



# Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2023) 2(1):77-95

## A Comprehensive Framework for Optimal Stochastic Operating of Energy Hubs Integrated with Responsive Cooling, Thermal and Electrical Loads, and Ice Storage System by an Improved Self-Adaptive Slime Mold Optimization Algorithm

Mohamad Emadi<sup>1</sup>, Hamid Reza Massrur<sup>2</sup>, Esmaeel RokRok<sup>3</sup>, and Amin Samanfar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Lorestan, Iran

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Department of Electrical Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Lorestan, Iran

### Abstract:

Following the expansion of the use of multi-carrier energy hubs in industries, this paper presents a comprehensive stochastic framework for optimal management and daily scheduling of an energy hub integrated with renewable energy sources and responsive cooling, thermal and electrical loads, and ice storage system. To solve this challenge, the 2m+1 Point Estimation Method (PEM) is used to accurately evaluate the system's uncertainties with low computational complexity. The 2m+1 PEM is a fast uncertainty analysis method based on the Taylor series. This method considers the uncertainty of renewable energy sources, the cooling, electrical and thermal loads, and the exchange price with different upstream energy distribution networks. This paper also presents a new self-adaptive optimization method called the Self-adaptive Modified Slime Mold optimization Algorithm (SMSMA) to solve the complex nonlinear problem of optimal daily scheduling of an energy hub. The improved self-adaptive method is based on the wavelet theory, which improves the capability and ability of the original slime mold algorithm to solve the daily optimal scheduling problem of an integrated energy hub. Numerical results show that the proposed daily stochastic scheduling framework, together with the proposed SMSMA algorithm, effectively reduces the operating costs of energy hubs.

**Keywords:** Slime mold algorithm, Multi-energy generation, Point estimate method, Integrated energy hub, Stochastic energy hub management.

**Received:** 12 October 2022

**Revised:** 21 November 2022

**Accepted:** 19 December 2022

**Corresponding Author:** Dr. Hamid Reza Massrur, h.massrur@sharif.edu

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1969195.1043>



## فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

### یک چارچوب جامع جهت بهره‌برداری احتمالاتی بهینه از سپهرهای انرژی ادغام‌شده با بارهای پاسخگوی سرمایه‌ی، حرارتی و الکتریکی و سیستم ذخیره‌ساز یخ توسط الگوریتم بهینه‌سازی خود-تطبیق کپک مخاطی بهبودیافته

محمد عمدی<sup>۱</sup>، حمید رضا مسرور<sup>۲</sup>، اسمعیل رک رک<sup>۳</sup> و امین سامان فر<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، لرستان، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه لرستان، خرم آباد، لرستان، ایران

**چکیده:** به دنبال گسترش استفاده از سپهرهای چند حاملی انرژی در صنایع، این مقاله یک چارچوب تصادفی جامع جهت مدیریت بهینه و برنامه‌ریزی روزانه یک سپهر انرژی ادغام‌شده با منابع انرژی تجدید پذیر و بارهای پاسخگوی سرمایه‌ی، حرارتی و الکتریکی و سیستم ذخیره‌ساز یخ ارائه می‌دهد. جهت حل این مسئله، از روش تخمین نقطه‌ای  $2m+1$  جهت ارزیابی دقیق عدم قطعیت‌های سیستم با پیچیدگی محاسباتی کم استفاده می‌شود. روش تخمین نقطه‌ای  $2m+1$  یک روش تحلیل عدم قطعیت سریع بر اساس سری تیلور است. در این روش عدم قطعیت منابع انرژی تجدید پذیر و بارهای الکتریکی و حرارتی سپهر انرژی و همچنین قیمت مبادله با شبکه‌های مختلف توزیع انرژی بالادستی در نظر گرفته شده است. این مقاله همچنین یک روش بهینه‌سازی خود-تطبیق جدید به نام الگوریتم بهینه‌سازی خود-تطبیق بهبودیافته کپک مخاطی (SMSMA) را جهت حل مسئله پیچیده غیرخطی برنامه‌ریزی بهینه روزانه یک سپهر انرژی ارائه می‌دهد. روش خود-تطبیق بهبودیافته شده بر مبنای تئوری موجک است که قابلیت و توانایی الگوریتم اصلی کپک مخاطی را جهت حل مسئله برنامه‌ریزی بهینه روزانه یک سپهر انرژی یکپارچه بهبود می‌بخشد. نتایج عددی نشان می‌دهد که چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی روزانه پیشنهادی، همراه با الگوریتم بهینه‌سازی SMSMA پیشنهادی، هزینه‌های بهره‌برداری سپهر انرژی را کاهش می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم کپک مخاطی، تولید چند انرژی، روش تخمین نقطه‌ای، سپهر انرژی یکپارچه، مدیریت تصادفی سپهر انرژی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۰

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸

نویسنده‌ی مسئول: دکتر حمید رضا مسرور، h.massrur@sharif.edu

DOI: <https://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1969195.1043>



## ۱- مقدمه

امروزه، مصرف کنندگان صنعتی، تجاری و مسکونی به اشکال مختلف انرژی مانند گاز طبیعی، گرمایش، سرمایش و برق نیاز دارند. اگر رشد مصرف انرژی به درستی مدیریت و برنامه ریزی نشود، منجر به رشد بیشتر مصرف حامل‌های مختلف انرژی، آلودگی بیشتر و اتلاف نامحدود منابع طبیعی می‌شود. تا دهه قبل، این حامل‌های انرژی اکثریت به‌طور جداگانه مورد بحث قرار می‌گرفتند. ایده جدید در مدیریت انرژی، یکپارچه‌سازی در بهره‌برداری از انرژی است که با توزیع بهینه انرژی بین مصرف‌های مختلف، تا آنجا که ممکن است باعث صرفه‌جویی در منابع انرژی می‌شود [۱]. با توجه به گستردگی شبکه‌های برق و گاز طبیعی و سهولت دسترسی آن‌ها، عملکرد یکپارچه حامل‌های انرژی الکتریکی و گاز طبیعی، که به سیستم‌های چند حاملی انرژی معروف هستند، اخیراً توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است. شایان ذکر است که عملکرد یکپارچه زیرساخت‌های مختلف انرژی مانند برق، گاز طبیعی و حرارت باعث افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش تلفات کل سیستم انرژی می‌شود.

اخیراً، مفهوم سپهر انرژی<sup>۱</sup> به‌عنوان یک طرح با کارایی بالا برای بهینه‌سازی هم‌زمان سیستم‌های انرژی در اشکال مختلف معرفی شده است [۲-۴]. سپهرهای انرژی متشکل از منابع مختلف انرژی و بارهای مختلفی همانند الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی هستند که توسط چندین واحد مبدل انرژی به یکدیگر متصل می‌گردند. سپهرهای انرژی از پتانسیل بالایی جهت ادغام منابع انرژی تجدید پذیر در راستای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، افزایش پایداری/ انعطاف‌پذیری سیستم تأمین انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای برخوردار هستند [۲]. هر سپهر انرژی دارای واحدهای مختلفی شامل منابع تولید انرژی، منابع تولیدات پراکنده و واحدهای ذخیره‌سازی هست که جهت تأمین تقاضاهای انرژی و دستیابی به برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری از سیستم با هم مشارکت می‌کنند. امروزه، سپهرهای انرژی به‌طور گسترده مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند و برای سیستم‌های انرژی بخش‌های مسکونی، تجاری و صنعتی مدل‌سازی شده‌اند [۵]. بر اساس وزارت انرژی ایالات متحده، تقریباً ۳۵٪ از مصرف برق در نواحی ساختمانی و تجاری مصرف می‌شود. از این ۳۵٪، حدود ۱۲٪ به سیستم‌های تهویه مطبوع اختصاص دارد [۶]. فناوری ذخیره یخ به‌طور گسترده جهت تطبیق با بارهای سرمایشی به کار گرفته می‌شود. فناوری مخزن یخ باعث انتقال بارهای الکتریکی در زمان‌های پیک مصرف به زمان‌های خارج از پیک می‌شود [۷]. ذخیره یخ اصولاً از چیلر و سیستم‌های تانک یخ تشکیل شده است.

چیلر در شرایط یخ‌سازی استفاده می‌شود. یخ در زمان‌های کاهش مصرف الکتریکی در تانک ایجاد می‌شود و در زمان‌های پیک از یخ ذخیره‌شده استفاده می‌شود. این سیستم یک روش بسیار مؤثر برای کاهش پیک مصرف می‌باشد. تغییر پیک و اصلاح منحنی بار الکتریکی روزانه در دوره‌های پیک، از ویژگی‌های استفاده از این سیستم است. در این روش چیلر در ساعات کم‌مصرفی با ظرفیت کامل شروع به کار می‌کند و سیال خنک شده در مخازن یخ مربوطه ذخیره می‌شود. بنابراین در ساعات اوج مصرف، چیلر خاموش می‌شود و یخ ذخیره‌شده بار سرمایشی مورد نیاز را تأمین می‌کند. از مزایای ذخیره‌سازی یخ خنک‌کننده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) انتقال مصرف برق چیلر به ساعات کم‌مصرف، اصلاح منحنی بار و کاهش مصرف برق، (۲) کاهش ظرفیت چیلرها و برج‌های خنک‌کننده، کاهش حجم تأسیسات لوله‌کشی، (۳) کاهش تجهیزات الکتریکی و هزینه‌های مربوطه، (۴) افزایش ضریب عملکرد چیلر به دلیل تغییر ساعت کار آن‌ها به ساعات کم‌مصرف و کارکرد با بار کامل، (۵) ایده آل برای پروژه‌هایی که به CCHP نیاز دارند. ساختار CCHP ترکیبی از توربین‌های گازی، جذب‌کننده‌های گرما، و سیستم‌های بویلر و یخچال است. این ساختار انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد و بارهای سرمایشی، گرمایشی و برق را با هم تأمین می‌کند [۸]. بهره‌وری انرژی در سیستم CCHP ممکن است تا ۶۰-۸۰ درصد برسد. این ساختار به‌شدت بهره‌وری انرژی را افزایش می‌دهد و جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی با قابلیت تری را ارائه می‌دهد [۸].

گیدل و همکاران [۹] پیشگامان معرفی تعاریف و مفاهیم سپهر انرژی بودند. در [۱۰] نویسندگان یک مدل کلی و یک تکنیک بهینه‌سازی مناسب جهت پخش انرژی برای سپهرهای انرژی حاوی حامل‌های انرژی مانند گرما، گاز طبیعی و برق ارائه داده‌اند. مسئله پخش انرژی بهینه یک سیستم چند حاملی انرژی با منابع مختلف تجدید پذیر در [۱۱، ۱۲] حل شده است. مرجع [۱۳]، یک روش بهینه‌سازی چند دوره‌ای برای حل مسئله پخش انرژی یک سپهر انرژی با در نظر گرفتن انرژی زیست‌توده جهت گرمایش بررسی کرده است. برای تعیین مقدار هر حامل انرژی برای خرید / تولید با توجه به وضعیت بار فعلی و هزینه‌های حامل‌های انرژی در [۱۴، ۱۵] بهینه‌شده است. در [۱۶]، مدیریت انرژی سلسله مراتبی برای چندین مرکز انرژی خانگی ایجاد شده است. نویسندگان عدم قطعیت سیستم، به‌عنوان مثال توان خروجی DG های مبتنی بر تجدید و تعرفه‌های برق را در نظر نگرفته‌اند. در [۱۷] با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضای بار، روش جدیدی برای برنامه‌ریزی و عملکرد بهینه سپهرهای انرژی ارائه شده است، این در حالی است که عدم قطعیت‌های قیمت برق مورد توجه





قرار نگرفته است. یک مدل یکپارچه جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری و برنامه‌ریزی سپهرهای انرژی در [۱۸] ایجاد شده است که عدم قطعیت DG های تجدید پذیر و تقاضای بارهای سپهر انرژی را در نظر می‌گیرد. برنامه‌ریزی تصادفی به‌طور گسترده جهت ارزیابی عدم قطعیت مسئله استفاده می‌شود. با این حال، ایراد اصلی برنامه‌ریزی تصادفی این است که بار محاسباتی زیادی را به مسئله تحمیل می‌کند. نویسندگان در [۱۹] یک مدل تصادفی را برای یک سپهر انرژی چند حاملی ارائه دادند که در آن برنامه پاسخگویی بار، بازار برق و بازار انرژی گرمایی در نظر گرفته شده است. در مقابل، سیستم خنک‌کننده و ذخیره آن در نظر گرفته نشده است. بهینه‌سازی اقتصادی سیستم چند حاملی انرژی با استفاده از ماتریس اتصال و لحاظ گره‌های مجازی در [۲۰] پیشنهاد شده است. اگرچه این مطالعه چندین منبع انرژی را برای حامل‌های انرژی در نظر گرفته و تأثیر برنامه‌های پاسخگویی بار را در نظر گرفته است، اما اثر سیستم خنک‌کننده و مدل‌سازی بارگذاری جزئی تجهیزات را مورد مطالعه قرار نداده است. در [۲۱]، ریز شبکه‌های چند حاملی انرژی بررسی شده‌اند که می‌توانند انرژی را با یکدیگر مبادله کنند، اما اثر سیستم خنک‌کننده و برنامه‌های پاسخگویی بار در آن بحث نشده است.

به‌منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، سیستم‌های ذخیره انرژی نقشی اساسی در سیستم دارند. این تجهیزات، انرژی را ذخیره می‌کنند تا عملکرد کلی سیستم افزایش یابد. به‌عنوان مثال، ذخیره‌سازی الکتریکی در بازه‌های قیمت کم برق باعث ذخیره‌سازی در انرژی و تخلیه آن در ساعات اوج مصرف می‌شود [۲۲]. یک سیستم سپهر انرژی در [۲۳] پیشنهاد شده است که هدف آن به حداکثر رساندن سود سیستم است. با این حال، مدل‌سازی سیستم خنک‌کننده و برنامه پاسخگویی بار در آن در نظر گرفته نشده است. در [۲۴]، یک چارچوب مشارکت در سیستم‌های چند حاملی انرژی ارائه شده است که منابع انرژی تجدید پذیر و سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی در سپهر انرژی ادغام می‌شود. با این حال، اثر برنامه پاسخگویی بارهای سرمایشی، حرارتی و الکتریکی و تأثیر سیستم‌های ذخیره یخ در این کار، مورد مطالعه قرار نگرفته است.

همان‌طور که از بررسی ادبیات در زمینه سپهر انرژی مشاهده می‌شود، برخی از جنبه‌های عمده در ارتباط با آن هنوز در مطالعات این موضوع به بلوغ و تکامل کافی نرسیده است. از مهم‌ترین چالش‌های موجود که می‌بایست نسبت به تحقیقات قبلی مورد مطالعه عمیق‌تر قرار گیرد می‌توان به موضوعات نقش فناوری ذخیره‌سازی یخ در استفاده بهینه از سپهر، مطالعات پاسخگویی بارهای برودتی سپهر در کنار پاسخگویی بارهای الکتریکی و حرارتی را اشاره نمود که اکثر مطالعات قبل تنها پاسخگویی بارهای الکتریکی و نهایتاً پاسخگویی بارهای حرارتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین استفاده از یک روش سریع جهت ارزیابی عدم قطعیت‌های موجود در سیستم سپهر انرژی می‌تواند کارایی و سرعت برنامه‌ریزی آن را افزایش دهد.

با توجه به مباحث بیان‌شده، این مقاله یک چارچوب جامع جهت برنامه‌ریزی تصادفی یک سپهر انرژی در حضور بارهای پاسخگوی برودتی و حرارتی و الکتریکی ارائه می‌دهد. در مدل‌سازی سپهر انرژی، اثربخشی مهم‌ترین فن‌آوری‌های روز نظیر فناوری ذخیره‌سازی یخ و مبدل توان الکتریکی به گاز طبیعی<sup>۲</sup> (P2G) [۲۵] بهره گرفته شده است. در این چارچوب تصادفی، با استفاده از روش ارزیابی عدم قطعیت تخمین نقطه‌ای نوع  $2m+1$  که تنها از اطلاعات چولگی و کشیدگی توابع توزیع احتمال متغیرهای دارای عدم قطعیت استفاده می‌نماید، ارزیابی سریع متغیرهای دارای عدم قطعیت با دقت مناسب نسبت به روش مونت کارلو انجام می‌گردد [۲۶]. در این روش انواع عدم قطعیت‌های موجود نظیر عدم قطعیت‌های بارهای برودتی، حرارتی و الکتریکی، عدم قطعیت‌های منابع تجدید پذیر و قیمت‌های خرید حامل‌های انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله، مدل‌سازی تجهیزات و روابط مبدل‌های انرژی به‌صورت تجهیزات با بازده غیرثابت مدل‌سازی شده‌اند و اثر بارگذاری جزئی تجهیزات با استفاده از روابط غیرخطی در نظر گرفته شده است. با توجه به مدل‌سازی غیرخطی تجهیزات متعدد و لحاظ عدم قطعیت‌ها و ابعاد گسترده مسئله، جهت حل مسئله برنامه‌ریزی بهینه روزانه سپهر انرژی به یک الگوریتم کارا نیاز می‌باشد که بتواند از جواب‌های بهینه محلی با توجه به مدل‌سازی غیرخطی مسئله عبور نماید. لذا این مقاله، در راستای پر کردن این چالش، یک الگوریتم جدید بهبودیافته بهینه‌سازی به نام الگوریتم خود تطبیق بهبودیافته کپک مخاطی ارائه نموده است. این روش بهبودیافته بر مبنای تئوری موجک<sup>۲</sup> می‌باشد. این روش خود تطبیق بهبودیافته سبب افزایش توانایی و استحکام الگوریتم اصلی بهینه‌سازی کپک مخاطی می‌شود جهت حل مسئله برنامه‌ریزی بهینه روزانه سپهر چند حاملی انرژی ادغام‌شده با انرژی‌های تجدید پذیر می‌باشد.

در ادامه به‌طور خلاصه به مهم‌ترین اهداف و نوآوری‌های مقاله اشاره شده است:

- ۱- ارائه یک چارچوب جامع تصادفی جهت مدیریت برنامه‌ریزی سپهر انرژی در حضور پاسخگویی بارهای برودتی، حرارتی و الکتریکی.
- ۲- بررسی تأثیرات فن‌آوری‌های به‌روز نظیر ذخیره یخ و مبدل P2G و انواع ذخیره‌سازهای دیگر بر روی برنامه‌ریزی روزانه سپهر انرژی.

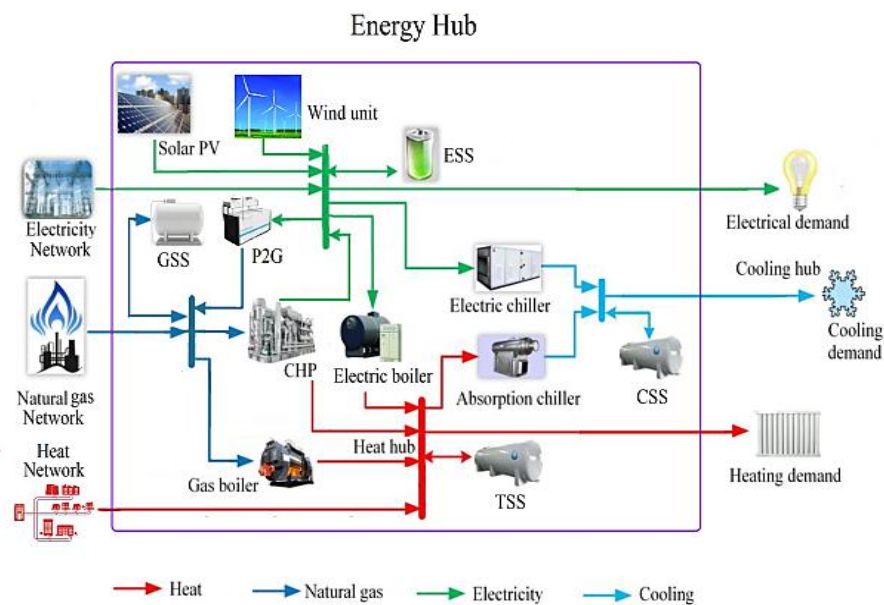


۳- ارائه یک الگوریتم جدید بهبودیافته بهینه‌سازی به نام الگوریتم خود تطبیق بهبودیافته کپک مخاطی جهت بهینه‌سازی مسئله مدیریت روزانه سپهر انرژی.

۴- ارزیابی سریع انواع عدم قطعیت‌های مسئله با استفاده از روش تخمین نقطه‌ای  $2m+1$ . مابقی این مقاله به شرح زیر است. در بخش دوم، چارچوب مدیریت سپهر انرژی یکپارچه پیشنهادی ارائه شده است. در بخش سوم، مدل‌سازی ریاضی برنامه‌ریزی روزانه بهینه پیشنهادی برای سپهر انرژی یکپارچه فرموله می‌شود. بخش چهارم روش تجزیه و تحلیل سریع تصادفی تخمین نقطه‌ای  $2m+1$  را جهت حل مسئله بهینه‌سازی سپهر انرژی در کنار عدم قطعیت‌های سیستم نشان می‌دهد. الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی خود تطبیق بهبودیافته کپک مخاطی در بخش پنجم بیان شده است. در بخش ششم، عملکرد چارچوب برنامه‌ریزی بهینه روزانه سپهر انرژی پیشنهادی و همچنین عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده جهت حل مسئله، با نتایج عددی مختلف بررسی می‌شود. در پایان، بخش هفتم به نتیجه‌گیری‌های مقاله اشاره می‌کند.

## ۲- چارچوب مدیریت یک سپهر چند حاملی انرژی ادغام‌شده با انرژی‌های تجدید پذیر

سپهر چند حاملی انرژی ساختاری است که در آن اتصالات متقابل بین تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، مبدل‌ها و دستگاه‌های ذخیره انرژی به اشکال مختلف اتفاق می‌افتد. هر سپهر انرژی ممکن است شامل سه نوع تجهیزات مانند تبدیل انرژی، انتقال انرژی و دستگاه‌های ذخیره انرژی باشد. از مراکز سپهر انرژی می‌توان در مقیاس‌های وسیع برای بسیاری از کاربردها از جمله صنعتی، برنامه‌های تجاری و مسکونی استفاده نمود. ساختار سپهر انرژی پیشنهادی که در شکل (۱) نشان داده شده است. ورودی‌های سپهر انرژی شامل انرژی الکتریکی، حرارتی و گازی می‌باشد که تقاضای انرژی الکتریکی، حرارتی و برودتی بارهای محلی وابسته به سپهر انرژی را تأمین می‌کند.



شکل (۱): ساختار کلی یک سپهر چند حاملی انرژی ادغام‌شده با انرژی‌های تجدید پذیر

انرژی‌های ورودی بر اساس شرایط و خواسته‌های سپهر انرژی تبدیل یا مستقیماً به نقطه خروجی منتقل می‌شوند. تقاضای انرژی الکتریکی در خروجی سپهر انرژی را می‌توان با تولید برق الکتریکی CHP، واحد خورشیدی، توربین بادی تأمین کرد یا از شبکه بالادستی خریداری کرد. برای تأمین بار گرمایش در سمت خروجی سپهر انرژی، می‌توان از بویلر گازسوز، توان حرارتی تولیدشده توسط واحد CHP یا بویلر الکتریکی (EB) استفاده کرد یا مستقیماً از شبکه بالادستی خریداری نمود. به دلیل تغییرات قیمت برق، انرژی حرارتی و گاز طبیعی در حین کار روزانه سپهر، توان حرارتی تولیدشده توسط بویلر، CHP یا گرمای خریداری‌شده از شبکه بالادستی را می‌توان در سیستم ذخیره گرما (TSS) ذخیره کرد. علاوه بر این، توان الکتریکی تولیدشده توسط CHP، واحد خورشیدی، توربین بادی یا توان الکتریکی خریداری‌شده از شبکه بالادستی را می‌توان در طی یک روز در سیستم ذخیره برق (ESS) ذخیره کرد.



همچنین، گاز مورد نیاز واحدهای گازسوز هم از طریق خرید از شبکه بالادست می‌تواند تأمین شود و هم از طریق استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر و با استفاده از واحد P2G که انرژی برق را به گاز تبدیل می‌کند، استفاده نمود. همچنین می‌توان گاز موجود در سپهر انرژی را برای ساعات بعد در تانک گاز ذخیره (GSS) سازی نمود.

جهت تأمین بارهای سرمایشی، می‌توان از چیلرهای جذبی و از سرما سازهای الکتریکی استفاده نمود. همچنین می‌توان سرمای تولیدشده را در تجهیز CSS ذخیره نمود. فناوری تهویه مطبوع ذخیره یخ (CSS) فرآیند استفاده از یخ برای ذخیره انرژی حرارتی است. این فرآیند می‌تواند انرژی مورد استفاده برای خنک‌سازی را در زمان‌های اوج تقاضای الکتریکی کاهش دهد. این دستگاه از تجهیزات خنک‌کننده استاندارد، به علاوه یک مخزن ذخیره انرژی برای انتقال تمام یا بخشی از نیازهای سرمایشی ساختمان به ساعات غیر اوج و شبانه استفاده می‌کند. در ساعات غیر اوج مصرف، یخ در مخازن ذخیره انرژی ساخته و ذخیره می‌شود. سپس از یخ ذخیره‌شده برای خنک کردن ساکنان ساختمان در روز بعد استفاده می‌شود.

سپهرهای چند حاملی انرژی یک نهاد مستقل هستند که اشکال مختلف انرژی را از شبکه‌های مختلف انرژی با یک قیمت از پیش تعیین شده خریداری می‌کنند و تقاضای انرژی خروجی سپهر را تأمین می‌کنند. مدیر سپهر انرژی، می‌تواند تقاضای انرژی خود را در پاسخ به تغییرات قیمت‌های انرژی به وسیله تغییر در انرژی تغذیه‌کننده در ورودی سپهر یا تغییر در الگوی مصرف انرژی خود در خروجی سپهر، بهینه نمایند. با تغییر در انرژی تغذیه‌کننده در ورودی سپهرها، مصرف انرژی از دیدگاه مشتریان پاسخگو تغییر نمی‌کند، اما منبع انرژی تأمین‌کننده به یک منبع انرژی دیگر تبدیل می‌شود. سپهرهای چند حاملی انرژی، هزینه‌های خرید انرژی خود را با استفاده از انعطاف‌پذیری که توسط ادغام انرژی‌های گرما، سرما، گاز، برق به دست می‌آید، به حداقل می‌رساند. لذا بهره‌بردار سپهر انرژی، می‌تواند هم با استفاده از طریق تغییر در الگوی مصرف بارهای حرارتی و الکتریکی و برودتی و هم با استفاده از طریق انعطاف‌پذیری که ناشی از ادغام انرژی‌های مختلف است، هزینه بهره‌برداری از سپهر را کاهش دهد. همچنین سپهرهای انرژی این قابلیت را دارا می‌باشند که مازاد انرژی تولیدی خود را به شبکه‌های بالادست به فروش رسانند و هزینه‌های خود را کاهش دهند.

### ۳- مدل‌سازی ریاضی برنامه‌ریزی بهینه روزانه سپهر چند حاملی انرژی ادغام‌شده با انرژی‌های تجدید پذیر

به‌طور کلی مدیر سپهر سعی دارد تا با استفاده از برنامه‌ریزی مناسب، در طول یک روز هزینه بهره‌برداری از سپهر را کاهش دهد. لذا تابع هدف این اپراتور، کاهش هزینه‌های روزانه خرید انرژی از شبکه‌های مختلف سپهر به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min}(Cost_{MECM}) = \min[\sum_{t=1}^{24} (\omega_E^t \cdot L_{e,in}^t + \omega_H^t \cdot L_{h,in}^t + \omega_G^t \cdot L_{g,in}^t)] \quad (1)$$

که در آن  $\omega_E^t$ ،  $\omega_H^t$  و  $\omega_G^t$  به ترتیب قیمت خرید ساعتی برق، گرما و گاز از شبکه‌های بالادستی هستند. معادلات (۲) - (۵) تعادل انرژی‌های مختلف در سپهر را برای انرژی‌های برق، گاز و گرما و سرما به ترتیب مشخص می‌کند.

$$L_{e,in}^t = P_t^{EC} + P_t^{P2G} + P_t^{ECb} + P_{ch,t}^{ESS} + L_{e,out}^t - P_t^{CHP} - P_t^{wind} - P_t^{PV} - P_{dch,t}^{ESS} \quad (2)$$

$$L_{g,in}^t = F_t^{Gcb} + F_t^{CHP} + F_{ch,t}^{GSS} - F_t^{P2G} - F_{dch,t}^{GSS} \quad (3)$$

$$L_{h,in}^t = \phi_{ch,t}^{CSS} + \phi_t^{AC} + L_{h,out}^t - \phi_t^{ECb} - \phi_t^{Gcb} - \phi_t^{chp} - \phi_{dch,t}^{CSS} \quad (4)$$

$$\psi_t^{EC} + \psi_{t,C}^{AC} + \psi_{dch,t}^{CSS} = L_{c,out}^t + \psi_{ch,t}^{CSS} \quad (5)$$

انرژی‌های الکتریکی و حرارتی در خروجی سپهر با توجه به نوع مصرف‌کنندگان به دو بخش بارهای ثابت و بارهای انعطاف‌پذیر به صورت زیر تقسیم می‌شود [۲۷]:

$$L_{e,out}^t = L_{e,out,Fix}^t + L_{e,out,DR}^t \quad (6)$$

$$L_{h,out}^t = L_{h,out,Fix}^t + L_{h,out,DR}^t \quad (7)$$

$$L_{c,out}^t = L_{c,out,Fix}^t + L_{c,out,DR}^t \quad (8)$$

که در آن  $L_{e,out,Fix}^t$ ،  $L_{h,out,Fix}^t$  و  $L_{c,out,Fix}^t$  بارهای ثابت انرژی الکتریکی، حرارتی و سرمایشی هستند و  $L_{e,out,DR}^t$ ،  $L_{h,out,DR}^t$  و  $L_{c,out,DR}^t$  بارهای پاسخگوی انرژی الکتریکی، حرارتی و سرمایشی می‌باشند.





مقادیر کل بار الکتریکی و بارهای حرارتی برای یک روز ثابت است و تأمین این بارها از یک دوره زمانی به دوره‌های زمانی دیگر در آن روز تنها می‌توانند جابه‌جا شوند. لذا مجموع بارهای حرارتی و الکتریکی در هر روز می‌تواند به صورت زیر مدل شود:

$$E_r^{day} = \sum_{t \in T} L_{e,out,Fix}^t + \sum_{t \in T} L_{e,out,DR}^t \quad (9)$$

$$H_r^{day} = \sum_{t \in T} L_{h,out,Fix}^t + \sum_{t \in T} L_{h,out,DR}^t \quad (10)$$

در صد جابه‌جایی بارهای الکتریکی و حرارتی در هر ساعت تنها می‌تواند به میزان در صد مشارکت بارها در برنامه پاسخگویی بار یکپارچه باشد. از این رو محدودیت زیر برای تغییرات پاره‌های پاسخگو انرژی در هر ساعت باید رعایت شود:

$$L_{e,out,DR}^{t,min} \leq L_{e,out,DR}^t \leq L_{e,out,DR}^{t,max} \quad (11)$$

$$L_{h,out,DR}^{t,min} \leq L_{h,out,DR}^t \leq L_{h,out,DR}^{t,max} H_r^{day} = \sum_{t \in T} L_{h,out,Fix}^t + \sum_{t \in T} L_{h,out,DR}^t \quad (12)$$

در مطالعات سپهر چند حاملی انرژی، توان حرارتی تولیدشده در خروجی CHP مشخص و ثابت در نظر گرفته می‌شود. از این رو برای محاسبه مقدار توان الکتریکی توسط این واحد می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۲۸]:

$$P_t^{chp} = \begin{cases} a_r^{chp} \phi_{t,h}^{chp} + b_r^{chp} T_s^{chp} + c_r^{chp} \\ \text{For } d_{1,r}^{chp} \phi_{t,h}^{chp} \leq \phi_{t,h}^{chp} \leq \phi_{t,max}^{chp} \\ a_r^{chp} \phi_{t,h}^{chp} + b_i^{chp} T_s^{chp} + c_r^{chp} - y_{1,r}^{chp} \\ \text{For } d_{2,r}^{chp} \phi_{t,max}^{chp} \leq \phi_{t,h}^{chp} \leq d_{1,r}^{chp} \phi_{t,max}^{chp} \\ a_r^{chp} \phi_{t,h}^{chp} + b_r^{chp} T_s^{chp} + c_r^{chp} - y_{1,r}^{chp} - y_{2,r}^{chp} \\ \text{For } \phi_{t,min}^{chp} \leq \phi_{t,h}^{chp} \leq d_{2,r}^{chp} \phi_{t,max}^{chp} \end{cases} \quad (13)$$

که در آن  $P_t^{chp}$  توان اکتیو الکتریکی CHP،  $\phi_{t,h}^{chp}$  توان حرارتی تولیدی آن که به شبکه حرارتی تزریق می‌شود و  $\phi_{t,min}^{chp}$  و  $\phi_{t,max}^{chp}$  به ترتیب مقدار حداقل و حداکثر توان حرارتی تولیدی آن است. ضرایب موجود در رابطه نیز ثابت‌های نشان‌دهنده وابستگی بین مقدار تولید توان‌های حرارتی و الکتریکی است که به ضرایب بارگذاری جزئی CHP معروف هستند.  $T_s^{chp}$  دمای آب حرارت دیده‌شده در خروجی CHP است. پارامترهای  $d_{1,r}^{chp}$  و  $d_{2,r}^{chp}$  ثابت‌های اثر بارگذاری گفته می‌شوند و از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$d_{1,r}^{chp} = (d_{1,r}^{chp} \phi_{t,max}^{chp} - \phi_{t,h}^{chp}) e_{1,r}^{chp} \quad (14)$$

$$d_{2,r}^{chp} = (d_{2,r}^{chp} \phi_{t,max}^{chp} - \phi_{t,h}^{chp}) e_{2,r}^{chp} \quad (15)$$

تمامی ضرایب معادلات (۱۴) و (۱۵) به صورت ثابت می‌باشند که مقدار آن‌ها در مرجع [۲۸] داده شده است.

برای محاسبه میزان گاز مصرفی این واحدها با اعمال شرایط مربوط به بازده آن‌ها می‌توان گفت:

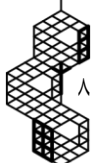
$$F_t^{chp} = \frac{3.412 (P_t^{chp} + \phi_t^{chp})}{GHV_g \eta_t^{chp}} \quad (16)$$

که در این رابطه  $P_t^{chp}$  توان الکتریکی CHP،  $\phi_t^{chp}$  توان حرارتی تولیدی آن که به شبکه حرارتی تزریق می‌شود،  $GHV_g$  مقدار حرارت ناخالص در واحد حجم گاز طبیعی و  $\eta_t^{chp}$  مقدار بازده کلی تبدیل انرژی CHP است. شایان ذکر است برای تطبیق واحد و دیمانسیون طرفین معادله از ضریب ۳/۴۱۲ استفاده شده است. چراکه واحد  $GHV_g$  معمولاً برحسب  $BTU/m^3$  است و واحد مدنظر برای توان الکتریکی و توان حرارتی در روابط بیان شده وات است. ضریب گفته شده این دو پارامتر را هم دیمانسون می‌کند. گفتنی است که مقدار گاز مصرفی محاسبه شده از رابطه (۱۷) برحسب مترمکعب استاندارد در ساعت (SCM/h) خواهد بود.

$$F_t^{boil} = \frac{3.412 (\phi_t^{Gcb} + a^{Gcb} \phi_{t,max}^{Gcb})}{GHV_g b^{Gcb}} \quad (17)$$

در این رابطه  $\phi_t^{Gcb}$  توان حرارتی تولیدشده توسط بویلر است که مشابه CHP آن را به شبکه حرارتی تحویل می‌دهد. میزان حداکثری که می‌توان توسط یک بویلر توان حرارتی تولید کرد با  $\phi_{t,max}^{Gcb}$  نمایش داده شده است.  $a^{Gcb}$  و  $b^{Gcb}$  ثابت‌های بارگذاری جزئی بویلر را بیان می‌کند. از نظر دیمانسیون نیز مشابه روابط قبل است که جهت پرهیز از تکرار این مبحث، از آوردن آن اجتناب می‌شود. علاوه بر این، مقدار الکتریسیته موردنیاز بویلرهای الکتریکی برای تولید انرژی گرمایی را می‌توان به صورت [۳۰] نشان داد:

$$P_t^{Ecb} = \frac{\phi_t^{Ecb}}{\eta_t^{Ecb}} \quad (18)$$





مقدار مصرف توان الکتریکی واحد P2G ( $P_t^{P2G}$ ) به صورت زیر تعیین می‌شود [۳۱]:

$$P_t^{P2G} = \frac{GHV_g}{\eta_{P2G,3.412}^{P2G}} \cdot F_t^{P2G} \quad (19)$$

توان حرارتی خروجی بویلرهای گازسوز و برقی باید به ترتیب بین حداقل و حداکثر ظرفیت بویلرهای گازسوز و برقی باشند:

$$\phi_{t,min}^{Gcb} \leq \phi_t^{Gcb} \leq \phi_{t,max}^{Gcb} \quad (20)$$

$$\phi_{t,min}^{Ecb} \leq \phi_t^{Ecb} \leq \phi_{t,max}^{Ecb} \quad (21)$$

میزان توان حرارتی تولیدی CHP، باید در بین مقادیر ماکزیمم و مینیمم تولیدی واحد CHP باشد:

$$\phi_{t,min}^{chp} \leq \phi_{t,h}^{chp} \leq \phi_{t,max}^{chp} \quad (22)$$

میزان گاز طبیعی تولیدی هر واحد P2G، باید در بین مقادیر ماکزیمم و مینیمم تولیدی هر واحد P2G باشد، که طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$F_{t,min}^{P2G} \leq F_t^{P2G} \leq F_{t,max}^{P2G} \quad (23)$$

حالت شارژ (SOC) مربوط به ESS را می‌توان با معادله زیر به دست آورد:

$$P_{SOC,t}^{ESS} = P_{SOC,t-1}^{ESS} + \eta_{ch}^{ESS} P_{ch,t}^{ESS} - \eta_{dch}^{ESS} P_{dch,t}^{ESS} \quad (24)$$

که در آن  $\eta_{ch}^{ESS}$  و  $\eta_{dch}^{ESS}$  راندمان شارژ و دشارژ هستند. علاوه بر این، ESSها را نمی‌توان به طور هم‌زمان شارژ و دشارژ کرد. همچنین، نرخ تغییرات برای SOC مربوط به ESSها باید به شرح زیر در نظر گرفته شود:

$$0 \leq P_{ch,t}^{ESS} \leq P_{ch,max}^{ESS} \times \Delta t \quad (25)$$

$$0 \leq P_{dch,t}^{ESS} \leq P_{dch,max}^{ESS} \times \Delta t \quad (26)$$

محدودیت‌های ظرفیت بالا/پایین برای ESS به شرح زیر است:

$$P_{SOC,min}^{ESS} \leq P_{SOC,t}^{ESS} \leq P_{SOC,max}^{ESS} \quad (27)$$

توان خنک‌کننده خروجی AC با حداقل ( $\psi_{t,min}^{AC}$ ) و حداکثر ( $\psi_{t,max}^{AC}$ ) ظرفیت AC محدود می‌شود:

$$\psi_{t,min}^{AC} \leq \psi_t^{AC} \leq \psi_{t,max}^{AC} \quad (28)$$

علاوه بر این، انرژی گرمایی موردنیاز برای AC برای تولید انرژی سرمایه‌ی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\phi_t^{AC} = \frac{\psi_{t,C}^{AC}}{\eta_{t,C}^{AC}} \quad (29)$$

SOC مربوط به TSSها با در نظر گرفتن بازده شارژ/دشارژ ( $\eta_{ch}^{TSS}$ ) / ( $\eta_{dch}^{TSS}$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\phi_{SOC,t}^{TSS} = \phi_{SOC,t-1}^{TSS} + \eta_{ch}^{TSS} \phi_{ch,t}^{TSS} - \eta_{dch}^{TSS} \phi_{dch,t}^{TSS} \quad (30)$$

هر TSS را نمی‌توان در هر بازه زمانی به طور هم‌زمان دشارژ و شارژ کرد. محدودیت‌های ظرفیت پایین/بالا و نرخ رمپ SOC مربوط به TSS باید به ترتیب با معادلات زیر برآورده شوند [۳۲].

$$\phi_{SOC,min}^{TSS} \leq \phi_{SOC,t}^{TSS} \leq \phi_{SOC,max}^{TSS} \quad (31)$$

$$0 \leq \phi_{ch,t}^{TSS} \leq \phi_{ch,max}^{TSS} \times \Delta t \quad (32)$$

$$0 \leq \phi_{dch,t}^{TSS} \leq \phi_{dch,max}^{TSS} \times \Delta t \quad (33)$$

قدرت خنک‌کنندگی EC با حداقل ظرفیت ( $\psi_{t,min}^{EC}$ ) و حداکثر ( $\psi_{t,max}^{EC}$ ) به شرح زیر محدود می‌شود:

$$\psi_{t,min}^{EC} \leq \psi_{t,C}^{EC} \leq \psi_{t,max}^{EC} \quad (34)$$

انرژی الکتریکی موردنیاز برای EC برای تولید سرمایه‌ی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$P_t^{EC} = \frac{\psi_{t,C}^{EC}}{\eta_{t,C}^{EC}} \quad (35)$$

SOC مربوط به GSS را بر اساس معادله زیر حساب می‌شود [۳۳]:

$$F_{SOC,t}^{GSS} = F_{SOC,t-1}^{GSS} + \eta_{ch}^{GSS} F_{ch,t}^{GSS} - \eta_{dch}^{GSS} F_{dch,t}^{GSS} \quad (36)$$

که در آن  $\eta_{ch}^{GSS}$  و  $\eta_{dch}^{GSS}$  راندمان شارژ و دشارژ GSS هستند و GSS نمی‌تواند به طور هم‌زمان در یک بازه زمانی شارژ و دشارژ شود. محدودیت ظرفیت GSS و نرخ رمپ SOC مربوط به GSS به ترتیب توسط معادلات (۳۷)، (۳۸) و (۳۹) توصیف می‌شود:

$$F_{SOC,min}^{GSS} \leq F_{SOC,t}^{GSS} \leq F_{SOC,max}^{GSS} \quad (37)$$







$$0 \leq F_{ch,t}^{GSS} \leq F_{ch,max}^{GSS} \times \Delta t \quad (38)$$

$$0 \leq F_{dch,t}^{GSS} \leq F_{dch,max}^{GSS} \times \Delta t \quad (39)$$

SOC مربوط به CSS را می‌توان با در نظر گرفتن بازده شارژ و دشارژ  $(\eta_{ch}^{CSS})$  و  $(\eta_{dch}^{CSS})$  با استفاده از معادلات زیر تعریف کرد:

$$\psi_{SOC,t}^{CSS} = \psi_{SOC,t-1}^{CSS} + \eta_{ch}^{CSS} \psi_{ch,t}^{CSS} - \eta_{dch}^{CSS} \psi_{dch,t}^{CSS} \quad (40)$$

CSS را نمی‌توان به‌طور هم‌زمان در هر بازه زمانی دشارژ و شارژ کرد. علاوه بر این، محدودیت‌های ظرفیت CSS و نرخ رمپ برای SOC آن به ترتیب با معادلات (41) - (43) بیان می‌شوند:

$$\psi_{SOC,min}^{CSS} \leq \psi_{SOC,t}^{CSS} \leq \psi_{SOC,max}^{CSS} \quad (41)$$

$$0 \leq \psi_{ch,t}^{CSS} \leq \psi_{ch,max}^{CSS} \times \Delta t \quad (42)$$

$$0 \leq \psi_{dch,t}^{CSS} \leq \psi_{dch,max}^{CSS} \times \Delta t \quad (43)$$

استراتژی اتخاذی اپراتور سپهر چند حاملی انرژی و مقادیر کنترلی مربوط به تصمیم‌گیری آن در هر ساعت به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$X_t^{Hub} = \begin{cases} (\phi_{ch,t}^{CSS}, \phi_{dch,t}^{CSS}, \phi_t^{chp}, \phi_t^{Gcb}, \phi_t^{Ecb}, \\ \psi_{t,C}^{AC}, \psi_{dch,t}^{CSS}, \psi_{ch,t}^{CSS}, \psi_t^{EC}, F_{ch,t}^{GSS}, \\ F_{dch,t}^{GSS}, F_t^{P2G}, P_{dch,t}^{ESS}, P_{ch,t}^{ESS}, \\ L_{e,out,DR}^t, L_{h,out,DR}^t) \end{cases} \quad (44)$$

#### ۴- روش ارزیابی عدم قطعیت تخمین نقطه‌ای 2m+1

روش PEM، مسئله‌ی برنامه‌ریزی تصادفی را به چندین برنامه‌ریزی قطعی تبدیل می‌کند. با این تفاوت که بار محاسباتی این روش بسیار کم‌تر است [34]. از نکات قابل توجه این روش عدم نیاز به توابع توزیع دقیق متغیرهای کنترلی است. روش PEM تنها به چهار مقدار میانگین، واریانس، چولگی<sup>۴</sup> و کشیدگی<sup>۵</sup> توابع توزیع متغیرهای تصادفی نیاز دارد. چولگی و کشیدگی به ترتیب میزان نامتقارنی و پخی هر تابع توزیع را نسبت به تابع توزیع نرمال نشان می‌دهد.

روش‌های تخمین نقطه‌ای 2m+1 برای هر متغیر تصادفی، دو نقطه از تابع توزیع آن را به دست آورده و سپس مسئله را به ازای این نقاط حل می‌کند. نقاط به‌دست‌آمده را نقاط تمرکز احتمالی می‌نامند. نقطه‌ی تمرکز احتمالی K ام برای متغیر تصادفی Z<sub>d</sub> به شکل  $(z_{d,p}, w_{d,p})$  نمایش داده می‌شود که Z<sub>l,k</sub> مکان و w<sub>l,k</sub> ضریب تأثیر این نقطه در مقدار کلی تابع هدف را نشان می‌دهد.

در ادامه گام‌به‌گام روش 2m+1 برای به دست آوردن گشتاورهای اول و دوم خروجی بیان شده است:

گام ۱: مشخص کردن تعداد متغیرهای عدم قطعیت (m)

گام ۲: قرار دادن گشتاورهای اول و دوم c امین متغیر خروجی  $(E(S^q))$  برابر با صفر:

$$E(S^q) = 0 \quad (q=1,2) \quad (45)$$

گام ۳: انتخاب یک متغیر تصادفی Z<sub>d</sub>

گام ۴: محاسبه‌ی چولگی  $(\lambda_{zd,3})$  و پخی متغیر تصادفی  $(\lambda_{zd,4})$  بر طبق روابط زیر:

$$\lambda_{zd,3} = \frac{E[(z_d - \mu_{z_d})^3]}{(\sigma_{z_d})^3}, \quad \lambda_{zd,4} = \frac{E[(z_d - \mu_{z_d})^4]}{(\sigma_{z_d})^4} \quad (46)$$

گام ۵: محاسبه‌ی دو مکان استاندارد  $(\xi_{z_d,p})$ :

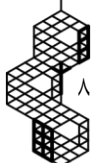
$$\xi_{z_d,p} = \frac{\lambda_{zd,3}}{2} + (-1)^{3-p} \sqrt{\lambda_{zd,4} - \frac{3}{4} \lambda_{zd,3}^2} \quad p=1,2 \quad (47)$$

$$\xi_{z_d,3} = 0$$

گام ۶: محاسبه‌ی دو مکان تخمین زده‌شده  $(z_{d,p})$ :

$$z_{d,p} = \mu_{z_d} + \xi_{z_d,p} \cdot \sigma_{z_d}, \quad p=1,2,3 \quad (48)$$

گام ۷: حل کردن مسئله‌ی قطعی با تابع هدف F با حضور مکان‌های تخمین زده‌شده و به دست آوردن خروجی S متناظر با نقطه  $z_{d,p}$ :





$$S_{c(d,p)} = F_c(\mu_{z_1}, \mu_{z_2}, \dots, \mu_{z_d,p}, \dots, \mu_{z_m}) \quad (49)$$

$p=1,2,3$

در رابطه‌ی بالا  $Z_{d,p}$  مکان‌های متغیر تصادفی  $Z_d$  و  $\mu_{z_m}$  مقدار میانگین بقیه متغیرهای دارای عدم قطعیت است. وقتی جواب  $2 \times m$  بار محاسبه‌ی قطعی مسئله به دست آمد، مقدار میانگین و انحراف معیار متغیر تصادفی خروجی به دست خواهد آمد. بعد از به دست آمدن  $2 \times m$  نقطه، محاسبات قطعی مسئله،  $2 \times m$  بار انجام می‌شود. در هر بار محاسبه یکی از متغیرهای تصادفی برابر با یکی از نقاط تمرکز در نظر گرفته شده و برای بقیه‌ی متغیرهای تصادفی مقدار میانگینشان لحاظ می‌گردد. همچنین یک بار هم مسئله برای لحاظ میانگین تمامی مقادیر متغیرهای دارای عدم قطعیت حل می‌شود.

گام ۸: محاسبه‌ی ضریب تأثیر  $p$  امین نقطه از  $d$  امین متغیر دارای عدم قطعیت  $(\omega_{z_d,p})$ :

$$\omega_{z_d,p} = \frac{(-1)^{3-p}}{\xi_{z_d,p} \left( \xi_{z_d,1} - \xi_{z_d,2} \right)} \quad p=1,2 \quad (50)$$

$$\omega_{z_d,3} = \frac{1}{m} - \frac{1}{\lambda_{z_d,4} - \lambda_{z_d,3}^2} \quad (51)$$

گام ۹: تکرار مراحل ۳ تا ۹، تا وقتی که همه‌ی متغیرهای تصادفی در محاسبات وارد شوند.

گام ۱۰: محاسبه گشتاورهای (q) اول و دوم خروجی:

$$\begin{aligned} E(S_c^q) &= \sum_{d=1}^m \sum_{p=1}^3 \omega_{z_d,p} \cdot (S_{c(d,p)})^q \\ &= \sum_{d=1}^m \sum_{p=1}^2 \omega_{z_d,p} \cdot (S_{c(d,p)})^q \\ &+ \left[ F(\mu_{z_1}, \mu_{z_2}, \dots, \mu_{z_d}, \dots, \mu_{z_m})^q \right] \sum_{d=1}^m \omega_{z_d,3} \end{aligned} \quad (52)$$

گام ۱۱: محاسبه‌ی میانگین  $(\mu_{S_c})$  و انحراف استاندارد  $(\sigma_{S_c})$ ،  $c$  امین متغیر تصادفی خروجی:

$$\mu_{S_c} = E(S_c) \quad (53)$$

$$\sigma_{S_c} = \sqrt{E(S_c^2) - (E(S_c))^2} = \sqrt{E(S_c^2) - \mu_{S_c}^2} \quad (54)$$

شایان ذکر است که متغیرهای دارای عدم قطعیت که وارد روش تخمین نقطه‌ای  $2m+1$  می‌شود شامل قیمت‌های خرید انرژی از شبکه‌های بالادست، میزان توان تولیدی انرژی‌های تجدید پذیر و مقادیر بارهای حرارتی و الکتریکی می‌باشد.

## ۵- الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی خود تطبیق بهبود یافته کپک مخاطی<sup>۱</sup>

در این مقاله از یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی جدید که الگوریتم کپک مخاطی نامیده می‌شود جهت حل مسئله بهینه‌سازی مدیریت روزانه سپهر چند حاملی انرژی، استفاده شده است. الگوریتم مورد نظر با استفاده از شبیه‌سازی الگوی رفتار کپک مخاطی ایجاد شده است. در واقع کپک مخاطی در فرآیند بهینه‌سازی به دنبال پیدا کردن منابع مواد غذایی با بالاترین کیفیت است. الگوریتم کپک مخاطی (SMA) مبتنی بر جمعیت است و فرایند ساده‌ای را در تنظیمات دارد و به راحتی قابلیت تعمیم به مسائل با ابعاد بزرگ را دارا است [۳۵].

مرحله اصلی این الگوریتم، مرحله فعال نزدیک شدن کپک مخاطی به غذا است. در این مرحله، ماده آلی موجود در کپک مخاطی به دنبال مواد غذایی می‌گردد، سپس آن را احاطه کرده و آنزیم‌ها را برای هضم آن ترشح می‌کند. در رفتار کپک مخاطی، وقتی یک رگ به یک منبع غذایی نزدیک می‌شود، نوسان سازنده موجی تولید می‌کند که جریان سیتوپلاسمی را از طریق ورید افزایش می‌دهد و هرچه سیتوپلاسم سریع‌تر جریان یابد، ورید ضخیم‌تر می‌شود. از طریق این بازخورد مثبت و منفی، این الگوریتم می‌تواند مسیر بهینه برای اتصال به غذا را برقرار کند.



## ۵-۱- مدل سازی ریاضی الگوریتم اصلی کپک مخاطی

کپک مخاطی با توجه به بو موجود در هوا می تواند به غذا نزدیک شود. بر این مبنا، فرمول ریاضی برای به روزرسانی محل کپک مخاطی به شرح زیر تکمیل می گردد [۳۵]:

$$\vec{X}^* = \begin{cases} rand \cdot (UB - LB) + LB, & rand < z \\ \vec{X}_b(t) + \vec{v}_b * (\vec{W} \cdot \vec{X}_A(t) - \vec{X}_B(t)), & r < p \\ \vec{v}_c \cdot \vec{X}(t), & r \geq p \end{cases} \quad (55)$$

LB و UB به ترتیب مرزهای پایین و بالای دامنه جستجو را نشان می دهند، rand و r مقدار تصادفی را در [0,1] نشان می دهند. مقدار  $z$ ،  $0.3$  در نظر گرفته می شود. در رابطه بالا  $\vec{v}_b$  پارامتری در بازه  $[-a, a]$ ،  $\vec{v}_c$  به صورت خطی از یک تا صفر کاهش می یابد.  $t$  شماره تکرار فعلی را نمایش می دهد.  $\vec{X}_B$  محل مستقل با بالاترین غلظت بو (ماده غذایی) که در حال حاضر (تاکنون) یافت شده است را نشان می دهد.  $\vec{X}(t)$  محل کپک مخاطی را مشخص می کند.  $\vec{X}_A$  و  $\vec{X}_B$  دو محل مستقل تصادفی انتخاب شده از کپک مخاطی را نشان می دهند و  $\vec{W}$  هم وزن مربوطه را در الگوریتم نشان می دهد.

$$p = \tanh |F(\vec{X}(t)) - GB| \quad \text{where } i \in 1, 2, \dots, n \quad (56)$$

$X(i)$  مقدار تابع هدف  $\gamma$  مربوط به محل  $X$  را نشان می دهد و  $GB$  بهترین مقدار تابع هدف در تمام تکرارها را نشان می دهد.

$$vb = [-a, a] \quad (57)$$

$$a = \tanh^{-1} \left( - \left( \frac{t}{\max - t} \right) + 1 \right) \quad (58)$$

رابطه زیر فرمول محاسبه ضریب وزنی را بیان می کند:

$$W(\text{SmellIndex}(i)) = \begin{cases} 1 + r \cdot \log \left( \frac{PB - F(i)}{PB - wC} + 1 \right) & \text{For condition} \\ 1 - r \cdot \log \left( \frac{PB - F(i)}{PB - wC} + 1 \right) & \text{other} \end{cases} \quad (59)$$

$$\text{SmellIndex} = \text{sort}(S) \quad (60)$$

$wC$  و  $PB$  به ترتیب بهترین و بدترین مقدار تابع هدف در تکرار حاضر را نشان می دهد. معادله  $W$  از نظر ریاضی بازخورد مثبت و منفی بین عرض و رید کپک مخاطی و غلظت مواد غذایی مورد بررسی را شبیه سازی می کند. تابع sort، جواب های موجود در جمعیت را بر اساس بهینه ترین جواب از بالا تا پایین به ترتیب می کند. *condition* نشان دهنده این می باشد که آیا  $F(i)$  در نیمه بالایی جمعیت به ترتیب شده، قرار می گیرد یا خیر.

## ۵-۲- بهبود الگوریتم اصلی کپک مخاطی با استراتژی جهش خود تطبیق موجک

هدف اصلی این استراتژی جبران کاستی ها و بهبود مشخص های همگرایی الگوریتم SMA و فرار از بهینه های محلی است. نام این الگوریتم بهبود یافته SMSMA است. این روش به منظور ایجاد تنوع و گوناگونی در موقعیت های مختلف کاندیدهای جواب، ایجاد تکاپو در عملیات جستجو و جلوگیری از افتادن در بهینه های محلی و ایجاد سکون در جمعیت به کار می رود. این جهش برگرفته از تئوری موجک [۳۶] است که یک ابزار بسیار قوی برای تنظیم مناسب متغیرهای موجود در هر عضو مجموعه جواب الگوریتم SMA است که سبب بالا بردن پتانسیل جستجو و همگرایی سریع تر آن می شود.

در این مقاله، به منظور بهبود عملکرد الگوریتم SMA در رویه های مهم اکتشاف و استخراج، پارامتر  $a$  با یک مکانیسم خود تطبیق بر اساس نظریه موجک جایگزین شده است. پارامتر  $a$  بر اساس مکانیسم خود تطبیق، به طور پویا جهش جمعیت در طول مسیر جستجو را ایجاد می کند. که سبب می شود الگوریتم در جستجوی جواب بهینه سراسری، پویا تر بوده و از بهینه های محلی فرار کند. روابط مکانیسم خود تطبیق الگوریتم SMSMA به صورت زیر است:





$$a = \frac{1}{\sqrt{h}} \exp \frac{-(\frac{\varphi}{h})^2}{2} \cos \left( 5 \left( \frac{\varphi}{h} \right) \right) \quad (61)$$

مقادیر بزرگتر  $a$ ، تغییرات بزرگی در جهش ایجاد می‌کند و فضای جستجوی بزرگی را ایجاد می‌کند. برعکس، مقدار کم  $a$ ، فضای جستجوی کوچکتری را ایجاد می‌کند از آنجاکه ۹۹٪ کل انرژی موجک مورلت در فاصله [۲.۵ تا ۲۰.۵] قرار گرفته است،  $\varphi$  می‌تواند به صورت تصادفی در فاصله [۲.۵ h تا ۲۰.۵ h] انتخاب شود. به منظور خود تطبیق کردن خوب پارامتر  $a$ ، مقدار پارامتر  $(h)$  با توجه به زمان متغیر است. به خصوص، در تکرار اولیه جستجوی الگوریتم، مقدار  $h$  باید کوچک باشد و  $a$  باید مقدار زیادی داشته باشد. علاوه بر این، با افزایش تکرار می‌باید مقدار  $h$  بزرگ‌تر می‌شود و مقدار  $a$  بسیار کوچک شود.  $h$  از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$h = \exp^{-\ln(\eta) \times (1 - iter / iter_{max})^\beta + \ln(\eta)} \quad (62)$$

$\eta$  حد بالای  $h$  و  $\beta$  پارامتر شکل  $h$  است. بر این اساس، در مراحل ابتدایی جستجو، به منظور داشتن مقدار کوچک  $h$ ، مقدار کوچک  $\beta$  باید اعمال شود. از این رو، جستجوی گسترده در تکرارهای اولیه اتفاق می‌افتد، و جستجو در اطراف بهینه سرتاسر در تکرارهای بعدی احاطه می‌شود. مقدار  $\beta$  خیلی زیاد بر عملکرد SMSMA تأثیر می‌گذارد. از این رو، برای رسیدن به تعادل مطلوب بین قابلیت اکتشاف و بهره برداری SMSMA، مقدار  $\beta$  باید به درستی انتخاب شود. بنابراین، در مراحل اولیه فرآیند جستجو، باید مقدار کمی از  $\beta$  برای افزایش اندازه گام جهش به منظور رسیدن به نقطه بهینه استفاده شود و مقدار زیادی از  $\beta$  برای تنظیم سریعتر در پایان جستجو استفاده گردد. بنابراین،  $\beta$  به شرح زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\beta = \beta_{min} + \frac{\beta_{max} - \beta_{min}}{iter_{max}} \times iter \quad (63)$$

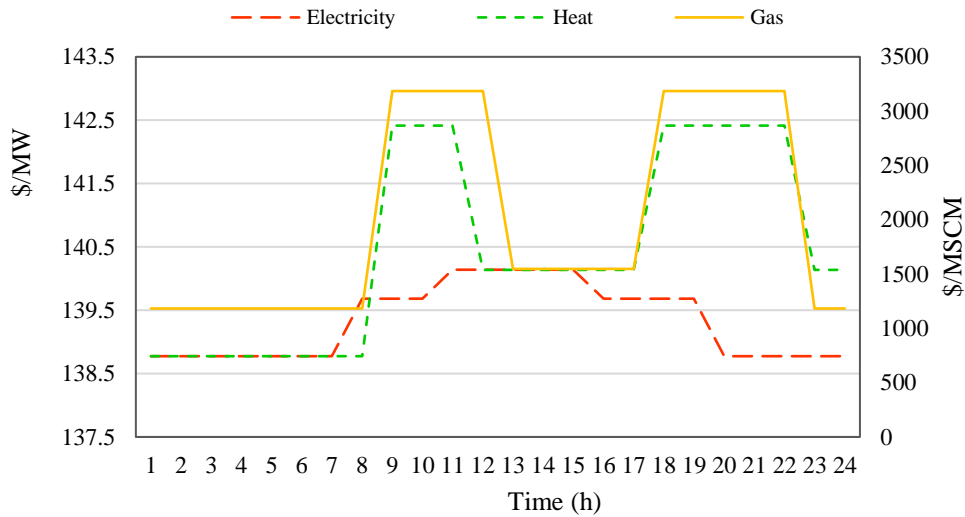
## ۶- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی و نشان دادن کارایی برنامه‌ریزی بهینه پیشنهادی یک سپهر انرژی، روش پیشنهادی بر روی یک سپهر انرژی چند انرژی یکپارچه بررسی شده است. سیستم سپهر چند حاملی انرژی با دو سناریو آزمایش شده است. در سناریوی اول، که حالت اساسی و قطعی است، عملکرد سپهر انرژی بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های سیستم سپهر تجزیه و تحلیل می‌شود. در سناریوی بعدی، اثرات عدم قطعیت منابع تجدید پذیر و همچنین انواع مختلف عدم قطعیت بار همراه با عدم قطعیت قیمت هر حامل انرژی بررسی می‌شود. واحد نیروگاه بادی توربینی با ۳۵ کیلووات و نیروگاه خورشیدی یک واحد ۲۵ کیلوواتی است. توابع توزیع مورد استفاده در این مطالعه برای عدم قطعیت بارهای الکتریکی و حرارتی، برودتی [۳۷]، خطاهای پیش‌بینی قیمت مبادله انرژی با شبکه‌های بالادستی [۳۷]، توان خروجی واحد باد [۳۷]، عدم قطعیت‌های توان خروجی فتوولتائیک [۳۸] همگی با تابع نرمال مدل شده‌اند. خطای انحراف استاندارد متغیرهای دارای عدم قطعیت ۱۰٪ فرض می‌شود. تعداد جمعیت و حداکثر تعداد تکرار در SMSMA به ترتیب ۵۰ و ۲۰۰ نفر است. شکل (۲) نشان‌دهنده قیمت‌های مبادله انرژی با شبکه‌های بالادست حرارت، گاز و الکتریکی می‌باشد. تنها ۲۵ درصد از انرژی‌های الکتریکی، حرارتی و برودتی مورد نیاز خروجی سپهر انرژی، قابلیت پاسخگویی دارند. جدول (۱) مشخصات فنی تجهیزات داخلی سپهر انرژی را نشان می‌دهد. ساختار سپهر انرژی مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده است. چارچوب پیشنهادی توسط نرم‌افزار MATLAB بر روی یک رایانه شخصی Core i7، 2.7 گیگاهرتز با ۴ گیگابایت رم حل شده است.

جدول (۱): مشخصات فنی تجهیزات داخلی سپهر انرژی

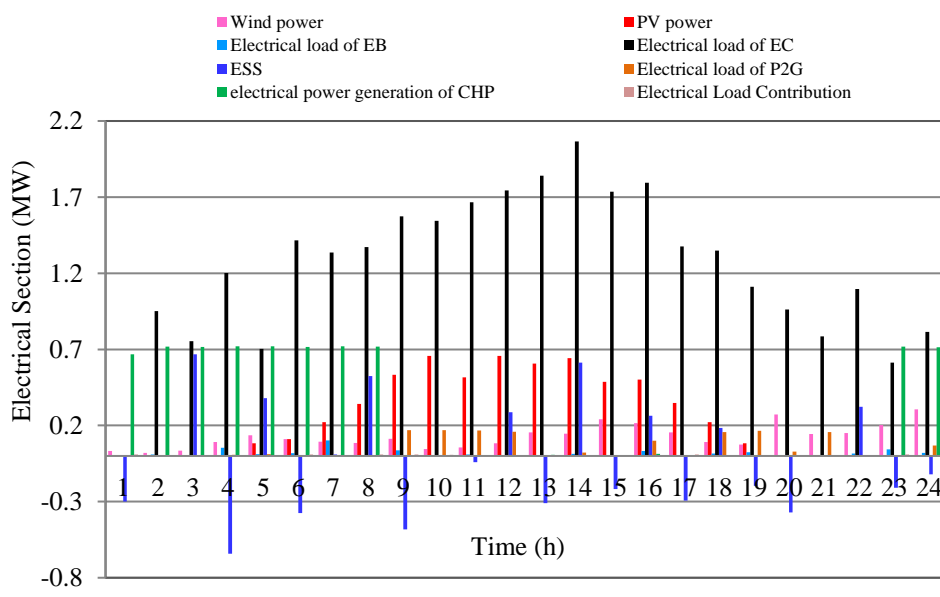
CHP (KW)	Gas-boiler (KW)	P2G (MSCM)	EB (KW)	AC (KW)
1500	800	0.01	500	1500
EC (KW)	ESS (KW)	TSS (KW)	GSS (MSCM)	CSS (KW)
1500	1000	1000	0.01	300



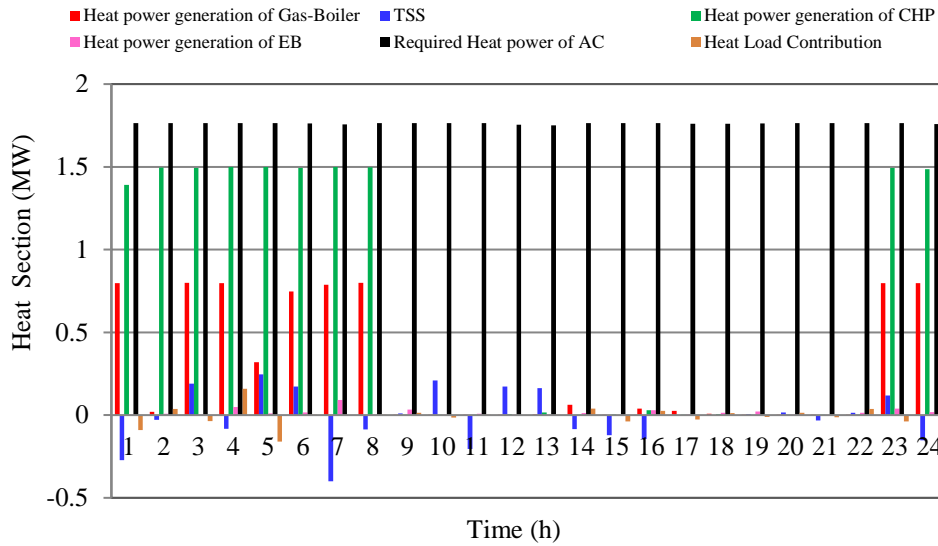


شکل (۲): قیمت‌های مبادله انرژی با شبکه‌های بالادست حرارت، گاز و الکتریکی

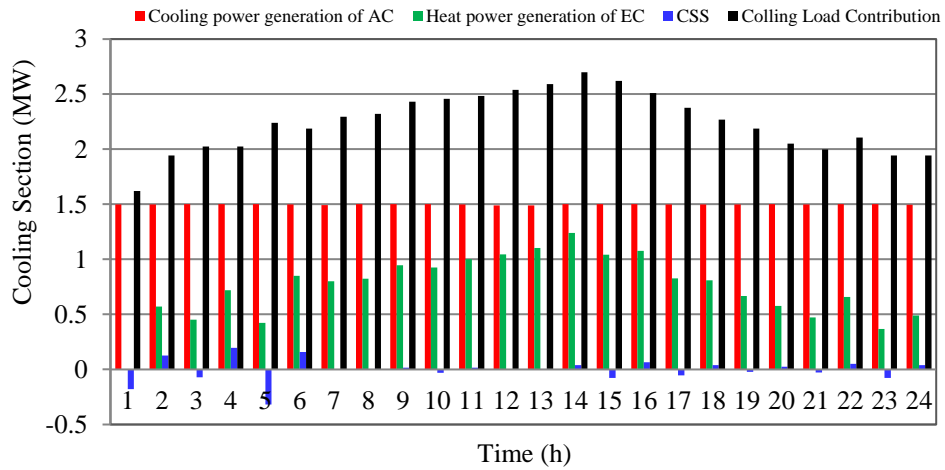
نتایج برنامه‌ریزی روزانه تجهیزات داخلی سپهر انرژی و مدیریت آن در شکل‌های (۳) نشان داده شده است. از این شکل مشهود است که CHPها و بویلرهای سپهر انرژی، زمانی که فقط قیمت گاز پایین باشد برق تولید می‌کنند. علاوه بر این، بویلر برقی در سیستم برای تولید انرژی حرارتی مقرون به صرفه نیست. برای تولید توان سرمایشی، واحد AC یک تجهیز اقتصادی است و این دستگاه اغلب با حداکثر ظرفیت در برنامه‌ریزی سپهر انرژی در ساعات مختلف کار می‌کند. همچنین برای تأمین توان سرمایشی باقیمانده، از EC استفاده می‌شود. واحدهای ذخیره انرژی در برنامه‌ریزی سپهر انرژی به‌طور مکرر شارژ یا تخلیه می‌شوند تا کل هزینه عملیات روزانه سپهر انرژی کاهش یابد. به‌طور کلی، بهره‌بردار سپهر انرژی تمایل دارد از تجهیزات داخلی خود سپهر، انرژی تولید کند تا خرید انرژی باقیمت‌های بالا از طریق شبکه‌های بالادستی باشد. بهره‌بردار سپهر انرژی، انرژی‌های مورد نیاز خود را در ساعاتی خریداری می‌کند که قیمت‌های خرید انرژی در قیمت‌های پایین‌تر است. این واقعیت را می‌توان در منحنی‌های توان مازاد و کمبود سپهر و استراتژی‌های شارژ/دشارژ ذخیره‌سازی آن مشاهده کرد.



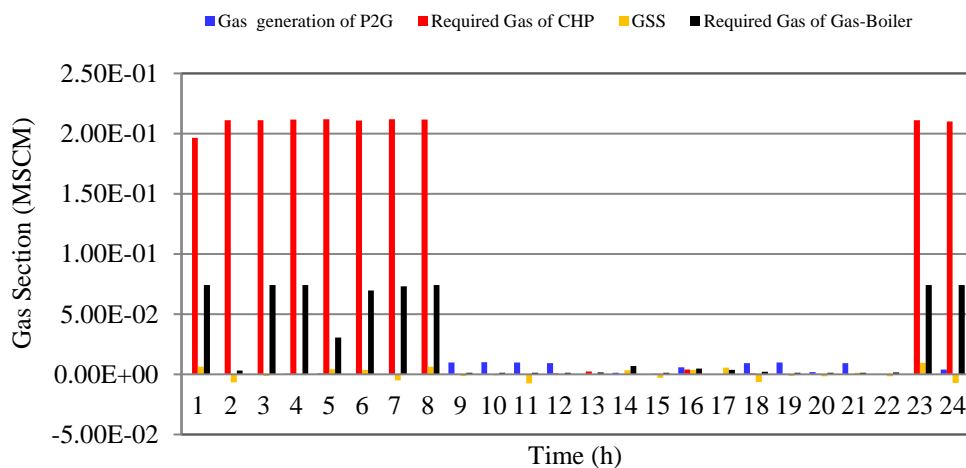
الف



ب.



ج.

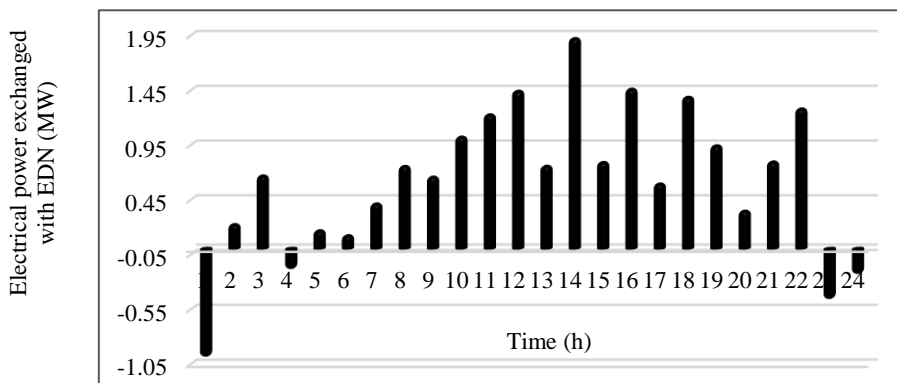


د.

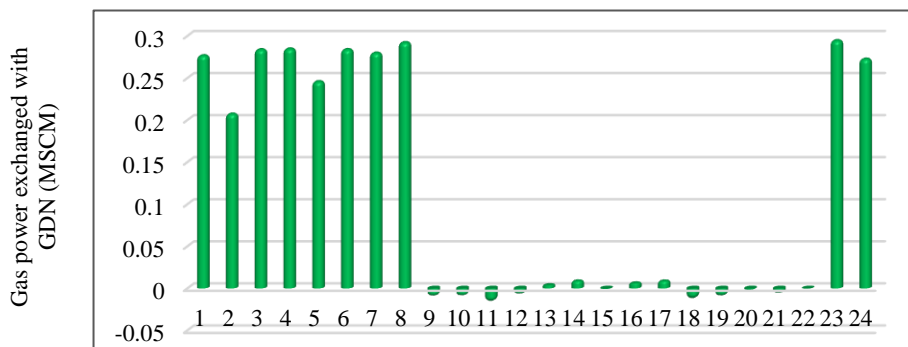
شکل (۳): بهره‌برداری بهینه از تجهیزات داخلی سپهر انرژی، الف) بخش الکتریکی، ب) بخش حرارتی، ج) بخش برودتی، د) بخش گازی



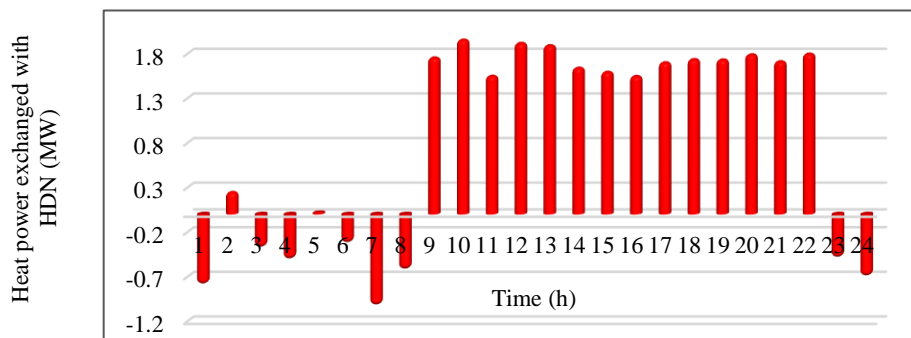
شکل (۴) مبادله توان‌های الکتریکی، گازی و حرارتی را با شبکه‌های بالادستی نشان می‌دهد. زمانی که تقاضای برق بین ۱۰ صبح تا ۱۰ شب زیاد باشد و قیمت گاز نیز بالا هست، بهره‌بردار سپهر انرژی، تقاضای خود را با خرید انرژی الکتریکی از شبکه بالادست تأمین می‌کند. علاوه بر این، از این شکل مشهود است که وقتی قیمت گاز پایین است، بهره‌بردار سپهر انرژی تمایل به خرید انرژی گاز دارد و زمانی که بالا باشد، گاز مازاد خود را به شبکه گاز می‌فروشد. هنگامی که قیمت گاز بالا است، بهره‌بردار سپهر انرژی تمایل به خرید انرژی حرارتی برای تأمین تقاضای خود دارد. همچنین در ساعات دیگر، بهره‌بردار سپهر انرژی می‌تواند انرژی حرارتی مازاد خود را به شبکه حرارت بالادستی بفروشد.



الف



ب



ج

شکل (۴): مبادله توان سپهر انرژی با شبکه‌های بالادستی. الف) توان الکتریکی (ب) گاز (ج) توان حرارتی.



نتایج هزینه بهره‌برداری بهینه سپهر انرژی به‌دست آمده توسط الگوریتم خود تطبیق بهبودیافته کپک مخاطی و روش تخمین نقطه‌ای  $2m+1$  در جدول (۲) نشان داده شده است. در این جدول قابل توجه است که وقتی عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته می‌شود، هزینه بهره‌بردهای سپهر انرژی افزایش دارد. علی رقم افزایش هزینه بهره‌برداری در روش تخمین نقطه‌ای  $2m+1$  این روش مؤثرتر است، زیرا دید واقعی تری از سیستم را برای بهره‌بردار پیشه رو می‌آورد.

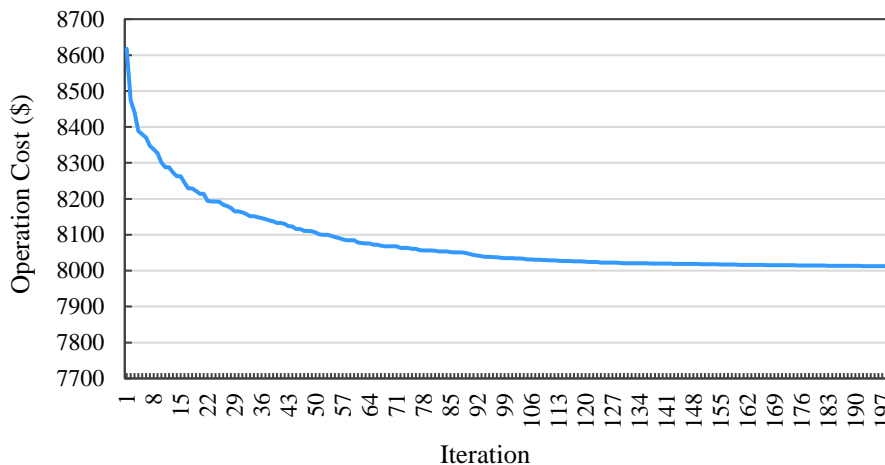
جدول (۲): مقایسه روش‌های برنامه‌ریزی مدیریت سپهر انرژی

روش برنامه‌ریزی سپهر انرژی	هزینه بهره‌برداری (\$)
برنامه‌ریزی قطعی	۷۹۶۳.۴۱
روش تخمین نقطه‌ای $2m+1$	۸۰۱۲.۶۴

نتایج مقایسه‌ای بین الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف در جدول (۳) از نظر شاخص‌های مقایسه‌ای مهم آماری مانند انحراف معیار، میانگین، بدترین و بهترین راه‌حل‌ها ارائه شده است. قابل توجه است که بهترین نتیجه برای هر شاخص در این جدول به صورت پررنگ تایپ شده است. شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که الگوریتم SMSMA از سایر الگوریتم‌های شناخته شده در همه شاخص‌ها بهتر است. انحراف معیار پایین الگوریتم SMSMA نسبت به سایر الگوریتم‌ها برتری جهش خود-تطبیق مبتنی بر موجک پیشنهادی را برای الگوریتم اصلی SMA نشان می‌دهد. با توجه به انحراف معیار استاندارد SMSMA در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر، کیفیت و استحکام روش جهش اصلاح شده برای الگوریتم اصلی SMA را آشکار می‌نماید. این مقایسه‌ها توانایی SMSMA را در حل مسئله برنامه‌ریزی بهینه روزانه سپهر انرژی نشان می‌دهد. به منظور نمایش سرعت همگرایی الگوریتم پیشنهادی SMSMA، منحنی همگرایی این الگوریتم در شکل (۵) نمایش داده شده است.

جدول (۳): مقایسه نتایج آماری الگوریتم پیشنهادی MMSMA و الگوریتم‌های دیگر جهت حل مسئله مدیریت روزانه بهینه سپهر انرژی

الگوریتم بهینه‌سازی	هزینه بهره‌برداری (\$)			انحراف معیار
	بهترین	میانگین	بدترین	
GA	۸۰۴۷.۷۳	۸۰۵۳.۲۴	۸۰۶۱.۲۶	۳.۵۳۷
PSO	۸۰۴۰.۸۵	۸۰۴۶.۴۹	۸۰۵۲.۹۲	۲.۸۴۱
SMA	۸۰۲۷.۶۲	۸۰۳۵.۱۷	۸۰۴۴.۳۷	۱.۲۷۴
<b>SMSMA</b>	<b>۸۰۱۲.۶۴</b>	<b>۸۰۱۸.۱۴</b>	<b>۸۰۲۵.۷۴</b>	<b>۰.۳۴۱</b>



شکل (۵): منحنی همگرایی الگوریتم SMSMA

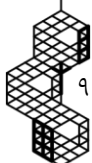




این مقاله به یک چالش مهم در زمینه عملکرد بهینه سپهرهای یکپارچه انرژی ادغام‌شده با انرژی‌های تجدید پذیر پرداخته است. در این راستا، با استفاده از روش تخمین نقطه‌ای  $2m+1$ ، چالش عدم قطعیت انرژی‌های تجدید پذیر و بارهای مختلف انرژی همراه با عدم قطعیت‌های قیمت شبکه‌های بالادستی ارزیابی گشت. در این مقاله همچنین الگوریتم خود تطبیق اصلاح‌شده بهینه‌سازی به نام SMSMA جهت حل مسئله برنامه‌ریزی بهینه یک سپهر انرژی یکپارچه ارائه شده. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سپهر انرژی می‌تواند تقاضای برق مصرف‌کنندگان خود را با استفاده از واحد CHP و مصرف گاز هنگامی که قیمت برق بالا است و مقادیر موجود تولید انرژی‌های تجدید پذیر پایین است، تأمین نماید. همچنین هنگامی که خرید انرژی گرمایی مقرون‌به‌صرفه نبوده و قیمت گاز پایین‌تر باشد، سپهر انرژی می‌تواند با استفاده از واحد بویلر گازی و مصرف گاز، پاسخگوی مصرف‌کنندگان انرژی گرمایی باشد. سیاست بهینه سپهر انرژی در ساعات مختلف روز با توجه به قیمت حامل‌های انرژی و نیازهای مختلف انرژی متفاوت است. با توجه به نتایج مبادلات انرژی با شبکه‌های بالادستی و همچنین نحوه شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها، بهره‌بردار سیستم توانسته در ساعات مختلف که قیمت‌های حامل‌های انرژی پایین بوده، انرژی از شبکه‌های بالادستی خریداری نماید و در زمانی که قیمت حامل‌های انرژی بالا بوده، انرژی به شبکه‌های بالادست در صورت داشتن مازاد انرژی بفروش برساند. علاوه بر این، نتایج عددی نشان داد که عدم قطعیت تقاضای انرژی حرارتی و الکتریکی، منابع انرژی تجدید پذیر و قیمت مبادله انرژی با شبکه‌های بالادستی، باعث افزایش هزینه بهره‌برداری از سپهر یکپارچه انرژی می‌شود. اما این هزینه درک بهتری از پارامترهای نامشخص در آینده را برای بهره‌بردار فراهم می‌کند، که باعث می‌شود جواب‌ها واقع‌بینانه‌تر باشند. نتایج عددی همچنین توانایی و استحکام الگوریتم SMSMA را در به دست آوردن جواب بهینه مسئله برنامه‌ریزی روزانه یک سپهر انرژی یکپارچه در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر نشان داد.

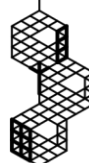
## مراجع

- [1] K. Kampouropoulos, F. Andrade, E. Sala, A. G. Espinosa, and L. Romeral, "Multiobjective optimization of multi-carrier energy system using a combination of ANFIS and genetic algorithms," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2276-2283, 2016.
- [2] X. Zhang, M. Shahidepour, A. Alabdulwahab, and A. Abusorrah, "Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures," *IEEE Transactions on Smart grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2302-2311, 2015.
- [3] N. Liu, L. Tan, H. Sun, Z. Zhou, and B. Guo, "Bilevel Heat-Electricity Energy Sharing for Integrated Energy Systems With Energy Hubs and Prosumers," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 6, pp. 3754-3765, 2021.
- [4] M. Z. Oskouei, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Abapour, M. Shafiee, and A. Anvari-Moghaddam, "Strategic operation of a virtual energy hub with the provision of advanced ancillary services in industrial parks," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 4, pp. 2062-2073, 2021.
- [5] Y.-G. Son, B.-C. Oh, M. A. Acquah, R. Fan, D.-M. Kim, and S.-Y. Kim, "Multi energy system with an associated energy hub: a review," *IEEE Access*, 2021.
- [6] <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=36692>
- [7] B. Zhao, Z. Zhao, M. Huang, X. Zhang, Y. Li, and R. Wang, "Model Predictive Control of Solar PV-Powered Ice-Storage Air-Conditioning System Considering Forecast Uncertainties," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 3, pp. 1672-1683, 2021.
- [8] Y. Xie, S. Lin, W. Liang, Y. Yang, and M. Liu, "An Interval Probabilistic Energy Flow Calculation Method for CCHP Campus Microgrids," *IEEE Systems Journal*, 2022.
- [9] M. Geidl and G. Andersson, "Optimal power flow of multiple energy carriers," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 22, no. 1, pp. 145-155, 2007.
- [10] H. R. Massrur, T. Niknam, J. Aghaei, M. Shafie-Khah, and J. P. Catalao, "Fast decomposed energy flow in large-scale integrated electricity-gas-heat energy systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1565-1577, 2018.
- [11] H. R. Massrur, T. Niknam, M. Fotuhi-Firuzabad, and A. Nikoobakht, "Hourly electricity and heat Demand Response in the OEF of the integrated electricity-heat-natural gas system," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 15, pp. 2853-2863, 2019.





- [12] S. M. Ezzati, F. Faghihi, H. M. Shourkaei, S. B. Mozafari, and S. Soleymani, "Optimum operation of multi-energy carriers in the context of an energy hub considering a wind generator based on linear programming," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 10, no. 1, p. 014702, 2018.
- [13] H. R. Massrur, T. Niknam, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Investigation of carrier demand response uncertainty on energy flow of renewable-based integrated electricity-gas-heat systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 11, pp. 5133-5142, 2018.
- [14] A. M. El-Zonkoly, A. Y. Abdelaziz, and A. M. Eladl, "Double-layer firefly algorithm for simultaneous optimal sizing and operation of energy hubs," *Electric Power Components and Systems*, vol. 45, no. 16, pp. 1846-1857, 2017.
- [15] A. Najafi, A. Tavakoli, M. Pourakbari-Kasmaei, and M. Lehtonen, "A risk-based optimal self-scheduling of smart energy hub in the day-ahead and regulation markets," *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, p. 123631, 2021.
- [16] M. C. Bozchalui, C. A. Canizares, and K. Bhattacharya, "Optimal energy management of greenhouses in smart grids," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 6, no. 2, pp. 827-835, 2014.
- [17] N. Neyestani, M. Yazdani-Damavandi, M. Shafie-Khah, G. Chicco, and J. P. Catalão, "Stochastic modeling of multienergy carriers dependencies in smart local networks with distributed energy resources," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1748-1762, 2015.
- [18] S. Moazeni, A. H. Miragha, and B. Defourny, "A risk-averse stochastic dynamic programming approach to energy hub optimal dispatch," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 2169-2178, 2018.
- [19] M. Alipour, K. Zare, and M. Abapour, "MINLP probabilistic scheduling model for demand response programs integrated energy hubs," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 1, pp. 79-88, 2017.
- [20] Y. Wang, N. Zhang, C. Kang, D. S. Kirschen, J. Yang, and Q. Xia, "Standardized matrix modeling of multiple energy systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 257-270, 2017.
- [21] Z. Zhao *et al.*, "Distributed robust model predictive control-based energy management strategy for islanded multi-microgrids considering uncertainty," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, no. 3, pp. 2107-2120, 2022.
- [22] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, H. Zareipour, and M. Moeini-Aghtaieh, "A probabilistic energy management scheme for renewable-based residential energy hubs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2217-2227, 2016.
- [23] M. Jadidbonab, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Marzband, and P. Siano, "Short-term self-scheduling of virtual energy hub plant within thermal energy market," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 68, no. 4, pp. 3124-3136, 2020.
- [24] T. Ha, Y. Xue, K. Lin, Y. Zhang, V. Van Thang, and T. Nguyen, "Optimal Operation of Energy Hub Based Microenergy Network with Integration of Renewables and Energy Storages," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020.
- [25] X. Gao, K. W. Chan, S. Xia, X. Zhang, and G. Wang, "Bidding strategy for coordinated operation of wind power plants and NGG-P2G units in electricity market," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 212-224, 2021.
- [26] L. Liu, W.-d. Li, J. Shen, C. Jin, and K. Wen, "Probabilistic Assessment of beta for Thermal Unit Using Point Estimate Method Adopted to a Low-Order Primary Frequency Response Model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 1931-1941, 2018.
- [27] S. Bahrami and A. Sheikhi, "From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 650-658, 2015.
- [28] T. Savola and I. Keppo, "Off-design simulation and mathematical modeling of small-scale CHP plants at part loads," *Applied thermal engineering*, vol. 25, no. 8-9, pp. 1219-1232, 2005.
- [29] A. Shabanpour-Haghighi and A. R. Seifi, "An integrated steady-state operation assessment of electrical, natural gas, and district heating networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 3636-3647, 2015.
- [30] N. Holjevac, T. Capuder, N. Zhang, I. Kuzle, and C. Kang, "Corrective receding horizon scheduling of flexible distributed multi-energy microgrids," *Applied energy*, vol. 207, pp. 176-194, 2017.
- [31] Y. Tao, J. Qiu, S. Lai, and J. Zhao, "Integrated electricity and hydrogen energy sharing in coupled energy systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 2, pp. 1149-1162, 2020.





- [32] J. Wei, Y. Zhang, J. Wang, X. Cao, and M. A. Khan, "Multi-period planning of multi-energy microgrid with multi-type uncertainties using chance constrained information gap decision method," *Applied Energy*, vol. 260, p. 114188, 2020.
- [33] L. Ju *et al.*, "A two-stage optimal coordinated scheduling strategy for micro energy grid integrating intermittent renewable energy sources considering multi-energy flexible conversion," *Energy*, vol. 196, p. 117078, 2020.
- [34] L. A. Gallego, J. F. Franco, and L. G. Cordero, "A fast-specialized point estimate method for the probabilistic optimal power flow in distribution systems with renewable distributed generation," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 131, p. 107049, 2021.
- [35] S. Li, H. Chen, M. Wang, A. A. Heidari, and S. Mirjalili, "Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization," *Future Generation Computer Systems*, vol. 111, pp. 300-323, 2020.
- [36] M. Gouri and R. S. Balan, "Enhancement of multimedia security using random permutation with wavelet function," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 63, pp. 41-52, 2017.
- [37] S. Clegg and P. Mancarella, "Storing renewables in the gas network: modelling of power-to-gas seasonal storage flexibility in low-carbon power systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 3, pp. 566-575, 2016.
- [38] B. Mihaylov, T. R. Betts, A. Pozza, H. Müllejans, and R. Gottschalg, "Uncertainty estimation of temperature coefficient measurements of PV modules," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 6, no. 6, pp. 1554-1563, 2016.

## زیر نویس ها

- 
- <sup>1</sup> Energy Hub
  - <sup>2</sup> Power to Gas
  - <sup>3</sup> Wavlete
  - <sup>4</sup> Skewss
  - <sup>5</sup> Kurtosis
  - <sup>6</sup> Self-Adaptive Modified Slime Mould Algorithm
  - <sup>7</sup> Fintness

