

Journal of Sustainable Energy Systems

Home Page: <https://ses.ut.ac.ir>

Research Paper

The impact of integrated demand response on robust scheduling of local water-energy systems in the presence of electric and hydrogen vehicles

Reza Ghaffarpour*, Saeid Zamanian

Department of Electrical Engineering, Faculty and Research Institute of Passive Defense and Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 21 January 2022

Revised 03 March 2022

Accepted 28 March 2022

Keywords:water-energy system
integrated demand response
electric vehicles
hydrogen vehicles
robust scheduling**ABSTRACT**

Integrated demand response effectively promotes the use of renewable energy sources and improves energy efficiency in systems with multiple energy carriers. This paper proposes a resilient scheduling model for local energy systems based on electricity, cooling, hydrogen, and water in the presence of electric and hydrogen vehicles. In addition, the role of integrated demand response based on electricity and cooling to reduce the operating cost of the local water-energy system is investigated. The local energy system is equipped with electricity generation sources, a water desalination device, wind turbine, water, electricity, cooling, and hydrogen storage systems, an electricity to hydrogen conversion unit, and an electric chiller to simultaneously meet water and energy demands. To model the uncertainty of wind power generation, a robust optimization approach is used without the need for probability density function and scenario generation, which supports the optimal scheduling of the water-energy system against changes in wind power generation. It also enables the operator to apply a risk-averse approach. Numerical results show that using integrated demand response besides water-energy storage systems reduces the total operating cost of the local system by 5.6%.

Introduction

Integrated demand response effectively promotes the use of renewable energy sources and improves energy efficiency in systems with multiple energy carriers. This paper proposes a resilient scheduling model for local energy systems based on electricity, cooling, hydrogen, and water in the presence of electric and hydrogen vehicles. In addition, the role of integrated demand response based on electricity and cooling to reduce the operating cost of the local water-energy system is investigated. The local energy system is equipped with electricity generation sources, a water desalination device, wind turbine, water, electricity, cooling, and hydrogen storage systems, an electricity to hydrogen conversion unit, and an electric chiller to simultaneously meet water and energy demands. To model the uncertainty of wind power generation, a robust optimization approach is used without the need for probability density function and scenario generation, which supports the optimal planning of

the water-energy system against changes in wind power generation.

Model description

The reviewed literature mainly evaluated the optimal scheduling of water-energy systems, considering only electricity and water carriers. The role of other energy carriers in developing a high-efficiency water-energy system has been neglected. A robust scheduling model based on information gap decision theory (IGDT) is studied to meet various energy demands, including water, electricity, cooling and hydrogen, in a developed island water-energy system. The proposed water-energy system is equipped with gas microturbines, wind turbines, a water desalination device, a P2H unit, and an electric chiller (as the supply resources), drinking water, hydrogen, and cooling. In the proposed model, the effect of integrated demand response considering flexibility in electricity and cooling demands on the optimal scheduling of the local system is investigated. In addition, the role of various storage systems,

* Corresponding Author, Email: rgaffarpour@ihu.ac.ir

including water, electricity, cooling, and hydrogen, in reducing the cost of operating the local system is investigated. The proposed optimization MILP model is solved in the GAMS by the commercial CPLEX solver.

Results and discussions

Numerical results show that using integrated demand response besides water-energy storage systems reduces the total operating cost of the local system by 5.6%. Among the four microturbines, the main participation of unit 3 is between 8:00 and 22:00 to charge the energy storage device and prevent the participation of expensive unit 4 in the peak hours. The electric chiller is programmed to produce more cooling for storing in the storage system during off-peak hours. The cooling storage system is also used in discharge mode during 14-18 when the electricity consumption is high. It contributes significantly to the non-participation of microturbine 4. The cooling demand also reacts to the high electricity consumption hours and guarantees its demand based on the electricity demand hours. The hourly energy level of the vehicle station increases between 5-12 due to the low demand and the entry of vehicles to the station, and this leads to the operating cost reduction. The desalination unit desalinates the seawater during the

hours when the electricity demand is lower. A larger volume of water is desalinated by the device in the initial hours due to the presence of water storage. Instead, when the electricity demand is high, the water storage system uses the stored water and lessens the power consumption of the desalination unit. Regarding the effect of wind generation uncertainty, as the value of the robust parameter increases, the operating cost and the optimal robust function also increase.

The use of electricity, cooling and hydrogen storage systems reduced operating costs by 1.1, 0.7, and 1.2 percent, respectively. The water storage system led to a reduction in electricity consumption during peak hours and a reduction in the operating cost of the system by 1.1%. Integrated demand response had a significant effect on reducing peak consumption and system operating costs by 1.5%. Simultaneous consideration of integrated demand response along with water-energy storage systems reduced the operating cost of the proposed water-energy system by 5.6%, which shows the effect of coordinated planning of these resources. According to the proposed robust approach, the system operator, based on an acceptable cost, was able to cover a suitable range of errors in the prediction of wind power generation and adopt a risk-averse strategy without the need to generate a scenario.

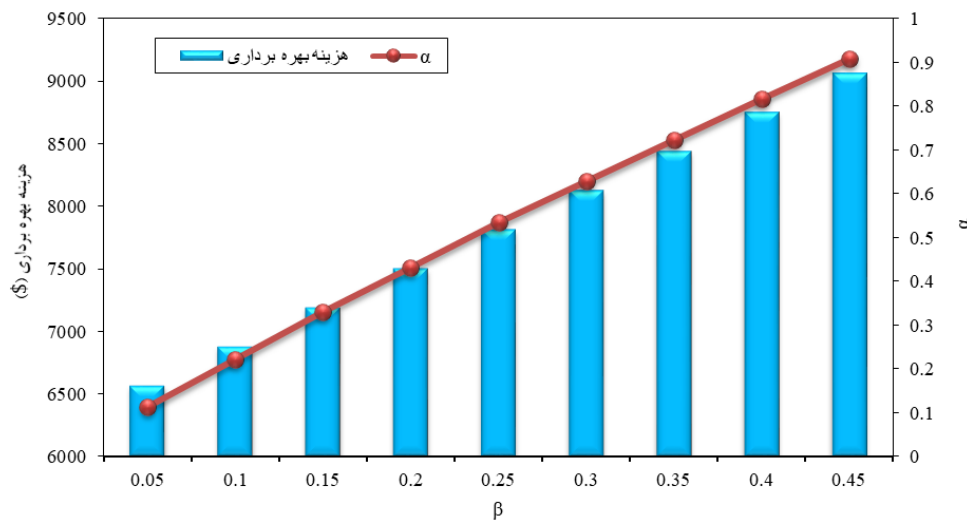


Figure 1. Impact of risk-averse parameter β on the operation cost and optimal robust function α

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

مقاله پژوهشی

اثر پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه بر برنامه‌ریزی مقاوم سیستم‌های آب-انرژی محلی در حضور خودروهای الکتریکی و هیدروژنی

رضا غفارپور^{۱*}، سعید زمانیان^۲

^۱ استادیار دانشکده و پژوهشکده مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

^۲ مربی دانشکده و پژوهشکده مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۱/۰۱ تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۱۲/۱۲ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۱/۰۸	پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه به طور مؤثر استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و بهبود بهره‌وری انرژی در سیستم‌های با چندین حامل انرژی را ترویج می‌دهد. مقاله یک مدل برنامه‌ریزی مقاوم برای سیستم‌های انرژی محلی مبتنی بر برق، سرمایه‌ش، هیدروژن و آب در حضور خودروهای الکتریکی و هیدروژنی پیشنهاد می‌دهد. به علاوه، نقش پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه مبتنی بر برق و سرمایه‌ش در جهت کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم آب-انرژی محلی بررسی می‌شود. سیستم انرژی محلی به منابع تولید برق، دستگاه آب شیرین کن، توربین بادی، سیستم‌های ذخیره‌ساز آب، برق، سرمایه‌ش و هیدروژن، واحد تبدیل برق به هیدروژن و چیلر الکتریکی به منظور تأمین هم‌زمان تقاضاهای آب-انرژی مجهز است. به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت توان تولیدی باد، از یک رویکرد بهینه‌سازی مقاوم بدون نیاز به تابع چگالی احتمال و تولید سناریو استفاده می‌شود که برنامه‌ریزی بهینه سیستم آب-انرژی را در برابر تغییرات تولید توان باد استوار می‌سازد. همچنین، این رویکرد بهره‌بردار را قادر می‌سازد تا یک رویکرد ریسک‌گریز را اعمال کند. نتایج عددی نشان می‌دهد استفاده از پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه در کنار سیستم‌های ذخیره‌ساز آب-انرژی سبب کاهش کل هزینه بهره‌برداری سیستم محلی تا ۵/۶ درصد می‌شود.

به‌تازگی ساختارهای جدیدی همانند پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه در جهت افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی در سیستم‌های چند حامل انرژی مورد توجه قرار گرفته است. [۳] در پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه، نه تنها مصرف‌کنندگان برق، بلکه دیگر مصرف‌کنندگان انرژی می‌توانند در قالب یک برنامه‌ریزی هماهنگ به منظور بهبود انعطاف‌پذیری سمت تقاضا عمل کنند. در مقاله [۴] اثر اقتصادی-زیست‌محیطی پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه در یک هاب انرژی مبتنی بر هیدروژن تحت برنامه‌ریزی تصادفی مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتیجه

مقدمه
افزایش مصرف مشترکان در روزهای گرم سال و مدیریت اوج بار، یکی از مشکلات بسیار مهمی است که شرکت‌های برق با آن مواجه هستند [۱]. یکی از مسائل مهم در بهره‌برداری از سیستم‌های با چندین حامل انرژی^۱، استفاده بهینه و پر بازده از حامل‌های مختلف انرژی است. بهره‌برداری بهینه از این نوع سیستم‌ها سبب افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش هزینه انرژی، انتشار آلاینده‌ها و اتلاف انرژی خواهد شد. [۲]

* نویسنده مسئول

Email: rgaffarpour@ihu.ac.ir
1. Multi-energy systems

متمرکز ریزشکه‌های انرژی مبتنی بر برق و هیدروژن در حضور فناوری‌های P2H در مقاله [۱۱] مطالعه شده که هدف آن حداقل کردن هزینه بهره‌برداری ریزشکه‌ها به منظور تأمین خودروهای الکتریکی و هیدروژنی است. در مقاله [۱۲] یک ریزشکه مبتنی بر هیدروژن معرفی شد که هدف آن حداقل کردن هزینه تأمین ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن مجهز به فناوری P2H با در نظر گرفتن محدودیت فنی ریزشکه بود.

با افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت از یک سو و افزایش بحران کمبود منابع آب زیرزمینی از سوی دیگر، استفاده از توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر در جهت تأمین انرژی زیرساخت‌های مرتبط با آب اهمیت به‌سزایی پیدا کرده است. مدیریت و بهینه‌سازی یکپارچه آب و انرژی می‌تواند به بهبود قابلیت اطمینان و شرایط اقتصادی منجر شود. [۱۳] سیستم‌های آب-انرژی می‌توانند راه حلی امیدوارکننده برای بهبود مدیریت انرژی و منابع آب در جزایر، جوامع روستایی و بسیاری از نقاط جهان که فاقد زیرساخت‌های حیاتی هستند باشند. در مقاله [۱۴] یک مدل بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن مصرف انرژی ریزشکه آب-انرژی ارائه شده است. همچنین، برای به حداقل رساندن هزینه روزانه انرژی در ریزشکه آب-انرژی، یک مدل توزیع اقتصادی روز پیش ارائه شده است که مصرف انرژی سیستم آب با استفاده از برنامه‌ریزی و عملکرد مخزن و پمپ آن، عوامل هیدرولیکی و تقاضای روزانه به حداقل می‌رسد. در مقاله [۱۵] یک فرمولاسیون برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح برای توزیع هوشمند تولیدات پراکنده، مدیریت انرژی حرارتی ساختمان و تأمین تقاضای آب در یک ریزشکه انرژی-آب جزیره‌ای پیشنهاد شده است. مقاله [۱۶] یک مفهوم جدید و مدل جزیره‌ای هوشمند را در سیستم قدرت ارائه می‌دهد که قابلیت جزیره‌ای شرایط مناسبی را برای تأمین آب مورد نیاز ریزشکه که به واحد آب شیرین کن مجهز است، فراهم می‌کند. چنین روشی می‌تواند با استفاده از آب دریا، هزینه‌های مورد نیاز آب را در بخش‌های مختلف کاهش دهد. در مقاله [۱۷] یک چارچوب برنامه‌ریزی جامع برای افزایش حالت ارتجاعی شبکه توزیع برق و شبکه توزیع آب با ریزشکه‌های متعدد در برابر توفان‌ها پیشنهاد شده است. سخت شدن خطوط

آن کاهش هزینه انرژی و آلودگی زیست‌محیطی با اجرای پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه است. در مقاله [۵] اثر پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه بر هزینه بهره‌برداری سیستم‌های انرژی مبتنی بر برق و گاز مطالعه شده است که در آن عدم قطعیت‌های مربوط به تولید توان باد و تقاضای گاز تحت یک رویکرد ترکیبی تئوری تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی^۱-(IGDT) تصادفی بررسی شده‌اند. اثر پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه بر هزینه بهره‌برداری یک نهاد فراهم‌کننده برق، گاز و گرمایش در مقاله [۶] بررسی شده است که در آن محدودیت‌های فنی هرسه شبکه برق، گاز و گرمایش به طور کامل در نظر گرفته شده است. یک مسئله برنامه‌ریزی مقاوم برای یک هاب انرژی مبتنی بر برق و گرمایش در حضور پاسخ‌گویی تقاضای برق و گرمایش در مقاله [۷] پیشنهاد شده است که عدم قطعیت قیمت بازار برق تحت یک رویکرد ریسک‌گریز بدون نیاز به تابع چگالی احتمال مدل شده است.

وسایل حمل‌ونقل با سوخت‌های فسیلی یکی از منابع اصلی آلاینده‌گی هستند. از این‌رو، با افزایش خودروهای هیدروژنی در کنار خودروهای الکتریکی به دلیل مسائل زیست‌محیطی، اهمیت استفاده از فناوری‌های نوظهوری همچون فناوری تبدیل برق به هیدروژن^۲ (P2H) افزایش یافته است. این فناوری‌ها با استفاده کردن از توان مازاد منابع تجدیدپذیر می‌توانند به صورت غیرمستقیم برای تأمین سوخت این خودروها استفاده شوند. در مقاله [۸] یک مدل برنامه‌ریزی بهینه برای تأمین انرژی خودروهای الکتریکی و هیدروژنی در یک ریزشکه جزیره‌ای تحت رویکرد تصادفی مبتنی بر ریسک پیشنهاد شده است. یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه به منظور حداقل کردن هزینه انرژی و انتشار کربن در یک ریزشکه انرژی مبتنی بر برق، گرمایش و هیدروژن در مقاله [۹] پیشنهاد شده است که عدم قطعیت‌های مربوط به توان تولیدی باد و قیمت بازار تحت رویکرد IGDT مدل شده‌اند. یک طرح تأمین انرژی بهینه برای خودروهای الکتریکی، گاز و هیدروژنی در مقاله [۱۰] پیشنهاد شده که از یک رویکرد تصادفی IGDT-به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت‌های انرژی باد و قیمت بازار در یک سیستم چند حامل انرژی استفاده شده است. برنامه‌ریزی مقاوم غیر

1. Information gap decision theory
2. Power-to-hydrogen

زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند. در مقاله [۱۹] از واحدهای آب شیرین کن صنعتی که از برق برای تغییر آب شور به آب آشامیدنی بهره می‌برند، استفاده شده است. برای رفع کمبود آب شیرین و به حداقل رساندن هزینه‌های انرژی و آب شیرین استخراج‌شده از مخازن زیرزمینی، یک روش چندهدفه در این مرجع به کار گرفته شده است.

در شبکه توزیع برق، بالا بردن اندازه ذخیره‌ساز انرژی در ریزشکه‌ها و مخازن آب در شبکه توزیع آب به عنوان سه استراتژی در نظر گرفته شده است. در مقاله [۱۸] یک چارچوب مدیریتی جدید برای ریزشکه آب-انرژی ارائه شده است که این برنامه‌ریزی کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و همچنین، هزینه‌های آلاینده‌های

جدول ۱. مجموعه‌ها و شاخص‌های مرتبط

شماره مقاله	حامل انرژی ریزشکه	آب	حرارت	هیدروژن	گاز	برق	اهداف برنامه‌ریزی
[۴]	✓	×	×	✓	×	✓	کاهش اثرات اقتصادی-زیست‌محیطی
[۵]	✓	×	×	×	✓	✓	کاهش هزینه بهره‌برداری
[۶]	✓	×	✓	×	✓	✓	کاهش هزینه بهره‌برداری
[۷]	✓	×	✓	×	×	✓	کاهش هزینه بهره‌برداری
[۸]	✓	×	×	✓	×	✓	کاهش هزینه بهره‌برداری
[۹]	✓	×	✓	✓	×	✓	کاهش اثرات اقتصادی-زیست‌محیطی
[۱۰]	✓	×	×	✓	✓	✓	کاهش هزینه بهره‌برداری
[۱۱]	✓	×	×	✓	×	✓	تأمین بهینه برق خودروها و هیدروژن
[۱۲]	✓	×	×	✓	×	✓	کاهش هزینه ایستگاه‌های سوخت‌گیری
[۱۳]	✓	✓	×	×	×	✓	کاهش هزینه بهره‌برداری
[۱۴]	✓	✓	×	×	×	✓	کاهش هزینه بهره‌برداری
[۱۵]	✓	✓	✓	×	×	✓	کاهش هزینه بهره‌برداری
[۱۶]	✓	✓	×	×	×	✓	کاهش هزینه بهره‌برداری ریزشکه مجهز به آب شیرین کن
[۱۷]	✓	✓	×	×	×	✓	کاهش هزینه بهره‌برداری
[۱۸]	✓	✓	×	×	×	✓	کاهش اثرات اقتصادی-زیست‌محیطی
[۱۹]	✓	✓	×	×	×	✓	کاهش هزینه بهره‌برداری و تأمین آب شیرین به واسطه آب شیرین کن
پژوهش ارائه شده	✓	✓	✓	✓	✓	✓	کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم چند حامل انرژی جزیره‌ای و برنامه‌ریزی بهینه این حامل‌ها

در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی مقاوم مبتنی بر IGDT به منظور تأمین تقاضاهای مختلف انرژی شامل آب، برق، سرمایه‌ش و هیدروژن در یک سیستم آب-انرژی جزیره‌ای توسعه‌یافته مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سیستم آب-انرژی پیشنهادی به میکروتوربین‌های گازی و توربین بادی، دستگاه آب شیرین کن، واحد P2H و چیلر الکتریکی به عنوان منابع اصلی تولید برق، آب آشامیدنی، هیدروژن و سرمایه‌ش مجهز است. در مدل پیشنهادی، اثر پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در تقاضاهای برق و سرمایه‌ش بر برنامه‌ریزی بهینه سیستم محلی بررسی می‌شود. به علاوه، نقش انواع سیستم‌های

جدول ۱ یک مقایسه کلی بین مراجع مورد اشاره را از لحاظ ساختار حامل انرژی ریزشکه، اعمال ریسک و اهداف برنامه‌ریزی در اختیار قرار داده است. در مراجع یادشده، به طور عمده برنامه‌ریزی بهینه سیستم‌های آب-انرژی با در نظر گرفتن تنها حامل برق و آب مورد ارزیابی قرار گرفته و نقش دیگر حامل‌های انرژی در توسعه یک سیستم آب-انرژی پربازده نادیده گرفته شده است. به علاوه در مراجع یادشده، تنها اثر خودروهای الکتریکی و هیدروژنی و یا پاسخ‌گویی بار یکپارچه در سیستم‌های با چندین حامل انرژی بررسی شده و اثر این فناوری‌ها به طور هم‌زمان در یک سیستم آب-انرژی یکپارچه نادیده گرفته شده است.

روزانه سیستم آب-انرژی است. شکل ۱ ارتباط بین حامل‌های انرژی مختلف را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که دستگاه آب شیرین کن به منظور تأمین آب مورد نیاز سیستم محلی به عنوان مصرف‌کننده برق در نظر گرفته می‌شود. در ساعت‌هایی که قیمت برق زیاد است، سیستم ذخیره‌ساز آب به عنوان یک منبع انعطاف‌پذیر نقش قابل ملاحظه‌ای در کاهش هزینه تأمین آب شیرین فراهم می‌کند. واحد P2H نیز به عنوان مصرف‌کننده برق، نقش تأمین ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن را به عهده دارد. چیلر الکتریکی دیگر مصرف‌کننده برق به شمار می‌رود که نقش تأمین سرمایش سیستم محلی را به عهده دارد. سیستم‌های ذخیره‌ساز برق، سرمایش و هیدروژن نیز به عنوان دیگر منابع انعطاف‌پذیر نقش قابل ملاحظه‌ای در کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم آب-انرژی محلی ایفا می‌کنند. پاسخ‌گویی بار یکپارچه مبتنی بر قیمت نیز در ساعت‌هایی که تقاضای برق و یا سرمایش بالا است، با شیف‌ت دادن بخشی از تقاضا سبب کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم محلی می‌شوند.

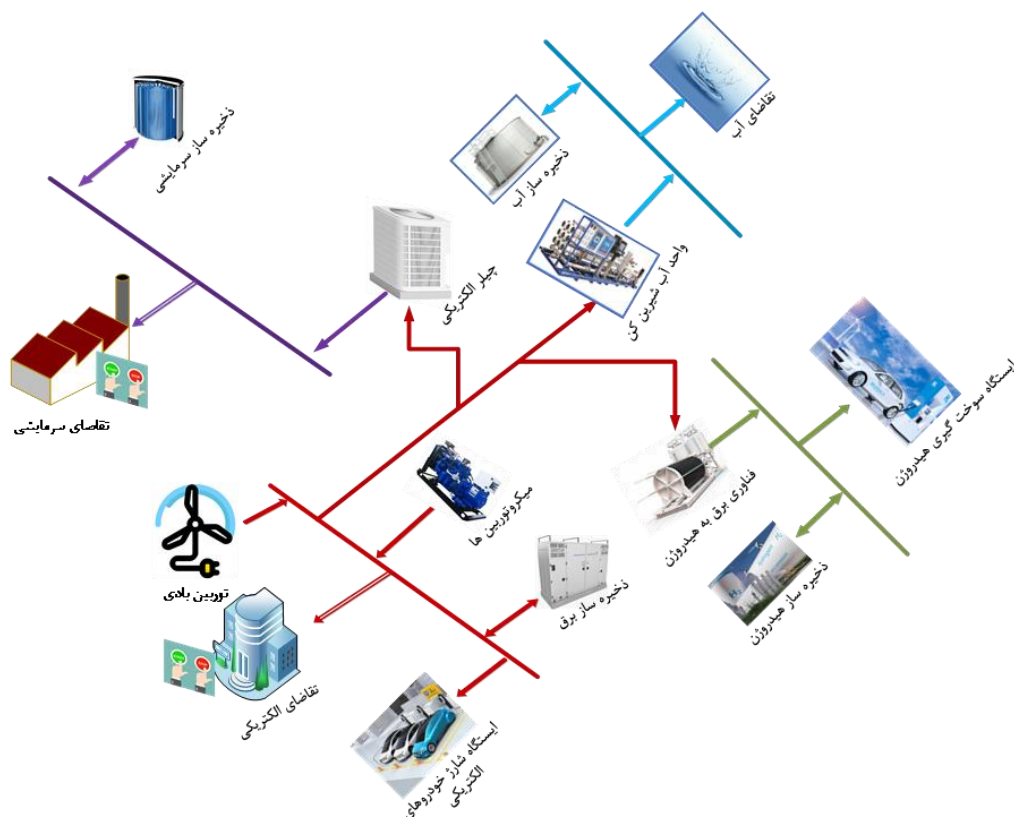
ذخیره‌ساز شامل آب، برق، سرمایش و هیدروژن بر کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم محلی بررسی می‌شود. همچنین، از رویکرد مقاوم مبتنی بر IGDT به منظور کنترل عدم قطعیت توان تولیدی باد بدون نیاز به تابع چگالی احتمال و یا تولید سناریو استفاده می‌شود که در آن بهره‌بردار می‌تواند سطح محافظه‌کاری سیستم را در برابر خطای پیش‌بینی تولید توان باد تنظیم کند.

بقیه این مقاله به شرح زیر است: در بخش دوم و سوم فرمول‌بندی مسئله شامل مدل‌سازی سیستم آب-انرژی محلی با حضور پاسخ‌گویی بار یکپارچه و سیستم‌های ذخیره‌ساز آب-انرژی تحت رویکرد قطعی و مقاوم ارائه شده است. شبیه‌سازی و نتایج عددی در بخش چهارم ارائه شده است. در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

فرمولاسیون مسئله تحت رویکرد قطعی

تابع هدف

هدف از مدل پیشنهادی، حداقل کردن هزینه بهره‌برداری



شکل ۱. شماتیک سیستم آب-انرژی پیشنهادی

توان است. حداقل زمان روشن بودن مربوط به میکروتوربین‌های گازی در روابط ۵ و ۶ آورده شده است. قیود مربوط به حداقل خاموش ماندن نیز در روابط ۷ و ۸ نشان داده شده است. وضعیت روشن و خاموش بودن واحدها با در نظر گرفتن هزینه راه‌اندازی و خاموشی نیز توسط روابط ۹ تا ۱۲ بیان می‌شوند.

$$P_g^{\min} I_{g,t} \leq P_{g,t} \leq P_g^{\max} I_{g,t} \quad (2)$$

$$P_{g,t,s} - P_{g,t-1} \leq R_g^{up} \quad (3)$$

$$P_{g,t-1} - P_{g,t} \leq R_g^{dn} \quad (4)$$

$$I_{g,t} - I_{g,t-1} \leq I_{g,t+UT_{g,u}} \quad (5)$$

$$UT_{g,u} = \begin{cases} u & u \leq MUT_g \\ 0 & u > MUT_g \end{cases} \quad (6)$$

$$I_{g,t-1} - I_{g,t} \leq 1 - I_{g,t+DT_{g,u}} \quad (7)$$

$$DT_{g,u} = \begin{cases} u & u \leq MDT_g \\ 0 & u > MDT_g \end{cases} \quad (8)$$

$$SU_{g,t} \geq SUC_g (I_{g,t} - I_{g,t-1}) \quad (9)$$

$$SU_{g,t} \geq 0 \quad (10)$$

$$SD_{g,t} \geq SDC_g (I_{g,t-1} - I_{g,t}) \quad (11)$$

$$SD_{g,t} \geq 0 \quad (12)$$

در روابط یادشده، $P_g^{\min}$ ، $P_g^{\max}$ و R_g^{up} و R_g^{dn} حداکثر توان تولیدی میکروتوربین، حداقل توان تولیدی میکروتوربین، نرخ تغییرات افزایشی و کاهش میکروتوربین گازی را نشان می‌دهند MUT_g و MDT_g حداقل زمان روشن و خاموش بودن میکروتوربین‌های گازی را نشان می‌دهند SUC_g و SDC_g به‌ترتیب هزینه راه‌اندازی و خاموش شدن میکروتوربین‌های گازی را بیان می‌کنند UT و DT متغیرهای کمکی هستند و u شاخص حداقل زمان روشن/خاموش بودن است که از ۱ تا MUT/MDT تغییر می‌کند.

تابع هدف مدل پیشنهادی به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح^۱ در رابطه ۱ بیان می‌شود که شامل پنج بخش است. بخش اول هزینه تولید توان و راه‌اندازی و خاموشی واحدهای تولید توان را نشان می‌دهد. بخش دوم تابع هدف هزینه بهره‌برداری سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی را نشان می‌دهد. بخش سوم و چهارم به‌ترتیب هزینه سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن و سرمایه‌ش در حالت دشارژ را نشان می‌دهد. بخش پنجم تابع هدف هزینه بهره‌برداری ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی در حالت دشارژ را نشان می‌دهد.

$$\min \sum_{g=1}^{NG} \sum_{t=1}^T (b_g P_{g,t} + c_g I_{g,t} + SU_{g,t} + SD_{g,t}) + \sum_{t=1}^T \lambda^{ES} P_t^{dis} + \sum_{t=1}^T \lambda^{HS} H_t^{Dis} + \sum_{t=1}^T \lambda^{CS} C_t^{Dis} + \sum_{t=1}^T \lambda^{PL} PL_t^{Dis} \quad (1)$$

در روابط یادشده، t و g شاخص زمان و میکروتوربین‌های گازی را نشان می‌دهند. Pe_t^{Dis} ، $P_{g,t}$ ، C_t^{Dis} ، H_t^{Dis} و PL_t^{Dis} به‌ترتیب نمایانگر توان تولیدی میکروتوربین‌های گازی، توان دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی، توان دشارژ سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن، توان دشارژ ذخیره‌ساز سرمایه‌ش و توان دشارژ ایستگاه شارژ خودروها هستند $SU_{g,t}$ و $SD_{g,t}$ هزینه راه‌اندازی و خاموشی میکروتوربین‌های گازی و b_g و c_g نیز ضرایب هزینه میکروتوربین‌های گازی را نشان می‌دهند λ^{ES} ، λ^{HS} ، λ^{CS} و λ^{PL} به‌ترتیب هزینه بهره‌برداری سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی، هیدروژنی، سرمایه‌ش و ایستگاه شارژ خودروها در حالت دشارژ هستند $I_{g,t}$ یک متغیر باینری به منظور نشان دادن وضعیت روشن و خاموش بودن میکروتوربین‌های گازی است.

قیود مسئله

قیود میکروتوربین‌های گازی: در سالیان اخیر میکروتوربین‌های گازی به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود نظیر پاسخ‌دهی سریع، آلودگی به مراتب پایین، هزینه راه‌اندازی کم و سازگاری بیشتر با محیط زیست، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. مجموعه محدودیت‌های مربوط به عملکرد میکروتوربین‌های گازی در روابط ۲-۱۲ ارائه شده است. رابطه ۲ محدودیت توان میکروتوربین‌های گازی را نشان می‌دهد. رابطه ۳ و ۴ بیانگر محدودیت نرخ تغییرات

1. Mixed-integer linear programming

از این طریق هزینه برق پرداختی خود را کاهش دهند. تقاضای الکتریکی و سرمایشی پس از اجرای برنامه پاسخ‌گویی تقاضا توسط رابطه ۱۹ تعریف شده است. رابطه ۲۰ بیان می‌کند که مقدار کل بار الکتریکی یا سرمایشی شیفت‌یافته در کل دوره زمانی برابر با صفر است. به علاوه، مقدار بار الکتریکی یا سرمایشی قابل شیفت در هر ساعت دارای محدودیت است که توسط رابطه‌های ۲۱ و ۲۲ بیان شده‌اند.

$$d_t^{e/c,DR} = d_t^{e/c} - DR_t^{e/c,dn} + DR_t^{e/c,up} \quad (19)$$

$$\sum_{t=1}^{NT} DR_t^{e/c,up} - DR_t^{e/c,dn} = 0 \quad (20)$$

$$0 \leq DR_t^{e/c,up} \leq DR_t^{e/c,up_max} \quad (21)$$

$$0 \leq DR_t^{e/c,dn} \leq DR_t^{e/c,dn_max} \quad (22)$$

در این روابط، $d_t^{e/c,DR}$ میزان مصرف مورد انتظار در نتیجه اعمال برنامه پاسخ‌گویی بار است و $d_t^{e/c}$ میزان بار پایه است. دو متغیر $DR_t^{e/c,up}$ ، $DR_t^{e/c,dn}$ به ترتیب بیانگر افزایش و کاهش بار (پاسخ منفی و مثبت) (در قبال همکاری در برنامه هستند. همچنین، پارامترهای $DR_t^{e/c,up_max}$ و $DR_t^{e/c,up_min}$ نیز این پاسخ‌ها رو محدود می‌کنند.

قیود ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی: در این روش، ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی علاوه بر مسئولیت شارژ خودروهای برقی با رعایت ترجیحات صاحبان خودرو، از امکان استفاده از خودروها در حالت دشارژ بهره‌مند است. در روابط ۲۳ تا ۲۷ زمان ورود و خروج خودروها به/از ایستگاه شارژ و سطح شارژ آن‌ها به هنگام ورود و خروج به/از ایستگاه شارژ توسط تابع توزیع نرمال بیان شده است. در این روابط μ و σ^2 به ترتیب میانگین و واریانس پارامتر غیرقطعی است.

$$t_{ev}^{arr} = f_{TG}(\chi; \mu_{arr}, \sigma_{arr}^2, (t_{ev}^{arr,min}, t_{ev}^{arr,max})) \quad (23)$$

$$t_{ev}^{arr} \leq t_{ev}^{dep} \quad (24)$$

$$t_{ev}^{dep} = f_{TG}(\chi; \mu_{dep}, \sigma_{dep}^2, (t_{ev}^{dep,min}, t_{ev}^{dep,max})) \quad (25)$$

قیود سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی: مجموعه محدودیت‌های مربوط به عملکرد سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی در روابط ۱۳ تا ۱۸ آمده است. محدودیت شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی در روابط ۱۳ و ۱۴ آمده است. رابطه منطقی بین شارژ و دشارژ که مشخص می‌کند سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی در هر لحظه تنها می‌تواند در یک عملکرد شارژ یا دشارژ باشد در رابطه ۱۵ آمده است. وضعیت سطح انرژی سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی در رابطه ۱۶ آمده است. برابری شرایط ابتدایی و انتهایی سطح انرژی سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی در رابطه ۱۷ آمده است. در نهایت، میزان سطح انرژی سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی توسط یک حداقل و حداکثر مقدار باید محدود شود که در رابطه ۱۸ آمده است.

$$P_{t-1}^{dis_min} x_t^{dis} \leq P_t^{dis} \leq P_{t-1}^{dis_max} x_t^{dis} \quad (13)$$

$$P_{t-1}^{ch_min} x_t^{ch} \leq P_t^{ch} \leq P_{t-1}^{ch_max} x_t^{ch} \quad (14)$$

$$x_t^{ch} + x_t^{dis} \leq 1 \quad (15)$$

$$ES_t = ES_{t-1} + \eta_{es}^{ch} P_t^{ch} - \frac{P_t^{dis}}{\eta_{es}^{dis}} \quad (16)$$

$$ES_{t=24} = ES_{t=0} \quad (17)$$

$$ES_t^{min} \leq ES_t \leq ES_t^{max} \quad (18)$$

در روابط یادشده، P_t^{dis} و P_t^{ch} توان‌های ذخیره‌ساز الکتریکی در حالت شارژ و دشارژ است x_t^{dis} و x_t^{ch} به ترتیب متغیرهای باینری مربوط به وضعیت قرارگیری ذخیره‌ساز در حالت دشارژ و شارژ هستند ES_t . سطح انرژی ساعتی ذخیره‌ساز الکتریکی را نشان می‌دهد ES_t^{max} و ES_t^{min} حداکثر و حداقل ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی هستند η_{es}^{ch} و η_{es}^{dis} به ترتیب بازده دشارژ و شارژ سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی هستند. همچنین $P_{t-1}^{dis_min}$ ، $P_{t-1}^{ch_min}$ و $P_{t-1}^{ch_max}$ به ترتیب حداقل و حداکثر توان‌های شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز هستند.

قیود پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه: مطابق با برنامه پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه، مصرف‌کنندگان می‌توانند بارشان را از ساعت‌های با تقاضای برق/سرمایش بالا به ساعت‌های با تقاضای برق/سرمایش پایین‌تر شیفت دهند و

شارژ در هر لحظه از رابطه ۳۳ به دست می‌آید. در این رابطه η_{ev}^{ch} و η_{ev}^{dis} به ترتیب بازده شارژ و دشارژ است.

$$U_t^{PL2G} + U_t^{PL2G} \leq 1 \quad (32)$$

$$SOC_t = SOC_{t-1} + SOC_t^{arv} - SOC_t^{dep} + \eta_{ev}^{ch} P_t^{G2PL} - \frac{P_t^{PL2G}}{\eta_{es}^{dis}} \quad (33)$$

حداکثر و حداقل سطح انرژی ایستگاه شارژ به عنوان تابعی از ظرفیت پارکینگ در رابطه ۳۵ ارائه شده است.

$$SOC_t^{\min} Cap_t \leq SOE_t \leq SOC_t^{\max} Cap_t \quad (34)$$

قیود چیلر الکتریکی: در این مقاله از چیلر الکتریکی^۱ به منظور تأمین سرمایش سیستم آب-انرژی پیشنهادی استفاده می‌شود. در معادله ۳۵ رابطه بین سرمایش تولیدی ($C_t^{chiller}$) و برق مصرفی (P_t^c) توسط چیلر الکتریکی بیان می‌شود $\eta^{chiller}$ بازده چیلر است. محدودیت مصرف توان چیلر الکتریکی (P_t^{c-max}) توسط رابطه ۳۶ قابل بیان است.

$$C_t^{chiller} = \eta^{chiller} P_t^c \quad (35)$$

$$0 \leq P_t^c \leq P_t^{c-max} \quad (36)$$

قیود سیستم ذخیره‌ساز سرمایشی: روابط ۳۷ و ۳۸ محدودیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز سرمایش را نشان می‌دهند. سیستم ذخیره‌ساز سرمایش نمی‌تواند هم‌زمان در حالت شارژ و یا دشارژ مورد بهره‌برداری قرار بگیرد که توسط رابطه ۳۹ بیان می‌شود. سطح انرژی ذخیره‌ساز سرمایش در رابطه ۴۰ آمده است. برابری شرایط ابتدایی و انتهای سطح انرژی سیستم ذخیره‌ساز سرمایش در رابطه ۴۱ آمده است. محدودیت ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز سرمایش در رابطه ۴۲ آمده است.

$$0 \leq C_t^{dis} \leq C_t^{dis-max} \quad (37)$$

$$0 \leq C_t^{ch} \leq C_t^{ch-max} \quad (38)$$

$$CS_t = CS_{t-1} + \eta_{cs}^{ch} C_t^{ch} - \frac{C_t^{dis}}{\eta_{cs}^{dis}} \quad (39)$$

$$CS_{t=24} = CS_{t=0} \quad (40)$$

$$SOC_{ev}^{arv} = f_{TG}(\chi; \mu_{SOC_{ev}^{arv}}, \sigma_{SOC_{ev}^{arv}}^2, (SOC_{ev}^{arv, \min}, SOC_{ev}^{arv, \max})) \quad (26)$$

$$SOC_{ev}^{dep} = f_{TG}(\chi; \mu_{SOC_{ev}^{dep}}, \sigma_{SOC_{ev}^{dep}}^2, (SOC_{ev}^{dep, \min}, SOC_{ev}^{dep, \max})) \quad (27)$$

ev شاخص خودروی الکتریکی است t^{arv} و t^{dep} زمان‌های ورود و خروج خودرو به ایستگاه شارژ هستند و SOC^{arv} و SOC^{dep} نیز بیانگر SOC های زمان ورود و ترک ایستگاه هستند f_{TG} تابع تولید اعداد تصادفی بر اساس تابع توزیع نرمال است که در آن χ بیانگر متغیر تصادفی است. همچنین، حداقل و حداکثر مقدار این متغیرهای تصادفی با اندیس‌های بالای min و max نشان داده شده‌اند. تعداد خودروهایی که در زمان t در ایستگاه شارژ حضور دارند N_t ، در رابطه ۲۸ ارائه شده و وابسته به تعداد خودروهای ورودی N_t^{arv} و تعداد خودروهای خروجی از ایستگاه N_t^{dep} است. ظرفیت ایستگاه شارژ در زمان t (Cap_t) با توجه به ظرفیت خودروهایی که در این زمان در ایستگاه شارژ حضور دارند نیز از رابطه ۲۹ به دست می‌آید.

$$N_t = N_{t-1} + N_t^{arv} - N_t^{dep} \quad (28)$$

$$Cap_t = Cap_{t-1} + Cap_t^{arv} - Cap_t^{dep} \quad (29)$$

حداکثر توان مجاز مبادله‌شده بین ایستگاه شارژ و شبکه در زمان t توسط روابط ۳۰ و ۳۱ ارائه شده است. P^{PL2G} توان انتقالی از ایستگاه به شبکه و P^{G2PL} نیز توان تحویلی از شبکه به ایستگاه است. همان‌طور که دیده می‌شود، این مقدار به تعداد خودروهای موجود در ایستگاه شارژ و نرخ شارژ و دشارژ، که به زیرساخت‌های ایستگاه شارژ بستگی دارد، وابسته است.

$$P_t^{PL2G} \leq \gamma^{dis} N_t U_t^{PL2G} \quad (30)$$

$$P_t^{G2PL} \leq \gamma^{ch} N_t U_t^{G2PL} \quad (31)$$

در رابطه یادشده γ^{dis} و γ^{ch} به ترتیب نرخ شارژ و دشارژ و $U_{pl,t,s}^{PL2G}$ و $U_{pl,t,s}^{G2PL}$ متغیرهای باینری هستند که وضعیت شارژ و دشارژ ایستگاه شارژ را نشان می‌دهند. به منظور جلوگیری از شارژ و دشارژ هم‌زمان ایستگاه شارژ، رابطه ۳۲ در نظر گرفته شده است. سطح انرژی ایستگاه

در روابط یادشده، Sh^{max} و Sh^{min} حداکثر و حداقل ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی هستند η_h^{Ch} و η_h^{Dis} به ترتیب بازده دشارژ و شارژ سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی هستند L_t^{hv} تقاضای ساعتی ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن است. علاوه بر این، H^{Ch} و H^{Dis} هیدروژن جذب و تخلیه شده هستند.

قیود آب شیرین کن و ذخیره‌ساز آب: مقدار توان مصرف‌شده توسط دستگاه آب شیرین کن (P_t^D) برای حذف نمک از آب دریا و تولید آب آشامیدنی (Q_t^D) توسط معادله ۴۹ بیان می‌شود. ماکزیمم آب آشامیدنی حاصل‌شده از دستگاه آب شیرین کن ($Q^{D,max}$) در هر ساعت توسط رابطه ۵۰ محدود می‌شود.

$$P_t^D = \eta^D Q_t^D \quad (49)$$

$$0 \leq Q_t^D \leq Q^{D,max} \quad (50)$$

سیستم ذخیره‌ساز آب به منظور ذخیره‌سازی آب در ساعاتی که هزینه تولید آب آشامیدنی کم است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. آب ذخیره‌شده در ساعاتی که تقاضای برق زیاد است، می‌تواند کمک به‌سزایی به بهبود الگوی مصرف انرژی کند و سبب کاهش مصرف برق واحد آب شیرین کن شود. مقدار آب موجود در سیستم ذخیره‌ساز در هر ساعت توسط رابطه ۵۱ برآورد می‌شود. ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز آب توسط رابطه ۵۲ محدود می‌شود. محدودیت شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز آب توسط معادلات ۵۳ و ۵۴ مقید می‌شود. سیستم ذخیره‌ساز نمی‌تواند هم‌زمان در حالت شارژ و دشارژ باشد که این مسئله توسط معادله ۵۵ بیان شده است. رابطه ۵۶ نیز میزان برق مصرفی جهت پمپاژ آب طی ذخیره‌سازی آب را نشان می‌دهد.

$$LS_t = LS_{t-1} + \frac{Q_t^{Ch}}{CS} - \frac{Q_t^{Dis}}{CS} \quad (51)$$

$$0 \leq LS_t \leq LS^{max} \quad (52)$$

$$Q_t^{Ch} \leq Q^{Ch,max} I_t^{Ch} \quad (53)$$

$$Q_t^{Dis} \leq Q^{Dis} I_t^{Dis} \quad (54)$$

$$CS^{min} \leq CS_t \leq CS^{max} \quad (41)$$

در روابط یادشده، C_t^{Ch} توان شارژ ذخیره‌ساز سرمایشی است CS_t . سطح انرژی ساعتی ذخیره‌ساز سرمایشی را نشان می‌دهد CS^{max} و CS^{min} حداکثر و حداقل ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز سرمایشی می‌باشند η_{cs}^{Ch} و η_{cs}^{Dis} نیز به ترتیب بازده دشارژ و شارژ سیستم ذخیره‌ساز سرمایشی هستند.

قیود ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن مجهز به سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و P2H: در این مقاله، میزان تقاضای ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن براساس اطلاعات و داده‌های گذشته توسط بهره‌بردار سیستم پیش‌بینی می‌شود. ایستگاه سوخت‌گیری مورد مطالعه به واحد P2H و ذخیره‌سازی هیدروژنی به منظور افزایش انعطاف‌پذیری سیستم مجهز است. رابطه بین برق مصرفی (Ph_t) و هیدروژن تولیدی (H_t) توسط واحد P2H با معادله ۴۲ نشان داده می‌شود. ماکزیمم شارژ ($H_t^{Ch,max}$) و ماکزیمم دشارژ ($H_t^{Dis,max}$) سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی توسط معادلات ۴۳ و ۴۴ نشان داده می‌شود. معادله ۴۷ هیدروژن در دسترس (Sh_t) در ذخیره‌ساز هیدروژنی را در هر ساعت محاسبه می‌کند که توسط معادله ۴۶ محدود می‌شود. معادله ۴۷ نیز نشان می‌دهد سطح انرژی اولیه و نهایی ذخیره‌ساز هیدروژنی باید برابر باشند. معادله ۴۸ نیز تأمین تقاضای ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن در هر ساعت را نشان می‌دهد.

$$H_t = \eta_h Ph_t \quad (42)$$

$$0 \leq H_t^{Ch} \leq H_t^{Ch,max} \quad (43)$$

$$0 \leq H_t^{Dis} \leq H_t^{Dis,max} \quad (44)$$

$$Sh_t = Sh_{t-1} + \eta_h^{Ch} H_t^{Ch} - \frac{H_t^{Dis}}{\eta_h^{Dis}} \quad (45)$$

$$Sh^{min} \leq Sh_t \leq Sh^{max} \quad (46)$$

$$Sh_0 = Sh_{24} \quad (47)$$

$$H_t + H_t^{Dis} - H_t^{Ch} = L_t^{hv} \quad (48)$$

آید که تابع هدف واقعی در برابر انحراف پارامتر غیرقطعی نسبت به مقدار پیش‌بینی‌شده، به صورت بهینه محاسبه شود. زمانی که تابع هدف در برابر حداکثر شعاع عدم قطعیت ایمن‌سازی شود، تصمیم‌گیری مقاوم به دست می‌آید. به بیان دیگر، تصمیم‌گیرنده مطمئن خواهد بود که به ازای پارامتر غیرقطعی در محدوده شعاع عدم قطعیت به دست آمده، مقدار تابع هدف از حد مجازی که برای تعیین شعاع عدم قطعیت پارامتر غیرقطعی در نظر گرفته شده است، تجاوز نخواهد کرد. روابط ریاضی توصیف‌کننده این استراتژی در رابطه ۶۱ ارائه شده است:

$$\alpha(X, \Delta_C) = \max \left\{ \varepsilon : \left(\max_{\Psi \in U(\Psi, \varepsilon)} OF \leq \Delta_C = (1 + \beta) OF_b \right) \right\} \quad (61)$$

در رابطه یادشده Δ_C و OF_b به ترتیب مقدار بحرانی و مقدار پایه تابع هدف و x متغیر تصمیم‌گیری مسئله است. در استراتژی ریسک‌گریز، پارامتر غیرقطعی تأثیر نامطلوبی بر تابع هدف دارد. بنابراین، اپراتور سیستم، هزینه بیشتری را در رابطه با انحراف نامطلوب انرژی باد در این استراتژی در نظر می‌گیرد که در روابط زیر به عنوان یک مسئله دوسطحی ارائه شده است.

$$\alpha = \max \varepsilon \quad (62)$$

$$\begin{aligned} & \max \sum_{g=1}^{NG} \sum_{t=1}^T (b_g P_{g,t} + c_g u_{g,t} + S U_{g,t} + S D_{g,t}) + \\ & \sum_{t=1}^T \lambda^{ES} P e_t^{Dis} + \sum_{t=1}^T \lambda^{HS} H_t^{Dis} + \sum_{t=1}^T \lambda^{CS} C_t^{Dis} + \quad (63) \\ & \sum_{t=1}^T \lambda^{PL} P L_t^{Dis} \leq \Delta_C \end{aligned}$$

$$(1 - \varepsilon) \bar{P} W_t \leq P W_t \leq (1 + \varepsilon) \bar{P} W_t \quad (64)$$

$$(60)-(2) \quad (65)$$

به منظور حل مسئله توسط حل‌کننده‌های متداول، مسئله بهینه‌سازی دوسطحی پیشنهادی به یک مسئله تک‌سطحی تبدیل شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، خطای پیش‌بینی در توان تولیدی باد، در استراتژی ریسک‌گریز به گونه‌ای مدل می‌شود که سبب افزایش هزینه بهره‌برداری می‌شود. بنابراین در این استراتژی تنها کاهش

$$I_t^{ch} + I_t^{dis} \leq 1 \quad (55)$$

$$P_t^{pump} = Q_t^{ch} L^G \frac{g\varphi}{\eta^{PWL} (3.6 \times 10^6)} \quad (56)$$

در روابط یادشده، Q_t^{ch} و Q_t^{ch} آب ذخیره‌شده و تخلیه‌شده را نشان می‌دهند I_t^{dis} و I_t^{ch} به ترتیب متغیرهای باینری مربوط به وضعیت قرارگیری ذخیره‌ساز در حالت دشارژ و شارژ هستند LS_t . سطح آب ساعتی ذخیره‌ساز را برحسب متر نشان می‌دهد و LS^{max} حداکثر ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز است CS . سطح مقطع سیستم ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد.

قیود تعادل آب-انرژی: تعادل توان در سیستم آب-انرژی محلی پیشنهادی در رابطه ۵۷ بیان شده است که در آن توان مصرفی توسط دستگاه آب شیرین کن، پمپاژ آب، ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن و چیلر الکتریکی لحاظ شده‌اند. قید تعادل سرمایه‌ش در سیستم انرژی محلی پیشنهادی توسط رابطه ۵۸ تعریف شده است. قید تعادل آب آشامیدنی مورد نیاز سیستم جزیره‌ای شده نیز توسط رابطه ۵۹ قابل بیان است.

$$\sum_{g=1}^{NG} P_{g,t} + P W_t + P_t^{dis} - P_t^{ch} + P_t^{PL2G} - P_t^{G2PL} \quad (57)$$

$$-P_t^D - P_t^{pump} - P h_t - P_t^c - d_t^e - DR = 0$$

$$C_t^{chiller} + C_t^{dis} - C_t^{ch} = d_t^{c-DR} \quad (58)$$

$$Q_t^D + Q_t^{dis} - Q_t^{ch} = Q L_t^D \quad (59)$$

مدل‌سازی ریاضی مسئله تحت رویکرد مقاوم

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در این پژوهش به منظور مدل کردن عدم قطعیت توان تولیدی باد، از روش مقاوم مبتنی بر IGDT استفاده می‌شود. به طور کلی، توصیف ریاضی عدم قطعیت مسئله به صورت زیر صورت می‌گیرد: [۴]

$$U = U(\bar{\Psi}, \varepsilon) = \left\{ \Psi : \left| \frac{\Psi - \bar{\Psi}}{\bar{\Psi}} \right| \leq \varepsilon \right\} \quad (60)$$

این استراتژی تابع هدف را در برابر امکان خطا در پیش‌بینی پارامتر غیر قطعی ورودی، مقاوم می‌سازد و عموماً توسط تصمیم‌گیرندگان محافظه‌کار استفاده می‌شود. مجموعه متغیرهای تصمیم‌گیری باید به گونه‌ای به دست

در توان تولیدی باد، تأثیر نامطلوبی بر هزینه بهره‌برداری شبکه دارد. در نتیجه مسئله دوسطحی بیان‌شده توسط معادلات ۶۲ تا ۶۵ (می‌تواند همانند آنچه در ادامه ارائه شده است، به یک مسئله تک‌سطحی تبدیل می‌شود).

$$\alpha = \max \varepsilon \quad (66)$$

$$\sum_{g=1}^{NG} \sum_{t=1}^T (b_g P_{g,t} + c_g u_{g,t} + SU_{g,t} + SD_{g,t}) + \sum_{t=1}^T \lambda^{ES} P e_t^{Dis} + \sum_{t=1}^T \lambda^{HS} H_t^{Dis} + \sum_{t=1}^T \lambda^{CS} C_t^{Dis} + \sum_{t=1}^T \lambda^{PL} PL_t^{Dis} \leq \Delta_C \quad (67)$$

$$\Delta_C \leq (1 + \beta) OF_b \quad (68)$$

$$PW_t = (1 - \varepsilon) \bar{PW}_t \quad (69)$$

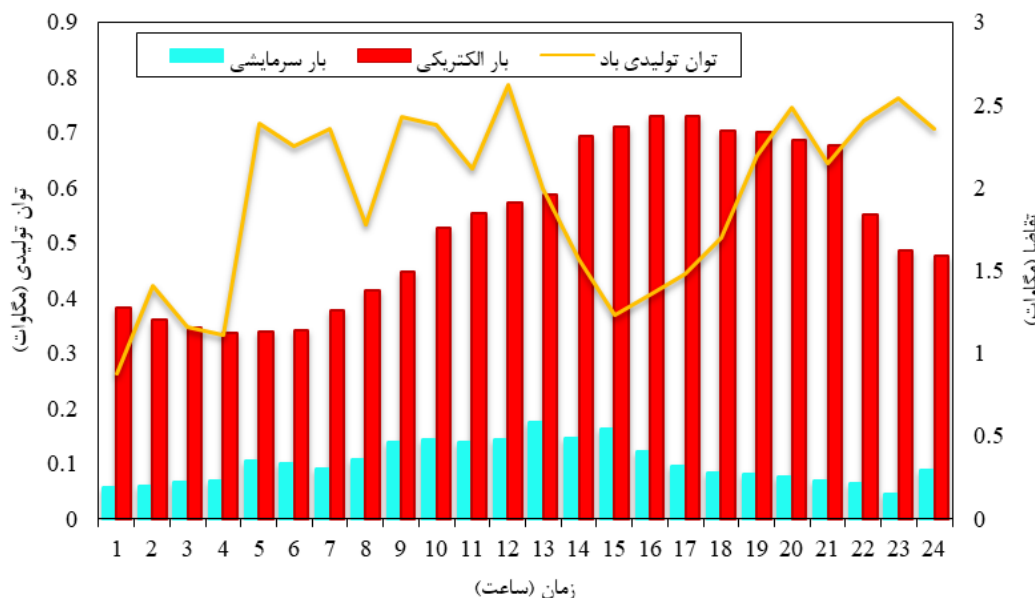
$$(60)-(2) \quad (70)$$

نتایج اجرای مدل

مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی به صورت یک برنامه‌ریزی آمیخته عدد صحیح مدل می‌شود که در نرم‌افزار گمز و توسط حل‌کننده تجاری CPLEX حل می‌شود. [۲۰]

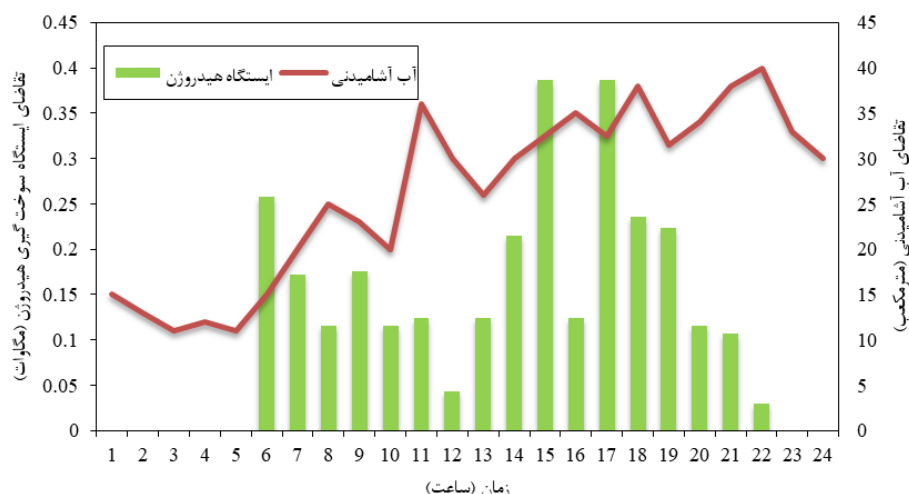
تقاضای برق، سرمایه‌ش و توان باد پیش‌بینی‌شده سیستم مورد مطالعه در شکل ۲ قابل مشاهده است. شکل ۳ نیز تقاضای مربوط به ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن و تقاضای آب آشامیدنی مورد نیاز سیستم جزیره مورد مطالعه را نشان می‌دهد. ماکزیمم توان تولیدی میکروتوربین‌ها به ترتیب ۷/۰، ۷/۰، ۵/۰ و ۱/۲ مگاوات فرض می‌شود. ماکزیمم توان شارژ و دشارژ و ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی به ترتیب برابر با ۰/۴، ۰/۴ و ۱/۲ مگاوات ساعت فرض می‌شود. ماکزیمم توان شارژ، دشارژ و ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن نیز برابر با ۰/۳، ۰/۳ و ۰/۹ مگاوات ساعت است.

همچنین ماکزیمم توان شارژ، دشارژ و ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز سرمایه‌ش برابر با ۰/۴، ۰/۴ و ۱ مگاوات ساعت است. ماکزیمم توان شارژ، دشارژ و ظرفیت ذخیره‌ساز آب نیز به ترتیب ۳۰، ۳۰ و ۱۲۰ متر مکعب فرض می‌شود. بازده فناوری P2H، چیلر الکتریکی، دستگاه آب شیرین کن به ترتیب برابر با ۸۰، ۱۵۰ و ۸۵ درصد است. تعداد خودروهای الکتریکی در این مطالعه برابر با ۳۰۰ فرض شده است. دیگر اطلاعات مربوط خودروهای الکتریکی در مقاله [۲۱] قابل مشاهده است.

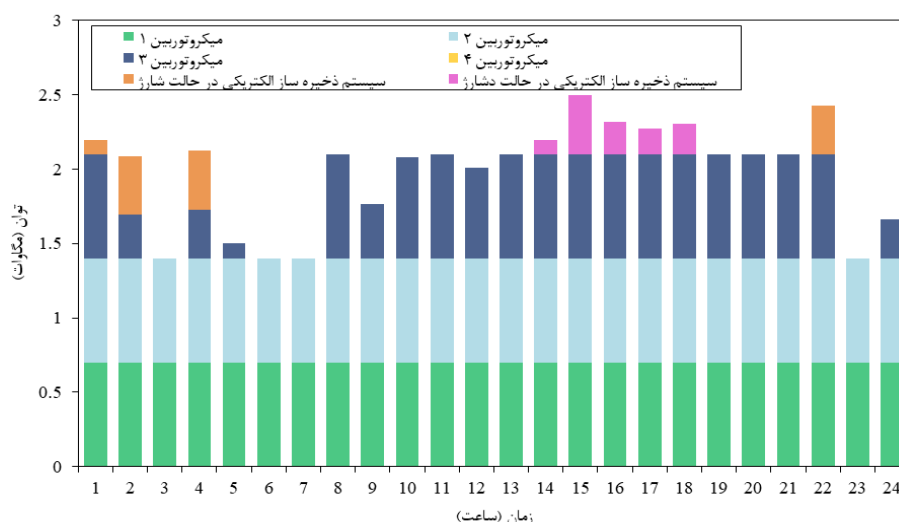


شکل ۲. تقاضای برق، سرمایه‌ش و توان باد پیش‌بینی‌شده

غارپور و زمانیان: اثر پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه بر برنامه‌ریزی مقاوم سیستم‌های آب-انرژی محلی در حضور ...



شکل ۳. تقاضای آب آشامیدنی و هیدروژن پیش‌بینی‌شده



شکل ۴. برنامه‌ریزی بهینه میکروتوربین‌ها و سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی

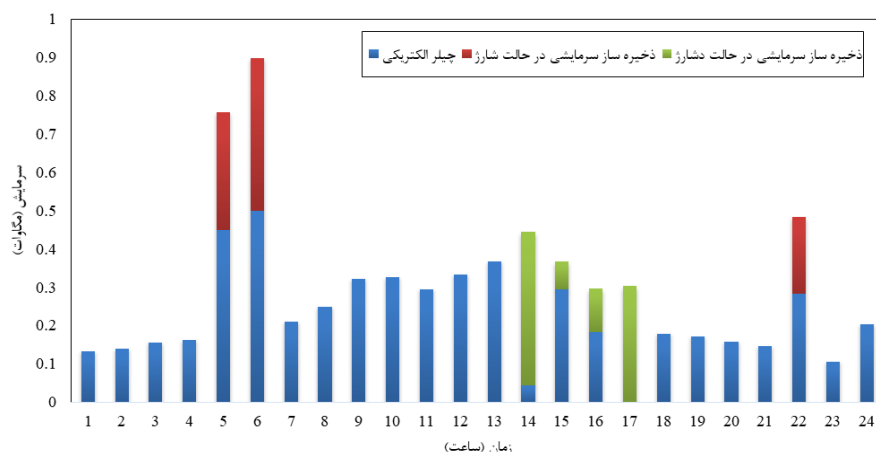
سپس در ساعاتی که تقاضای برق زیاد است) ساعات بین ۱۴ و ۱۸ (در حالت دشارژ استفاده می‌شود و از این طریق سبب عدم مشارکت میکروتوربین ۴ می‌شود. هزینه بهره‌برداری سیستم آب-انرژی پیشنهادی برابر با ۸۷/۶۲۴۸ دلار است که بدون حضور سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی این هزینه برابر با ۲۶/۶۳۲۲ دلار است. شکل ۵ نیز برنامه‌ریزی بهینه چلیر الکتریکی و سیستم ذخیره‌ساز سرمایه‌ش را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که چلیر الکتریکی به نحوی برنامه‌ریزی می‌شود که بتواند در ساعات کم‌مصرف برق، سرمایه‌ش بیشتری به منظور ذخیره‌سازی در سیستم ذخیره‌ساز تولید کند. سیستم ذخیره‌ساز سرمایه‌ش نیز در ساعات ۱۴ تا ۱۸ که مصرف برق زیاد است، در حالت دشارژ مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد و از این طریق کمک

ارزیابی اقتصادی منابع برق و سرمایه‌ش با حضور پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه

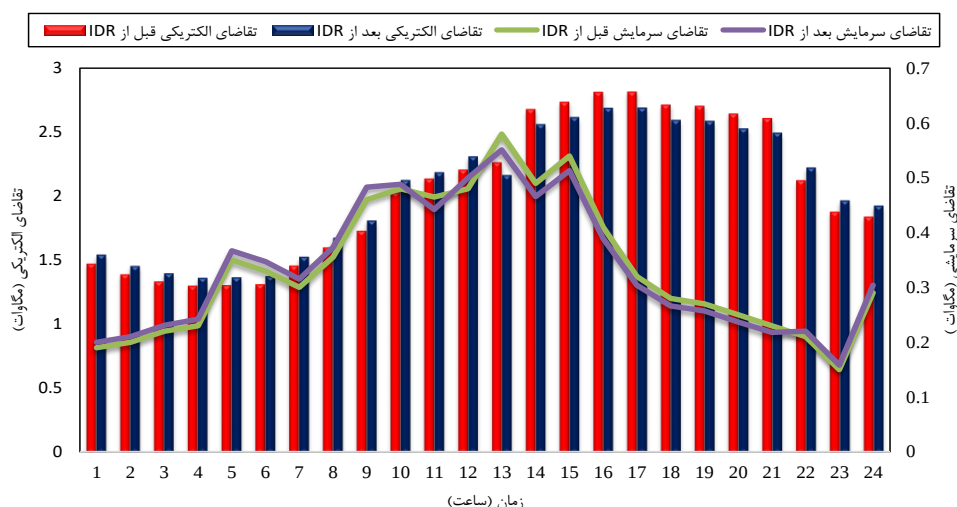
شکل ۴ برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید توان را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که میکروتوربین‌های ۱ و ۲ در تمامی ساعات مشارکت داده می‌شوند، زیرا این واحدها به عنوان ارزان‌ترین واحدها در نظر گرفته شده‌اند. میکروتوربین ۳ نیز به طور عمده بین ساعات ۸ تا ۲۲ با توجه به بالا بودن سطح تقاضای انرژی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

دلیل مشارکت میکروتوربین ۳ در ساعات اولیه به طور عمده به دلیل شارژ کردن سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و مانع شدن از مشارکت واحد گران‌قیمت ۴ در ساعت اوج مصرف است. سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی نیز در ساعات اولیه که تقاضا پایین است در حالت شارژ استفاده می‌شود و

است که این مسئله کمک ویژه‌ای به کاهش هزینه سیستم انرژی یکپارچه می‌کند. هزینه بهره‌برداری سیستم پیشنهادی بدون در نظر گرفتن پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه به ۷۲/۶۳۴۵ دلار افزایش یافته است. برنامه‌ریزی ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی نیز در شکل ۷ قابل مشاهده است. دیده می‌شود که سطح انرژی ساعتی ایستگاه بین ساعات ۵ تا ۱۲ با توجه به پایین بودن میزان تقاضای برق و ورود خودروها به ایستگاه افزایش یافته است. در واقع، بهره‌بردار تلاش می‌کند که در ساعات اولیه ورود خودروها به ایستگاه به شارژ آن‌ها بپردازد تا از این طریق سبب کاهش هزینه عملیاتی سیستم شود. در ساعت ۱۲ به بعد با توجه خروج خودروها از ایستگاه شارژ و دشارژ ایستگاه، سطح انرژی ساعتی کاهش یافته است.



شکل ۵. برنامه‌ریزی بهینه چیلر الکتریکی و سیستم ذخیره‌ساز سرمایش

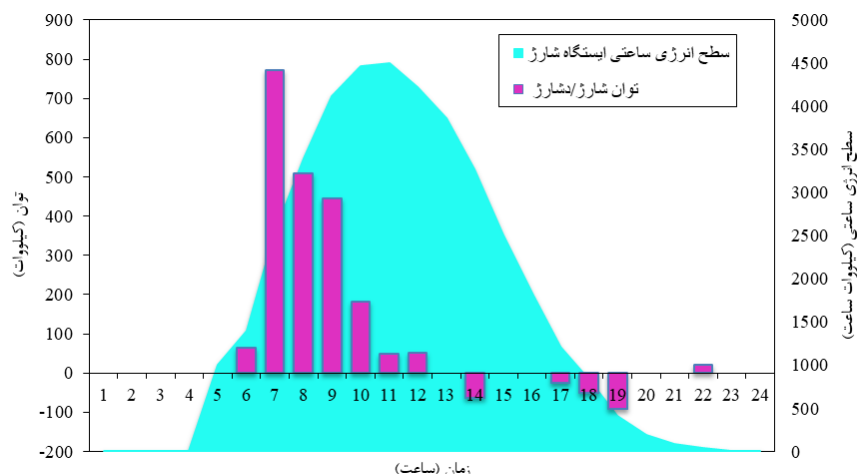


شکل ۶. تأثیر پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه بر تقاضای برق و سرمایش

به‌سزایی به عدم مشارکت میکروتوربین ۴ می‌کند. بدون حضور سیستم ذخیره‌ساز سرمایش، هزینه بهره‌برداری برابر با ۳۲/۶۲۹۷ دلار می‌شود که افزایش هزینه بهره‌برداری را نشان می‌دهد.

اثر پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه بر تقاضای الکتریکی و سرمایشی سیستم پیشنهادی در شکل ۶ نشان داده شده است. میزان مشارکت مصرف‌کنندگان الکتریکی و سرمایشی در برنامه پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه ۵ درصد فرض شده است. تقاضای الکتریکی و سرمایشی از ساعات پرمصرف برق به ساعات کم‌مصرف شیفت یافته‌اند. مسئله قابل توجه آن است که تقاضای سرمایشی نیز به طور عمده به ساعت پرمصرف برق واکنش نشان داده شده و میزان تقاضای خود را براساس ساعات تقاضای برق تضمین کرده

غفارپور و زمانیان: اثر پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه بر برنامه‌ریزی مقاوم سیستم‌های آب-انرژی محلی در حضور ...

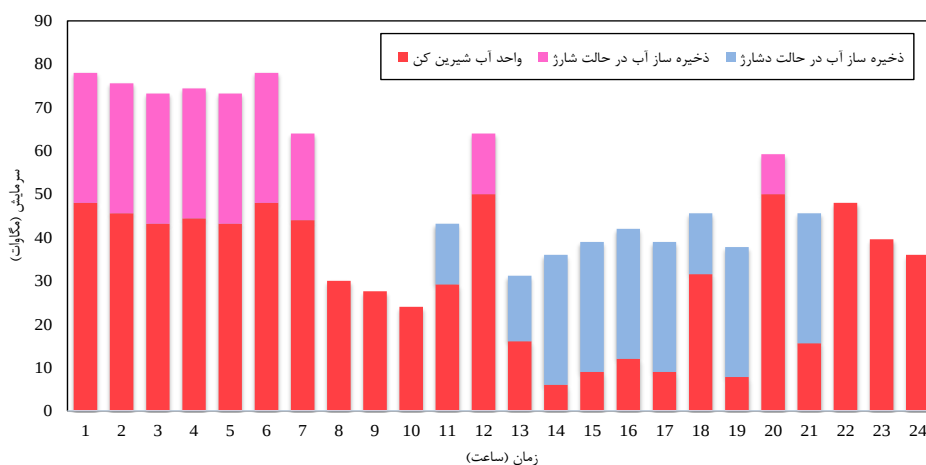


شکل ۷. برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی

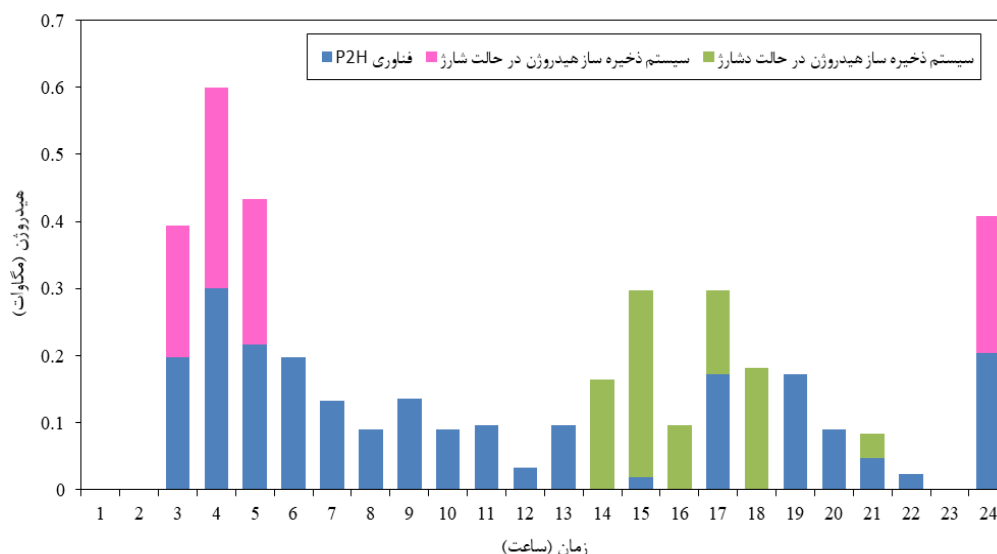
سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که هیدروژن تولیدشده توسط P2H در ساعات پیک تقاضای برق کاهش یافته و در ساعات کم‌باری افزایش داشته است، زیرا واحد P2H از مصرف‌کنندگان برق به شمار می‌رود و نحوه برنامه‌ریزی آن به صورتی خواهد بود که سبب کاهش تقاضای برق در ساعات پیک مصرف شود. سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن نقش به‌سزایی در کاهش مصرف توان واحد P2H در ساعات پیک مصرف برق ایفا می‌کند که منجر به کاهش هزینه بهره‌برداری تا ۲/۱ درصد می‌شود. در نهایت، جدول ۲ به منظور مقایسه تأثیر هر یک از اجزای سیستم انرژی چند حامل انرژی تهیه شده است. این جدول، نقش عدم حضور هر یک از این اجزا بر هزینه بهره‌برداری مورد انتظار ریزشکه را نشان می‌دهد.

ارزیابی اقتصادی منابع آب و هیدروژن

در شکل ۸ برنامه‌ریزی بهینه واحد آب شیرین کن و سیستم ذخیره‌ساز آب به منظور تأمین آب آشامیدنی مورد نیاز سیستم جزیره‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، واحد آب شیرین کن در ساعاتی که تقاضای برق کمتر است به نمک‌زدایی آب دریا می‌پردازد. به علاوه در ساعات اولیه با توجه به وجود ذخیره‌ساز آب، حجم آب بیشتری توسط دستگاه آب شیرین کن نمک‌زدایی می‌شود. در عوض، در ساعاتی که تقاضای برق زیاد است، سیستم ذخیره‌ساز آب از آب ذخیره‌شده استفاده می‌کند و منجر به کاهش مصرف توان واحد آب شیرین کن می‌شود. حضور سیستم ذخیره‌ساز آب منجر به کاهش هزینه بهره‌برداری روزانه تا ۱/۱ درصد می‌شود. شکل ۹ نیز طرح تأمین بهینه ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن در حضور فناوری P2H و



شکل ۸. برنامه‌ریزی بهینه واحد آب شیرین کن و سیستم ذخیره‌ساز آب



شکل ۹. برنامه‌ریزی بهینه واحد P2H و سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن

جدول ۲. مجموعه‌ها و شاخص‌های مرتبط

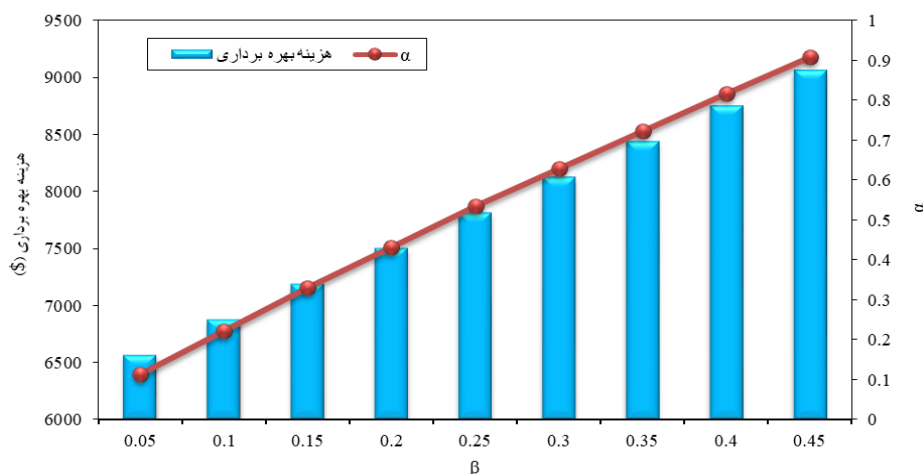
ساختار ریز شبکه	سیستم آب-انرژی پیشنهادی	در غیاب ذخیره‌ساز الکتریکی	در غیاب ذخیره‌ساز سرمایشی
هزینه (دلار)	۸۷/۶۲۴۸	۲۶/۶۳۲۲	۳۲/۶۲۹۷
ساختار ریز شبکه	در غیاب برنامه پاسخگویی بار یکپارچه	در غیاب ذخیره‌ساز آب	در غیاب ذخیره‌ساز هیدروژنی
هزینه (دلار)	۷۲/۶۳۴۵	۶۰/۶۳۱۷	۸۵/۶۳۲۵

ارزیابی عدم قطعیت توان باد تحت رویکرد IGDT

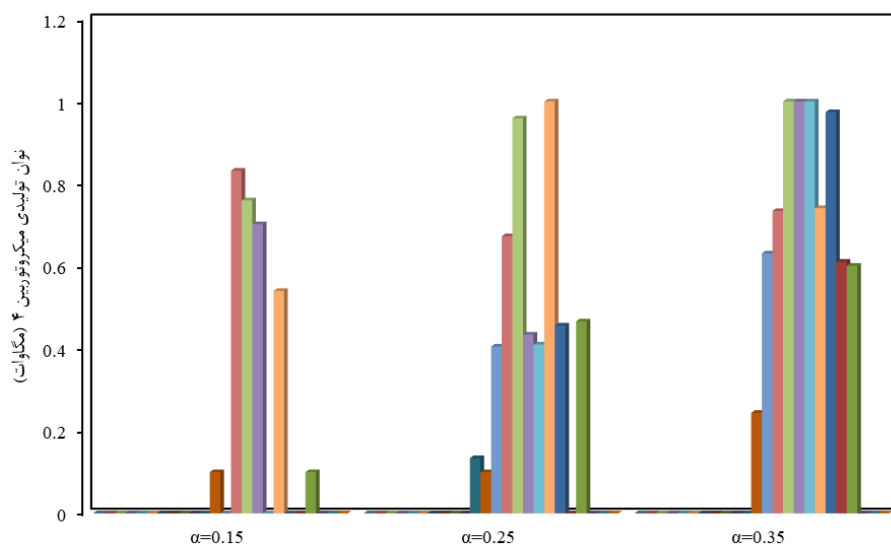
در این بخش اثر عدم قطعیت توان تولیدی باد تحت رویکرد IGDT آنالیز می‌شود. در شکل ۱۰ دیده می‌شود که همان‌طور پارامتر مقاوم β افزایش می‌یابد، هزینه بهره‌برداری و تابع مقاوم بهینه α نیز افزایش می‌یابند؛ به این معنا که بهره‌بردار برای دستیابی به یک رویکرد ریسک‌گریزتر باید هزینه بهره‌برداری بیشتری را متحمل شود، اما در عوض می‌تواند محدوده گسترده‌تری از خطای پیش‌بینی تولید توان باد را پوشش دهد. برای مثال، تحت β برابر با ۱۵/۰، هزینه بهره‌برداری روزانه و تابع مقاوم بهینه α به ترتیب برابر با ۲۱/۷۱۸۶ دلار و ۳۳ درصد هستند؛ به این معنا که اگر خطا در پیش‌بینی تولید توان باد در هیچ‌یک از ساعات برنامه‌ریزی از ۳۳ درصد فراتر نرود، بهره‌بردار می‌تواند هزینه بهره‌برداری ۲۱/۷۱۸۶ دلار را تضمین کند. با افزایش پارامتر مقاوم این هزینه افزایش

و در عوض دستیابی بهره‌بردار به رویکردی مقاوم‌تر افزایش می‌یابد. شکل ۱۱ نیز اثر افزایش تابع مقاوم بهینه بر توزیع توان میکروتوربین ۴ را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که میکروتوربین ۴ با افزایش α مشارکتش در تامین تقاضای برق افزایش یافته که نتیجه آن افزایش هزینه بهره‌برداری روزانه و کاهش وابستگی به تولید توان باد است. بنابراین بهره‌بردار جهت اجرای یک رویکرد ریسک‌گریز باید مشارکت واحد گران‌قیمت ۴ را افزایش دهد. به عبارت واضح‌تر، α بیانگر بازه عدم قطعیت موجود در تولید توان بادی است که به عنوان متغیر در مسئله مبتنی بر IGDT به کار می‌رود. افزایش این متغیر یا همان تابع مقاوم بهینه به معنای در نظر گرفتن ریسک عدم قطعیت بالاتر است و بنابراین افزایش همکاری میکروتوربین) با هزینه بهره‌برداری گران‌تر (راهکار مقابله با این ریسک است.

غفارپور و زمانیان: اثر پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه بر برنامه‌ریزی مقاوم سیستم‌های آب-انرژی محلی در حضور ...



شکل ۱۰. اثر پارامتر مقاوم β بر هزینه بهره‌برداری و تابع مقاوم بهینه α



شکل ۱۱. اثر تابع مقاوم بهینه α بر مشارکت میکروتوربین ۴

سیستم‌های ذخیره‌ساز آب، برق، سرمایش و هیدروژن، واحد تبدیل برق به هیدروژن و چیلر الکتریکی به منظور تامین همزمان تقاضاهای آب-انرژی مجهز بود. از حل مسئله پیشنهادی نتایج زیر حاصل شد:

۱. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز برق، سرمایش و هیدروژن به ترتیب منجر به کاهش هزینه بهره‌برداری به میزان ۱/۱، ۷/۰ و ۱/۲ درصد شد.

۲. سیستم ذخیره‌ساز آب منجر به کاهش مصرف برق در ساعات پیک و کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم به میزان ۱/۱ درصد شد.

۳. پاسخگویی تقاضای یکپارچه تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش پیک مصرف و هزینه بهره‌برداری سیستم به میزان ۵/۱ درصد داشت.

نتیجه‌گیری

این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی بهینه برای سیستم‌های انرژی محلی مبتنی بر برق، سرمایش، هیدروژن و آب در حضور خودروهای الکتریکی و هیدروژنی پیشنهاد داد. از یک رویکرد مقاوم مبتنی بر IGDT بدون نیاز به تولید سناریو و تابع چگالی احتمال استفاده شد که بهره‌بردار را قادر ساخت به مدیریت عدم قطعیت در توان تولیدی باد براساس بودجه‌اش بپردازد و یک هزینه بهره‌برداری معقول را تضمین کند. همچنین، نقش پاسخ‌گویی تقاضای یکپارچه مبتنی بر برق و سرمایش در جهت کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم آب-انرژی محلی بررسی شد. سیستم انرژی پیشنهادی به منابع تولید برق و سرمایش، دستگاه آب شیرین کن، توربین بادی،

- multi-energy market considering network constraints. *Appl Energy*. 2019;250:512-529.
- [6]. Lu X, Liu Z, Ma L, Wang L, Zhou K, Feng N. A robust optimization approach for optimal load dispatch of community energy hub. *Appl Energy*. 2020;259:114195.
- [7]. Xu X, Hu W, Cao D, Huang Q, Liu W, Jacobson MZ, Chen Z. Optimal operational strategy for an offgrid hybrid hydrogen/electricity refueling station powered by solar photovoltaics. *J Power Sources*. 2020;451:227810.
- [8]. Mansour-Saatloo A, Ebadi R, Mirzaei M. A, Zare K, Mohammadi-Ivatloo B, Marzband M, Anvari-Moghaddam A. Multi-objective IGDT-based scheduling of low-carbon multi-energy microgrids integrated with hydrogen refueling stations and electric vehicle parking lots. *Sustain Cities and Soc*. 2021;74:103197.
- [9]. Xu X, Hu W, Liu W, Wang D, Huang Q, Huang R, Chen Z. Risk-based scheduling of an off-grid hybrid electricity/hydrogen/gas/refueling station powered by renewable energy. *J Cleaner Prod*. 2021;315:128155.
- [10]. Mansour-Saatloo A, Pezhmani Y, Mirzaei MA, Mohammadi-Ivatloo B, Zare K, Marzband M, Anvari-Moghaddam A. Robust decentralized optimization of multi-microgrids integrated with power-to-X technologies. *Appl Energy*. 2021;304:117635.
- [11]. Wu X, Qi S, Wang Z, Duan C, Wang X, Li F. Optimal scheduling for microgrids with hydrogen fueling stations considering uncertainty using data-driven approach. *Appl Energy*. 2019;253:113568.
- [12]. Sui Q, Wei F, Lin X, Li Z. Optimal energy management of a renewable microgrid integrating water supply systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021;125:106445.
- [13]. Moazeni F, Khazaei J. Optimal operation of water-energy microgrids; a mixed integer linear programming formulation. *J Cleaner Prod*. 2020;275:122776.
- [14]. Moazeni F, Khazaei J. Dynamic economic dispatch of islanded water-energy microgrids with smart building thermal energy management system. *Appl Energy*. 2020;276:115422.
- [15]. Mohamed M. A, Almalaq A, Awwad E. M, El-Meligy M. A, Sharaf M, Ali Z. M. An effective energy management approach within a smart island considering water-energy hub. *IEEE Trans Ind Appl*. 2020.
۴. در نظر گرفتن همزمان پاسخگویی تقاضای یکپارچه در کنار سیستم‌های ذخیره‌ساز آب-انرژی هزینه بهره‌برداری سیستم آب-انرژی پیشنهادی را به میزان ۶/۵ درصد کاهش داد که اثر برنامه‌ریزی هماهنگ این منابع را به‌خوبی نشان می‌دهد.
۵. با توجه به رویکرد مقاوم پیشنهادی، بهره‌برداری سیستم بر اساس یک هزینه قابل قبول توانست محدوده مناسبی از خطا در پیش‌بینی تولید توان باد را پوشش دهد و یک استراتژی ریسک‌گریز بدون نیاز به تولید سناریو اتخاذ کند.
- در خصوص کارهای آینده می‌توان ابتدا به مدل‌سازی ریسک اشاره کرد. راهکار ارزش در معرض ریسک شرطی برای دخالت دادن ریسک عدم قطعیت موجود در چندین واحد تولیدی/بار و به واسطه تعداد سناریوهای بالا بسیار مهم است. مورد بعدی، بحث برنامه‌های پاسخ‌گویی بار است که می‌توان به شکل دقیق‌تری آن‌ها را اعمال کرد. برنامه‌های مبتنی بر قیمت، از جمله برنامه‌های پاسخگویی بار هستند که نقش موثری در مدیریت مصرف این نوع ریزشک‌ها می‌توانند داشته باشند.

منابع

- [1]. Mirzaei M. A, Nazari-Heris M, Mohammadi-Ivatloo B, Zare K, Marzband M, Pourmousavi SA. Robust flexible unit commitment in network-constrained multicarrier energy systems. *IEEE Syst J*. 2020;15(4):5267-5276.
- [2]. Wang D, Jia H, Hou K, Du W, Chen N, Wang X, Fan M. Integrated demand response in district electricity-heating network considering double auction retail energy market based on demand-side energy stations. *Appl Energy*. 2019;248:656-678.
- [3]. Agabalaye-Rahvar M, Mansour-Saatloo A, Mirzaei MA, Mohammadi-Ivatloo B, Zare K. Economic-environmental stochastic scheduling for hydrogen storage-based smart energy hub coordinated with integrated demand response program. *Int J Energy Research*. 2021;45(14):20232-20257.
- [4]. Mirzaei M. A, Nazari-Heris M, Mohammadi-Ivatloo B, Zare K, Marzband M, Anvari-Moghaddam A. A novel hybrid framework for co-optimization of power and natural gas networks integrated with emerging technologies. *IEEE Syst J*. 2020;14(3):3598-3608.
- [5]. Liu P, Ding T, Zou Z, Yang Y. Integrated demand response for a load serving entity in

- [16]. Najafi J, Peiravi A, Anvari-Moghaddam A, Guerrero JM. Resilience improvement planning of power-water distribution systems with multiple microgrids against hurricanes using clean strategies. *J cleaner prod.* 2019;223:109-126.
- [17]. Roustaei M, Niknam T, Salari S, Chabok H, Sheikh M, Kavousi-Fard A, Aghaei J. A scenario-based approach for the design of Smart Energy and Water Hub. *Energy.* 2020;195:116931.
- [18]. Pakdel MJ, Sohrabi F, Mohammadi-Ivatloo B. Multi-objective optimization of energy and water management in networked hubs considering transactive energy. *J Cleaner Prod.* 2020;266:121936.
- [19]. Mirzaei MA, Nazari-Heris M, Mohammadi-Ivatloo B, Zare K, Marzband M, Shafie-Khah M, Anvari-Moghaddam A, Catalão JP. Network-constrained joint energy and flexible ramping reserve market clearing of power-and heat-based energy systems: a two-stage hybrid IGDT-stochastic framework. *IEEE Syst J.* 2020;15(2):1547-56.
- [20]. Li Y, Li Z, Wen F, Shahidehpour M. Privacy-preserving optimal dispatch for an integrated power distribution and natural gas system in networked energy hubs. *IEEE Trans Sustain Energy.* 2018;10(4):2028-2038.
- [21]. Ahrabi M, Abedi M, Nafisi H, Mirzaei M. A, Mohammadi-Ivatloo B, Marzband M. Evaluating the effect of electric vehicle parking lots in transmission-constrained AC unit commitment under a hybrid IGDT-stochastic approach. *Int J Elect Power & Energy Syst.* 2021;125:106546.