



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Risk-Based Multi-Stage Model Employment in the Multi-Objective Optimal Scheduling Process of Micro-Energy Grid Using Augmented Epsilon-Constrained Concept

Seyyed Mostafa Nosratabadi ^{a,*} , Ali Peivand ^b, Morteza Jadidoleslam ^a 

^a Department of Electrical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

^b Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-04-06

Revised: 2024-04-01

Accepted: 2024-04-07

Keywords:

Multi-Stage modeling;
Augmented epsilon-constraint method;
Micro-Energy grid;
Multi-Objective modeling;
Energy hub;
CCHP.

ABSTRACT

Today, due to the concern of emission and greenhouse gases, generation of a clean energy and using renewable energies in the best way (with high efficiency) is a very important issue. Although economic goals have always been more important than environmental goals. In this paper, more considerations have been made in order to consider the environmental issue in the proposed optimal scheduling of the system in the micro energy grid. This optimal system studies the energy hub system, which is the main part of the micro-energy grid, in the form of a CCHP-based network combined with renewable energies. This system uses three energy hubs, energy storage, and converter devices. Therefore, in this paper, a multi-stage planning framework is proposed for the energy hub system and to optimize its performance, including reducing emission and operational cost. In this model, upper and lower limits are considered for the power produced by renewable energy sources to indicate the possibility of power interruption due to their fluctuations. Also, by considering multiple objective functions, optimal decision conditions can be guaranteed for the decision operator. To solve the multi-objective problem, the augmented epsilon-constraint method is used. In addition, two optimal decision-making methods have been proposed and compared too. The results obtained after the implementation of the proposed model show the efficiency of the model in reducing the cost and environmental emission.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.30303.2431>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: sm.nosratabadi@sirjantech.ac.ir

How to cite this article:

Nosratabadi, S. M., Peivand, A., & Jadidoleslam, M. (2025). Risk-based multi-stage model employment in the multi-objective optimal scheduling process of micro-energy grid using augmented epsilon-constrained concept. *Journal of Modeling in Engineering*, 23(80), 1-19. doi: 10.22075/jme.2024.30303.2431

بکارگیری مدل چند مرحله ای مبتنی بر ریسک در پروسه برنامه ریزی بهینه چندهدفه شبکه میکرو انرژی با روش اپسیلون مقید پیشرفته

سید مصطفی نصرت آبادی^{۱*}، علی پیوند^۲، مرتضی جدیدالاسلام^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷	<p>امروزه با توجه به نگرانی آلودگی و گازهای گلخانه‌ای، تولید یک انرژی پاک و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به بهترین نحو (با بازدهی بالا) مسئله بسیار مهمی است. اگر چه همیشه اهداف اقتصادی از اهداف زیست محیطی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، اما در این مقاله، در برنامه ریزی بهینه پیشنهادی سیستم در شبکه میکروانرژی ملاحظات بیشتری به منظور در نظرگیری مسئله زیست محیطی صورت گرفته است. این سیستم بهینه، سیستم هاب انرژی را که بخش اصلی شبکه میکروانرژی است، به صورت شبکه مبتنی بر CCHP که با انرژی‌های تجدیدپذیر ترکیب شده است، مورد مطالعه قرار می‌دهد. این سیستم از سه هاب انرژی و دستگاه‌های ذخیره‌ساز و مبدل انرژی استفاده می‌کند. از این رو در این مقاله، یک چارچوب برنامه ریزی چندمرحله‌ای برای سیستم هاب انرژی و برای بهینه کردن عملکرد آن شامل کاهش آلودگی و هزینه عملیاتی پیشنهاد شده است. در این مدل برای توان تولیدی توسط منابع انرژی تجدیدپذیر حدود بالا و پایین در نظر گرفته شده است تا بیانگر احتمال انقطاع توان به دلیل نوسانات آن‌ها باشد. همچنین، با در نظر گرفتن چندین تابع هدف می‌توان شرایط تصمیم‌گیری بهینه را برای اپراتور تصمیم‌گیرنده تضمین کرد. برای حل مسئله چند هدفه در این مقاله از روش اپسیلون پیشرفته استفاده شده است. علاوه بر آن در این مقاله دو روش تصمیم‌گیری بهینه پیشنهاد و با یکدیگر مقایسه شده اند. نتایج بدست آمده پس از اجرای مدل پیشنهادی نشان‌دهنده کارایی مدل در کاهش هزینه و آلودگی زیست محیطی می‌باشد.</p>
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۳	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹	
<p>واژگان کلیدی:</p> <p>مدلسازی چند مرحله‌ای، روش اپسیلون مقید پیشرفته، شبکه میکرو انرژی، مدلسازی چند هدفه، هاب انرژی، تولید همزمان برق گرمایش و سرمایش (CCHP).</p>	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.30303.2431>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

بازسازی کرده‌اند. DGها، واحدهای تولید برقی مانند واحدهای ترکیبی گرمایش، سرمایش و توان (CCHP) و سلول‌های فتوولتائیک هستند که می‌توانند به سیستم‌های توزیع متصل شوند. واحدهای CCHP برق را به عنوان یک محصول جانبی با استفاده از سیستم بازیابی گرمای (HRS) تولید می‌کنند. به طور کلی گرمایش و سرمایش تولید شده

توزیع برق سنتی تحت تاثیر تغییرات منابع انرژی توزیع شده مانند تولیدات پراکنده (DGها)، دستگاه‌های ذخیره انرژی و تقاضاهای قابل کنترل قرار گرفته است. علاوه بر این، سیستم‌های انرژی مدرن پدید آمده مانند شبکه‌های هوشمند نیز پیکربندی تولید، ذخیره‌سازی و توزیع انرژی را

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: sm.nosratabadi@sirjantech.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

۲. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

استناد به این مقاله:

نظیر الگوریتم ژنتیک با دسته‌بندی غیر غالب (NSGAI) و الگوریتم بهبود یافته‌ی ازدحام ذرات (MPSO) نتایج بهتری را به طور خاص در مدل‌سازی چند هدفه داشته‌اند [۹ و ۱۰]. روش‌های اخیر عمدتاً بر مبنای توابع احتمالاتی می‌باشند، بنابراین نمی‌توان انتظار پاسخی دقیق را از آن‌ها داشت. در مقابل روش اسپیلین کاملاً مستقل از توابع احتمالاتی عمل می‌کند و از ساختاری ثابت برخوردار است. رویکرد قطعی به صورت گسترده‌ای برای مدل‌سازی مسائل مختلف EH به ویژه در کارهای منتشر شده گذشته استفاده شده است، به عنوان مثال می‌توان به توزیع بهینه انرژی EH و شارش توان [۱۱-۱۳]، برنامه‌ریزی کوتاه مدت EH [۱۴-۱۷] و تعهد واحد EH [۱۸ و ۱۹] اشاره نمود. برنامه‌ریزی شارش توان توسط یک واحد EH، توزیع بهینه EH نامیده می‌شود. با این تفسیر، برنامه‌ریزی کوتاه مدت EH در قالب مرجع [۲۰] شکل گرفته است که می‌تواند به عنوان یک مسئله خطی عددی صحیح مختلط برای برنامه‌ریزی وسایل ذخیره انرژی استفاده شود. تقاضاهای صنعتی در قالب EH در [۲۱] مدل‌سازی می‌شوند و یک برنامه‌ریزی بهینه‌سازی قطعی آفلاین برای آن پیشنهاد شده است. برنامه‌ریزی روزانه بهینه EH‌های مسکونی که تقاضاهای قابل کنترل را نیز مدیریت می‌کند، در [۲۲] شکل گرفته است. در این مرجع مصارف برق تحت عنوان TOU و RTP در نظر گرفته شده‌اند که می‌توانند تصویری جامع از تاثیرات هر یک از روش‌های قیمت‌گذاری در اختیار بهره‌بردار بگذارد.

یکی دیگر از موضوعات قابل توجه در یک میکرو گرید با سطح نفوذ بالای منابع انرژی تجدید پذیر، موضوع انقطاع توان می‌باشد. در حقیقت برای تضمین پایداری سیستم متصل به این منابع و با توجه به نوسانات دائمی آن‌ها همواره این احتمال وجود دارد که بخشی از توان تولیدی این منابع از دست برود. بنابراین یکی از توابع هدف در یک میکرو گرید می‌تواند به حداقل رساندن انقطاع توانی باشد. به طور کلی نوآوری‌های مقاله پیش رو به شرح زیر است:

- ارائه یک ساختار چند مرحله‌ای برای کاهش هزینه عملیاتی کل سیستم در کنار میزان آلودگی تولیدی.

تعریف یک شبکه میکروانرژی مبتنی بر سیستم CCHP برای تامین تقاضای الکتریکی، سرمایه‌ش و گرمایش.

- ارائه یک ساختار چند هدفه برای ایجاد مقایسه بر

در هنگام تولید برق نیروگاه‌های بزرگ نمی‌تواند برای تامین تقاضاهای حرارتی و خنک‌کنندگی استفاده شود، زیرا تقاضای گرمایش و سرمایه‌ش محلی به اندازه کافی بالاست. علاوه بر این، انتقال گرما و سرما در فواصل طولانی به دلیل تلفات بالای آن از لحاظ اقتصادی قابل توجیه نیست. بر این اساس اگر واحدهای CCHP گرمایش و سرمایه‌ش تولید شده خود را به صورت محلی مصرف کنند، می‌توانند رقابت سودمندتری داشته باشند [۱]. ایده هاب انرژی (EH) به عنوان یک سیستم با تعدادی از ورودی‌ها و خروجی‌های انرژی تعریف شده است که شامل مبدل‌ها و ذخیره‌سازهای انرژی است. EH ممکن است برای مدل‌سازی سیستم‌های انرژی با اندازه‌های مختلف از یک مصرف‌کننده مسکونی گرفته تا سیستم‌های انرژی ملی، مورد استفاده قرار گیرد. در این زمینه مصرف‌کنندگان انرژی کوچک و متوسط که از منابع انرژی توزیع شده استفاده می‌کنند نیازمند برنامه‌ریزی هستند [۲].

برای مدل‌سازی یک ریزشبکه متشکل از سیستم‌های متنوع از جمله سیستم CCHP روش‌های مختلفی وجود دارد. عمده این روش‌ها به بهینه‌سازی طی یک مرحله اکتفا می‌کنند که نتایج کارآمدی در پی نخواهد داشت. برای رسیدن به اهداف یک ریزشبکه، ساختار بهینه‌سازی چند مرحله‌ای می‌تواند بسیار موثر باشد. به عبارتی دیگر در این ساختار، مسئله به دو بخش تقسیم می‌شود که شامل مسئله اصلی و مسئله فرعی می‌باشد. هر کدام از این زیر مسئله‌ها یکی از اهداف ریزشبکه را دنبال خواهد کرد. بنابراین با حل مسئله بهینه‌سازی برای هر زیر مسئله می‌توان ناحیه بهینگی را مشخص نمود. این ناحیه دارای حدود بالا و پایین بوده که نقطه کار سیستم مورد بررسی باید بین این حدود قرار گیرد. در این زمینه روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران پیشنهاد شده که می‌توان به روش تجزیه بندرز (BD) [۳] و روش C&CG [۴] اشاره نمود. کاربرد تکنیک چند مرحله‌ای می‌تواند بسیار گسترده باشد. حل مسئله تعهد واحدها (UC) [۵]، توزیع اقتصادی [۶]، بهینه‌سازی ظرفیت ذخیره‌سازها در بازه‌های زمانی یک ساعته و یک روزه [۷] و به حداقل رساندن انقطاع باد [۸] از جمله کاربردهای تکنیک چند مرحله‌ای می‌باشد. الگوریتم‌های فرا ابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک (GA) و بهینه‌سازی بر اساس هوش جمعی (PSO) می‌توانند در مدل‌سازی چند هدفه مورد استفاده قرار گیرند. اخیراً سوبه‌های ارتقا یافته

در مرحله اول وضعیت روشن یا خاموش بودن واحدهای ژنراتوری، واحدهای ذخیره‌ساز سرما و گرما، چیلر جذبی و بویلر گازی مشخص خواهد شد. این کار توسط پنج متغیر باینری انجام خواهد شد. به بیانی دیگر پس از اجرای مرحله اول می‌توان از اقتصادی‌ترین وضعیت واحدها اطمینان حاصل نمود. لازم به ذکر است که در این مرحله باتری یا ذخیره‌ساز توان الکتریکی نخواهیم داشت. با توجه به این که خروجی مرحله اول نمایانگر کمترین هزینه خواهد بود، بنابراین در این مرحله بیشترین میزان استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را به عنوان حد بالای مسئله خواهیم داشت.

• مرحله دوم

در این مرحله وضعیت متغیرهای باینری مسئله ثابت نگه داشته خواهد شد تا کمترین هزینه تولید توان تضمین شود. با توجه به احتمال کاهش توان تولیدی توسط منابع انرژی تجدیدپذیر و اصل عدم قطعیت این منابع، لازم است تا در این مرحله قیود تکمیلی را به مدل پیشنهادی اضافه کنیم (این قیود توسط روابط (۱۸) و (۱۹) تعریف شده‌اند). نتایج بدست آمده در این مرحله برای منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان حد پایین در نظر گرفته خواهد شد.

• مرحله سوم

طی اجرای مراحل اول و دوم، مقادیر متفاوتی برای مشارکت منابع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. در حقیقت، این منابع در مرحله اول بدون داشتن ریسک توانستند در برنامه تولید مشارکت کنند در حالیکه در مرحله دوم، ریسک کاهش توان تولیدی به دلیل عدم قطعیت این منابع مانع مشارکت حداکثری آنها شد. در مرحله سوم اپراتور هوشمند شبکه باید بین هزینه عملیاتی کل و ریسک استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مقایسه انجام دهد و بهترین تصمیم را بگیرد. برای کمک به تصمیم‌گیری بهینه، در این مقاله یک روش ابتکاری پیشنهاد شده است. همچنین برای نمایش کارایی این روش، مقایسه ای با روش‌های مرسوم فازی و تابع امتیاز در قسمت نتایج انجام گرفته است.

• مرحله چهارم

پس از مشخص شدن نقطه کار بهینه سیستم در مرحله سوم، می‌توان ظرفیت باتری مورد نیاز برای هاب الکتریکی را تعیین نمود. به عبارت دیگر در مدل‌سازی انجام شده در این مقاله، ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی به عنوان یک

مبنای مفهوم بهینگی پارتو و به کارگیری روش اپسیلون پیشرفته جهت حل مسئله چند هدفه.

- ارائه دو روش تصمیم‌گیری بهینه مبتنی بر روش فازی و روش تابع امتیاز.
- تخمین ظرفیت ذخیره‌ساز برای هاب الکتریکی بر اساس تصمیم‌گیری بهینه منابع انرژی تجدید پذیر. سایر بخش‌های این مقاله بدین صورت است که در بخش ۲ مدلسازی پیشنهادی مدیریت انرژی ارائه شده است. نتایج عددی شبیه‌سازی مدل پیشنهادی در یک مورد مطالعاتی در بخش ۳ مورد بحث قرار می‌گیرد و در بخش ۴ نکات نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- ساختار شبکه و مدل پیشنهادی

۱-۲- شبکه میکرو انرژی (MEG)

شبکه میکرو انرژی (MEG) یک مدل ابتکاری و توسعه یافته از ریزشبکه است؛ که بسیاری از اشکال انرژی مانند گاز، برق، گرمایش و سرمایش در آن ادغام شده است. این مدل، یک مدل بهبود یافته است که در بسیاری از جنبه‌ها مزایای بسیاری دارد و بیشتر انرژی‌های تجدید پذیر در آن پیاده‌سازی می‌شوند [۲۳]. به طور کلی این شبکه، در مقایسه با شبکه‌های سنتی، قابل اطمینان‌تر و ایمن‌تر است و ارسال بهینه در آن موجب کاهش انتشار آلودگی و هزینه عملیاتی می‌شود.

۱-۱-۲- هاب انرژی

بخش اصلی شبکه MEG، هاب انرژی است که از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است. هاب انرژی مفهومی است که در آن چندین تولیدکننده و مصرف‌کننده انرژی وجود دارد و انرژی می‌تواند از منابع مختلف دریافت شود و به فرم‌های گوناگون تغییر شکل یابد و همچنین به صورت شیمیایی، حرارتی یا مکانیکی ذخیره شود. یا به طور کلی هاب انرژی واحدی است که در آن امکان تبدیل، تغییر و ذخیره سازی چندین حامل انرژی وجود دارد و می‌توان از آن به عنوان واسطه‌ای میان تولیدکننده و مصرف‌کننده انرژی یاد کرد.

۲-۲- مدلسازی چند مرحله‌ای

همانطور که در ابتدا گفته شد در این مقاله قصد داریم ساختار بهینه‌سازی چند مرحله‌ای برای شبکه میکروانرژی اشاره شده را پیاده‌سازی کنیم. ساختار پیشنهادی شامل چهار مرحله می‌باشد که به شرح زیر تشریح می‌گردد:

• مرحله اول

$$Cost_{pe} = \sum_{t=1}^{24} (P_e^t + P_{in}^t) \quad (4)$$

مقدار هزینه تولید توان توسط دیزل ژنراتورها از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول هزینه مربوط به سوخت و قسمت دوم هزینه مربوط به خاموش و روشن شدن ژنراتورها می‌باشد. رابطه (۵) و (۶) به هزینه سوخت و روشن یا خاموش شدن مربوط می‌شود. همچنین رابطه (۷) مجموع هزینه‌های ژنراتورها را نشان می‌دهد.

$$C_{fuel} = \sum_{d=1}^{N_D} \sum_{t=1}^T [a_d \times (P_{dg}^{d,t})^2 + b_d \times P_{dg}^{d,t} + c_d] \quad (5)$$

$$C_{susc} = \sum_{d=1}^{N_D} \sum_{t=1}^T [SUC^d \times z^{d,t} + SDC^d \times v^{d,t}] \quad (6)$$

$$Cost_{dg} = \{C_{fuel} + C_{susc}\} \quad (7)$$

طبق روابط (۸) تا (۱۰)، سه متغیر باینری برای مدل‌سازی مسئله در نظر گرفته شده است. متغیر باینری A وضعیت فعلی ژنراتور را از نظر روشن یا خاموش بودن نشان می‌دهد. همچنین، متغیرهای باینری Z و V به ترتیب نشان دهنده روشن بودن و خاموش بودن ژنراتور در زمان می‌باشند.

$$A^{d,t} - A^{d,t-1} \leq z^{d,t} \quad \forall d,t \quad (8)$$

$$A^{d,t-1} - A^{d,t} \leq v^{d,t} \quad \forall d,t \quad (9)$$

$$z^{d,t} + v^{d,t} \leq 1 \quad \forall d,t \quad (10)$$

روابط (۱۱) و (۱۲) برای اجرای قیود مدت زمان روشن یا خاموش بودن ژنراتورها تعریف شده‌اند.

$$[A^{d,t+1} - A^{d,t}] \times MUT^d - \sum_{\tau=t+2}^{\min\{T,t+MUT^d\}} A^{d,\tau} \leq \max\{1, MUT^d - T + t - 1\} \quad \forall d,t \in 1, 2, \dots, T-2 \quad (11)$$

$$[A^{d,t+1} - A^{d,t}] \times MDT^d - \sum_{\tau=t+2}^{\min\{T,t+MDT^d\}} A^{d,\tau} \leq MDT^d \quad \forall d,t \in 1, 2, \dots, T-2 \quad (12)$$

در روابط بالا پارامترهای MDT و MUT به ترتیب بیانگر حداقل زمان خاموش بودن و حداقل زمان روشن بودن برای ژنراتور d ام می‌باشند.

به عنوان تابع هدف دوم، آلودگی ناشی از برق و گاز

متغیر در نظر گرفته شده است. متغیر مذکور شامل قیود و محدودیت‌هایی است که در بخش محدودیت‌های ذخیره‌ساز الکتریکی به آن اشاره شده است. این ظرفیت بر اساس حداقل کردن هزینه و میزان نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر محاسبه خواهد شد.

۲-۳- مدل‌سازی چندهدفه

به منظور حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، روش‌ها و تکنیک‌های خاصی مانند تکنیک مجموع وزندار، اپسیلون مقید و الگوریتم تکاملی در دسترس هستند، که در این مقاله از روش و رویکرد اپسیلون مقید پیشرفته [۲۴] برای حل مدل پیشنهادی چند هدفه برای عملکرد بهینه سیستم هاب انرژی مبتنی بر CCHP تحت اولویت‌های اقتصادی و محیط زیستی استفاده شده است. تفاوت اصلی روش اپسیلون مقید معمولی با پیشرفته در بدست آوردن جواب‌های بهینه قوی است. در واقع هر دو روش می‌توانند جواب‌های بهینه را در ناحیه شدنی مسئله شناسایی کنند اما روش اپسیلون پیشرفته به این موضوع اکتفا نکرده و به دنبال بهینه‌ترین جواب در محدوده شدنی مسئله خواهد بود. همچنین در این مقاله دو روش تصمیم‌گیری بهینه پیشنهاد شده است که می‌تواند به اپراتور هوشمند تصمیم‌گیرنده جهت اتخاذ تصمیم نهایی کمک کند.

۲-۴- توابع هدف

به عنوان تابع هدف، هزینه‌های گاز خریداری شده از شبکه گاز، برق خریداری شده از شبکه برق و توان تولیدی توسط دیزل ژنراتورها بایستی به حداقل برسد، که مقدار حداقل مجموع دو هزینه که معرف تابع هدف اول می‌باشد در رابطه (۱) نمایش داده شده است.

$$OF_1 = \text{Min}[F_1] = Cost_{pg} + Cost_{pe} + Cost_{dg} + \sum_{t=1}^T (c_{ch} P_{es,c}^t + c_{dis} P_{es,d}^t) \quad (1)$$

هزینه گاز خریداری شده از شبکه گاز در روابط (۲) و (۳) نمایش داده شده است.

$$Cost_{pg} = P_g \times \sum_{t=1}^{24} (P_{ge}^t + P_{gh}^t) \quad (2)$$

$$Cost_{pg} = P_g \times \sum_{t=1}^{24} \left(\frac{P_{gt}^t}{\eta_{ge}} + \frac{H_{gb}^t}{\eta_{gh,gb}} \right) \quad (3)$$

هزینه برق خریداری شده از شبکه برق بالادست در رابطه (۴) نشان داده شده است.

همچنین در معادلات (۲۰) تا (۲۲) به ترتیب حدود مربوط به گاز ورودی از شبکه گاز، مقادیر تولید توان توسط دیزل ژنراتورها و توان تولید شده از توربین گازی آورده شده است.

$$0 \leq P_{gas}^t \leq P_{gas}^{max} \quad (20)$$

$$P_{dg}^{min} \leq P_{dg}^{d,t} \leq P_{dg}^{max} \quad (21)$$

$$0 \leq P_{gt}^t \leq P_{gt}^{max} \quad (22)$$

و معادله نهایی (۲۳) مربوط به حداکثر توان قابل خریداری از شبکه بالادست می‌باشد.

$$0 \leq P_{grid}^t \leq P_{grid}^{max} \quad (23)$$

• محدودیت‌ها و تبدیلات انرژی مربوط به بخش

سرمایش:

در دو معادله (۲۴) و (۲۵) به ترتیب مدل ریاضی برای چیلر الکتریکی و چیلر جذبی نشان داده شده است.

$$P_{ec}^t \times COP_{ec} = C_{ec}^t \quad (24)$$

$$H_{ac}^t \times COP_{ac} = C_{ac}^t \quad (25)$$

در معادله (۲۶) تعادل انرژی خنک کننده تولید شده بیان شده است.

$$P_{ice}^t \times COP_{ice} = P_{cs,c}^t \quad (26)$$

همچنین در دو معادله (۲۷) و (۲۸) به ترتیب محدودیت تهویه ذخیره یخ و چیلر الکتریکی آورده شده است.

$$0 \leq P_{ice}^t \leq P_{ice}^{max} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{ec}^t \leq P_{ec}^{max} \quad (28)$$

• محدودیت‌ها و تبدیلات انرژی مربوط به بخش

گرمایش:

در رابطه (۲۹)، تعادل گاز ورودی از شبکه بالادست به سیستم هاب انرژی بیان شده است که طی این فرمول گاز ورودی از شبکه گاز برابر است با مجموع گاز ورودی به توربین گازی و دیگ بخار.

$$P_{gas}^t = P_{ge}^t + P_{gh}^t \quad (29)$$

در دو معادله (۳۰) و (۳۱) به ترتیب تبدیلات انرژی گاز بویلر و توربین گازی بیان شده است.

$$\eta_{gh,gb} \times P_{gh}^t = H_{gb}^t \quad (30)$$

$$\eta_{gh,gt} \times P_{ge}^t = H_{gt}^t \quad (31)$$

خریداری شده و همچنین آلودگی تولیدی توسط دیزل ژنراتورها بایستی به حداقل برسد، که در رابطه (۱۳) بیان شده است.

$$OF_2 = Min [F_2] = \sum_{t=1}^{24} \left[(\beta_e \times P_{in}^t) + \beta_g \times \left(\frac{P_{gt}^t}{\eta_{ge}} + \frac{H_{gb}^t}{\eta_{gh,gb}} \right) + (\beta_{dg} \times P_{dg}^{d,t}) \right] \quad (13)$$

۲-۲-۴- محدودیت‌ها و تبدیلات انرژی بخش‌های مختلف

در این قسمت برای سه بخش موجود در CCHP که مربوط به سیستم هاب انرژی می‌باشند، قیدهای محدودیت و روابط تبدیل انرژی مربوط به هر بخش به صورت جداگانه آورده شده است.

• محدودیت‌ها و تبدیلات انرژی مربوط به بخش

توان (الکتریکی):

تبادل بین شبکه برق بالادست و هاب توان (الکتریکی) در معادله (۱۴) نمایش داده شده است.

$$P_{grid}^t \times \eta_t = P_{in}^t \quad (14)$$

در رابطه (۱۵) توان تولید شده از توربین گازی به وسیله گاز ورودی به توربین گازی نشان داده شده است.

$$\eta_{ge} \times P_{ge}^t = P_{gt}^t \quad (15)$$

در معادلات (۱۶) و (۱۷) به ترتیب حدود مربوط به توان سیستم فتوولتائیک و توربین بادی آورده شده است.

$$0 \leq P_{pv}^t \leq P_{pv}^{max} \quad (16)$$

$$0 \leq P_{wt}^t \leq P_{wt}^{max} \quad (17)$$

قید (۱۸) معرف محدودیت تولید توان توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتائیک بین دو واحد زمانی متوالی می‌باشد. در این مقاله واحد زمانی یک ساعت در نظر گرفته شده است.

$$\begin{cases} P_{WT,PV}^t - P_{WT,PV}^{t-1} \leq R_{WT,PV}^{up} \\ P_{WT,PV}^{t-1} - P_{WT,PV}^t \leq R_{WT,PV}^{down} \end{cases} \quad (18)$$

همچنین قید (۱۹) میزان انرژی تولیدی توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتائیک را محدود می‌کند.

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T P_{WT}^t \Delta T \leq E_{WT} \\ \sum_{t=1}^T P_{PV}^t \Delta T \leq E_{PV} \end{cases} \quad (19)$$

الکتریکی از نسبت اتلاف انرژی ذخیره‌ساز (δ_{es}) استفاده شده است. همچنین، بازدهی شارژ و دشارژ انرژی الکتریکی مطابق با ضرایب $\eta_{es,c}$ و $\eta_{es,d}$ در نظر گرفته شده است. شارژ و دشارژ هر دو در یک زمان نمی‌تواند اتفاق بیفتد و در دو معادله (۳۸) و (۳۹) و به ترتیب محدودیت مربوط به حالت شارژ و دشارژ را داریم.

$$0 \leq P_{es,c}^t \leq u_{es} \times P_{es,c}^{\max} \quad (38)$$

$$0 \leq P_{es,d}^t \leq (1 - u_{es}) \times P_{es,d}^{\max} \quad (39)$$

و در آخر معادله (۴۰) مربوط به محدودیت ذخیره انرژی توسط ذخیره‌ساز الکتریکی می‌باشد، که در زیر نمایش داده شده است.

$$E_{es}^{\min} \leq E_{es}^t \leq E_{es}^{\max} \quad (40)$$

مسئله‌ای که قابل توجه می‌باشد این است که انرژی در زمان ابتدایی و انتهایی با هم برابر می‌باشند که این عمل در معادله (۴۱) نمایش داده شده است.

$$E_{es}^0 = E_{es}^{24} \quad (41)$$

• ذخیره‌سازی مربوط به بخش سرمایه‌ش:

در معادله (۴۲) ذخیره انرژی در ذخیره ساز سرمایه‌ش بر اساس حالت شارژ و دشارژ نشان داده شده است.

$$E_{cs}^{t+1} = E_{cs}^t \times (1 - \delta_{cs}) + \quad (42)$$

$$\left[(P_{cs,c}^t \times \eta_{cs,c}) - \left(\frac{P_{cs,d}^t}{\eta_{cs,d}} \right) \right]$$

در رابطه‌ی (۴۲) منظور از δ_{cs} نسبت تلفات انرژی برای ذخیره‌سازی سرما می‌باشد. همچنین برای ذخیره کردن و استفاده کردن از این سرما (شارژ و دشارژ) به ترتیب از $\eta_{cs,c}$ و $\eta_{cs,d}$ به عنوان بازده استفاده شده است. شارژ و دشارژ هر دو در یک زمان نمی‌تواند اتفاق بیفتد و در دو معادله (۴۳) و (۴۴) به ترتیب محدودیت مربوط به حالت شارژ و دشارژ را داریم.

$$0 \leq P_{cs,c}^t \leq u_{cs} \times P_{cs,c}^{\max} \quad (43)$$

$$0 \leq P_{cs,d}^t \leq (1 - u_{cs}) \times P_{cs,d}^{\max} \quad (44)$$

و در آخر معادله (۴۵) مربوط به محدودیت ذخیره انرژی توسط ذخیره‌ساز سرمایه‌ش می‌باشد، که در زیر نمایش داده

و در انتهای این بخش محدودیت‌های مربوط به دیگ بخار و چیلر جذبی را داریم. همانگونه که در معادلات مربوط به آنها مشاهده می‌کنیم، دیگ بخار و چیلر جذبی اگر روشن باشند حداقل در ۰.۲۵ ظرفیت خود کار می‌کنند. در معادلات (۳۲) و (۳۳) به ترتیب محدودیت مربوط به دیگ بخار و چیلر جذبی نمایش داده شده است.

$$0.25 \times H_{gb}^{\max} \times u_{gb} \leq H_{gb}^t \leq H_{gb}^{\max} \times u_{gb} \quad (32)$$

$$0.25 \times H_{ac}^{\max} \times U_t^{AC} \leq H_{ac}^t \leq H_{ac}^{\max} \times U_t^{AC} \quad (33)$$

۲-۲-۵- قید تعادل انرژی

با در نظر گرفتن برنامه پاسخ تقاضا و داشتن سه هاب انرژی در سیستم هاب انرژی، در این مقاله سه قید تعادل وجود دارد که در معادلات زیر نمایش داده شده‌اند.

قید تعادل مربوط به هاب قدرت (الکتریکی) در معادله (۳۴) نمایش داده شده است.

$$P_{in}^t + \sum_{d=1}^{N_{DG}} P_{dg}^{d,t} + P_{pv}^t + P_{wt}^t + P_{gt}^t + P_{es,d}^t = P_{es}^t + P_{ice}^t + P_{es,c}^t + PL^t \quad (34)$$

قید تعادل مربوط به هاب سرمایه‌ش در معادله (۳۵) نمایش داده شده است.

$$C_{ac}^t + C_{ec}^t + P_{cs,d}^t = P_{cs,c}^t + CL^t \quad (35)$$

قید تعادل مربوط به هاب گرمایش در معادله (۳۶) نمایش داده شده است.

$$\eta_{he} H_{gt}^t + H_{gb}^t + P_{hs,d}^t = H_{ac}^t + P_{hs,c}^t + HL^t \quad (36)$$

۲-۲-۶- ذخیره‌سازی انرژی

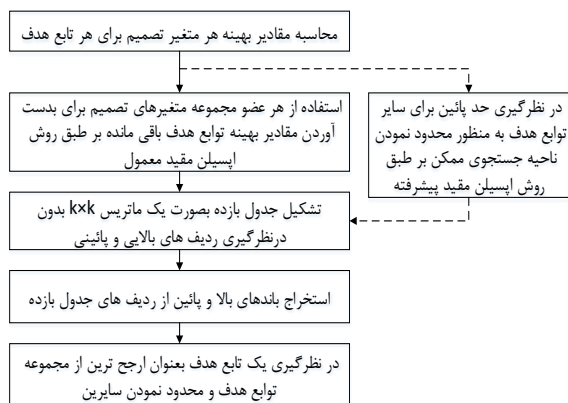
همانند قسمت‌های قبل، بخش مربوط به ذخیره‌سازی انرژی نیز به دلیل وجود سه قسمت در سیستم هاب انرژی، دارای معادلات و محدودیت‌هایی به صورت جداگانه می‌باشد، که در زیر به آنها می‌پردازیم.

• ذخیره‌سازی مربوط به بخش توان (الکتریکی):

در معادله (۳۷) ذخیره انرژی در ذخیره‌ساز الکتریکی بر اساس حالت شارژ و دشارژ نشان داده شده است.

$$E_{es}^{t+1} = E_{es}^t \times (1 - \delta_{es}) + \left[(P_{es,c}^t \times \eta_{es,c}) - \left(\frac{P_{es,d}^t}{\eta_{es,d}} \right) \right] \quad (37)$$

ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی طبق رابطه‌ی (۳۷) انجام می‌شود به نحوی که برای مدل‌سازی میزان هدر رفت انرژی



شکل ۱- فلوچارت روش اپسیلون مقید شامل روش معمول و پیشرفته

بر این مبنا، در روش معمول، مقادیر بهینه‌ی هر تابع هدف، برای سایر توابع نیز استفاده می‌شود که این کار می‌تواند منجر به بدست آوردن جواب‌های بهینه‌ی ضعیف شود. در روش پیشرفته، مقدار بهینه متناظر با هر تابع در سایر توابع جایگزین نخواهد شد، بلکه به عنوان محدودیت در نظر گرفته می‌شود. این کار به سالور این امکان را می‌دهد که در صورت وجود جواب بهینه‌ی غالب در محدوده شدنی مسئله، آن را برای ایجاد جدول بازده انتخاب کند. به این روش جستجوی نقاط بهینه پارتو، روش بهینه‌سازی لکسیکوگراف می‌گویند.

شکل (۱) روند پیاده‌سازی روش اپسیلون همراه با تغییرات لازم جهت تبدیل آن به روش اپسیلون پیشرفته را نمایش می‌دهد. همچنین لازم به ذکر است که نتایج شبیه‌سازی بوسیله این روش طی صد مرحله تکرار بدست می‌آید.

روش تصمیم‌گیری بهینه:

در این مقاله دو روش تصمیم‌گیری بهینه مورد استفاده قرار گرفته است تا اپراتور هوشمند تصمیم‌گیرنده را برای تصمیم‌گیری نهایی یاری دهد. رابطه (۵۲) معرف روش فازی می‌باشد [۲۶]. در این روش کلیه مقادیر z تابع هدف نرمالایز (پریونیت) می‌شوند و پس از آن فاصله هر یک از این نقاط با نقطه ایده‌آل محاسبه خواهد شد. کمترین فاصله نماینده بهترین جواب از بین k جواب بدست آمده است.

$$\Gamma_z^k = \frac{f_z^{\max} - f_z(k)}{f_z^{\max} - f_z^{\min}} \quad (52)$$

یکی دیگر از روش‌های تصمیم‌گیری بهینه در این مقاله بر اساس تابع امتیاز می‌باشد [۲۷]. اگر دو مجموعه

$$s_2 = ((S_{p1}, S_{p2}), (S_{q1}^*, S_{q2}^*)) \text{ و } s_1 = ((S_{g1}, S_{g2}), (S_{h1}^*, S_{h2}^*))$$

شده است.

$$E_{cs}^{\min} \leq E_{cs}^t \leq E_{cs}^{\max} \quad (45)$$

در اینجا نیز انرژی سرمایشی در زمان ابتدایی و انتهایی باهم برابر می‌باشند که در معادله (۴۶) نمایش داده شده است.

$$E_{cs}^0 = E_{cs}^{24} \quad (46)$$

ذخیره‌سازی مربوط به بخش گرمایش:

در معادله (۴۷) ذخیره انرژی در ذخیره‌ساز گرمایش بر اساس حالت شارژ و دشارژ نشان داده شده است.

$$E_{hs}^{t+1} = E_{hs}^t \times (1 - \delta_{hs}) + \left[(P_{hs,c}^t \times \eta_{hs,c}) - \left(\frac{P_{hs,d}^t}{\eta_{hs,d}} \right) \right] \quad (47)$$

مطابق با مدل‌سازی‌های ذخیره‌سازهای الکتریکی و سرمایی، در مدل‌سازی انرژی گرمایی نیز برای تلفات انرژی گرمایی از δ_{hs} استفاده می‌شود. همینطور ضرایب $\eta_{hs,c}$ و $\eta_{hs,d}$ راندمان‌های شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی گرمایی هستند [۲۵]. در حالت انرژی گرمایشی نیز شارژ و دشارژ هر دو در یک زمان نمی‌تواند اتفاق بیفتد. بنابراین در دو معادله (۴۸) و (۴۹) به ترتیب محدودیت مربوط به حالت شارژ و دشارژ را خواهیم داشت.

$$0 \leq P_{hs,c}^t \leq u_{hs} \times P_{hs,c}^{\max} \quad (48)$$

$$0 \leq P_{hs,d}^t \leq (1 - u_{hs}) \times P_{hs,d}^{\max} \quad (49)$$

همچنین معادله (۵۰) مربوط به محدودیت ذخیره انرژی توسط ذخیره‌ساز گرمایشی می‌باشد، که در زیر نمایش داده شده است.

$$E_{hs}^{\min} \leq E_{hs}^t \leq E_{hs}^{\max} \quad (50)$$

در اینجا نیز انرژی گرمایشی در زمان ابتدایی و انتهایی باهم برابر می‌باشند که در معادله (۵۱) این قید منظور شده است.

$$E_{hs}^0 = E_{hs}^{24} \quad (51)$$

روش اپسیلون پیشرفته:

برای مدل‌سازی مدل چند هدفه در این مقاله از روش موثر اپسیلون مقید پیشرفته استفاده شده است که منجر به یافتن نقاط بهینه پارتو خواهد شد. کلیه مراحل اجرای روش مذکور طبق مرجع [۲۴] می‌باشد. تفاوت اساسی روش اپسیلون مقید پیشرفته با اپسیلون مقید معمول در تشکیل جدول بازده می‌باشد.

$$\alpha_r^t = \frac{(P_{PV}^t + P_{WT}^t) - B_L^t}{B_U^t - B_L^t} \quad \forall t \in T \quad (55)$$

$$Risk (\%) = \frac{100}{24} \sum_{t=1}^T \alpha_r^t \quad (56)$$

در روابط بالا، منظور از حدود بالا و پایین مقادیر چارک‌های ۰/۹۵ و ۰/۰۵ می باشد. به بیانی دیگر، احتمال اینکه مجموع توان منابع انرژی تجدیدپذیر کمتر از حد پایین باشد ۰/۰۵ می باشد. همچنین، برای حد بالا نیز این موضوع صادق است. در حقیقت برای جلوگیری از مقادیر غیر واقعی برای متغیرهای P_{PV}^t و P_{WT}^t ، مقدار این متغیرها باید در محدوده‌ی چارک‌های ۵ درصد و ۹۵ درصد در هر لحظه از زمان باشد. مقادیر این چارک‌ها مطابق مرجع [۸] می باشد.

۳- مطالعه موردی، نتایج و بحث

در این بخش پیاده‌سازی مدل پیشنهادی چند مرحله‌ای بر روی یک ساختار MEG مورد مطالعه آورده شده است. قسمت‌های مختلف هاب مورد بحث در این مقاله در شکل (۲) قابل مشاهده می باشد. کلیه مراحل پیاده‌سازی در نرم افزار GAMS ورژن ۲۵.۱.۲ انجام شده است. با توجه به وجود متغیرهای باینری و عملگرهای غیرخطی در روابط مدل نیازمند یک مدل‌سازی غیرخطی مختلط عدد صحیح (MINLP) هستیم. بنابراین مسئله پیشنهادی توسط سالور DICOPT حل شده است. همچنین، در این مدل از چهار واحد دیزل ژنراتور برای مشارکت در برنامه ریزی تولید توان استفاده شده است. الگوریتم حل مدل پیشنهادی توسط شکل (۳) قابل مشاهده می باشد.

وجود داشته باشد، به نحوی که بخواهیم مقایسه‌ای بین این دو مجموعه انجام دهیم، از تابع امتیاز استفاده خواهیم کرد. رابطه (۵۳) امتیاز هر مجموعه را محاسبه خواهد کرد. در رابطه مذکور η به معنی امید ریاضی و γ^2 واریانس می باشد. همچنین، رابطه (۵۴) مقادیر امید ریاضی و واریانس را برای دو متغیر تصادفی x و y نشان می دهد.

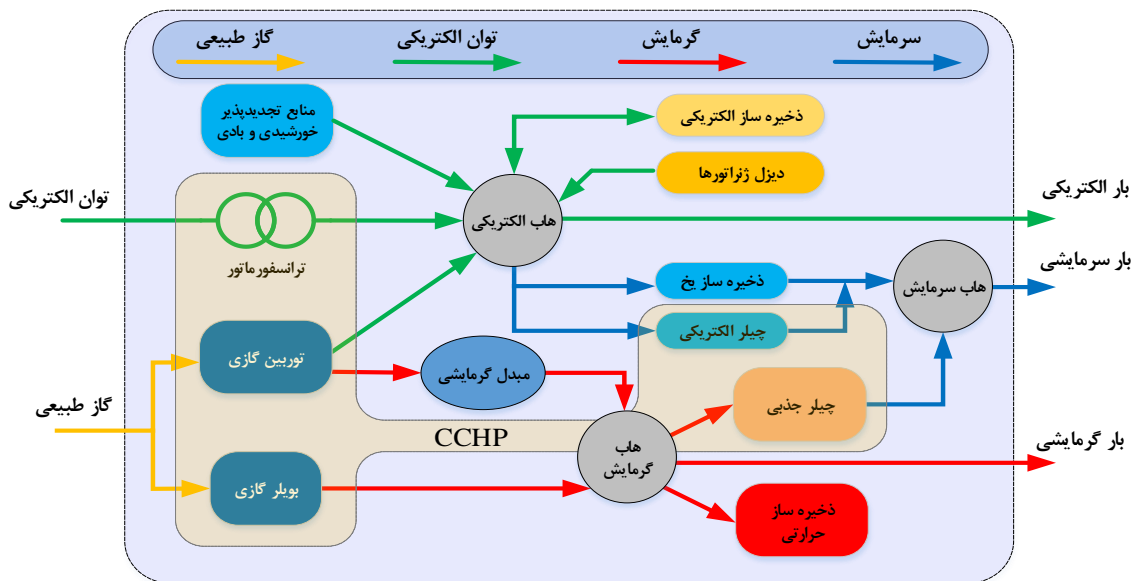
$$\beta(s) = \{\eta, \gamma^2\} \quad (53)$$

$$\begin{cases} \eta = \mu_x \mu_y \\ \gamma^2 = \sigma_{xy}^2 = \mu_{x^2 y^2} - \mu_{xy}^2 \end{cases} \quad (54)$$

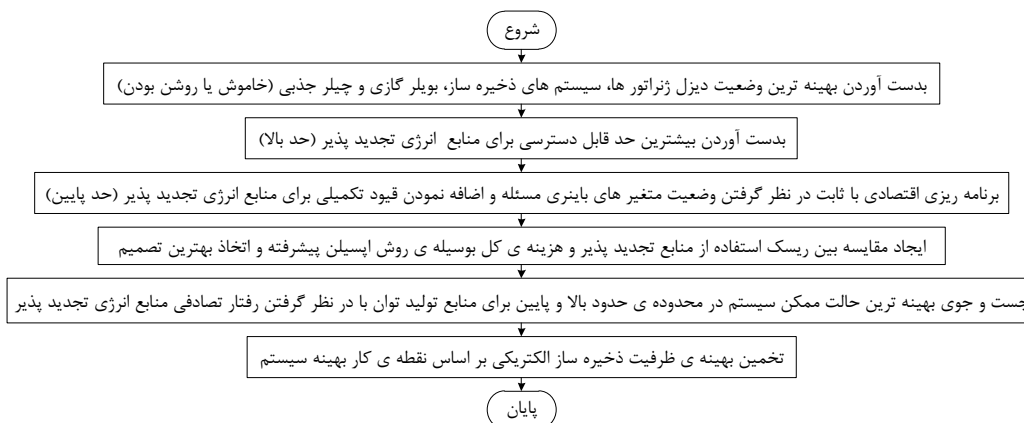
بوسیله این تابع، امتیاز مجموعه‌ای بیشتر است که امید ریاضی آن بیشتر باشد و در صورت مساوی بودن امید ریاضی امتیاز مجموعه‌ای بیشتر است که واریانس کوچکتری داشته باشد.

• عملگر ریسک منابع انرژی تجدیدپذیر:

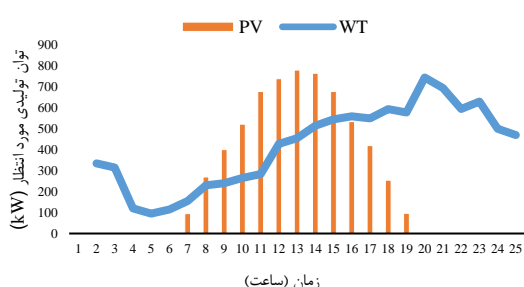
برای محاسبه ریسک استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، با توجه به نوسانات شدید آنها، رابطه (۵۵) احتمال قطع توان را برای این منابع نشان می دهد. قطع توان زمانی رخ می دهد که توان تولیدی توسط منابع انرژی تجدیدپذیر از توان برنامه‌ریزی شده بیشتر باشد. برای مشخص شدن مقدار عددی عملگر ریسک نیاز به حدود بالا و پایین توان B_U^t پیش بینی شده برای منابع تجدیدپذیر است. بنابراین، B_L^t به ترتیب نشان‌دهنده حدود بالا و پایین خواهد بود. رابطه (۵۶) مقدار متوسط ریسک را در یک روز بر حسب درصد نشان می دهد.



شکل ۲- ساختار سیستم MEG مورد مطالعه مبتنی بر CCHP در حضور هاب‌های انرژی



شکل ۳- الگوریتم حل مدل پیشنهادی



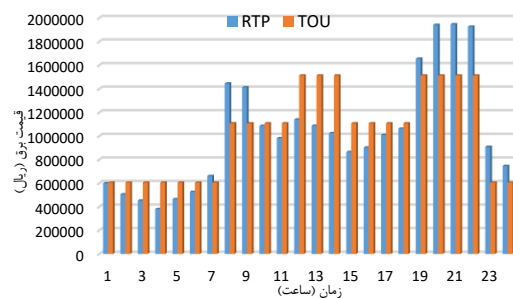
شکل ۶- مقادیر توان تولیدی قابل انتظار توسط صفحات فتوولتائیک و توربین های بادی در ۲۴ ساعت پیش رو بر حسب کیلووات

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده در ریزشبهه مورد بحث

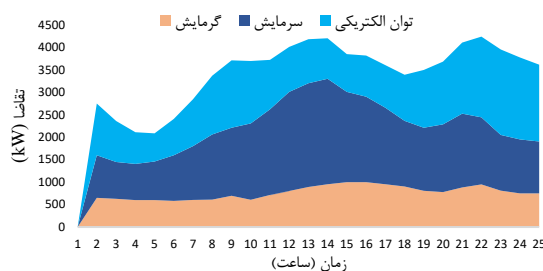
پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار
P_{gt}^{max}	kW	1000	P_{grid}^{max}	kW	1500
H_{gb}^{max}	kW	800	P_{gas}^{max}	kW	3400
H_{ac}^{max}	kW	1000	η_{ge}	-	0.3
P_{ec}^{max}	kW	500	$\eta_{gh,gb}$	-	0.9
P_{ice}^{max}	kW	100	$\eta_{gh,gt}$	-	0.4
P_{pv}^{max}	kW	180	η_t	-	0.98
P_{wt}^{max}	kW	200	η_{he}	-	0.7
β_e	Kg/kWh	0.972	COP_{ec}	-	4
β_g	Kg/kWh	0.23	COP_{ice}	-	3.5
β_{dg}	Kg/kWh	0.38	COP_{ac}	-	1.2
P_g	ریال/kWh	۴۴۱۰۰۰	P_{dg}^{max}	kW	200
P_{dg}^{min}	kW	0	$C_{ch} * C_{dis}$	\$/kW ریال	5

۳-۱- پارامترها و داده های ورودی

شکل های (۴) تا (۶) به ترتیب بیانگر روش های قیمت گذاری مورد استفاده در این مقاله، تقاضای مربوط به سه هاب انرژی ریزشبهه و توان تولیدی منابع انرژی تجدید پذیر شامل صفحات فتوولتائیک و توربین های بادی می باشند. قیمت برق بر اساس نرخ ارز در ۳۱ شهریور سال ۱۳۹۸ محاسبه شده است. برای سادگی در روند مدل سازی مسئله، توان تولیدی توربین های بادی و سیستم های فتوولتائیک از مرجع [۲۶] اخذ شده است. همچنین جداول ۱ تا ۲ برخی از پارامترهای ورودی مدل پیشنهادی را مشخص می کنند.



شکل ۴- قیمت گذاری های RTP و TOU برای خریداری توان الکتریکی از شبکه بالادست بر حسب ریال



شکل ۵- میزان تقاضای توان الکتریکی، سرمایه و گرمایش در ۲۴ ساعت پیش رو بر حسب کیلووات

تولید خواهد بود.

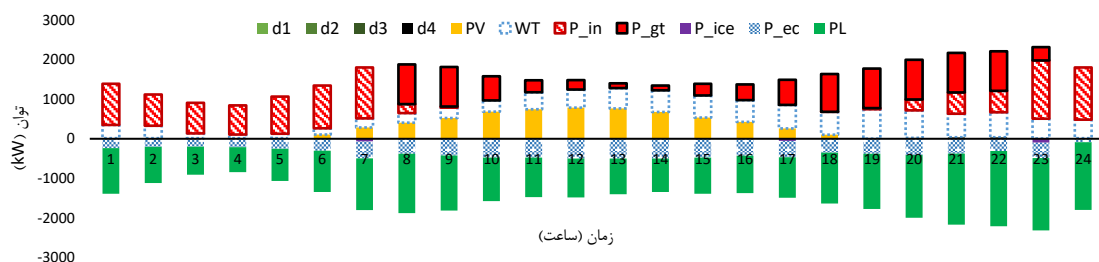
نمودار شکل (۱۰) اختلاف سطح استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را در طی مراحل اول و دوم نشان می‌دهد. همچنین، مقادیر بدست آمده در این شکل نشان‌دهنده حدود بالا و پایین مسئله بهینه‌سازی می‌باشند. پس از معین شدن حدود مجاز قابل استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، باید یک مقایسه بین میزان پذیرش ریسک استفاده از این منابع و هزینه کل سیستم انجام شود. بدیهی است که هر چه میزان ریسک را بیشتر کنیم مقدار هزینه کل کاهش خواهد یافت. دلیل این امر افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان منابع رایگان و بدون آلودگی می‌باشد. از طرفی، هرچه میزان ریسک را کاهش دهیم باید انتظار افزایش هزینه عملیاتی کل را داشته باشیم. لذا، با دو تابع هدف غیر همسو مواجه هستیم. اغلب در این موارد از مفهوم بهینگی پارتو به جای بهینگی مطلق استفاده می‌شود. در شکل (۱۱) می‌توان منحنی پارتو را برای جواب‌های بهینه و غیر غالب مشاهده کرد. معمولاً روش‌های متنوعی برای یافتن بهینه‌ترین نقطه از روی نقاط جبهه پارتو وجود دارد. در این مقاله دو روش را برای تصمیم‌گیری بهینه در نظر گرفته ایم. نقطه زرد رنگ نمایانگر بهترین جواب از دیدگاه روش فازی می‌باشد. در روش اخیر تمامی مقادیر توابع هدف بر اساس مقادیر اکستریم نرمالایز می‌شود. پس از یکه سازی توابع هدف، فاصله هر یک از جواب‌های پارتو با نقطه ایده آل محاسبه خواهد شد. نقطه‌ای که کمترین فاصله را با نقطه ایده آل دارد به عنوان بهترین جواب انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که مقصود از نقطه ایده آل، مختصاتی (غیر قابل دستیابی) می‌باشد که در آن مقادیر هر دو تابع هدف کمینه هستند. همچنین، نقطه آبی متعلق به روش تابع امتیاز در این مقاله می‌باشد.

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده برای سیستم‌های ذخیره‌ساز هاب الکتریکی، گرمایش و سرمایش

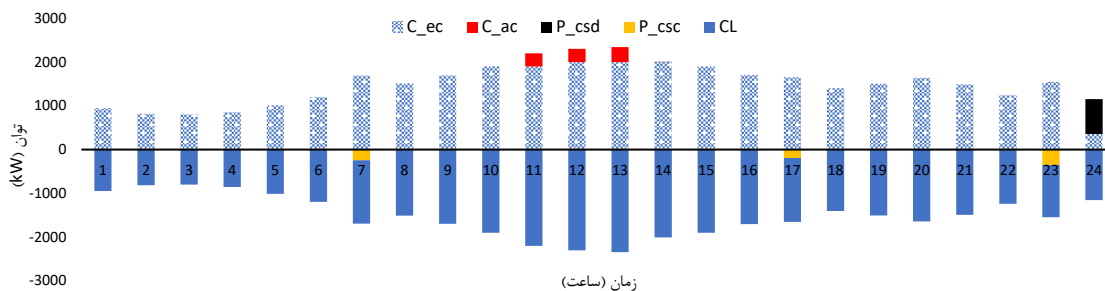
ذخیره‌ساز سرمایش			ذخیره‌ساز گرمایش		
پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار
$P_{cs,c}^{\max}$	kW	700	$P_{hs,c}^{\max}$	kW	800
$P_{cs,d}^{\max}$	kW	800	$P_{hs,d}^{\max}$	kW	800
E_{cs}^{\min}	kWh	400	E_{hs}^{\min}	kWh	400
E_{cs}^{\max}	kWh	1800	E_{hs}^{\max}	kWh	1800
$\eta_{cs,c}$	-	0.97	$\eta_{hs,c}$	-	0.98
$\eta_{cs,d}$	-	0.95	$\eta_{hs,d}$	-	0.98
δ_{cs}	-	0.02	δ_{hs}	-	0.02

۳-۲- پیاده‌سازی مدل پیشنهادی و نتایج

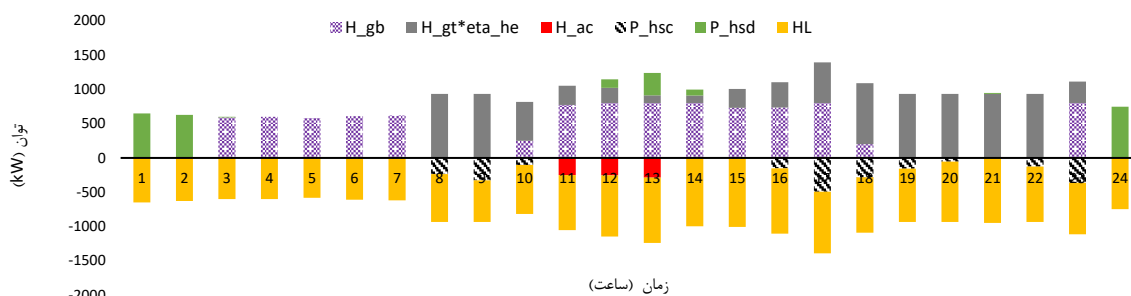
مطابق با توضیحات مدل پیشنهادی، پس از اجرای مرحله اول، وضعیت خاموش یا روشن بودن هر یک از واحدهای موجود در شبکه انرژی مشخص می‌شود. جدول ۱ نشان‌دهنده وضعیت این واحدها در هر ساعت می‌باشد. همچنین، مقادیر بهینه توان تولیدی توسط واحدهای الکتریکی، سرمایش و گرمایش در شکل‌های (۷) تا (۹) آورده شده است. لذا در مرحله دوم از مدل پیشنهادی، باید قیود جدیدی را به مسئله اضافه کنیم که بیانگر اصل عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. این قیود تکمیلی در روابط (۱۸) تا (۱۹) قابل مشاهده هستند. اعمال این قیود منجر به نتایج محافظه کارانه می‌شود زیرا برخلاف مرحله اول، در این مرحله شاخص ریسک برای منابع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. پیامد این موضوع استفاده کمتر از منابع انرژی تجدیدپذیر در برنامه‌ریزی



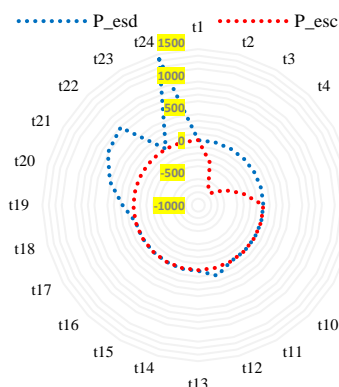
شکل ۷- برنامه‌ریزی تولید بهینه هر یک از واحدهای هاب الکتریکی



شکل ۸- برنامه ریزی تولید بهینه هر یک از واحدهای هاب سرمایش

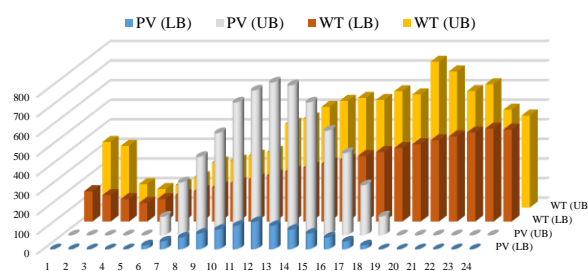


شکل ۹- برنامه ریزی تولید بهینه هر یک از واحدهای هاب گرمایش

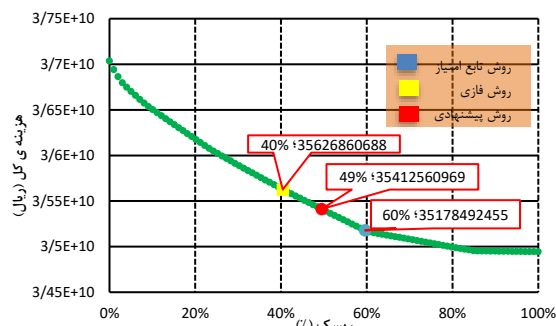


شکل ۱۲- شارژ و دشارژ سیستم ذخیره ساز هاب الکتریکی در هر ساعت بر حسب کیلووات

در شکل (۱۲) می توان نحوه شارژ و دشارژ سیستم ذخیره ساز الکتریکی را مشاهده کرد. این نمودار پس از اجرای مرحله چهارم از مدل پیشنهادی بدست آمده است. همچنین مقادیر انرژی سیستم های ذخیره ساز الکتریکی، گرمایش و سرمایش و تغییرات آن در هر ساعت در شکل (۱۳) آورده شده است. پس از اجرای مرحله چهارم، ظرفیت بهینه سیستم ذخیره ساز الکتریکی به شکل اقتصادی تخمین زده خواهد شد که نتیجه آن در جدول ۳ بیان شده است.



شکل ۱۰- مقادیر حد بالا و پایین برای منابع فتوولتائیک و توربین بادی طی مراحل اول و دوم

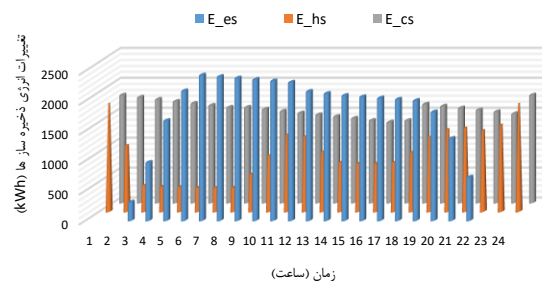


شکل ۱۱- منحنی پارتو برای تصمیم گیری بهینه بین هزینه کل سیستم و درصد ریسک بکارگیری منابع انرژی تجدید پذیر

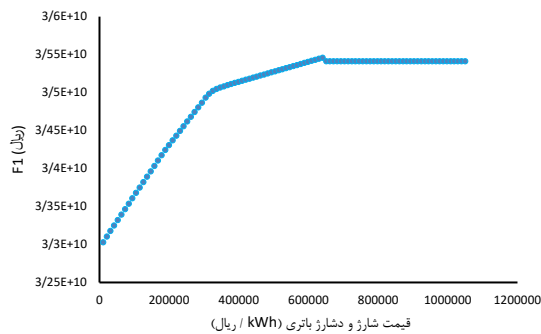
جدول ۳- وضعیت متغیرهای باینری پس از اجرای مرحله اول

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
d_1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
d_2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1
d_3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
d_4	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
u_{hs}	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
u_{cs}	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0
u_t^{AC}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_{gb}	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0

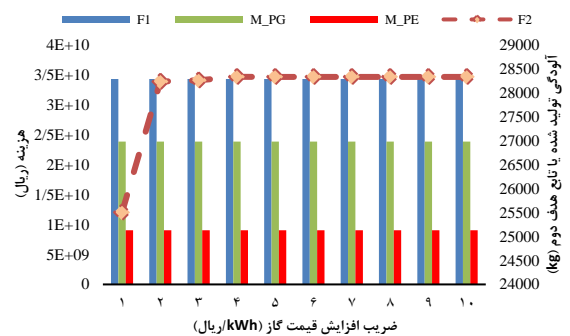
از آن مقدار آلودگی تولید شده ثابت می‌شود. دلیل آن این است که افزایش قیمت هر کیلووات گاز تا نقطه مشخصی می‌تواند ادامه پیدا کند و پس از آن دیگر خرید گاز اقتصادی نخواهد بود. در شکل (۱۵) نیز تاثیر افزایش هزینه شارژ و دشارژ سیستم ذخیره ساز توان الکتریکی بر هزینه عملیاتی کل سیستم آورده شده است. طبق این نمودار تا قیمت ۷۱۴/۰۰۰ ریال بر کیلووات برای هر مرتبه شارژ یا دشارژ، می‌توان انتظار افزایش هزینه را داشت.



شکل ۱۳- تغییرات انرژی ذخیره شده در ذخیره‌سازهای هاب الکتریکی، سرمایش و گرمایش بر حسب کیلووات ساعت



شکل ۱۵- تغییرات تابع هدف اول مسئله بر اساس افزایش قیمت شارژ و دشارژ باتری (kWh / ریال)



شکل ۱۴- تغییرات هزینه کل، هزینه گاز و برق خریداری شده و میزان آلودگی تولیدی بر حسب افزایش قیمت گاز

جدول ۳- نتایج مربوط به تخمین ظرفیت ذخیره‌ساز مورد نیاز در هاب الکتریکی در مرحله چهارم از مدل پیشنهادی

مقدار	متغیر
29648.9	$Cost_{es}$ (Rial)
2430.357	E_{es}^{max} (kWh)
1331.231	$P_{es,d}^{max}$ (kW)
737.7219	$P_{es,c}^{max}$ (kW)

۳-۳- آنالیز حساسیت

در شکل (۱۴) آنالیز حساسیت مربوط به افزایش قیمت گاز مشاهده می‌شود. در این نمودار نتایج بر اساس ضریب عدد صحیحی از قیمت گاز بدست آمده‌اند. از این نمودار می‌توان دریافت که افزایش قیمت گاز تا حد دو برابر قیمت اولیه، می‌تواند موجب افزایش آلودگی زیست محیطی شود اما پس

به میزان $1/0.42/230/0.00$ ریال در هزینه نهایی صرفه‌جویی کند. همچنین، تصمیم‌گیری بهینه بین تابع ریسک و هزینه کل که در مرحله سوم صورت گرفت منجر به کاهش 7.75% انقطاع توان نسبت به مورد دوم شد.

جدول ۴- نتایج مرتبط با چهار مورد مطالعاتی

مورد	چهارم	سوم	دوم	اول
هزینه کل (ریال)	3.44E+10	3.54E+10	3.70E+10	3.49E+10
هزینه خرید برق (ریال)	9.06E+09	1.10E+10	1.23E+10	1.06E+10
هزینه خرید گاز (ریال)	2.39E+10	2.42E+10	2.45E+10	2.42E+10
آلودگی تولید شده (kg)	25507.56	26140.67	27266.52	25782.41
میزان قطع منابع انرژی تجدید پذیر (%)	45.75	45.75	53.5	43.4
میزان ریسک منابع انرژی تجدید پذیر (%)	49	49	0	100

جدول ۵ به مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری بهینه پرداخته است. طبق این جدول، روش تابع امتیاز کمترین هزینه را در پی خواهد داشت در حالی که بیشترین احتمال ریسک را نیز با خود به همراه دارد.

جدول ۵- مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری بهینه

شمارنده	فاصله تا نقطه ایده آل	P_{in}	ریسک (%)	هزینه کل (ریال)	تابع امتیاز
41	0.6064	13625.88	60	3.51E+10	تابع امتیاز
60	0.5194	13940.27	40	3.56E+10	فازی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور برنامه‌ریزی کوتاه مدت شبکه میکروانرژی (MEG) از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی، یک مدلسازی بصورت برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط پیشنهاد شد و بهینه‌سازی آن بصورت چندمرحله ای انجام پذیرفت. ابتدا در این مقاله توان بهینه واحدهای تولید توان مشخص خواهد شد. سپس بوسیله نتایج بدست آمده می‌توان به بهینه‌سازی و تخمین ظرفیت ذخیره‌سازها پرداخت. از آنجائیکه یک مدل پیشنهادی با چندین تابع هدف متضاد داریم، که تابع هدف اول به حداقل رساندن هزینه ها و تابع هدف دوم به حداقل رساندن آلودگی و تابع

به منظور ایجاد شرایط مقایسه‌ای و نشان دادن موثر بودن مدل چند مرحله‌ای پیشنهادی در این مقاله، چهار مورد مطالعاتی با شرایط مختلف تعریف شده است که نتایج آنها در جدول (۴) قابل مشاهده می‌باشند. موردهای مطالعاتی مورد نظر در این مقاله به صورت زیر تشریح می‌گردد:

• مورد مطالعاتی اول

در این مورد مطالعاتی از سیستم ذخیره‌ساز الکتریکی استفاده نمی‌شود. همچنین، هیچگونه مقایسه و تصمیم‌گیری بهینه‌ای صورت نخواهد گرفت. به عبارت دیگر در این مورد فقط مراحل اول و دوم مدل پیشنهادی اجرا خواهند شد و از انجام مراحل بهینه‌سازی سوم و چهارم صرفنظر می‌شود. لازم به ذکر است که در این مورد، از تمامی ظرفیت منابع انرژی تجدید پذیر استفاده خواهد شد که به معنی حداکثر بودن ریسک می‌باشد.

• مورد مطالعاتی دوم

کلید شرایط مورد مطالعاتی دوم مشابه با مورد اول می‌باشد با این تفاوت که در این مورد به منظور به حداقل رساندن ریسک استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر از قیود تکمیلی (۱۸) و (۱۹) استفاده خواهد شد.

• مورد مطالعاتی سوم

در این مورد مراحل اول، دوم و سوم از مدل پیشنهادی انجام خواهد شد و از اجرای مرحله چهارم صرفنظر می‌شود. به عبارت دیگر در این مورد از سیستم ذخیره‌ساز توان الکتریکی مانند دو مورد مطالعاتی قبل استفاده نخواهد شد.

• مورد مطالعاتی چهارم

این مورد مطالعاتی بیانگر اجرای کامل مدل پیشنهادی می‌باشد. به منظور نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی در کاهش هزینه کل و همچنین در نظر گرفتن ریسک استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر، این مورد مطالعاتی تعریف شده است.

طبق جدول ۴ مشخص است که در صورت اجرای کامل مدل پیشنهادی در این مقاله، هزینه عملیاتی کل سیستم نسبت به مورد های اول، دوم و سوم به ترتیب 1.64% ، 7.2% و 2.94% کاهش یافته است. همچنین مقادیر آلودگی تولید شده نیز نسبت به سایر موردهای مطالعاتی کاهش یافته است. مورد اول کمترین میزان انقطاع باد را دارد که به دلیل در نظر نگرفتن احتمال نوسان منابع تجدیدپذیر می‌باشد. باتوجه به این جدول، استفاده از سیستم ذخیره‌ساز می‌تواند

شاخص دوره زمانی (t)

• مخفف ها

CCHP	Combined Cooling, Heat Power
DG	Diesel Generator
MEG	Micro Energy Grid
EH	Energy Hub
PSO	Particle Swarm Optimization
MINLP	Mixed Integer Non-linear Programing
RTP	Real Time Pricing
TOU	Time Of Use
GAMS	General Algebraic Modeling System
BD	Benders Decomposition
UC	Unit Commitment
C&CG	Column and Constraint Generation
MUT	Minimum Up-time
MDT	Minimum Downtime

• متغیرها

$Cost_{pe}$	هزینه برق خریداری شده (ریال)
$Cost_{pg}$	هزینه گاز خریداری شده (ریال)
C_{ec}^t	خروجی سرما از چیلر الکتریکی (kW)
C_{ac}^t	خروجی سرما از چیلر جذبی (kW)
E_{es}^t	انرژی ذخیره شده توسط ذخیره‌ساز الکتریکی (kWh)
E_{hs}^t	انرژی ذخیره شده توسط ذخیره‌ساز گرما (kWh)
E_{cs}^t	انرژی ذخیره شده توسط تانک ذخیره سرما (kWh)
H_{gb}^t	خروجی گرما از گاز بویلر (kW)
H_{gt}^t	اتلاف گرما از توربین گازی (kW)
H_{ac}^t	گرمای ورودی به چیلر جذبی (kW)

هدف سوم به حداقل رساندن ریسک استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد، روش پیشنهادی برای حل این مدل رویکرد اپسیلون مقید پیشرفته در نظر گرفته شده است. شبکه مذکور دارای سه هاب انرژی الکتریکی، سرمایش و گرمایش است و این شبکه مبتنی بر یک واحد CCHP در حضور واحدهای تجدیدپذیر خورشیدی و بادی با اجزای مربوطه فعالیت می‌کند. با پیاده‌سازی مدل پیشنهادی مشخص شد که این مدل بخوبی می‌تواند در مقایسه با سایر موردهای مطالعاتی، هزینه کل و میزان آلودگی تولیدی را کاهش دهد. علاوه بر آن، در این مدل با اجرای بهینه‌سازی، ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز توان الکتریکی، از اتلاف هزینه ۱/۰۴۲/۲۳۰/۰۰۰ ریالی جلوگیری شد. مدل پیشنهادی در این مقاله نشان داد که انقطاع توانی منطقی می‌تواند کارآمدتر و اقتصادی‌تر از حداقل انقطاع توانی باشد. ارائه دو روش تصمیم‌گیری بهینه در این مدل نیز می‌تواند به اپراتور تصمیم‌گیرنده هوشمند آزادی عمل بیشتری دهد تا بهترین تصمیم را بر اساس اولویت‌های سیستمی و غیر سیستمی بگیرد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

سید مصطفی نصرت آبادی: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، تحقیق، نگارش - پیش‌نویس اصلی، نگارش - بررسی و ویرایش، منابع، راهنمایی.

علی پیوند: روش‌شناسی، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، تحقیق، نگارش - پیش‌نویس اصلی، نگارش - بررسی و ویرایش، منابع.

مرتضی جدیدالاسلام: روش‌شناسی، اعتبارسنجی، نگارش - پیش‌نویس اصلی، نگارش - بررسی و ویرایش، منابع.

اختصارات:

• اندیس‌ها

u_{hs}	متغیر باینری مربوط به ذخیره‌ساز گرما	P_{gas}^t	گاز ورودی از شبکه گاز (kW)
u_{cs}	متغیر باینری مربوط به ذخیره‌ساز سرما	P_{ge}^t	گاز ورودی به توربین گازی (kW)
u_{gb}	متغیر باینری مربوط به بویلر گازی	$P_{dg}^{d,t}$	توان تولیدی توسط d امین دیزل ژنراتور در زمان t، (kW)
U_t^{AC}	متغیر باینری مربوط به چیلر جذبی	P_{pv}^t	توان تولید شده به وسیله فتوولتائیک (kW)
• پارامترها			
COP_{ec}	ضریب عملکرد چیلر برقی	P_{wt}^t	توان تولید شده به وسیله توربین بادی (kW)
COP_{ice}	ضریب عملکرد تهویه هوای یخ	P_{gh}^t	گاز ورودی به گاز بویلر (kW)
COP_{ac}	ضریب عملکرد چیلر جذبی	P_{gt}^t	توان تولید شده از توربین گازی (kW)
PL^t	تقاضای اولیه برق (kW)	P_{grid}^t	توان خریداری شده از شبکه اصلی (kW)
E_{es}^{min}	حداقل انرژی ذخیره شده توسط ذخیره‌ساز الکتریکی (kWh)	P_{in}^t	توان حقیقی از شبکه برق (kW)
E_{es}^{max}	حداکثر انرژی ذخیره شده توسط ذخیره‌ساز الکتریکی (kWh)	P_{ec}^t	توان ورودی به چیلر الکتریکی (kW)
E_{hs}^{min}	حداقل انرژی ذخیره شده توسط ذخیره‌ساز گرما (kWh)	P_{ice}^t	توان ورودی به چیلر خنک کننده (kW)
E_{hs}^{max}	حداکثر انرژی ذخیره شده توسط ذخیره‌ساز گرما (kWh)	$P_{cs.c}^t$	شارژ سرمای تهویه هوای یخ (kW)
E_{cs}^{min}	حداقل انرژی ذخیره شده توسط تانک ذخیره سرما (kWh)	$P_{cs.d}^t$	دشارژ سرمای تهویه هوای یخ (kW)
E_{cs}^{max}	حداکثر انرژی ذخیره شده توسط تانک ذخیره سرما (kWh)	$P_{hs.c}^t$	شارژ گرمای ذخیره‌ساز گرما (kW)
H_{gb}^{max}	حداکثر خروجی گرما از گاز بویلر (kW)	$P_{hs.d}^t$	دشارژ گرمای ذخیره‌ساز گرما (kW)
H_{ac}^{max}	حداکثر گرمای ورودی به چیلر جذبی (kW)	$P_{es.c}^t$	شارژ توان ذخیره‌ساز الکتریکی (kW)
$P_{es.c}^{max}$	حداکثر شارژ توان ذخیره‌ساز الکتریکی (kW)	$P_{es.d}^t$	دشارژ توان ذخیره‌ساز الکتریکی (kW)
$P_{hs.c}^{max}$	حداکثر شارژ گرمای ذخیره‌ساز گرما (kW)	• متغیرهای باینری	
$P_{cs.c}^{max}$	حداکثر شارژ سرمای تهویه هوای یخ (kW)	$A_{d,t}$	متغیر باینری دیزل ژنراتور که وضعیت روشن و خاموش بودن آن را نشان می دهد
$P_{es.d}^{max}$	حداکثر دشارژ توان ذخیره‌ساز الکتریکی (kW)	$Z_{d,t}$	متغیر باینری دیزل ژنراتور که روشن شدن ژنراتور را نشان می دهد
		$V_{d,t}$	متغیر باینری دیزل ژنراتور که خاموش شدن ژنراتور را نشان می دهد
		u_{es}	متغیر باینری مربوط به ذخیره‌ساز الکتریکی

β_g	ضریب انتشار معادل گاز طبیعی (kg/kWh)	$P_{hs.d}^{max}$	حداکثر دشارژ گرمای ذخیره‌ساز گرما (kW)
β_{dg}	ضریب انتشار آلودگی تولیدی توسط دیزل ژنراتور ها (kg/kWh)	$P_{cs.d}^{max}$	حداکثر دشارژ سرمای تهویه هوای یخ (kW)
$\eta_{es.c}$	بازده شارژ ذخیره سازی الکتریکی	P_{gt}^{max}	حداکثر توان تولید شده از توربین گازی (kW)
$\eta_{hs.c}$	بازده شارژ ذخیره سازی گرما	P_{wt}^{max}	حداکثر توان تولید شده بوسیله توربین بادی (kW)
$\eta_{cs.c}$	بازده شارژ ذخیره سازی سرما	P_{grid}^{max}	حداکثر تبادل برق بین شبکه برق و سیستم هاب انرژی (kW)
$\eta_{es.d}$	بازده دشارژ ذخیره سازی الکتریکی	P_{gas}^{max}	حداکثر گاز ورودی از شبکه گاز (kW)
$\eta_{hs.d}$	بازده دشارژ ذخیره سازی گرما	P_{ec}^{max}	حداکثر توان ورودی به چیلر الکتریکی (kW)
$\eta_{cs.d}$	بازده دشارژ ذخیره سازی سرما	P_{ice}^{max}	حداکثر توان ورودی به چیلر خنک کننده (kW)
η_{ge}	بازده توربین گازی برای تولید توان	P_{pv}^{max}	حداکثر توان تولید شده بوسیله سیستم فتوولتائیک (kW)
$\eta_{gh.gb}$	بازده گاز بویلر برای تولید گرما	P_{dg}^{max}	حداکثر توان تولید شده بوسیله دیزل ژنراتور ها (kW)
$\eta_{gh.gt}$	بازده توربین گازی برای تولید گرما	P_g	قیمت گاز (kW/ریال)
η_t	بازده ترانسفورماتور	β_e	ضریب انتشار معادل برق (kg/kWh)
η_{he}	بازده مبدل حرارتی		
δ_{es}	نسبت اتلاف انرژی از ذخیره‌ساز الکتریکی		
δ_{hs}	نسبت اتلاف انرژی از ذخیره‌ساز گرما		
δ_{cs}	نسبت اتلاف انرژی از ذخیره‌ساز تهویه هوای یخ		

مراجع

- [1] S.M. Nosratabadi, H.N. Moshizi, and J.M. Guerrero. "Strategy for demand side management effectiveness assessment via a stochastic risk-based bidding approach in a multi-energy microgrid containing combined cooling, heat and power and photovoltaic units." *IET Renewable Power Generation* 16, no. 10 (2022): 2036-2058.
- [2] S.M. Nosratabadi, M. Jahandide, and J.M. Guerrero. "Robust scenario-based concept for stochastic energy management of an energy hub contains intelligent parking lot considering convexity principle of CHP nonlinear model with triple operational zones." *Sustainable Cities and Society* 68 (2021): 102795.
- [3] Y. Wen, C. Guo, D.S. Kirschen, and S. Dong. "Enhanced security-constrained OPF with distributed battery energy storage." *IEEE Transactions on Power Systems* 30, no. 1 (2014): 98-108.
- [4] C. Wang, X. Li, Y. Zhang, Y. Dong, X. Dong, and M. Wang. "Two-stage unit commitment considering multiple correlations of wind power forecast errors." *IET Renewable Power Generation* 15, no. 3 (2021): 574-585.

- [5] A. Nasri, S.J. Kazempour, A.J. Conejo, and M. Ghandhari. "Network-constrained AC unit commitment under uncertainty: A Benders' decomposition approach." *IEEE Transactions on Power Systems* 31, no. 1 (2015): 412-422.
- [6] P. Li, L. Song, J. Qu, Y. Huang, X. Wu, X. Lu, and S. Xia. "A two-stage distributionally robust optimization model for wind farms and storage units jointly operated power systems." *IEEE Access* 9 (2021): 111132-111142.
- [7] A. Kargarian, and G. Hug. "Optimal sizing of energy storage systems: A combination of hourly and intra-hour time perspectives." *IET Generation, Transmission & Distribution* 10, no. 3 (2016): 594-600.
- [8] X. Dui, G. Zhu, and L. Yao. "Two-stage optimization of battery energy storage capacity to decrease wind power curtailment in grid-connected wind farms." *IEEE Transactions on Power Systems* 33, no. 3 (2017): 3296-3305.
- [9] A. Kou, and X. Li. "Neural network intelligent control based on MPSO." *IEEE Access* 11 (2023): 58565 - 58577.
- [10] H. Ma, Y. Zhang, S. Sun, T. Liu, and Y. Shan. "A comprehensive survey on NSGA-II for multi-objective optimization and applications." *Artificial Intelligence Review* 56 (2023): 15217-15270.
- [11] M. Geidl, and G. Andersson. "Optimal power flow of multiple energy carriers." *IEEE Transactions on Power Systems* 22, no. 1 (2007): 145-155.
- [12] A. Hajimiragha, C. Canizares, M. Fowler, M. Geidl, and G. Andersson. "Optimal energy flow of integrated energy systems with hydrogen economy considerations." *2007 iREP Symposium - Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability* (2007): 1-11.
- [13] A. Shabanpour-Haghighi, and A.R. Seifi. "Simultaneous integrated optimal energy flow of electricity, gas, and heat." *Energy Conversion and Management* 101 (2015): 579-591.
- [14] R. Hemmati, H. Mehrjerdi, and S.M. Nosratabadi. "Resilience-oriented adaptable microgrid formation in integrated electricity-gas system with deployment of multiple energy hubs." *Sustainable Cities and Society* 71 (2021): 102946.
- [15] F. Kamyab, and S. Bahrami. "Efficient operation of energy hubs in time-of-use and dynamic pricing electricity markets." *Energy* 106 (2016): 343-355.
- [16] I.G. Moghaddam, M. Saniei, and E. Mashhour. "A comprehensive model for self-scheduling an energy hub to supply cooling, heating and electrical demands of a building." *Energy* 94 (2016): 157-170.
- [17] S.M. Nosratabadi, M. Jahandide, and R.K. Nejad. "Simultaneous planning of energy carriers by employing efficient storages within main and auxiliary energy hubs via a comprehensive MILP modeling in distribution network." *Journal of Energy Storage* 30 (2020): 101585.
- [18] M. Nasir, A.R. Jordehi, M. Tostado-Véliz, V.S. Tabar, S.A. Mansouri, and F. Jurado. "Operation of energy hubs with storage systems, solar, wind and biomass units connected to demand response aggregators." *Sustainable Cities and Society* 83 (2022): 103974.
- [19] M. Nasir, A.R. Jordehi, S.A.A. Matin, V.S. Tabar, M. Tostado-Véliz, and S.A. Mansouri. "Optimal operation of energy hubs including parking lots for hydrogen vehicles and responsive demands." *Journal of Energy Storage* 50 (2022): 104630.
- [20] S.M. Nosratabadi, R. Hemmati, and P.K. Gharaei. "Optimal planning of multi-energy microgrid with different energy storages and demand responsive loads utilizing a technical-economic-environmental programming." *International Journal of Energy Research* 45, no. 5 (2021): 6985-7017.
- [21] S. Paudyal, C.A. Cañizares, and K. Bhattacharya. "Optimal operation of industrial energy hubs in smart grids." *IEEE Transactions on Smart Grid* 6, no. 2 (2015): 684-694.
- [22] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Lehtonen. "Home load management in a residential energy hub." *Electric Power Systems Research* 119 (2015): 322-328.
- [23] M. Geidl, and G. Andersson. "Optimal coupling of energy infrastructures." *2007 IEEE Lausanne Power Tech* (2007): 1398-1403.
- [24] G. Mavrotas, and K. Florios. "AUGMECON2: A novel version of the ϵ -constraint method for finding the exact Pareto set in multi-objective integer programming problems." *Applied Mathematics and Computation* 219, no. 18 (2013): 9652-9669.

- [25] K. Saberi, H. Pashaei-Didani, R. Nourollahi, K. Zare, and S. Nojavan. "Optimal performance of CCHP-based microgrid considering environmental issues in the presence of real-time demand response." *Sustainable Cities and Society* 45 (2019): 596-606.
- [26] H. Chamandoust, G. Derakhshan, S.M. Hakimi, and S. Bahramara. "Tri-objective scheduling of residential smart electrical distribution grids with optimal joint of responsive loads with renewable energy sources." *Journal of Energy Storage* 27 (2020): 101112.
- [27] J. Kexin, Z. Quan, and Y. Manting. "Multi-attribute group decision making method under 2-dimension uncertain linguistic variables." *Journal of Systems Engineering and Electronics* 31, no. 6 (2020): 1254-1261.