو توربین در این برنامه‌ریزی شرکت داده شده‌اند. چندین حامل انرژی مختلف نظیر گاز، الکتریسیته و آب به عنوان ورودی هاب پیشنهادی در نظر گرفته شده بودند. در مقابل،

گاز، الکتریسیته، گرما و حرارت، سرما و خنک‌سازی و آب به‌عنوان حامل‌های خروجی سیستم به‌دست آمد. سیستم جذب، جداسازی و ذخیره کربن به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر برای غلبه بر آلودگی بر روی هاب تحت مطالعه لحاظ گردید. هزینه و آلودگی کلی زیست‌محیطی به‌عنوان توابع هدف چندگانه در نظر گرفته شد که باید به‌طور هم‌زمان به حداقل می‌رسیدند. سرانجام، تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و به‌طور ویژه برنامه زمان استفاده، بر توابع هدف و منحنی بار هاب انرژی برای دست-یابی به هدف نویسندگان که مسئله مدیریت بار بوده است، در نظر گرفته شد. ادغام و ترکیب سیستم‌های جذب و جداسازی کربن و برنامه مدیریت و پاسخ‌گویی بار به‌طور هم‌زمان نیز، به‌منظور درک و تأثیر این نوع از فناوری‌ها بر هاب پیشنهادی از دیگر موضوعاتی بود که در این مقاله به آن پرداخته شد. درنهایت مسئله به‌صورت یک برنامه خطی عدد صحیح ترکیبی مدل شد و با استفاده از روش قیود اپسیلون و روش رضایت‌بخشی فازی حل گردید. شایان ذکر است که برنامه‌ریزی‌های مفروض با استفاده از حل‌کننده سیپلکس در نرم‌افزار گمز حل شدند. شبیه‌سازی‌ها و نتایج به‌دست آمده حاکی از کارآمدی برنامه‌ریزی‌ها و مطالعات مفروض بر توابع هدف و بهبود کلی سیستم پیشنهادی داشتند. به‌طوری‌که با اعمال سیستم جذب و جداسازی کربن و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر توابع هدف، تغییرات چشم‌گیر و مثبتی مشاهده گردید. این برنامه‌ریزی‌ها سبب شد تا هزینه‌ها به‌ترتیب از مقدار ۷۷۶ دلار و ۷۹۱ دلار برای حالت قطعی و مقاوم به مقدار ۷۳۹ دلار و ۷۴۷ دلار برسند، همچنین آلودگی نیز از مقدار ۱۰۲۱۶ کیلوگرم و ۱۱۴۶۹ کیلوگرم برای حالت قطعی و مقاوم به مقدار ۱۱۱۱ کیلوگرم و ۱۲۴۷ کیلوگرم برای حالت‌های ذکرشده کاهش پیدا کردند. درنهایت استفاده از برنامه پاسخ‌گویی بار منحنی بار مصرفی را مسطح نمود و در نتیجه آن قابلیت اطمینان و پایداری شبکه به‌صورت کلی افزایش پیدا نمود.

References

مراجع

- [1] Y. Wang, X. Wang, H. Yu, Y. Huang, H. Dong, C.Y. Qi, N. Baptiste, "Optimal design of integrated energy system considering economics, autonomy and carbon emissions", *Journal of Cleaner Production*, vol. 225, pp. 563-578, July 2019 (doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.025).
- [2] S.M. Moghaddas-Tafreshi, S. Mohseni, M.E. Karami, S. Kelly, "Optimal energy management of a grid-connected multiple energy carrier micro-grid", *Applied Thermal Engineering*, vol. 152, pp. 796-806, Apr. 2019 (doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.113).
- [3] S. Gorji, S. Zamanian, M. Moazzami, "Techno-economic and environmental base approach for optimal energy management of microgrids using crow search algorithm", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 11, no. 43, pp. 49-68, Dec. 2020 (dor: 20.1001.1.23223871.1399.11.43.4.7).
- [4] Y. Li, W. Liang, R. Tan, "Optimal design of installation capacity and operation strategy for distributed energy system", *Applied Thermal Engineering*, vol. 125, pp. 756-766, Oct. 2017 (doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.011).
- [5] H. Rahbarimaghani, "Optimal control of micro-grid (MG) to improve voltage profile including combined heat and power system", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 9, no. 36, pp. 43-50, Mar. 2019 (dor: 20.1001.1.23223871.1397.9.36.5.0).
- [6] M.D.S. Dutra, N. Alguacil, "Optimal residential users coordination via demand response: An exact distributed framework", *Applied Energy*, vol. 279, Article Number: 115851, Dec. 2020 (doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115851).
- [7] M. Zangeneh, E. Aghajari, M. Forouzanfar, "Implementation of smart fuzzy logic strategy to manage energy resources of a residential power system integrating solar energy and storage system using arduino boards", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 13, no. 42, pp. 115-131, June 2022 (dor: 20.1001.1.23223871.1401.13.49.8.7).
- [8] M.A. Jirdehi, M. Shaterabadi, "Incentive programs caused by the carbon capture utilization and storage technology profit's effect: optimal configuration and energy planning of hybrid microgrid involving INVELOX turbine", *Energy Technology*, vol. 8, no. 10, Article Number: 2000398, Oct. 2020 (doi: 10.1002/ente.202000398).
- [9] M.A. Jirdehi, M. Shaterabadi, "A low-carbon strategy using INVELOX turbines in the presence of real-time energy price uncertainty", *Greenhouse Gases: Science and Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 461-482, June 2021 (doi: 10.1002/ghg.2060).
- [10] F. Niazvand, S. Kharrati, F. Khosravi, A. Rastgou, "Scenario-based assessment for optimal planning of multi-carrier hub-energy system under dual uncertainties and various scheduling by considering CCUS

- technology”, Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 46, Article Number: 101300, Aug. 2021 (doi: 10.1016/j.seta.2021.101300).
- [11] M. Miveh, A. Ahmadi, M. Pishvaei, “Design and construction of a water-free cleaning robot for solar panels with the ability to adjust the height”, Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 13, no. 51, pp. 53-73, Dec. 2022 (doi:10.1001.1.23223871.1401.13.51.4.7).
- [12] A. Maroufmashat, A. Elkamel, M. Fowler, S. Sattari, R. Roshandel, A. Hajimiragha, S. Walker, E. Entchev, “Modeling and optimization of a network of energy hubs to improve economic and emission considerations”, Energy, vol. 93, part 2, pp. 2546-2558, Dec. 2015 (doi: 10.1016/j.energy.2015.10.079).
- [13] A. Maroufmashat, S. T. Taqvi, A. Miragha, M. Fowler, A. Elkamel, “Modeling and optimization of energy hubs: A comprehensive review”, Inventions, vol. 4, no. 3, p. 50, Aug. 2019 (doi: 10.3390/inventions403005-0).
- [14] P. Gabrielli, M. Gazzani, E. Martelli, M. Mazzotti, “Optimal design of multi-energy systems with seasonal storage”, Applied Energy, vol. 219, pp. 408-424, June 2018 (doi: 10.1016/j.apenergy.2017.07.142).
- [15] F. Barati, H. Seifi, M. S. Sepasian, A. Nateghi, M. Shafie-khah, J. P. Catalão, “Multi-period integrated framework of generation, transmission, and natural gas grid expansion planning for large-scale systems”, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 30, no. 5, pp. 2527-2537, Sep. 2015 (doi: 10.1109/TPWRS.2014.236-5705).
- [16] Y. Hu, Z. Bie, T. Ding, Y. Lin, “An NSGA-II based multi-objective optimization for combined gas and electricity network expansion planning”, Applied energy, vol. 167, pp. 280-293, Apr. 2016 (doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.148).
- [17] M. Chaudry, N. Jenkins, M. Qadrdan, J. Wu, “Combined gas and electricity network expansion planning”, Applied Energy, vol. 113, pp. 1171-1187, Jan. 2014 (doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.071).
- [18] B. Odetayo, J. MacCormack, W. Rosehart, H. Zareipour, “A chance constrained programming approach to integrated planning of distributed power generation and natural gas network”, Electric Power Systems Research, vol. 151, pp. 197-207, Oct. 2017 (doi: 10.1016/j.epsr.2017.05.036).
- [19] S. Clegg, P. Mancarella, “Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks”, IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 6, no. 4, pp. 1234-1244, Oct. 2015 (doi: 10.1109/TSTE.2015.2424885).
- [20] S. Clegg, P. Mancarella, “Storing renewables in the gas network: modelling of power-to-gas seasonal storage flexibility in low-carbon power systems”, IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 10, no. 3, pp. 566-575, Feb. 2016 (doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0439).
- [21] A. Najafi, H. Falaghi, J. Contreras, M. Ramezani, “Medium-term energy hub management subject to electricity price and wind uncertainty”, Applied Energy, vol. 168, pp. 418-433, April 2016 (doi: 10.1016/j.apenergy.2016.01.074).
- [22] A. Sheikhi, S. Bahrami, A.M. Ranjbar, “An autonomous demand response program for electricity and natural gas networks in smart energy hubs”, Energy, vol. 89, pp. 490-499, Sep. 2015 (doi: 10.1016/j.energy.2015.05.109).
- [23] A. Sheikhi, M. Rayati, S. Bahrami, A.M. Ranjbar, S. Sattari, “A cloud computing framework on demand side management game in smart energy hubs”, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 64, pp. 1007-1016, Jan. 2015 (doi: 10.1016/j.ijepes.2014.08.020).
- [24] S. Heinen, D. Burke, M. O'Malley, “Electricity, gas, heat integration via residential hybrid heating technologies—An investment model assessment”, Energy, vol. 109, pp. 906-919, Aug. 2016 (doi: 10.1016/j.energy.2016.04.126).
- [25] R. Niemi, J. Mikkola, P. Lund, “Urban energy systems with smart multi-carrier energy networks and renewable energy generation”, Renewable energy, vol. 48, pp. 524-536, Dec. 2012 (doi: 10.1016/j.renene.2012.05.017).
- [26] A. Dini, S. Pirouzi, M. Norouzi, M. Lehtonen, “Grid-connected energy hubs in the coordinated multi-energy management based on day-ahead market framework”, Energy, vol. 188, Article Number: 116055, Dec. 2019 (doi: 10.1016/j.energy.2019.116055).
- [27] M. Ghorab, “Energy hubs optimization for smart energy network system to minimize economic and environmental impact at canadian community”, Applied Thermal Engineering, vol. 151, pp. 214-230, Mar. 2019 (doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.107).
- [28] A. Najafi-Ghalelou, S. Nojavan, K. Zare, B. Mohammadi-Ivatloo, “Robust scheduling of thermal, cooling and electrical hub energy system under market price uncertainty”, Applied Thermal Engineering, vol. 149, pp. 862-880, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.108).
- [29] S.D. Beigvand, H. Abdi, M. La Scala, “Economic dispatch of multiple energy carriers”, Energy, vol. 138, pp. 861-872, Nov. 2017 (doi: 10.1016/j.energy.2017.07.108).

- [30] B.M. Soudmand, N.N. Esfetanaj, S. Mehdipour, R. Rezaeipour, "Heating hub and power hub models for optimal performance of an industrial consumer", *Energy Conversion and Management*, vol. 150, pp. 425-432, Oct. 2017 (doi: 10.1016/j.enconman.2017.08.037).
- [31] A. Najafi-Ghalelou, K. Zare, S. Nojavan, "Optimal scheduling of multi-smart buildings energy consumption considering power exchange capability", *Sustainable Cities and Society*, vol. 41, pp. 73-85, Aug. 2018 (doi: 10.1016/j.scs.2018.05.029).
- [32] S. Nojavan, M. Majidi, K. Zare, "Optimal scheduling of heating and power hubs under economic and environment issues in the presence of peak load management", *Energy Conversion and Management*, vol. 156, pp. 34-44, Jan. 2018 (doi: 10.1016/j.enconman.2017.11.007).
- [33] M.A. Mirzaei, A.S. Yazdankhah, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Marzband, M. Shafie-khah, J.P. Catalão, "Stochastic network-constrained co-optimization of energy and reserve products in renewable energy integrated power and gas networks with energy storage system", *Journal of Cleaner Production*, vol. 223, pp. 747-758, June 2019 (doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.021).
- [34] R.S. Amano, "Review of wind turbine research in 21st century", *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 139, no. 5, Article Number: 050801, Sep. 2017 (doi: 10.1115/1.4037757).
- [35] F. Porté-Agel, M. Bastankhah, S. Shamsoddin, "Wind-turbine and wind-farm flows: a review", *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 174, no. 1, pp. 1-59, Jan. 2020 (doi: 10.1007/s10546-019-00473-0).
- [36] M. Shaterabadi, M.A. Jirdehi, "Multi-objective stochastic programming energy management for integrated INVELOX turbines in microgrids: A new type of turbines", *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 2754-2769, Jan. 2020 (doi: 10.1016/j.renene.2019.08.002).
- [37] V.S. Tabar, M.A. Jirdehi, R. Hemmati, "Energy management in microgrid based on the multi objective stochastic programming incorporating portable renewable energy resource as demand response option", *Energy*, vol. 118, pp. 827-839, Jan. 2017 (doi: 10.1016/j.energy.2016.10.113).
- [38] V.S. Tabar, M.A. Jirdehi, R. Hemmati, "Sustainable planning of hybrid microgrid towards minimizing environmental pollution, operational cost and frequency fluctuations", *Journal of Cleaner Production*, vol. 203, pp. 1187-1200, Dec. 2018 (doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.059).
- [39] Y. Wang, L. Li, "Time-of-use based electricity demand response for sustainable manufacturing systems", *Energy*, vol. 63, pp. 233-244, Dec. 2013 (doi: 10.1016/j.energy.2013.10.011).
- [40] M. Shaterabadi, M.A. Jirdehi, "Smart scheduling of transmission line switching: optimization of multi-objective microgrid's day-ahead energy scheduling with considering high penetration of green energies and INVELOX", *Electrical Engineering*, vol. 103, pp. 1753-1767, June 2021 (doi: 10.1007/s00202-020-01193-2).
- [41] J. Aghaei, N. Amjady, H.A. Shayanfar, "Multi-objective electricity market clearing considering dynamic security by lexicographic optimization and augmented epsilon constraint method", *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 4, pp. 3846-3858, June 2011 (doi: 10.1016/j.asoc.2011.02.022).
- [42] M. Shaterabadi, M.A. Jirdehi, N. Amiri, S. Omid, "Enhancement the economical and environmental aspects of plus-zero energy buildings integrated with INVELOX turbines", *Renewable Energy*, vol. 153, pp. 1355-1367, June 2020 (doi: 10.1016/j.renene.2020.02.089).
- [43] F. Bre, V.D. Fachinotti, "A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings", *Energy and Buildings*, vol. 154, pp. 283-294, Nov. 2017 (doi: 10.1016/j.enbuild.2017.08.002).
- [44] J. Wang, M. Shahidehpour, Z. Li, "Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1319-1327, Aug. 2008 (doi: 10.1109/TPWRS.2008.926719).
- [45] V. Davatgaran, M. Saniei, S.S. Mortazavi, "Optimal bidding strategy for an energy hub in energy market", *Energy*, vol. 148, pp. 482-493, April 2018 (doi: 10.1016/j.energy.2018.01.174).

ضمیمه

The minimum and maximum unit's generation capacity of the proposed hub.

حداقل و حداکثر ظرفیت تولیدی هر واحد موجود در هاب پیشنهادی.

واحد تولیدی	محدودیت توان برحسب کیلووات	
	حداقل	حداکثر
سیستم‌های برق و حرارت (CHP)	۱۵	۳۰۰
بویلر	۳۰	۶۰۰
کوره	۱۰	۴۲۰
میکرو توربین (MT)	۰	۲۵۰
توربین بادی (WT)	۰	۲۰۰
چیلر بویلر (CB)	۰	۳۵۰
پمپ حرارتی-الکتریکی (EHP)	۰	۳۰۰

The numbers of the generation units of the proposed hub

تعداد ادوات تولیدی موجود در هاب پیشنهادی

واحد تولیدی	تعداد (n)
سیستم‌های برق و حرارت (CHP)	۱
بویلر	۱
کوره	۱
میکرو توربین (MT)	۱
توربین بادی (WT)	۱
چیلر بویلر (CB)	۱
پمپ حرارتی-الکتریکی (EHP)	۲

The cost of the maintenance, fixed, and operation of the generating units of the proposed hub

هزینه تعمیرات، نگهداری و عملکرد واحدهای تولیدی هاب پیشنهادی

واحدهای تولیدی	هزینه برحسب دلار	
	هزینه عملکرد برحسب دلار بر کیلووات	هزینه ثابت و نگهداری تجهیزات برحسب دلار
سیستم‌های برق و حرارت	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵
بویلر	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵
میکرو توربین	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴
کوره	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴
چیلر بویلر	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳
پمپ حرارتی-الکتریکی	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳
توربین بادی	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵

The emission factor of the generation units in the proposed hub and the main grid

ضرایب آلودگی منابع تولیدی هاب پیشنهادی و شبکه اصلی

نوع آلودگی	ضرایب آلودگی برحسب کیلوگرم بر مگا وات ساعت				
	میکروتوربین	بویلر	سیستم‌های برق و حرارت	شبکه	کوره
دی اکسید کربن (CO2)	۰/۷۲۲	۰/۸۴۵	۰/۸۲۲	۰/۹۲۲	۰/۶۵۰
دی اکسید گوگرد (SO2)	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۰۰۸۵	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳
اکسید نیتروژن (NOx)	۰/۲	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۲۳	۰/۰۲

The combined heat and power (CHP) information
اطلاعات مربوط به سیستم‌های برق و حرارت (CHP)

نماد	پارامتر
A^{CHP}	میزان در دسترس‌پذیری تجهیز CHP برحسب (%)
Con_{CHP}	مقدار آلاینده‌گی CHP برحسب (kg)
EMF_{CHP}	ضریب آلاینده‌گی تجهیز CHP برحسب (Kg/MWh)
$G_2(t)$	مقدار گاز طبیعی دریافتی توسط تجهیز CHP برحسب (kWh) در طول بازه زمانی (t)
$G_{CHP}(t)$	میزان توان تولیدی توسط تجهیز CHP برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
G_{CHP}^{max}	ماکزیمم میزان مجاز توان تولیدی توسط تجهیز CHP برحسب (kW)
RF_{CHP}	ضریب تبدیل حرارت به الکتریسیته مربوط به تجهیز CHP
Z_{M-CHP}	هزینه تعمیرات و نگهداری مربوط به تجهیز CHP برحسب (دلار)
Z_{OP-CHP}	هزینه بهره‌برداری مربوط به تجهیز CHP برحسب (دلار / کیلووات ساعت)
$Z_{CHP}(t)$	هزینه کلی مربوط به تجهیز CHP برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)
η_{ge}^{CHP}	ضریب راندمانی تبدیل گاز به الکتریسیته مربوط به تجهیز CHP
η_{gh}^{CHP}	ضریب راندمانی تبدیل گاز به حرارت مربوط به تجهیز CHP

The energy storage systems (ESS) information
اطلاعات مربوط به ذخیره‌سازها (ESS)

نماد	پارامتر
$E_{SS}(t)$	میزان ظرفیت کلی ذخیره‌ساز الکتریکی برحسب (kWh) در طول بازه زمانی (t)
$G_{ESS}(t)$	میزان توان تولیدی توسط تجهیز ذخیره‌ساز برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
E_{SS}^{max}	ماکزیمم توان تولیدی ذخیره‌ساز الکتریکی برحسب (kWh)
E_{SS}^{min}	حداقل توان تولیدی ذخیره‌ساز الکتریکی برحسب (kWh)
G_{E-dech}^{max}	ماکزیمم نرخ مجاز دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
G_{E-ch}^{max}	ماکزیمم نرخ مجاز شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
$Z_{ESS}(t)$	هزینه کلی مربوط به تجهیز ESS برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)
Z_{M-ESS}	هزینه تعمیرات و نگهداری مربوط به تجهیز ESS برحسب (دلار)
Z_{OP-ESS}	هزینه بهره‌برداری مربوط به تجهیز ESS برحسب (دلار / کیلووات ساعت)
η_{EC}	ضریب راندمانی شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی
η_{ED}	ضریب راندمانی دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی

ESS numerical data of the proposed hub
مقادیر ذخیره‌ساز هاب پیشنهادی

پارامتر	$\eta_D^E = \eta_C^E$	E_S^{max}	E_S^{min}	P_{E-ch}^{max}	P_{E-dech}^{max}
مقدار	۰/۹	۴۰۰ کیلووات ساعت	۲۵ کیلووات ساعت	۲۵ کیلووات	۲۵ کیلووات

Time parameters.

پارامترهای زمانی

نماد	پارامتر
t	زمان (h)
φ	معرف بازه زمانی در برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته

The electric heat pump (EHP) information
اطلاعات مربوط به پمپ حرارتی-الکتریکی (EHP)

نماد	پارامتر
A^{EHP}	میزان در دسترس‌پذیری تجهیز EHP برحسب (%)
C_{EHP}^{max}	ماکزیمم توان خنک‌سازی EHP در تولید توان سرمایی برحسب (kW)
$C_{EHP}(t)$	میزان توان سرمایی خروجی تجهیز EHP برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
$E_3(t)$	میزان توان ورودی به تجهیز EHP برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
$G_{EHP}(t)$	میزان توان تولیدی توسط تجهیز EHP برحسب (kW_{heat}) در طول بازه زمانی (t)
H_{EHP}^{max}	ماکزیمم میزان مجاز توان تولیدی توسط تجهیز EHP برحسب (kW_{heat})
$H_{EHP}(t)$	میزان توان حرارتی تجهیز EHP برحسب (kW_{heat}) در طول بازه زمانی (t)
$I_C(t)$	متغیر باینری مربوط به توانایی سرمایی تجهیز EHP در طول بازه زمانی (t)
$I_h(t)$	متغیر باینری مربوط به توانایی حرارتی تجهیز EHP در طول بازه زمانی (t)
$Z_{EHP}(t)$	هزینه کلی مربوط به تجهیز EHP برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)
$Z_{CONS-EHP}$	هزینه ثابت مربوط به تجهیز EHP برحسب (دلار)
Z_{OP-EHP}	هزینه بهره‌برداری مربوط به تجهیز EHP برحسب (دلار / کیلووات ساعت)
COP	ضریب کاری EHP

The wind turbine (WT) information

اطلاعات مربوط به توربین بادی (WT)

نماد	پارامتر
A_{WT}	مساحت سطح توربین بادی برحسب (m^2)
A^{Wind}	میزان در دسترس‌پذیری تجهیز توربین بادی برحسب (%)
$E_{Wind}(t)$	میزان توان تولیدی خروجی کل توسط تجهیز توربین بادی برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
$E(t)$	مجموع توان تولیدی توربین بادی و توان گرفته‌شده از شبکه بالادست برحسب (kW)
$G_{WT}(t)$	میزان توان تولیدی توسط تجهیز توربین بادی برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
V_t	سرعت باد در بازه زمانی (t) برحسب (m/s)
$V^{cut-in-WT}$	حداقل سرعت باد مربوط به تجهیز توربین بادی برحسب (m/s)
$V^{cut-out-WT}$	بیشینه سرعت باد مربوط به تجهیز توربین بادی برحسب (m/s)
η^w	ضریب کاری توربین بادی
G_{WT}^{max}	ماکزیمم میزان مجاز توان تولیدی توسط تجهیز توربین بادی برحسب (kW)
$Z_{WT}(t)$	هزینه کلی مربوط به تجهیز توربین بادی برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)
Z_{OP-WT}	هزینه بهره‌برداری مربوط به تجهیز توربین بادی برحسب (دلار / کیلووات ساعت)
$Z_{CONS-WT}$	هزینه ثابت مربوط به تجهیز توربین بادی برحسب (دلار)
ρ	پارامتر چگالی هوا مربوط به تجهیز توربین بادی برحسب (kg/m^3)

Availability factor of the various equipment

ضرایب در دسترس‌پذیری تجهیزات گوناگون

مقدار (%)	واحد تولیدی مورد نظر
۰/۹۶	A^{CHP}
۰/۹۶	A^{Wind}
۰/۹۹	A^{Net}
۰/۹۹	A^{CB}
۰/۹۸	A^{Boiler}
۰/۹۶	A^{MT}
۰/۹۷	$A^{Furnace}$
۰/۹۸	A^{EHP}

Boiler information
اطلاعات مربوط به بویلر

نماد	پارامتر
A_{Boiler}	میزان در دسترس پذیری تجهیز بویلر برحسب (%)
Con_{Boiler}	مقدار آلاینده‌گی بویلر برحسب (kg)
EMF_{Boiler}	ضریب آلاینده‌گی تجهیز بویلر برحسب (Kg/MWh)
$G_3(t)$	مقدار گاز طبیعی دریافتی توسط تجهیز بویلر برحسب (kWh) در طول بازه زمانی (t)
$G_{Boiler}(t)$	میزان توان تولیدی توسط تجهیز بویلر برحسب (kW_{heat}) در طول بازه زمانی (t)
$G_3(t)$	مقدار گاز طبیعی دریافتی توسط تجهیز بویلر برحسب (kWh) در طول بازه زمانی (t)
G_{Boiler}^{max}	ماکزیمم میزان مجاز توان تولیدی توسط تجهیز بویلر برحسب (kW_{heat})
$Z_{Boiler}(t)$	هزینه کلی مربوط به تجهیز بویلر برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)
$Z_{M-Boiler}$	هزینه تعمیرات و نگهداری مربوط به تجهیز بویلر برحسب (دلار)
$Z_{OP-Boiler}$	هزینه بهره‌برداری مربوط به تجهیز بویلر حسب (دلار / کیلووات ساعت)
η_{Boiler}	ضریب راندمانی تبدیل گاز به حرارت مربوط به تجهیز بویلر

Furnace information
اطلاعات مربوط به کوره

نماد	پارامتر
$A_{Furnace}$	میزان در دسترس پذیری تجهیز کوره برحسب (%)
$Con_{Furnace}$	مقدار آلاینده‌گی کوره برحسب (kg)
$EMF_{Furnace}$	ضریب آلاینده‌گی تجهیز کوره برحسب (Kg/MWh)
$G_4(t)$	مقدار گاز دریافتی توسط تجهیز کوره برحسب (kWh) در طول بازه زمانی (t)
$G_{Furnace}(t)$	میزان توان تولیدی توسط تجهیز کوره برحسب (kW_{heat}) در طول بازه زمانی (t)
$G_{Furnace}^{max}$	ماکزیمم میزان مجاز توان تولیدی توسط تجهیز کوره برحسب (kW_{heat})
$H_1(t)$	میزان توان خروجی حرارتی تجهیز کوره به منظور تأمین دیماندر حرارتی مورد نیاز برحسب (kW_{heat}) در طول بازه زمانی (t)
$Z_F(t)$	هزینه کلی مربوط به تجهیز کوره برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)
$Z_{M-Furnace}$	هزینه تعمیرات و نگهداری مربوط به تجهیز کوره برحسب (دلار)
$Z_{OP-Furnace}$	هزینه بهره‌برداری مربوط به تجهیز کوره برحسب (دلار / کیلووات ساعت)
$\eta_{ghf}^{Furnace}$	ضریب راندمانی تبدیل گاز به حرارت مربوط به تجهیز کوره

Microturbine information
اطلاعات مربوط به میکروتوربین

نماد	پارامتر
A^{MT}	میزان در دسترس پذیری تجهیز میکرو توربین برحسب (%)
Con_{MT}	مقدار آلاینده‌گی میکرو توربین برحسب (kg)
EMF_{MT}	ضریب آلاینده‌گی تجهیز میکرو توربین برحسب (Kg/MWh)
$G_1(t)$	مقدار گاز طبیعی دریافتی توسط تجهیز میکرو توربین برحسب (kWh) در طول بازه زمانی (t)
$G_{MT}(t)$	میزان توان تولیدی توسط تجهیز میکرو توربین برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
G_{MT}^{max}	ماکزیمم میزان مجاز توان تولیدی توسط تجهیز میکرو توربین برحسب (kW)
$Z_{MT}(t)$	هزینه کلی مربوط به تجهیز میکرو توربین برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)
Z_{M-MT}	هزینه تعمیرات و نگهداری مربوط به تجهیز میکرو توربین برحسب (دلار)
Z_{OP-MT}	هزینه بهره‌برداری مربوط به تجهیز میکرو توربین برحسب (دلار / کیلووات ساعت)
η_{MT}	ضریب راندمانی تبدیل گاز به الکتریسیته مربوط به تجهیز میکرو توربین

Chiller boiler (CB) information

اطلاعات مربوط به چیلر بویلر

نماد	پارامتر
A^{CB}	میزان در دسترس‌پذیری تجهیز چیلر بویلر برحسب (%)
$G_{CB} (t)$	میزان توان تولیدی توسط تجهیز چیلر بویلر برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
G_{CB}^{max}	ماکزیمم میزان مجاز توان تولیدی توسط تجهیز چیلر بویلر برحسب (kW)
$H_2 (t)$	توان حرارتی ورودی به چیلر بویلر برحسب (kW_{heat}) در طول بازه زمانی (t)
$Z_{CB} (t)$	هزینه کلی مربوط به تجهیز چیلر بویلر برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)
$Z_{CONS-CB}$	هزینه ثابت مربوط به تجهیز چیلر بویلر برحسب (دلار)
Z_{OP-CB}	هزینه بهره‌برداری مربوط به تجهیز چیلر بویلر برحسب (دلار / کیلووات ساعت)
η_{hc}	ضریب راندمانی تبدیل حرارت به سرما مربوط به تجهیز چیلر بویلر

The carbon capture utilization and storage (CCUS) information

اطلاعات مربوط به سیستم‌های جذب، استفاده و ذخیره سازی کربن دی اکسید

نماد	پارامتر
EMF_i	ضریب آلاینده‌گی i امین واحد تولیدی مربوط به برنامه‌ریزی در قسمت CCUS برحسب (kg/MWh)
$GG_i (t)$	میزان توان تولیدی به‌وسیله i امین واحد تولیدی مربوط به برنامه‌ریزی در قسمت CCUS برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
RP	ضریب درآمدی با استفاده از فناوری CCUS برحسب (دلار / کیلوگرم)
$R_{CCUS} (t)$	میزان درآمد حاصله برای هاب پیشنهادی با استفاده از فناوری CCUS برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)
STP	ضریب هزینه نصب و بهره‌برداری از فناوری CCUS در هاب پیشنهادی برحسب (دلار / کیلوگرم)
$Z_{CCUS} (t)$	هزینه کلی استفاده از سیستم CCUS در هاب پیشنهادی برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)

The time of use program (TOU) information

اطلاعات مربوط به برنامه پاسخگویی زمان استفاده

نماد	پارامتر
DR_{factor}^{min}	حداقل ضریب پاسخگویی بار در برنامه‌ریزی TOU
$DR_{factor} (t)$	ضریب پاسخگویی بار در برنامه‌ریزی TOU
DR_{factor}^{max}	ماکزیمم ضریب پاسخگویی بار در برنامه‌ریزی TOU
DR_{factor}^{off}	مقدار ضریب خاموشی بار در طول بازه زمانی (t)
$DR_{factor}^{shift} (t)$	مقدار ضریب جابه‌جایی بار در برنامه‌ریزی TOU در طول بازه زمانی (t)
$E_{id} (t)$	میزان کل بار الکتریکی هاب متشکل از ساختمان‌های مسکونی برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t) قبل از اعمال برنامه‌ریزی مربوط به پاسخگویی بار با استفاده از روش TOU
$E_{id}^{prim} (t)$	میزان کل بار الکتریکی هاب متشکل از ساختمان‌های مسکونی برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t) پس از اعمال برنامه‌ریزی مربوط به پاسخگویی بار با استفاده از روش TOU
Shift_Load (t)	میزان تغییرات کلی بار برحسب (kW) در برنامه‌ریزی TOU در طول بازه زمانی (t)

Gas and water carriers information
اطلاعات مربوط به حامل های گاز و آب

نماد	پارامتر
$G_{asLD}(t)$	میزان تقاضای کلی (دیماند) گاز طبیعی موردنیاز مشترکین برحسب (kWh) در طول بازه زمانی (t)
$G(t)$	مقدار گاز طبیعی دریافتی توسط هاب پیشنهادی برحسب (kWh) در طول بازه زمانی (t)
$G_5(t)$	مقدار گاز طبیعی دریافتی جهت تأمین نیاز و تقاضای مشترکین برحسب (kWh) در طول بازه زمانی (t)
N_{Fuel}	قیمت گاز طبیعی برحسب (دلار / کیلووات ساعت)
P_{Gas}^{max}	ماکزیمم مقدار مجاز گاز ورودی به هاب پیشنهادی برحسب (kWh)
$P_{Gas}(t)$	مقدار گاز طبیعی ورودی به هاب پیشنهادی برحسب (kWh) در طول بازه زمانی (t)
$Z_G(t)$	هزینه کلی مربوط به تقاضای گاز موردنیاز هاب مفروض برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)
N_{Water}	قیمت آب برحسب (دلار / کیلووات ساعت)
$Water_{LD}(t)$	مقدار تقاضای آب موردنیاز مشترکین موجود در هاب پیشنهادی برحسب (m^3) در طول بازه زمانی (t)
$W(t)$	مقدار آب ورودی به هاب برحسب (m^3) در طول بازه زمانی (t)
$W^{max}(t)$	بیشینه مقدار مجاز آب ورودی به هاب پیشنهادی برحسب (m^3) در طول بازه زمانی (t)
$Z_W(t)$	هزینه کلی مربوط به تقاضای آب موردنیاز هاب مفروض برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)

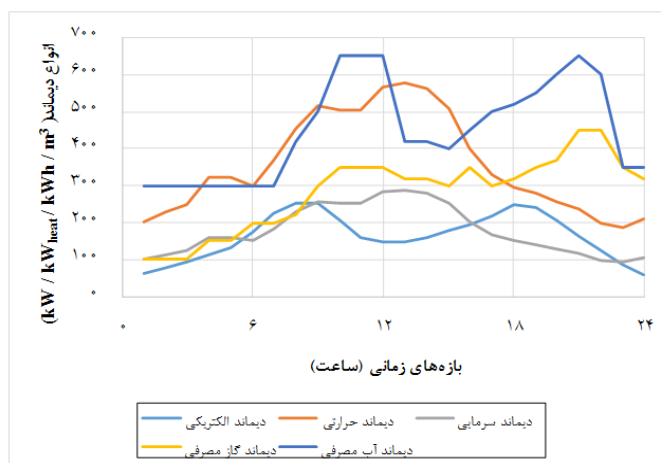
Upstream network and proposed hub information
اطلاعات مربوط به شبکه بالادست و هاب پیشنهادی

نماد	پارامتر
A^{Net}	میزان در دسترس پذیری شبکه اصلی برحسب (%)
CO_{nMG}	مقدار آلاینده گی شبکه اصلی برحسب (kg)
$D_E(t)$	میزان کل بار الکتریکی هاب متشکل از ساختمان های مسکونی برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
$D_H(t)$	میزان کل بار حرارتی هاب متشکل از ساختمان های مسکونی برحسب (kW_{heat}) در طول بازه زمانی (t)
$D_C(t)$	میزان کل بار سرمایی هاب متشکل از ساختمان های مسکونی برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
$E_{Grid}(t)$	میزان توان خریداری شده از شبکه اصلی برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
EMF_{MG}	ضریب آلاینده گی شبکه اصلی برحسب (Kg/MWh)
$P_{Buy-Line}^{max}$	ماکزیمم میزان توان مجاز عبوری مربوط به خطوط انتقال خرید برحسب (kW)
$P_{Sell-Line}^{max}$	ماکزیمم میزان توان مجاز عبوری مربوط به خطوط انتقال فروش برحسب (kW)
$P_{Buy}^{Real-Time}$	میزان توان خریداری شده بر اساس بازار واقعی برحسب (kW)
$P_{Buy}^{Day-Ahead}$	میزان توان خریداری شده بر اساس بازار روز پیش رو برحسب (kW)
P_{Sell}	میزان توان فروخته شده به شبکه بالادست برحسب (kW)
$P_{Buy}(t)$	میزان توان کل خریداری شده از شبکه بالادست برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
$P_{Sell}(t)$	میزان توان کل فروخته شده به شبکه بالادست برحسب (kW) در طول بازه زمانی (t)
$TC(Cost)$	هزینه کلی هاب پیشنهادی برحسب (دلار)
$TP(Emission)$	آلودگی کلی منتشر شده توسط هاب پیشنهادی برحسب (kg)
$Z_{Buy}(t)$	هزینه کلی مربوط به توان خریداری شده برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)
$Z_{Sell}(t)$	هزینه کلی مربوط به توان فروخته شده برحسب (دلار) در طول بازه زمانی (t)
Z_{Sell}	هزینه فروش (دلار)
Z_{Buy}	هزینه خرید (دلار)

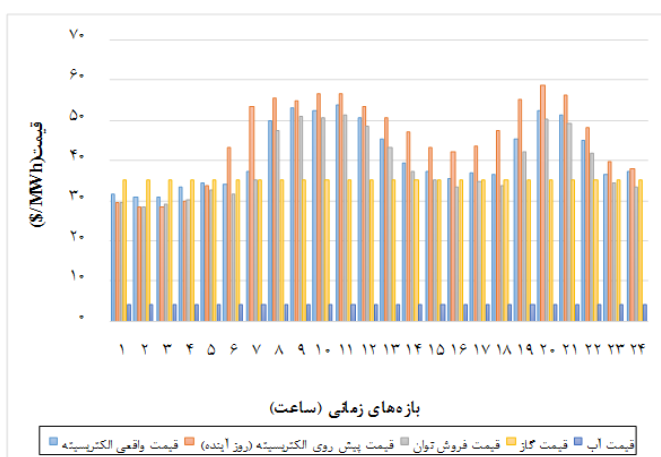
Efficiency factor of the various equipment

ضرایب راندمانی تجهیزات گوناگون

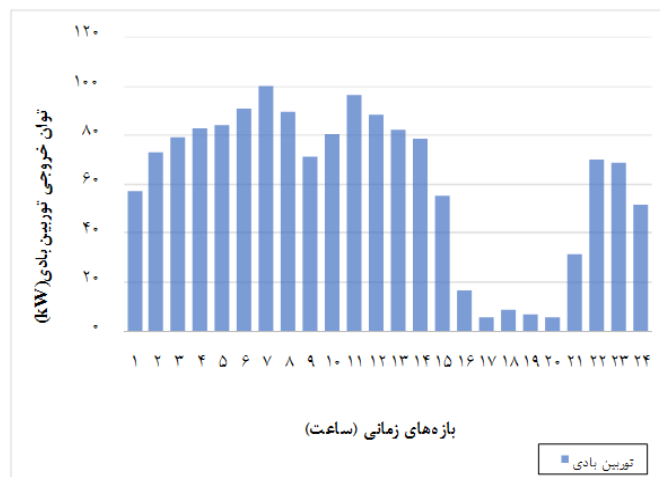
واحد تولیدی مورد نظر	مقدار (%)
η_{EE}	۰/۹۰
η_{MT}	۰/۳۰
η_{hc}	۰/۹۵
η_{Boiler}	۰/۸۵
η_{ge}^{CHP}	۰/۴۵
η_{gh}^{CHP}	۰/۳۵
$\eta_{ghf}^{Furnace}$	۰/۹۰
η^{60}	۰/۵۹
COP	۲/۵



مقادیر مربوط به انواع دیماندر در هاب پیشنهادی
Amounts of the various demands in the proposed hub



مقادیر مربوط به انواع هزینه‌ها در هاب پیشنهادی
Amounts of the various costs in the proposed hub



مقادیر مربوط به توان خروجی توربین بادی در هاب پیشنهادی
Amounts of the wind turbine's output power in the proposed hub

زیر نویس ها

1. Distributed energy resources
2. Renewable energy resources
3. Wind turbine
4. Photovoltaic
5. Tidal turbine
6. Fuel cell
7. Reformer
8. Micro-turbine
9. Boiler
10. Combined heat and power
11. Demand response program
12. Carbon capture utilization storage
13. Enhanced oil recovery
14. Enhanced coal bed recovery
15. Post-combustion
16. Pre-combustion
17. Oxygen fuel - combustion
18. Chemical looping - combustion
19. Multi-carrier hub energy system
20. Furnace
21. Energy storages
22. Compressed air energy storage
23. Electrical storage
24. Electrical vehicle
25. Absorption chiller
26. Return on assets
27. Deterministic
28. Time of use
29. Real time pricing
30. Particle swarm optimization
31. Carbon dioxide
32. Electric heat pump
33. Sulfur dioxide
34. Fuzzy satisfying approach
35. Feasible region