



Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2026) 5(3):23-38

Home Energy Management with Hiking Optimization Algorithm and Solar-Battery Energy System

Mohammad Hossein Erfani Majd¹, PhD Student, Gholam-Reza Kamyab¹, Assistant Professor, Saeed Balochian², Assistant Professor

¹ Department of Electrical Engineering, Gonabad Branch, Islamic Azad University, Gonabad, Iran

² Department of Electrical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

Abstract:

This paper focuses on the optimal planning of energy demand management in residential homes and presents an innovative approach to reducing electricity costs by integrating solar storage systems and demand response strategies. The Hiking Optimization Algorithm (HOA) is employed for the optimal scheduling of deferrable household appliances under incentive mechanisms such as time-of-use tariffs and real-time pricing. The proposed method has been evaluated and validated through case studies in a smart production and consumption environment. The results demonstrate a 26% reduction in electricity costs under time-of-use tariffs and a 32% reduction under real-time pricing compared to baseline scenarios. Additionally, the findings indicate improved flexibility and energy efficiency through the utilization of renewable energy sources and battery storage systems. This approach is not only economically effective but also contributes to grid stability and the integration of renewable energy, making it a practical solution for widespread applications.

Keywords: Hiking optimization, Solar storage, Demand response, Home energy planning.

Received: 29 November 2024

Revised: 14 February 2025

Accepted: 26 March 2025

Corresponding Author: Dr. Gholam-Reza Kamyab, kamyabgolamreza @iau.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1885851.1173>





فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

مدیریت انرژی خانگی با روش بهینه‌سازی کوهنوردی و سیستم انرژی خورشیدی - باتری

محمد حسین عرفانی مجد^۱، دانشجوی دکتری، غلامرضا کامیاب^۱، استادیار، سعید بلوچیان^۲، استادیار

۱- گروه مهندسی برق، واحد گناباد، دانشگاه آزاد اسلامی، گناباد، ایران

۲- گروه مهندسی برق، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

چکیده: این مقاله به برنامه‌ریزی بهینه مدیریت تقاضای انرژی در منازل مسکونی پرداخته و رویکردی نوآورانه برای کاهش هزینه‌های برق با ادغام سیستم‌های ذخیره‌سازی خورشیدی و استراتژی‌های پاسخ به تقاضا ارائه می‌دهد. الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی^۱ (HOA) برای زمان‌بندی بهینه وسایل خانگی قابل تأخیر تحت مکانیزم‌های تشویقی مانند تعرفه‌های زمان‌بندی‌شده و قیمت‌گذاری لحظه‌ای به کار گرفته شده است. روش پیشنهادی با انجام مطالعات موردی در یک محیط هوشمند تولید و مصرف، ارزیابی و تأیید شده است. این روش توانسته است کاهش ۲۶ درصدی هزینه‌های برق در تعرفه‌های زمان‌بندی‌شده و کاهش ۳۲ درصدی در تعرفه‌های قیمت‌گذاری لحظه‌ای در مقایسه با سناریوهای پایه‌ای حاصل کند. علاوه بر این، نتایج نشان‌دهنده افزایش انعطاف‌پذیری و کارایی انرژی از طریق استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری است. این روش نه تنها از نظر اقتصادی مؤثر است بلکه به پایداری شبکه و بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر کمک می‌کند و به عنوان یک راهکار عملی برای کاربردهای گسترده پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی کوهنوردی، ذخیره‌سازی خورشیدی، پاسخگویی به تقاضا، برنامه‌ریزی انرژی خانگی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۰۶

نویسنده مسئول: دکتر غلامرضا کامیاب، kamyabgolamreza@iau.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1885851.1173>



مدیریت تقاضای انرژی خانگی^۲ به عنوان یکی از چالش‌های اصلی در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های برق مصرفی در منازل، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. با افزایش تقاضای انرژی و همچنین بحران‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش وابستگی به شبکه‌های برق عمومی و حفظ محیط‌زیست، مطرح شده است. در این میان، سیستم‌های ذخیره‌سازی خورشیدی می‌توانند به عنوان ابزاری مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی در منازل مسکونی عمل کنند. علاوه بر این، استراتژی‌های پاسخگویی به تقاضا نیز به عنوان راهکاری برای کنترل و مدیریت بار مصرفی^۳ در زمان‌های پیک مصرف، مطرح شده‌اند.

هدف از این تحقیق، ارائه یک رویکرد بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی انرژی خانگی است که ضمن ادغام سیستم‌های ذخیره‌سازی خورشیدی و استراتژی‌های پاسخگویی به تقاضا^۴، بتواند به کاهش هزینه‌های برق مصرفی در منازل کمک کند. استفاده از روش بهینه‌سازی کوهنوردی به عنوان یک الگوریتم نوین در این تحقیق، به دنبال ارائه راه‌حلی برای زمان‌بندی بهینه مصرف انرژی در ساعت‌های مختلف روز است. انگیزه اصلی از این مطالعه، کمک به کاهش وابستگی به شبکه برق و استفاده بهینه از منابع تجدیدپذیر با هدف کاهش هزینه‌ها و حفظ پایداری محیط‌زیست است.

با توجه به افزایش روزافزون مصرف انرژی در منازل و تأثیرات منفی ناشی از مصرف بی‌رویه انرژی بر محیط‌زیست، بهینه‌سازی مصرف انرژی به یک اولویت جهانی تبدیل شده است. از سوی دیگر، هزینه‌های بالای انرژی و عدم پایداری شبکه‌های برق در بسیاری از کشورها، ضرورت استفاده از راهکارهای نوین برای بهینه‌سازی مصرف انرژی را دوچندان کرده است. از این رو، بهینه‌سازی مصرف انرژی خانگی با استفاده از منابع تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند به کاهش هزینه‌های مصرف‌کنندگان کمک کرده و همچنین به پایداری شبکه برق و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی منجر شود.

با وجود تحقیقات گسترده در زمینه مدیریت تقاضای انرژی و استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی خورشیدی، بیشتر مطالعات موجود به تحلیل تئوریک سیستم‌ها یا استفاده از الگوریتم‌های پیچیده‌تر محدود شده‌اند و به‌طور خاص، کمتر تحقیقی به ادغام روش‌های بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های نوین مانند روش کوهنوردی پرداخته است. همچنین، در بسیاری از تحقیقات قبلی، توجه کمتری به مقایسه و بررسی استراتژی‌های پاسخگویی به تقاضا در شرایط مختلف تعرفه‌های برق و فناوری‌های باتری مختلف شده است. این مطالعه با پر کردن این شکاف‌ها، به بررسی کاربرد الگوریتم کوهنوردی در بهینه‌سازی مصرف انرژی خانگی پرداخته و ضمن ارزیابی استراتژی‌های مختلف، راهکارهای عملی برای کاهش هزینه‌های انرژی و بهبود عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی خورشیدی ارائه می‌دهد.

مرجع [۱] روشی برای ارزیابی بهینه سیستم‌های باتری-خورشیدی در خانه‌های هوشمند با در نظر گرفتن قطعی‌های احتمالی شبکه ارائه کرده است. در مرجع [۲] استراتژی‌ای برای مدیریت مصرف انرژی خانگی و استفاده از انعطاف‌پذیری^۵ وسایل قابل تنظیم دما پیشنهاد شده است. در مرجع [۳] یک سیستم مدیریت انرژی هوشمند خانگی برای تنظیم مصرف برق از طریق برنامه‌ریزی خطی و نظارت بر دمای داخلی خانه معرفی شده است. در مرجع [۴] رویکردی برای مدیریت انرژی خانگی با ایجاد یک هاب انرژی کوچک به منظور افزایش دقت در مدیریت انرژی پیشنهاد شده است. مرجع [۵] استفاده از سیستم مدیریت انرژی خانگی مبتنی بر اینترنت اشیا و پاسخگویی تقاضا برای بخش مسکونی را به صورت انگیزشی بررسی کرده است. در مرجع [۶] مدلی ریاضی و کارآمد برای سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی ارائه شده است که برای مدیریت مصرف و کاهش هزینه‌های انرژی در خانه‌های هوشمند استفاده می‌شود. مرجع [۷] مروری جامع بر سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی با ادغام تکنیک‌های یادگیری تقویتی برای بهره‌گیری از ذخیره‌سازی انرژی دارد. مرجع [۸] بهینه‌سازی متقابل پیش‌بینی با آگاهی از ناهمگنی سیستم و استفاده از یادگیری غیرمتمرکز برای بهبود بهره‌وری انرژی و راحتی محیط خانه پرداخته است. در مرجع [۹] تحلیل سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی هوشمند انجام شده تا روندهای کنونی و چالش‌های آینده شناسایی شوند. پاسخ‌های تقاضا می‌تواند مصرف‌کنندگان را تشویق به تغییر الگوهای مصرف کند و با کاهش بار شبکه از قطعی‌ها جلوگیری نماید [۱۰]. در سیستم‌های کوچک‌تر مانند ریزشبکه‌ها^۶ یا کاربردهای خانگی، ترکیب منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها به عنوان ابزاری برای افزایش پایداری شبکه شناخته شده است [۱۱]. این سیستم‌های ذخیره‌سازی همراه با انرژی‌های تجدیدپذیر مانند پنل‌های خورشیدی به عنوان پشتیبان و ابزار مدیریت تقاضا در نظر گرفته می‌شوند. این رویکرد نه تنها





پشتیبان مناسبی برای تولید برق اضطراری فراهم می‌کند، بلکه به مدیریت بهینه انرژی خورشیدی، کاهش اوج بار و کاهش فشار روی شبکه اصلی کمک می‌کند [۱۲]. تضمین پایداری سیستم‌های مصرفی در برابر مشکلات شبکه برای حفظ یکپارچگی کل سیستم ضروری است. طراحی بهینه سیستم‌های هیبریدی خورشیدی-باتری با برنامه‌های پاسخگویی تقاضا برای دستیابی به پایداری در پایین‌ترین هزینه ممکن اهمیت دارد. اگرچه این موضوع برای شبکه‌های توزیع به طور گسترده‌ای بررسی شده است (مثلاً در مرجع [۱۳])، توجه کمتری به سیستم‌های سطح ساختمان، از جمله بیمارستان‌ها و خانه‌ها شده است. در مرجع [۱۴] یک رویکرد ساده برای تعیین ظرفیت واحد ذخیره‌سازی در سیستم خورشیدی-باتری معرفی شده که به منظور اطمینان از عملکرد در هنگام قطعی شبکه طراحی شده است. این تحقیق فقط به تعیین ظرفیت بهینه سیستم ذخیره‌سازی باتری پرداخته است و فرض شده که پیکربندی آرایه خورشیدی از پیش تعیین شده است. در این تحقیق، داده‌های واقعی از سه موقعیت جغرافیایی مختلف در ایالات متحده در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. این رویکرد فرض می‌کند که تمام خروجی سیستم خورشیدی در واحد ذخیره‌سازی باتری ذخیره می‌شود و ظرفیت ذخیره‌سازی بر اساس ساعات سالانه آفتابی تخمینی، حتی در شرایط کم آفتابی و ظرفیت محدود باتری در زمان رویدادهای شدید محاسبه می‌شود. مرجع [۱۵] به بررسی عملکرد موثر سیستم ذخیره‌سازی باتری در یک ساختمان تجاری پرداخته است که دارای یک آرایه خورشیدی ثابت است و امکان فروش انرژی اضافی به شبکه را دارد. مدل برنامه‌ریزی به دنبال بهبود تاب‌آوری^۷ سیستم و کاهش هزینه‌های عملیاتی با ادغام ارزش در معرض خطر در هدف‌گذاری است. در مرجع [۱۶] ابزار شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی اندازه سیستم ذخیره‌سازی باتری همراه با آرایه خورشیدی در یک بیمارستان توسعه یافته است. این چارچوب شامل معیارهای قابلیت اطمینان به عنوان محدودیت و جریمه بارهای از دست رفته است و بهینه‌سازی بر اساس سطح ریسک مشخص انجام می‌شود. فرآیند بهینه‌سازی با تعیین اندازه آرایه خورشیدی شروع شده و سپس ظرفیت باتری تنظیم شده و هدف‌گذاری بهینه برای یافتن بهترین اندازه ارزیابی می‌شود. مرجع [۱۷] بر طراحی سیستم ذخیره‌سازی باتری-خورشیدی برای یک منطقه دورافتاده در بولیوی تمرکز دارد و دو سناریوی افزایش تقاضای انرژی در خانه‌ها، مدارس و درمانگاه‌ها را با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک برای اندازه‌گیری سیستم، به‌ویژه برای باتری‌های لیتیوم-یون بررسی کرده است. مرجع [۱۸] روشی برای تعیین اندازه بهینه سیستم باتری-خورشیدی به منظور برآورد نیازهای انرژی محلی ارائه کرده است. این رویکرد قطعی اطمینان حاصل می‌کند که ظرفیت خورشیدی با نیازهای اوج بار منطبق است و با شبیه‌سازی تقاضا و تابش خورشیدی از روش مونت کارلو برای ارزیابی ظرفیت ذخیره‌سازی استفاده می‌کند. در مرجع [۱۹] به اندازه‌گیری بهینه سیستم انرژی هیبریدی^۸ برای یک بیمارستان پرداخته شده است که شامل ذخیره‌سازهای لیتیوم-یون، آرایه خورشیدی و یک ژنراتور دیزلی پشتیبان است. از ابزار ReOpt[®] برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم در دوازده سناریوی مختلف استفاده شده است که شرایط خورشیدی و زمان‌های قطعی متغیر را در بر می‌گیرد. مرجع [۲۰] ابزار ReOpt[®] را معرفی کرده که برای ارزیابی تاب‌آوری و عملکرد سیستم‌های هیبریدی انرژی در شرایط مختلف استفاده می‌شود.

نوآوری‌های مقاله به شرح زیر است:

استفاده از الگوریتم کوهنوردی برای مدیریت بهینه انرژی: مقاله از الگوریتم کوهنوردی برای بهینه‌سازی مدیریت انرژی در سیستم‌های خانگی استفاده کرده است. این الگوریتم به‌طور خاص به‌منظور کاهش هزینه‌های برق در خانه‌ها و برنامه‌ریزی بهینه مصرف دستگاه‌های خانگی در شرایط مختلف طراحی شده است.

ادغام سیستم‌های فتوولتائیک و ذخیره‌سازی انرژی: یکی از نوآوری‌های مهم مقاله استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک همراه با ذخیره‌سازی انرژی برای مدیریت مصرف برق در خانه‌ها است. این ترکیب باعث کاهش هزینه‌ها و بهبود بهره‌وری سیستم‌های انرژی در خانه‌ها می‌شود.

تمرکز بر استراتژی‌های پاسخ به تقاضا: مقاله به بررسی استراتژی‌های مختلف پاسخ به تقاضا برای مدیریت بار در خانه‌های هوشمند پرداخته است. این استراتژی‌ها با هدف کاهش هزینه‌های انرژی و بهبود کارایی سیستم‌ها در پاسخ به نوسانات شبکه برق و تغییرات تقاضا در ساعات مختلف طراحی شده‌اند.

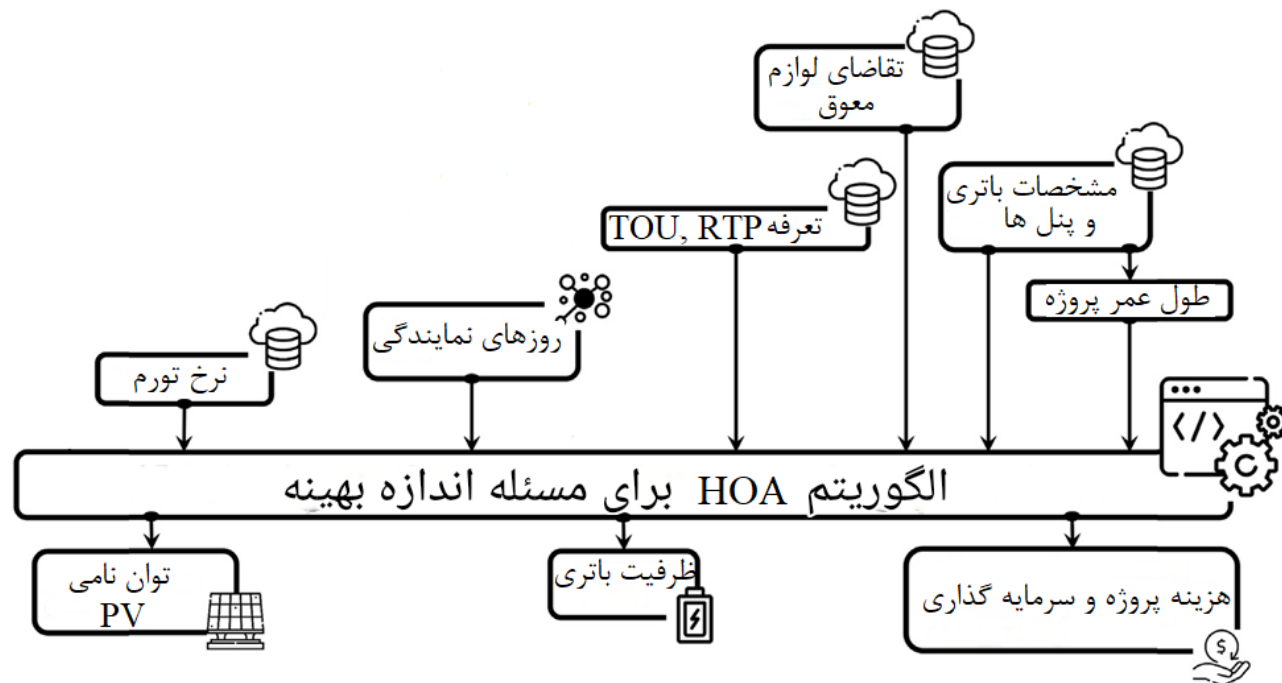
ارزیابی بهبود عملکرد سیستم‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی: این تحقیق نشان می‌دهد که الگوریتم کوهنوردی در بهبود عملکرد سیستم‌های خانگی انرژی از جمله ذخیره‌سازی و تولید انرژی فتوولتائیک موثر است و عملکرد این سیستم‌ها را در شرایط واقعی بهبود می‌بخشد.



بهینه‌سازی برنامه‌ریزی مصرف انرژی خانگی: مقاله روش‌های بهینه‌سازی جدیدی را برای برنامه‌ریزی مصرف انرژی خانگی معرفی کرده است که با استفاده از الگوریتم کوهنوردی و با هدف کاهش هزینه‌ها و مصرف انرژی طراحی شده‌اند. این روش‌ها به‌ویژه در کاهش مصرف برق در ساعات پیک و کاهش هزینه‌های مرتبط با آن مؤثرند.

ارائه مدل جدید برای مدیریت انرژی خانگی: این مقاله یک مدل جدید برای مدیریت انرژی در خانه‌های هوشمند ارائه می‌دهد که بر اساس الگوریتم کوهنوردی و استراتژی‌های پاسخ به تقاضا، به بهینه‌سازی استفاده از انرژی و کاهش هزینه‌ها در محیط‌های خانگی پرداخته است.

شکل (۱) نمایی شماتیک از روش‌شناسی به کار رفته برای طراحی یک سیستم PV-BS کارآمد با بهترین پیکربندی را نشان می‌دهد که از الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی و مشوق‌های پاسخ به تقاضا استفاده می‌کند.



شکل (۱): رویکرد پیشنهادی برای تعیین ابعاد ایده‌آل سیستم PV-BS

۲- مدیریت انرژی خانگی پیشنهادی

هدف تابع هدف کاهش هزینه کلی سیستم BS-PV در طول مدت پروژه است. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های جایگزینی تنها در صورتی است که تجهیزات از عمر مفید خود فراتر روند. علاوه بر این، هزینه‌های روزانه مرتبط با تبادلات انرژی بین سیستم خانگی و شبکه برق هستند. در اینجا x به عنوان بردار متغیرهای تصمیم عمل می‌کند. تابع (۱) شامل مجموعه‌ای از هزینه‌هاست که در بازه‌های زمانی مختلف محاسبه می‌شود. ابتدا هزینه‌های سرمایه‌ای پروژه در ابتدای زمان آن در نظر گرفته می‌شود. سپس، هزینه‌های سالانه مربوط به جایگزینی و نگهداری ثابت در طول مدت پروژه محاسبه می‌گردد. متغیرهای دودویی γ_j تضمین می‌کنند که هزینه‌های جایگزینی فقط در صورت گذشتن تجهیزات از عمر مفیدشان محاسبه شوند. هزینه‌های روزانه به تبادلات انرژی که بین سیستم خانگی و شبکه برق رخ می‌دهد، وابسته است. جدول زیر واژه‌نامه مربوط به مدل‌سازی را نشان می‌دهد [۲۱].

جدول (۱): واژه‌نامه

شاخص‌ها و مجموعه‌ها	
مجموعه‌ای از روزهای معمولی.	Ξ^D
مجموعه‌ای از لوازم خانگی که می‌توان عملکرد آن‌ها را به تأخیر انداخت یا به‌طور انعطاف‌پذیر زمان‌بندی کرد.	Ω^K
مقادیر شاخص سالانه.	j



t	نشانهگر زمانی ساعتی.
k	شاخص مربوط به لوازم خانگی که قابلیت زمان‌بندی یا به تأخیر انداختن دارند.
ثابت‌ها	
T	شاخص مربوط به لوازم خانگی که قابلیت زمان‌بندی یا به تأخیر انداختن دارند.
J	مدت زمان اختصاص داده شده برای ارزیابی پروژه بر حسب سال.
$\Delta\tau$	بازه زمانی هر مقطع ساعتی.
r	درصد افزایش سالانه نرخ تورم
$(Q^{BS})^-$	حداکثر ظرفیت مجاز ذخیره‌سازی سیستم باتری بر حسب کیلووات‌ساعت.
$(P^{PV})^-$	حداکثر ظرفیت مجاز خروجی پنل‌های فتوولتائیک بر حسب کیلووات.
Y	محدودیت‌های مالی بر حسب دلار.
SP_t	انرژی مازاد تولید شده توسط سیستم ذخیره‌سازی فتوولتائیک در زمان t مشخص.
$\lambda_t^*(G,s)$	قیمت انرژی در زمان مشخص t بر حسب دلار بر کیلووات‌ساعت.
λ_t^{*Tar}	نرخ‌های TOU زمان-استفاده (یا) RTP قیمت‌گذاری زمان واقعی در زمان مشخص t بر حسب دلار بر کیلووات‌ساعت.
v^{BS}	هزینه جایگزینی سیستم ذخیره‌سازی باتری بر حسب دلار بر کیلووات‌ساعت.
v^{PV}	هزینه جایگزینی سیستم فتوولتائیک بر حسب دلار بر کیلووات.
μ^{BS}	هزینه‌های عملیاتی و نگهداری سیستم ذخیره‌سازی باتری بر حسب دلار بر کیلووات‌ساعت در سال.
μ^{PV}	هزینه‌های عملیاتی و نگهداری سالانه سیستم فتوولتائیک بر حسب دلار بر کیلووات.
κ^{BS}	هزینه سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای سیستم ذخیره‌سازی باتری بر حسب دلار بر کیلووات‌ساعت.
κ^{PV}	هزینه سرمایه‌گذاری برای سیستم فتوولتائیک بر حسب دلار بر کیلووات.
γ_j^{*PV}	مقدار γ زمانی که لازم است پنل‌های فتوولتائیک در سال j جایگزین شوند.
$\eta^{BS,C}$	راندمان سیستم ذخیره‌سازی باتری در حالت شارژ.
γ_j^{*BS}	مقدار γ زمانی که لازم است سیستم ذخیره‌سازی باتری در سال j جایگزین شود.
$(p^{BS})^-$	ظرفیت خروجی توان سیستم ذخیره‌سازی باتری بر حسب کیلووات.
D^{BS}	سطح دشارژ سیستم باتری.
Q_0^{BS}	سطح اولیه شارژ سیستم ذخیره‌سازی باتری بر حسب کیلووات‌ساعت.
$(p^G)^-$	اوج انتقال توان بین شبکه و خانه بر حسب کیلووات.
p_D^{AND}	بار الکتریکی ناشی از لوازمی که نمی‌توان آن‌ها را به تأخیر انداختن در زمان خاص.
$(p^k)^-$	ظرفیت توان دستگاه قابل انعطاف.
LB^k	حداقل زمان مجاز برای عملیات دستگاه قابل تأخیر k .
UB^k	حداکثر زمان مجاز برای عملیات دستگاه قابل تأخیر k .
δ^k	زمان‌های اختصاص داده شده برای کارکرد دستگاه قابل تأخیر k .
η^{PV}	راندمان پنل‌های فتوولتائیک.
$\eta^{BS,d}$	راندمان سیستم ذخیره‌سازی باتری در زمان دشارژ.
$\eta^{BS,c}$	راندمان سیستم ذخیره‌سازی باتری در زمان شارژ.
θ_t	دما در زمان مشخص.
i_t	میزان تابش خورشید در واحد سطح در زمان مشخص.
متغیرهای تصمیم‌گیری	
Q^{BS}	ظرفیت سیستم ذخیره‌سازی انرژی بر حسب کیلووات‌ساعت.
p_t^{*PV}	توان خروجی تولید شده توسط سیستم فتوولتائیک در زمان مشخص.
$p_t^{*}(BS,d)$	مقدار برق تأمین شده توسط سیستم ذخیره‌سازی باتری به خانه در زمان مشخص.
$p_t^{*}(BS,C)$	انرژی انتقال یافته از خانه به ایستگاه پایه در زمان مشخص.
$p_t^{*}(G,b)$	برق تأمین شده از شبکه به خانه در زمان مشخص.
$p_t^{*}(G,s)$	برق انتقال یافته از خانه به شبکه در زمان مشخص.
s_t	میزان انرژی ذخیره شده در سیستم باتری در زمان مشخص.
$u_t^{*}(G,b)$	مقدار γ زمانی که شبکه برق به خانه برق می‌رساند در زمان مشخص.
$u_t^{*}(G,s)$	مقدار γ زمانی که شبکه برق به خانه برق می‌رساند در زمان مشخص.





$u_t \sim$	نشانگر وضعیت آماده به کار بودن لوازم خانگی به صورت باینری.
$(u_t^k)^-$	مقدار ۱ زمانی که دستگاه قابل تأخیر k در زمان مشخص t روشن می‌شود.
$-(u_t^k)$	مقدار 1 زمانی که دستگاه قابل تأخیر k در زمان مشخص t خاموش می‌شود.

$$\min_x \underbrace{Q_{\kappa}^{BS} + P_K^{PV}}_{\text{Capital costs}} + \underbrace{\sum_{j=1}^J (1+r)^{(j-1)} \{Q^{BS}(\gamma_j^{BS} \nu^{BS} + \mu^{BS}) + P^{PV}(\gamma_j^{PV} \nu^{PV} + \mu^{PV})\}}_{\text{Yearly costs}} + \underbrace{\sum_{t=1}^T \Delta \tau (\lambda_t^{\text{Tar}} p_t^{G,b} - \lambda_t^{G,s} p_t^{G,s})}_{\text{Daily costs}} \quad (1)$$

تعامل توان بین شبکه برق و سیستم خانگی تحت محدودیت‌های حداکثری تعریف‌شده در معادلات (۲) و (۳) قرار دارد. همچنین، بر اساس معادله (۴)، خرید و فروش انرژی نمی‌توانند به‌طور همزمان صورت گیرند.

$$0 \leq p_t^{G,b} \leq u_t^{G,b} \bar{p}^G; \forall t \in T \quad (2)$$

$$0 \leq p_t^{G,s} \leq u_t^{G,s} \bar{p}^G; \forall t \in T \quad (3)$$

$$u_t^{G,b} + u_t^{G,s} \leq 1; \forall t \in T \quad (4)$$

تولید انرژی توسط آرایه فتوولتائیک^۹ (PV) تحت تأثیر سطح تابش خورشید و دمای محیط قرار دارد و می‌توان این مقدار را با استفاده از معادله (۵) تعیین کرد. در کاربردهای عملی، مقدار φ_t باید در حدود ۱ باشد؛ چرا که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده تولید توان فراتر از ظرفیت طراحی‌شده آرایه PV است. این پژوهش اجازه می‌دهد که مقدار تولید توان تا ۱۰٪ بالاتر از توان نامی نیز افزایش یابد، که این مقدار حداکثر φ_t را به ۱.۱۰ محدود می‌کند. اگرچه تولید توان توسط معادله (۵) کنترل می‌شود، اما اینورتر می‌تواند در صورت نیاز، این تولید را کاهش دهد. بنابراین، رعایت محدودیت مشخص‌شده در قید (۶) ضروری است. در سطح خانگی، توان مؤثر آرایه PV تحت تأثیر عواملی از جمله فضای نصب و محدودیت‌های مالی کاربران قرار دارد. به همین دلیل، ظرفیت سیستم PV محدود شده است تا فرآیند بهینه‌سازی نتایج غیرواقعی را ارائه ندهد، همان‌طور که در معادله (۷) نشان داده شده است.

$$p_t^{PV} = P^{PV} i_t \{0.8 + 0.024(\theta_t + i_t[33.8 - 37.5\eta^{PV}] - 25) \times\} = P^{PV} \varphi_t; \forall t \in T \quad (5)$$

$$0 \leq p_t^{PV} \leq P^{PV} \varphi_t; \forall t \in T \quad (6)$$

$$P^{PV} \leq \bar{P}^{PV} \quad (7)$$

توان خروجی باتری‌ها به مشخصات تجهیزات وابسته است و در معادلات (۸) و (۹) به تفصیل بیان شده است. برای حفظ یکپارچگی عملکرد، معادله (۱۰) مشخص می‌کند که فرآیندهای شارژ و دشارژ نمی‌توانند به‌صورت همزمان رخ دهند. وضعیت شارژ^{۱۰} (SoC) سیستم ذخیره‌سازی باتری در معادله (۱۱) تعریف شده است که شامل محدودیت‌هایی برای حداکثر ظرفیت و عمق دشارژ است و این محدودیت‌ها در معادله (۱۲) مشخص شده‌اند. معادلات (۱۳) و (۱۴) به ترتیب وضعیت اولیه و نهایی شارژ باتری را تعیین می‌کنند. همچنین، ظرفیت سیستم ذخیره‌سازی باتری با محدودیت‌هایی مواجه است که در معادله (۱۵) بیان شده‌اند.

$$0 \leq p_t^{BS,d} \leq u_t^{BS,d} \bar{p}^{BS}; \forall t \in T \quad (8)$$

$$0 \leq p_t^{BS,c} \leq u_t^{BS,c} \bar{p}^{BS}; \forall t \in T \quad (9)$$

$$u_t^{BS,d} + u_t^{BS,c} \leq 1; \forall t \in T \quad (10)$$

$$s_t = s_{t-1} + \Delta \tau \left(\eta^{BS,c} p_t^{BS,c} - \frac{p_{s,t}^{BS,d}}{\eta^{BS,d}} \right); \forall t \in T \setminus t > 1 \quad (11)$$

$$Q^{BS}(1 - D^{BS}) \leq s_t \leq Q^{BS}; \forall t \in T \quad (12)$$

$$s_1 = Q_0^{BS} \quad (13)$$





$$s_T = Q_0^{BS} \quad (14)$$

$$Q^{BS} \leq \overline{Q^{BS}} \quad (15)$$

وسایل قابل تأخیر باید به چندین معیار پایبند باشند. نخست، این وسایل باید به صورت روزانه زمان‌بندی شوند، حتی در مواقعی که قطعی شبکه وجود دارد؛ این شرط در معادله (۱۶) مشخص شده است. علاوه بر این، این وسایل باید بدون وقفه عمل کنند که در معادله (۱۷) بیان شده است. در نهایت، لازم است این وسایل چرخه عملیاتی خود را در بازه‌های زمانی مشخص شده به پایان برسانند، که این موضوع در معادله (۱۸) قید شده است.

$$\sum_{t=1}^{t=T} \overline{u_t^k} = 1; \forall k \in \Omega^K \quad (16)$$

$$\overline{u_t^k} - u_t^k = u_t^k - u_{t-1}^k; \forall t \in T \setminus t > 1, \forall k \in \Omega^K \quad (17)$$

$$\sum_{t=LB^k}^{t=UB^k} u_t^k = \delta^k; \forall k \in \Omega^K \quad (18)$$

ابزارهای تصمیم‌گیری در خانه‌های هوشمند به شکل قابل توجهی تحت تأثیر محدودیت‌های مالی هستند که کاربران حاضر به پذیرش آن‌ها هستند. برای اعمال این محدودیت در مسئله خود، محدودیت (۱۹) را معرفی می‌کنیم. این فرمول تضمین می‌کند که کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه پروژه در چارچوب بودجه مشخصی که با Y نمایش داده می‌شود، باقی بماند.

$$Q^{BS} \kappa^{BS} + P^{PV} \kappa^{PV} \leq Y \quad (19)$$

چارچوب پیشنهادی اطمینان می‌دهد که نیازهای انرژی خانه‌ها حتی در صورت قطع موقت برق به طور کامل تأمین می‌شود. فرض بر این است که سیستم مدیریت انرژی خانگی قادر است زمان‌بندی دستگاه‌های قابل تأخیر را به خوبی مدیریت کرده و عملکرد سیستم ذخیره‌سازی باتری فوتوولتائیک را به گونه‌ای هماهنگ کند که نیازهای انرژی را برآورده سازد. بنابراین، رعایت محدودیت (۲۰) به صورت مداوم ضروری است.

$$p_t^{G,b} + p_t^{PV} + p_t^{BS,d} = p_t^{G,s} + p_t^{BS,c} + p_t^{ND} + \sum_{k \in \Omega^K} u_t^k \overline{p^k}; \forall t \in T \quad (20)$$

۳- الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی

این بخش اصول پایه و چارچوب ریاضی الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی (HOA) را پوشش می‌دهد. همچنین، مروری بر نحوه عملکرد الگوریتم HOA ارائه شده و کارایی محاسباتی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. مفهوم الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی (HOA) از چالش‌هایی الهام گرفته شده است که افراد در تلاش برای رسیدن به قله‌های کوه‌ها، تپه‌ها یا صخره‌ها با آن‌ها مواجه هستند، بسته به شرایط موجود. در هنگام پیاده‌روی، افراد معمولاً شیب زمین را به طور عمدی یا غریزی در نظر می‌گیرند. برای حفظ سرعت ثابت، آن‌ها تمایل دارند از مناطق بسیار شیب‌دار پرهیز کنند. شیب‌های تند و مسیرهای دشوار حرکت را کند می‌کنند و مدت زمان کل پیاده‌روی را افزایش می‌دهند. کوهنوردانی که با توپوگرافی منطقه آشنا هستند، می‌توانند مدت زمانی که برای رسیدن به قله نیاز است را تخمین بزنند. این مفهوم مشابه فرآیند بهینه‌سازی است، جایی که عامل‌ها سعی می‌کنند راه‌حل‌های بهینه محلی یا جهانی را پیدا کنند. فضای جستجوی بهینه‌سازی یا چشم‌انداز آن می‌تواند با زمین‌های ناهموار که کوهنوردان در مسیر خود به سوی قله با آن‌ها مواجه هستند مقایسه شود. علاوه بر این، هنگامی که برای یافتن بهترین راه‌حل جستجو می‌کنند، عامل‌ها ممکن است به دلیل پیچیدگی مسئله در نواحی خاصی از فضای جستجو گیر کنند. این امر می‌تواند منجر به تأخیر در رسیدن به بهینه‌سازی جهانی شود، درست مانند موانعی که کوهنوردان ممکن است در مسیر خود با آن‌ها روبرو شوند و پیشرفتشان کند شود. این رویکرد مبتنی بر بازسازی چالش‌های پیاده‌روی به عنوان یک روش برای حل مسائل بهینه‌سازی است.





مبنای نظری الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی (HOA) از تابع کوهنوردی توپلر، که توسط والدو توپلر، جغرافی‌دان و نقشه‌نگار آمریکایی-سوئیدی پیشنهاد شده است، گرفته شده است. این تابع یک مدل نمایی است که برای برآورد سرعت حرکت یک کوهنورد با در نظر گرفتن شیب یا گرادیان مسیر یا چشم‌انداز استفاده می‌شود. مرجع [۲۳] فرمول‌بندی ریاضی تابع کوهنوردی توپلر را ارائه می‌دهد:

$$\mathcal{W}_{i,t} = 6e^{-3.5|S_{i,t}+0.05|} \quad (21)$$

در این حالت، $\mathcal{W}_{i,t}$ نمایانگر سرعت کوهنورد i است که به کیلومتر در ساعت (km/h) اندازه‌گیری می‌شود، در طول تکرار یا در زمان t ، در حالی که $S_{i,t}$ شیب مسیر یا زمین را نشان می‌دهد. علاوه بر این، شیب $S_{i,t}$ به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{i,t} = \frac{dh}{dx} = \tan \theta_{i,t} \quad (22)$$

در اینجا، dh و dx به ترتیب تغییرات ارتفاع و مسافت طی شده توسط کوهنورد را نشان می‌دهند. علاوه بر این، $\theta_{i,t}$ نمایانگر زاویه شیب مسیر یا زمین است که در بازه $[0^\circ, 50^\circ]$ محدود شده است. روش HOA از فرآیند تصمیم‌گیری جمعی گروه و همچنین توانایی‌های شناختی فردی هر کوهنورد استفاده می‌کند. سرعت فعلی یک کوهنورد تحت تأثیر عواملی همچون سرعت اولیه که توسط مدل THF تنظیم شده است، موقعیت کوهنورد پیشرو، موقعیت خود کوهنورد و عاملی به نام sweep قرار دارد. بنابراین، سرعت کوهنورد i در هر زمان مشخص به شرح زیر تعیین می‌شود:

$$\mathcal{W}_{i,t} = \mathcal{W}_{i,t-1} + \gamma_{i,t}(\beta_{\text{best}} - \alpha_{i,t}\beta_{i,t}) \quad (23)$$

پارامتر $\gamma_{i,t}$ نمایانگر یک مقدار تصادفی است که از یک توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ انتخاب می‌شود. اصطلاحات $\mathcal{W}_{i,t}$ و $\mathcal{W}_{i,t-1}$ به ترتیب سرعت کوهنورد i در زمان‌های جاری و قبلی را نشان می‌دهند. بهترین موقعیت، β_{best} ، نمایانگر موقعیت کوهنورد پیشرو است، در حالی که $\alpha_{i,t}$ عامل (SF) sweep برای کوهنورد i است که در بازه $[1, 3]$ محدود می‌شود. عامل SF به کوهنورد کمک می‌کند تا به موقعیت پیشرو نزدیک بماند و بتواند مسیر پیشرو را دنبال کرده و با سیگنال‌های ارسال شده توسط او ارتباط برقرار کند. با در نظر گرفتن سرعت کوهنورد i در معادله (۲۱)، موقعیت جدید $\beta_{i,t+1}$ برای کوهنورد i به صورت زیر محاسبه می‌شود:

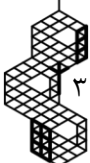
$$\beta_{i,t+1} = \beta_{i,t} + \mathcal{W}_{i,t} \quad (24)$$

ترتیب اولیه‌ای که عوامل به آن ترتیب داده می‌شوند، نقش مهمی در عملکرد بسیاری از الگوریتم‌های متاهوریستیک مانند HOA دارد و بر احتمال یافتن راه‌حل‌های ممکن و سرعت همگرایی تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق، HOA از روش تصادفی برای تعیین موقعیت‌های اولیه عوامل استفاده می‌کند [۲۳]. با این حال، تکنیک‌های دیگری مانند استراتژی‌های ابتکاری یا تنظیم شده نیز برای این کار در دسترس هستند.

موقعیت‌های اولیه کوهنوردان که به صورت $\beta_{i,t}$ نشان داده می‌شود، در محدوده‌های مجاز تعریف شده توسط حد بالای ϕ_j^2 و حد پایین ϕ_j^1 تنظیم می‌شوند، همانطور که در معادله زیر بیان شده است:

$$\beta_{i,t} = \phi_j^1 + \delta_j(\phi_j^2 - \phi_j^1) \quad (25)$$

δ_j مقداری است که به صورت تصادفی از یک توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ انتخاب می‌شود. همچنین، ϕ_j^1 و ϕ_j^2 به ترتیب به حداقل و حداکثر مقادیر متغیر تصمیم‌گیری j در مسئله بهینه‌سازی اشاره دارند. عامل فاکتور جارو (SF) یک پارامتر کلیدی است که تعادل بین جستجو و بهره‌برداری را در HOA تنظیم می‌کند. این عامل تعیین می‌کند که رهبر تا چه اندازه از سایر شرکت‌کنندگان فاصله داشته باشد، همانطور که در معادله (۲۳) نشان داده شده است. علاوه بر این، شیب مسیر بر سرعت کوهنوردان تأثیر می‌گذارد، همانطور که در معادلات (۲۱) و (۲۲) توضیح داده شده است، و تأثیر قابل توجهی بر اعمال جستجو و بهره‌برداری HOA دارد. با افزایش دامنه SF، HOA بیشتر به بهره‌برداری از راه‌حل‌های موجود متمایل می‌شود. از طرف دیگر، کاهش دامنه SF باعث می‌شود HOA بر جستجو تمرکز کند. همچنین، شیب کمتر مسیر باعث می‌شود HOA به سمت بهره‌برداری از راه‌حل‌های شناخته‌شده برود. تمام این عناصر

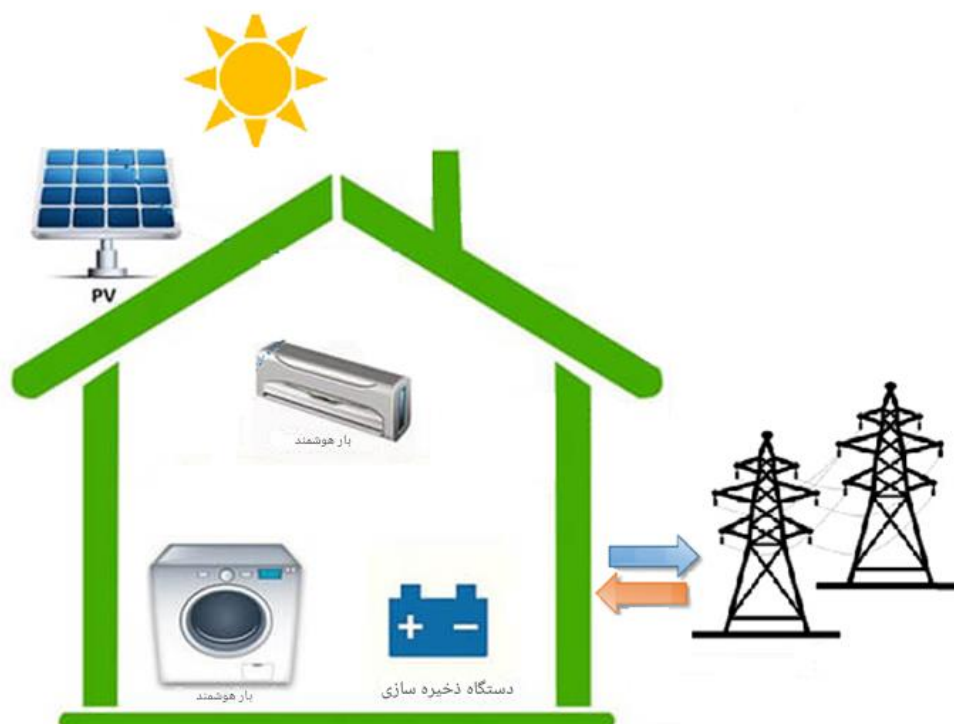




نقش قابل توجهی در تأثیرگذاری بر رفتار و عملکرد HOA در مواجهه با چالش‌های بهینه‌سازی دارند، HOA یک روش جستجوی جهانی است که برای کاوش فضای راه‌حل‌های مسئله بهینه‌سازی طراحی شده است و از نحوه حرکت کوهنوردان در مسیرهای مختلف الهام گرفته شده است. برای شروع پیاده‌روی، نقاط شروع تمام کوهنوردان تعیین می‌شود و با استفاده از تابع پیاده‌روی توپلر، موقعیت‌های جدید آنها پس از مدت زمان مشخص پیش‌بینی می‌شود. عملکرد هر کوهنورد ارزیابی شده و بهترین عملکرد به عنوان رهبر انتخاب می‌شود. در هر تکرار، موقعیت رهبر مجدداً ارزیابی می‌شود تا اطمینان حاصل شود که همیشه بهترین کوهنورد در مقام رهبری قرار دارد. پیچیدگی محاسباتی HOA توسط نماد O بزرگ تعیین می‌شود که محدوده بالایی نیازهای منابع الگوریتم را مشخص می‌کند. به طور خاص، این نماد نرخ رشد بدترین حالت برای مصرف حافظه یا زمان اجرای الگوریتم را توصیف می‌کند. در این زمینه، نماد O بزرگ برای HOA به صورت $O(T * I)$ نمایش داده می‌شود که در آن T نمایانگر حداکثر تعداد تکرارها یا زمان صرف شده در فرآیند پیاده‌روی است و I تعداد کل کوهنوردان مشارکت‌کننده در فرآیند را نشان می‌دهد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

این بخش نحوه‌ی به کارگیری روش‌شناسی توسعه یافته در یک محیط پروسومر را نشان می‌دهد. مطالعه موردی انتخاب شده با مدل مطرح شده در بخش ۲ مطابقت دارد که به طور مؤثر قابلیت‌های روش پیشنهادی را برجسته می‌کند و راهنمایی‌هایی برای اجرای آن در سیستم‌های خانگی و سناریوهای مختلف ارائه می‌دهد. محیط پروسومر مرجع مورد تجزیه و تحلیل در این مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده و به طور ریاضی در بخش ۱ مدل‌سازی شده است. نتایج ارائه شده در اینجا از اجرای مدل پیشنهادی و الگوریتم HOA شرح داده شده در بخش‌های ۲ و ۳ به دست آمده است، مطابق با نمودار جریان نشان داده شده در شکل ۱. مسئله بهینه‌سازی با استفاده از Matlab فرمول‌بندی و حل شده است. داده‌های مربوط به وسایل غیرقابل تعویق از مرجع [۲۲] استخراج شده است که شامل داده‌های واقعی از یک خانه هوشمند طی یک سال می‌باشد. این مجموعه داده‌ها شامل تلفات سیستم کلی است و نیاز به مدل‌سازی جداگانه را برطرف می‌کند. داده‌ها به بازه ۳۰ دقیقه‌ای تنظیم شده‌اند و بار به‌طور میانگین محاسبه شده است. داده‌های تابش خورشیدی و دمای سال ۲۰۱۶ از کمیسیون اروپا، به‌ویژه برای شهر لس‌آنجلس، تأمین شده است.



شکل (۲) محیط پروسومر پیشنهادی



جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی‌ها را در دو سناریو مختلف بررسی می‌کند. در این جدول، ابتدا سناریویی بررسی می‌شود که در آن هیچ‌گونه استفاده از باتری یا منبع خورشیدی وجود ندارد، و سپس نتایج برای سناریوهایی که در آن‌ها از منابع خورشیدی و باتری‌های ذخیره‌سازی استفاده شده‌اند، مقایسه می‌شوند.

در حالت اول، که شامل عدم استفاده از منابع خورشیدی و ذخیره‌سازی باتری است، دو استراتژی برای مدیریت مصرف انرژی در نظر گرفته شده‌اند. یکی از این استراتژی‌ها استراتژی زمان مورد استفاده است که به‌طور معمول برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در بازه‌های زمانی خاص با قیمت‌های مختلف طراحی می‌شود. در این سناریو، هزینه به ۱۹۱۱ دلار می‌رسد. همچنین، استراتژی دیگری که در این بخش بررسی می‌شود، استراتژی قیمت زمان واقعی است که در آن مصرف انرژی با توجه به تغییرات قیمت در هر لحظه از زمان تنظیم می‌شود. هزینه در این حالت به ۲۳۲۵ دلار می‌رسد که نشان می‌دهد هزینه‌ها در این استراتژی بیشتر از حالت اول است.

در دومین حالت، زمانی که از باتری و سیستم‌های خورشیدی استفاده می‌شود، نتایج نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجهی هستند. در این سناریو، برای هر دو استراتژی زمان مورد استفاده و قیمت زمان واقعی، سیستم خورشیدی و باتری‌ها به‌طور موثر در کاهش هزینه‌ها تأثیرگذار بوده‌اند. برای مثال، در حالت استراتژی زمان مورد استفاده، استفاده از باتری لیتیومی با ظرفیت ۱.۵ کیلووات ساعت و سیستم خورشیدی با ظرفیت ۴ کیلووات باعث کاهش هزینه‌ها به ۱۴۳۵ دلار می‌شود. این کاهش هزینه به‌طور چشمگیری نشان‌دهنده اثر مثبت سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی باتری در مدیریت مصرف انرژی است. در مقایسه با حالت بدون باتری و خورشیدی، این کاهش هزینه حدود ۲۶ درصد است.

در سناریوی استراتژی قیمت زمان واقعی، با استفاده از باتری لیتیومی با ظرفیت ۱.۶ کیلووات ساعت و سیستم خورشیدی با ظرفیت ۴.۵ کیلووات، هزینه‌ها به ۱۵۷۶ دلار کاهش می‌یابد. این کاهش نشان‌دهنده این است که در این سناریو، با وجود نوسانات قیمتی در زمان واقعی، سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری و انرژی خورشیدی می‌توانند هزینه‌ها را به‌طور موثر کاهش دهند، هرچند که تفاوت آن با حالت اول کمتر از حالت استراتژی زمان مورد استفاده است. این به دلیل نیاز به تطبیق بیشتر با تغییرات قیمت‌ها و استفاده بهینه از انرژی در زمان‌هایی است که قیمت‌ها بالا هستند.

بررسی این جدول نشان می‌دهد که استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی باتری نه تنها در کاهش هزینه‌های مصرف انرژی تأثیرگذار است، بلکه به‌طور خاص در استراتژی‌های مختلف مدیریت مصرف انرژی، کاهش قابل توجهی در هزینه‌ها ایجاد می‌کند. این کاهش هزینه‌ها، که در مجموع حدود ۲۶ تا ۳۲ درصد برای حالت‌های مختلف مشاهده می‌شود، نشان‌دهنده برتری استفاده از این سیستم‌ها نسبت به روش‌های سنتی مدیریت مصرف انرژی است. در این راستا، استفاده از باتری‌ها و سیستم‌های خورشیدی می‌تواند به عنوان یک راه‌حل پایدار و اقتصادی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در خانه‌های هوشمند و کاربردهای مشابه توصیه شود. این یافته‌ها اهمیت به‌کارگیری تکنولوژی‌های نوین در مدیریت مصرف انرژی را به‌طور واضحی نشان می‌دهند.

جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی با سناریوهای متفاوت

مورد مطالعاتی	استراتژی	تابع هدف (دلار)	ظرفیت منبع خورشیدی (kW)	ظرفیت باتری (kWh)
بدون باتری و منبع خورشیدی	استراتژی زمان مورد استفاده	-	۱۹۱۱	-
	استراتژی قیمت زمان واقعی	-	۲۳۲۵	-
با باتری و منبع خورشیدی	لیتیومی	استراتژی زمان مورد استفاده	۱۴۳۵	۱.۵
	لیتیومی	استراتژی قیمت زمان واقعی	۱۵۷۶	۱.۶

در جدول (۳)، مقایسه‌ای بین نتایج الگوریتم پیشنهادی HOA و سایر الگوریتم‌های شناخته‌شده انجام شده است. این جدول اطلاعاتی در مورد تابع هدف (هزینه‌ها)، ظرفیت منابع خورشیدی و باتری‌ها در استراتژی‌های مختلف ارائه می‌دهد و کمک می‌کند تا کارایی الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های دیگر مقایسه شود.

در اولین ردیف جدول، نتایج الگوریتم پیشنهادی HOA برای دو استراتژی زمان مورد استفاده و قیمت زمان واقعی آورده شده است. در حالت استراتژی زمان مورد استفاده، هزینه به ۱۴۳۵ دلار می‌رسد که نشان‌دهنده کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی در بهینه‌سازی



مصرف انرژی است. همچنین، در استراتژی قیمت زمان واقعی، هزینه به ۱۵۷۶ دلار می‌رسد. این نتایج نشان‌دهنده قابلیت بالای الگوریتم HOA در کاهش هزینه‌ها به‌ویژه زمانی که از منابع خورشیدی و باتری به‌طور همزمان استفاده می‌شود، است. مقایسه با سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد که در حالت استراتژی زمان مورد استفاده، الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، یادگیری و آموزش، جایا و گرگ خاکستری هزینه‌های بالاتری نسبت به الگوریتم HOA دارند. به‌عنوان مثال، الگوریتم ژنتیک هزینه‌ای معادل ۱۸۱۰ دلار در استراتژی زمان مورد استفاده و ۱۹۸۷ دلار در استراتژی قیمت زمان واقعی دارد که به‌طور قابل توجهی بیشتر از الگوریتم HOA است. همچنین، الگوریتم‌های ازدحام ذرات و یادگیری و آموزش نیز به‌ترتیب هزینه‌هایی برابر با ۱۶۸۷ و ۱۶۷۰ دلار در استراتژی زمان مورد استفاده دارند که نشان می‌دهد در مقایسه با HOA، هزینه‌های بالاتری دارند.

در حالت استراتژی قیمت زمان واقعی، الگوریتم‌های ازدحام ذرات، ژنتیک، یادگیری و آموزش، جایا و گرگ خاکستری به‌طور مشابه هزینه‌های بالاتری را نشان می‌دهند. این نتایج به‌ویژه نشان‌دهنده برتری الگوریتم HOA در کاهش هزینه‌ها است، به‌طوری‌که در هر دو استراتژی مورد بررسی، این الگوریتم از نظر هزینه عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد.

در زمینه ظرفیت منابع خورشیدی و باتری‌ها، الگوریتم HOA به‌طور قابل توجهی از سایر الگوریتم‌ها با ظرفیت‌های کوچکتری استفاده می‌کند، در حالی که توانسته است هزینه‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. این نشان‌دهنده توانایی بالای الگوریتم HOA در بهینه‌سازی مصرف انرژی با استفاده از منابع موجود و ظرفیت‌های محدود است. برای مثال، در مقایسه با الگوریتم ژنتیک که ظرفیت‌های بالاتری برای باتری و منابع خورشیدی در نظر گرفته است، الگوریتم HOA توانسته است عملکرد بهتری از نظر کاهش هزینه‌ها ارائه دهد.

در مجموع، این مقایسه نشان می‌دهد که الگوریتم HOA از نظر هزینه و استفاده بهینه از منابع خورشیدی و باتری‌ها برتری قابل توجهی نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد. این مزیت در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها، آن را به گزینه‌ای کارآمدتر در مدیریت انرژی خانه‌های هوشمند و دیگر سیستم‌های مشابه تبدیل می‌کند.

شکل (۳) مقایسه هزینه‌های بهینه‌سازی انرژی با استفاده از الگوریتم‌های مختلف تحت دو استراتژی زمان مورد استفاده و قیمت زمان واقعی را نمایش می‌دهد. این نمودار شامل نتایج هزینه‌های به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف است که در آن‌ها منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باتری‌ها و سیستم‌های خورشیدی به‌طور همزمان استفاده شده‌اند. در این نمودار محور افقی نام الگوریتم‌های مختلف را نشان می‌دهد که در این مطالعه مقایسه شده‌اند. این الگوریتم‌ها شامل الگوریتم پیشنهادی، ژنتیک، ازدحام ذرات، یادگیری و آموزش، جایا و گرگ خاکستری هستند. محور عمودی هزینه‌های به دست آمده از بهینه‌سازی مصرف انرژی را بر حسب دلار نمایش می‌دهد. دو سری داده در این نمودار وجود دارد. سری اول مربوط به استراتژی زمان مورد استفاده است که در آن هزینه‌ها برای هر الگوریتم محاسبه شده‌اند، جایی که مصرف انرژی در بازه‌های زمانی مختلف با قیمت‌های متفاوت بهینه‌سازی می‌شود. سری دوم مربوط به استراتژی قیمت زمان واقعی است که در آن هزینه‌ها در نظر گرفته شده‌اند و مصرف انرژی با توجه به تغییرات لحظه‌ای قیمت‌ها تنظیم می‌شود. نتایج نمودار نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی به طور قابل توجهی هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. در استراتژی زمان مورد استفاده، هزینه آن ۱۴۳۵ دلار و در استراتژی قیمت زمان واقعی، هزینه آن ۱۵۷۶ دلار است. سایر الگوریتم‌ها مانند ژنتیک، ازدحام ذرات، یادگیری و آموزش، جایا و گرگ خاکستری هزینه‌های بالاتری را نسبت به الگوریتم پیشنهادی دارند، به‌ویژه در استراتژی زمان مورد استفاده که هزینه‌ها به طور قابل توجهی بیشتر از الگوریتم پیشنهادی است. در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، الگوریتم پیشنهادی با استفاده از ظرفیت‌های کوچکتر برای منابع خورشیدی و باتری‌ها، توانسته است هزینه‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. این مقایسه نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی نه تنها از نظر هزینه، بلکه از نظر بهینه‌سازی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر نیز برتری دارد و می‌تواند گزینه‌ای کارآمدتر برای مدیریت انرژی در سیستم‌های خانگی و مشابه باشد.

شکل (۴) مقایسه‌ای بین هزینه‌ها و ظرفیت منابع خورشیدی و باتری در سناریوهای مختلف مدیریت مصرف انرژی در یک سیستم پروسومر را نشان می‌دهد. این شکل شامل دو محور اصلی است که به صورت زیر توضیح داده می‌شود. محور عمودی سمت چپ هزینه‌ها را نشان می‌دهد که به دلار نمایش داده می‌شوند و با استراتژی‌های مختلف مدیریت مصرف انرژی در ارتباط هستند. در این شکل، دو استراتژی مختلف برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در نظر گرفته شده‌اند که شامل استراتژی زمان مورد استفاده و استراتژی قیمت زمان واقعی است. در هر یک از این استراتژی‌ها، هزینه‌ها برای سه سناریوی مختلف محاسبه شده‌اند که عبارتند از سناریو بدون باتری و خورشیدی، سناریو با باتری و خورشیدی و سناریو با خورشیدی فقط. در سناریو بدون باتری و خورشیدی، هزینه‌ها به طور





قابل توجهی بیشتر از سناریوهایی است که از سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری و خورشیدی استفاده می‌کنند. در سناریو با باتری و خورشیدی، هزینه‌ها به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابند و این کاهش به دلیل استفاده از منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی باتری است. در سناریو با خورشیدی فقط، هزینه‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند، هرچند که این کاهش کمتر از سناریو با باتری و خورشیدی است. محور عمودی سمت راست ظرفیت منابع خورشیدی و باتری‌ها را نشان می‌دهد که در واحد کیلووات ساعت و کیلووات اندازه‌گیری می‌شود. این مقادیر به تفکیک برای هر سناریو و استراتژی نمایش داده شده‌اند. ظرفیت باتری‌ها به عنوان یک عامل کلیدی در کاهش هزینه‌ها و بهینه‌سازی مصرف انرژی برای هر سناریو نمایش داده شده است. ظرفیت باتری‌ها در سناریوی با باتری و خورشیدی به طور واضح بزرگتر از سناریوهای دیگر است. ظرفیت سیستم خورشیدی نیز در هر سناریو متفاوت است و نشان‌دهنده توان استفاده از انرژی تجدیدپذیر برای تأمین نیازهای انرژی است. برای هر سناریو، ظرفیت باتری و خورشیدی با رنگ‌های مختلف از یکدیگر تفکیک شده‌اند تا تفاوت‌ها به راحتی قابل شناسایی باشند. در این شکل، استفاده از رنگ‌های متنوع برای هر سناریو به وضوح تفاوت‌ها را نشان می‌دهد و به وضوح بیان می‌کند که چگونه استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌سازی می‌تواند در کاهش هزینه‌ها تأثیرگذار باشد.

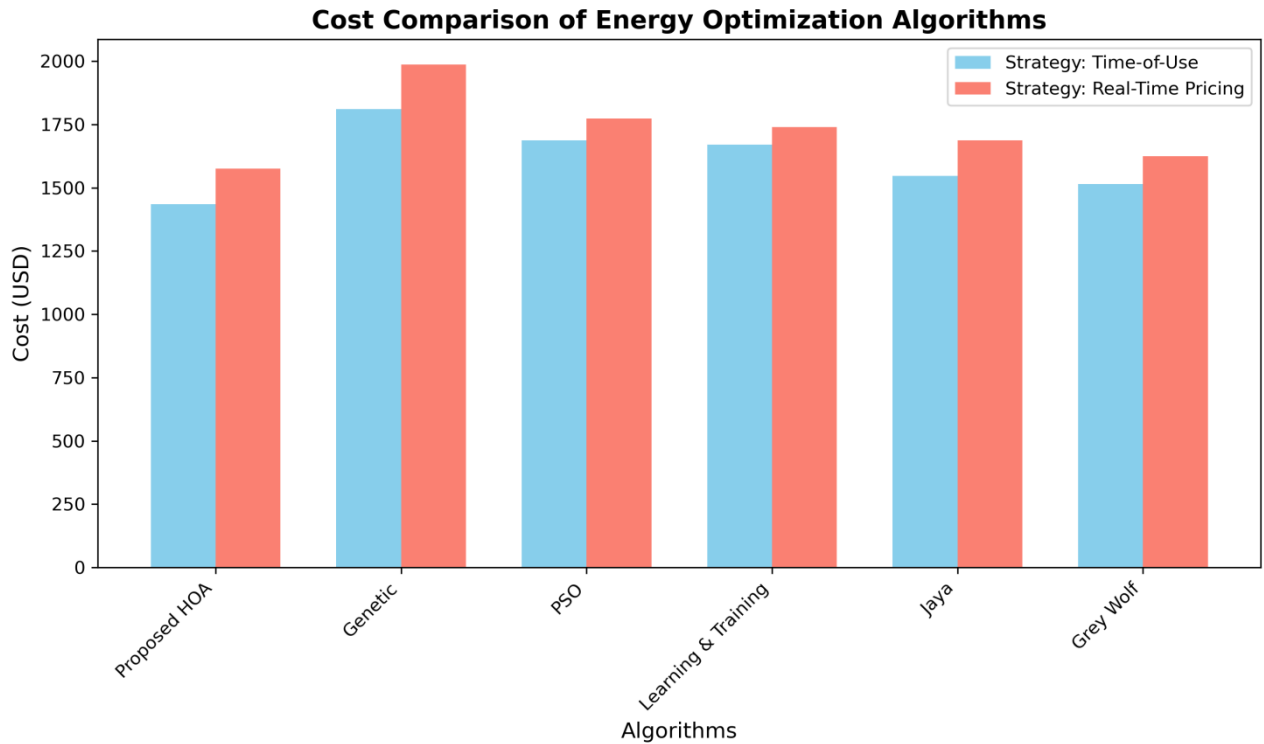
نتایج نشان می‌دهند که استفاده از سیستم‌های خورشیدی و باتری به طور مؤثری هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. در سناریوی با باتری و خورشیدی، هزینه‌ها به طور چشمگیری کاهش می‌یابند و در مقایسه با سناریو بدون باتری و خورشیدی، این کاهش هزینه‌ها قابل توجه است. در سناریوی با خورشیدی فقط، هزینه‌ها کاهش می‌یابند، اما این کاهش هزینه به اندازه سناریوی با باتری و خورشیدی نیست. این امر به وضوح نشان‌دهنده تأثیر مثبت سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی باتری در مدیریت مصرف انرژی است. همچنین، در این شکل مشخص است که استفاده از سیستم‌های خورشیدی و باتری نه تنها در کاهش هزینه‌ها تأثیرگذار است، بلکه همچنین به بهینه‌سازی مصرف انرژی کمک می‌کند.

این شکل به وضوح نشان می‌دهد که ترکیب سیستم‌های خورشیدی و باتری به کاهش هزینه‌ها و بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های خانگی و پروسومرها کمک می‌کند. در این شکل، تفاوت‌های هزینه‌ای بین استراتژی‌ها و سناریوهای مختلف با استفاده از سیستم‌های خورشیدی و باتری به وضوح نمایش داده شده است. استفاده از تکنولوژی‌های نوین مانند سیستم‌های خورشیدی و ذخیره‌سازی باتری می‌تواند راه‌حلی پایدار و اقتصادی برای مدیریت مصرف انرژی در سیستم‌های خانگی و دیگر کاربردهای مشابه باشد. این یافته‌ها اهمیت استفاده از این سیستم‌ها را در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها به خوبی نشان می‌دهند.

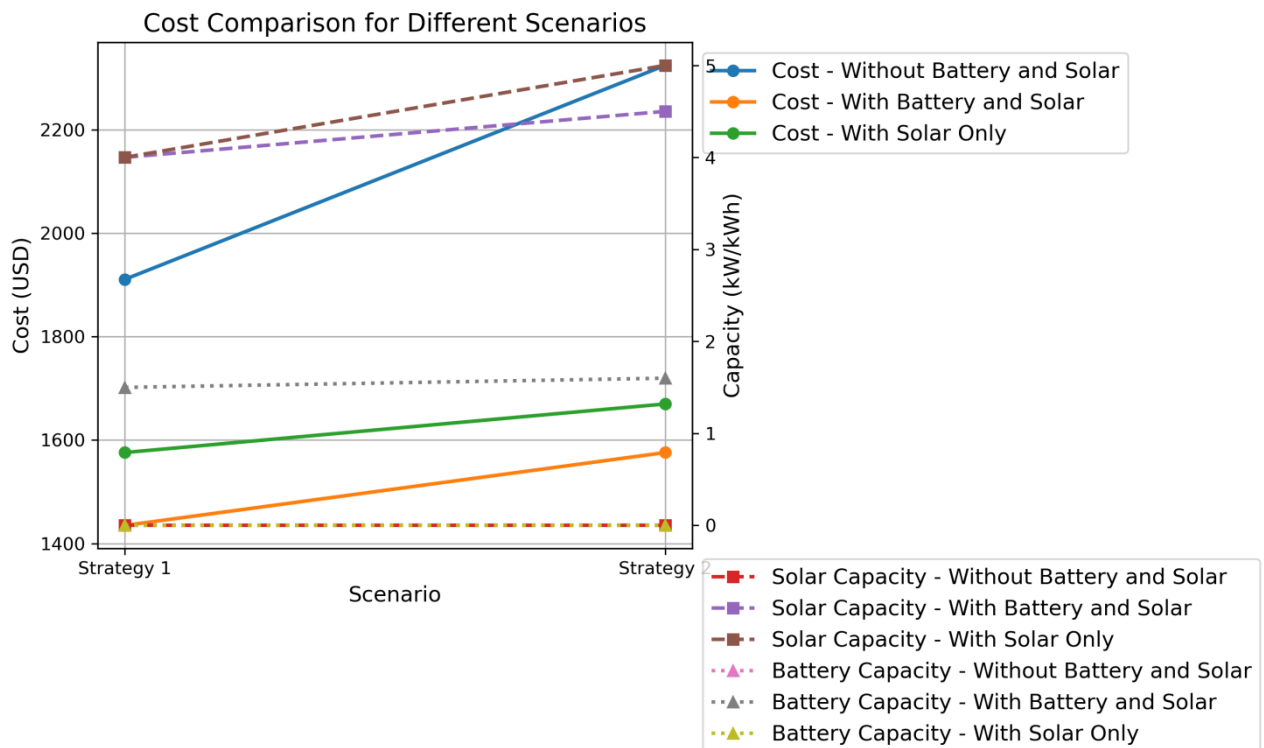
جدول (۳) مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی با سایر مطالعات

الگوریتم	ظرفیت باتری (kWh)	ظرفیت منبع خورشیدی (kW)	تابع هدف (دلار)	استراتژی
پیشنهادی HOA	۴	۱.۵	۱۴۳۵	استراتژی زمان مورد استفاده
	۴.۵	۱.۶	۱۵۷۶	استراتژی قیمت زمان واقعی
ژنتیک	۴	۲	۱۸۱۰	استراتژی زمان مورد استفاده
	۴	۲.۵	۱۹۸۷	استراتژی قیمت زمان واقعی
ازدحام ذرات	۵	۳	۱۶۸۷	استراتژی زمان مورد استفاده
	۵.۵	۳.۵	۱۷۷۴	استراتژی قیمت زمان واقعی
یادگیری و آموزش	۳	۴	۱۶۷۰	استراتژی زمان مورد استفاده
	۵	۵	۱۷۴۰	استراتژی قیمت زمان واقعی
جایا	۳.۵	۲	۱۵۴۷	استراتژی زمان مورد استفاده
	۳.۵	۲.۵	۱۶۸۷	استراتژی قیمت زمان واقعی
گرگ خاکستری	۴	۲	۱۵۱۴	استراتژی زمان مورد استفاده
	۳.۵	۲.۵	۱۶۲۴	استراتژی قیمت زمان واقعی





شکل (۳) مقایسه تعرفه‌های مختلف مدیریت پاسخ تقاضا در روش‌های مختلف



شکل (۴) مقایسه هزینه و ظرفیت برای سناریوهای مختلف مدیریت انرژی

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه یک چارچوب بهینه‌سازی نوآورانه برای مدیریت تقاضای انرژی خانگی ارائه می‌دهد که سیستم‌های ذخیره‌سازی خورشیدی و استراتژی‌های پاسخگویی به تقاضا را برای کاهش هزینه‌های برق مصرفی ترکیب می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی





کوهنوردی (HOA) توانسته است به طور مؤثری هزینه های برق را در شرایط تعرفه های زمان بندی شده تا ۲۶ درصد و در شرایط قیمت گذاری لحظه ای تا ۳۲ درصد کاهش دهد. این کاهش به دلیل زمان بندی بهینه وسایل قابل تأخیر و استفاده هوشمندانه از منابع انرژی تجدیدپذیر بوده است. همچنین، استفاده از سیستم های ذخیره سازی خورشیدی منجر به افزایش انعطاف پذیری شبکه و کاهش وابستگی به منابع انرژی غیرتجدیدپذیر شده است.

دلایل این نتایج شامل موارد زیر است:

۱. هماهنگی بهینه بین تولید انرژی خورشیدی و ذخیره سازی باتری که موجب کاهش تبادلات انرژی با شبکه در ساعات اوج مصرف شده است.

۲. زمان بندی هوشمند وسایل خانگی برای استفاده از انرژی در زمان هایی با تعرفه های پایین تر.

۳. بهره گیری از الگوریتم HOA که توانایی بالایی در یافتن راه حل های بهینه برای مسائل پیچیده دارد.

به طور کلی، این پژوهش نشان می دهد که ادغام سیستم های ذخیره سازی انرژی و استراتژی های پاسخگویی به تقاضا می تواند راهکاری مؤثر و اقتصادی برای مدیریت انرژی خانگی باشد. پیشنهاد می شود در تحقیقات آینده تأثیر ادغام وسایل نقلیه برقی (EV) و استفاده از تکنیک های یادگیری ماشین در این چارچوب بررسی شود.

مراجع

- [1] M. Tostado-Véliz, D. Icaza-Alvarez, and F. Jurado, "A novel methodology for optimal sizing photovoltaic-battery systems in smart homes considering grid outages and demand response," *Renewable Energy*, vol. 170, pp. 884–896, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.073.
- [2] M. Tostado-Véliz, M. Bayat, A. A. Ghadimi, and F. Jurado, "Home energy management in off-grid dwellings: Exploiting flexibility of thermostatically controlled appliances," *Journal of Cleaner Production*, vol. 310, art. no. 127507, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127507.
- [3] M. J. M. Al Essa, "Home energy management of thermostatically controlled loads and photovoltaic-battery systems," *Energy*, vol. 176, pp. 742–752, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.045.
- [4] G. Wang et al., "Robust energy management through aggregation of flexible resources in multi-home micro energy hub," *Applied Energy*, vol. 357, art. no. 122471, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.122471.
- [5] A. Ajitha, G. Akhilesh, T. Rajkumar, S. Radhika, and S. Goel, "Design and implementation of smart home energy management system for Indian residential sector," *Energy Conversion and Management*, vol. 307, art. no. 118369, 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118369.
- [6] F. Ghanavati, J. C. O. Matias, and G. J. Osório, "Towards sustainable smart cities: Integration of home energy management system for efficient energy utilization," *Sustainable Cities and Society*, vol. 111, art. no. 105579, 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105579.
- [7] W. Pinthurat, T. Surinkaew, and B. Hredzak, "An overview of reinforcement learning-based approaches for smart home energy management systems with energy storages," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 202, art. no. 114648, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114648.
- [8] R. Xu et al., "A decentralized federated learning based interoperable and heterogeneity aware predictive optimization method for energy and comfort in smart homes environment," *Applied Soft Computing*, vol. 161, art. no. 111689, 2024, doi: 10.1016/j.asoc.2024.111689.
- [9] M. S. Aliero, K. N. Qureshi, M. F. Pasha, and G. Jeon, "Smart home energy management systems in Internet of Things networks for green cities demands and services," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 22, art. no. 101443, 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101443.
- [10] M. M. Vahedipour-Dahraie, H. Rashidizadeh-Kermani, and A. Anvari-Moghaddam, "Risk-based stochastic scheduling of resilient microgrids considering demand response programs," *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 971–980, Mar. 2021, doi: 10.1109/JSYST.2020.3026142.
- [11] T. Khalili, A. Jafari, M. Abapour, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Optimal battery technology selection and incentive-based demand response program utilization for reliability improvement of an insular microgrid," *Energy*, vol. 169, pp. 92–104, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.024.





- [12] F. Shariatzadeh, P. Mandal, and A. K. Srivastava, "Demand response for sustainable energy systems: A review, application and implementation strategy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 343–350, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.062.
- [13] J. Dong, F. Gao, X. Guan, Q. Zhai, and J. Wu, "Storage-reserve sizing with qualified reliability for connected high renewable penetration micro-grid," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 732–743, 2016, doi: 10.1109/TSTE.2015.2498599.
- [14] D. P. Birnie III, "Optimal battery sizing for storm-resilient photovoltaic power island systems," *Solar Energy*, vol. 109, pp. 165–173, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.08.016.
- [15] M. Tavakoli, F. Shokridehaki, M. F. Akorede, M. Marzband, I. Vechiu, and E. Pouresmaeil, "CVaR-based energy management scheme for optimal resilience and operational cost in commercial building microgrids," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 100, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.02.022.
- [16] S. Tsianikas, J. Zhou, D. P. Birnie III, and D. W. Coit, "Economic trends and comparisons for optimizing grid-outage resilient photovoltaic and battery systems," *Applied Energy*, vol. 256, art. no. 113892, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113892.
- [17] F. Benavente, A. Lundblad, P. E. Campana, Y. Zhang, S. Cabrera, and G. Lindbergh, "Photovoltaic/battery system sizing for rural electrification in Bolivia: Considering the suppressed demand effect," *Applied Energy*, vol. 235, pp. 519–528, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.084.
- [18] E. Quiles, C. Roldán-Blay, G. Escrivá-Escrivá, and C. Roldán-Porta, "Accurate sizing of residential stand-alone photovoltaic systems considering system reliability," *Sustainability*, vol. 12, no. 3, p. 1274, 2020, doi: 10.3390/su12031274.
- [19] A. Lagrange, M. de Simón-Martín, A. González-Martínez, S. Bracco, and E. Rosales-Asensio, "Sustainable microgrids with energy storage as a means to increase power resilience in critical facilities: An application to a hospital," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 119, art. no. 105865, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.105865.
- [20] NREL, "Renewable, Energy Integration & Optimization," National Renewable Energy Laboratory, Denver, 2018. [Online]. Available: <https://reopt.nrel.gov/tool>. [Accessed: Jan. 8, 2021].
- [21] S. Xian and X. Feng, "Meerkat optimization algorithm: A new meta-heuristic optimization algorithm for solving constrained engineering problems," *Expert Systems with Applications*, vol. 231, art. no. 120482, 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2023.120482.
- [22] Smart Home Dataset with Weather Information, 2018. [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/taranvee/smart-home-dataset-with-weather-information>. [Accessed: Sep. 19, 2020].
- [23] S. O. Oladejo, S. O. Ekwe, and S. Mirjalili, "The Hiking Optimization Algorithm: A novel human-based metaheuristic approach," *Knowledge-Based Systems*, vol. 296, art. no. 111880, 2024, doi: 10.1016/j.knosys.2024.111880.

زیرنویس‌ها

-
- ¹ Hiking Optimization Algorithm
 - ² Home Energy Management
 - ³ Load Management
 - ⁴ Demand Response
 - ⁵ Felexibility
 - ⁶ Microgrid
 - ⁷ Resilience
 - ⁸ Hybrid Energy
 - ⁹ Photovoltaic
 - ¹⁰ State of Charge

