

Energy Exchange Management in Two-Layer Microgrids Using the Hiking Optimization Algorithm and Blockchain Technology

Mohamad Mahdi Erfani Majd¹, *PhD Student*, Reza Davarzani¹, *Assistant Professor*,
Mahmoud Samiei Moghaddam², *Assistant Professor*, Ali Asghar Shojaei³, *Assistant Professor*,
Mojtaba Vahedi¹, *Assistant Professor*

¹ Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

² Department of Electrical Engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran.

³ Department of Electrical Engineering, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran.

Abstract:

This study introduces a novel system for energy exchange management in a two-layer network of microgrids. In this framework, the first layer facilitates energy exchange among multiple microgrids, while the second layer enables energy sharing among users within each microgrid. The proposed model employs a multi-objective optimization framework based on the Hiking Optimization Algorithm and ensures transaction security and transparency using a multi-blockchain architecture. Simulation results, utilizing real-world data from five microgrids in Guizhou Province, China, reveal significant performance improvements compared to traditional methods. Specifically, the average utility values of users increased from 17.3 to 31.4 (a 96.2% improvement), while those of microgrid operators rose from 28.2 to 38.98 (a 34.58% enhancement). Moreover, the average energy transaction price dropped by up to 45% with increased distributed energy resources. These findings demonstrate the superior performance of the proposed HOA and blockchain-based method in competitive scenarios, offering greater flexibility in pricing and energy distribution. This work establishes an effective approach to sustainable energy management.

Keywords: Microgrids, Transaction security, Blockchain, Energy sharing, Internet of thing.

Received: 29 November 2024

Revised: 04 March 2025

Accepted: 01 April 2025

Corresponding Author: Mahmoud Samiei Moghaddam, samiei@iau.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1191926>



مدیریت تبادلات انرژی در ریزشبکه‌های دولایه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی و فناوری بلاکچین

محمد مهدی عرفانی مجد^۱، دانشجوی دکتری، رضا داورزنی^۱، استادیار، محمود سمیعی مقدم^۲، استادیار،

علی اصغر شجاعی^۳، استادیار، مجتبی واحدی^۱، استادیار

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

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

۳- گروه مهندسی برق، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران

چکیده: این مطالعه سیستمی نوین برای مدیریت تبادلات انرژی در شبکه‌ای دولایه از ریزشبکه‌ها معرفی می‌کند. در این ساختار، لایه اول به تبادل انرژی میان چندین ریزشبکه و لایه دوم به اشتراک‌گذاری انرژی میان کاربران در هر ریزشبکه اختصاص دارد. مدل پیشنهادی از یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی بهره می‌گیرد و با استفاده از فناوری چندبلاک‌چین امنیت و شفافیت تراکنش‌ها را تضمین می‌کند. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های واقعی از پنج ریزشبکه در استان گویزو، چین نشان داد که مدل پیشنهادی در مقایسه با روش‌های سنتی، بهبود چشمگیری در بهره‌وری داشته است. به‌طور خاص، مقادیر میانگین مطلوبیت کاربران از ۱۷.۳ به ۳۱.۴ (۹۶.۲٪ افزایش) و اپراتورهای ریزشبکه از ۲۸.۲ به ۳۸.۹۸ (۳۴.۵۸٪ افزایش) ارتقا یافت. همچنین قیمت میانگین معاملات انرژی با افزایش منابع انرژی توزیع‌شده تا ۴۵٪ کاهش یافت. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در شرایط رقابتی عملکرد بهتری داشته و قابلیت انعطاف‌پذیری بیشتری در قیمت‌گذاری و توزیع انرژی ایجاد می‌کند. این دستاوردها نه تنها برتری الگوریتم کوهنوردی و فناوری بلاک‌چین را به اثبات می‌رسانند، بلکه راهکاری مؤثر برای مدیریت انرژی پایدار ارائه می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه‌ها، امنیت تراکنش، بلاکچین، اشتراک‌گذاری انرژی، اینترنت اشیا.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۲

نویسنده مسئول: دکتر محمود سمیعی مقدم، samiei@iau.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1191926>





در سال‌های اخیر، افزایش مصرف انرژی و ضرورت استفاده بهینه از منابع انرژی تجدیدپذیر^۱، توجه بسیاری از محققان و صنعتگران را به راه‌حل‌های نوآورانه در حوزه مدیریت انرژی جلب کرده است. یکی از مهم‌ترین فناوری‌های مطرح‌شده در این زمینه، ریزشبکه‌ها^۲ هستند. ریزشبکه‌ها با ارائه قابلیت ترکیب تولید پراکنده، ذخیره‌سازی و مدیریت انرژی در سطح محلی، به کاهش وابستگی به شبکه‌های سراسری و افزایش بهره‌وری کمک می‌کنند. این فناوری علاوه بر کاهش هزینه‌های مصرف انرژی، تأثیرات مثبت زیست‌محیطی از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز به همراه دارد. با وجود این مزایا، مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها به‌ویژه در شرایطی که شامل چندین ریزشبکه متصل به یکدیگر باشد، چالش‌برانگیز است. الگوهای مصرف و تولید غیرقطعی، نوسانات بازار انرژی، و نیاز به حفظ امنیت و حریم خصوصی تراکنش‌ها از جمله عواملی هستند که مدیریت مؤثر این سیستم‌ها را پیچیده می‌سازند. روش‌های سنتی مدیریت انرژی، چه به صورت متمرکز و چه به شکل غیرمتمرکز، توانایی کافی برای پاسخگویی به این پیچیدگی‌ها ندارند و نیاز به توسعه رویکردهای پیشرفته‌تر احساس می‌شود. یکی از فناوری‌های نوظهور که می‌تواند در حل این چالش‌ها مؤثر باشد، بلاکچین است. این فناوری با تضمین امنیت و شفافیت تراکنش‌ها، بستر مناسبی برای مدیریت تبادلات انرژی فراهم می‌کند. از سوی دیگر، الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی می‌توانند توزیع بهینه انرژی میان کاربران و ریزشبکه‌ها را ممکن سازند. در این راستا، این پژوهش سیستمی جامع برای مدیریت انرژی در یک ساختار دولایه از ریزشبکه‌ها معرفی می‌کند که در آن لایه اول به تبادل انرژی میان چندین ریزشبکه و لایه دوم به اشتراک‌گذاری انرژی میان کاربران هر ریزشبکه اختصاص دارد. برای حل مسائل مرتبط با این سیستم، از الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی^۳ (HOA) استفاده شده است که توانایی حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی را دارد. همچنین، چارچوب این سیستم از فناوری بلاکچین^۴ بهره می‌گیرد تا امنیت و حریم خصوصی تراکنش‌ها تضمین شود. این ترکیب نه تنها منجر به افزایش کارایی در مدیریت انرژی می‌شود، بلکه با ارائه مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی، گامی مؤثر در راستای توسعه پایدار محسوب می‌شود. این پژوهش تلاش دارد تا با ارائه این سیستم، نشان دهد که استفاده از رویکردهای هوشمند و فناوری در مدیریت انرژی می‌تواند به بهبود عملکرد و بهره‌وری در سیستم‌های انرژی منجر شود و الگویی مناسب برای پیاده‌سازی در مقیاس‌های مختلف ارائه دهد.

در حالت عملیاتی جزیره‌ای ریزشبکه‌ها، معاملات انرژی برای کاربران در درون یک سیستم ریزشبکه واحد تنظیم می‌شود [۱]. اکثر تحقیقات تا به امروز بر روی انواع مختلف بهینه‌سازی مبتنی بر هزینه تمرکز داشته‌اند. این مطالعات معمولاً هزینه‌های مختلفی مانند هزینه‌های سوخت، سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر و هزینه‌های تولید برق را در نظر می‌گیرند و یکی یا بیشتر از این هزینه‌ها را به عنوان هدف بهینه‌سازی انتخاب می‌کنند [۲]. رویکرد جایگزین برای کاهش هزینه‌ها بر بهبود سود مالی کاربران تمرکز دارد، که به عنوان مازاد حاصل از فروش انرژی پس از کسر هزینه‌های تولید تعریف می‌شود [۳]. با پیشرفت انرژی تجدیدپذیر توزیع‌شده، مدل معامله انرژی دو سطحی ضروری می‌شود. در این مدل، ریزشبکه‌ها در سطح بالاتر با یکدیگر انرژی مبادله خواهند کرد، در حالی که در سطح پایین‌تر، کاربران فردی و اپراتورهای ریزشبکه^۵ (MGO) معاملات انرژی را در درون هر ریزشبکه انجام می‌دهند. این دو لایه به یکدیگر متصل و متقابلاً محدود هستند. برای مدیریت موفق معاملات انرژی در این چارچوب دو لایه، ایجاد یک استراتژی زمان‌بندی بهینه که نیازهای تمام کاربران و اپراتورهای ریزشبکه را برآورده کند، ضروری است. با این حال، بخش عمده‌ای از ادبیات موجود در مورد این مدل دوگانه معاملات انرژی، لایه‌ها را به عنوان اجزای جداگانه مشاهده کرده و بیشتر بر بهبود منافع اپراتورهای ریزشبکه به عنوان اولویت اصلی تمرکز کرده است [۴،۵]. در چارچوب ریزشبکه‌های همکاری‌پذیر، ریزشبکه‌های فردی می‌توانند با یکدیگر در مبادلات انرژی شرکت کنند، بسته به شرایط عملیاتی کنونی آنها [۶،۷]. در حال حاضر، روش‌های مدیریت معاملات انرژی به دو رویکرد اصلی تقسیم می‌شوند: (۱) روش‌های متمرکز و (۲) روش‌های غیرمتمرکز. روش‌های متمرکز شامل یک کنترلر مرکزی است که ابتدا داده‌ها را از حسگرهای تمام ریزشبکه‌ها جمع‌آوری می‌کند. سپس عملیات تمام ریزشبکه‌ها را بر اساس داده‌های تجمیع‌شده زمان‌بندی می‌کند. در مقابل، روش‌های غیرمتمرکز شامل زمان‌بندی عملیات هر ریزشبکه به‌طور مستقل بر اساس داده‌های محلی جمع‌آوری‌شده توسط حسگرهای خود می‌شود. علاوه بر این، با افزایش تعداد شرکت‌کنندگان در ریزشبکه‌ها، مسئله امنیت معاملات به اهمیت بیشتری دست می‌یابد [۸،۹]. فناوری بلاکچین راه‌حل امیدوارکننده برای تضمین امنیت معاملات انرژی ارائه می‌دهد. چندین محقق مکانیسم‌های امن معاملات انرژی مبتنی بر بلاکچین پیشنهاد کرده‌اند [۱۰-۱۲]. پروتکل‌های توافقی سنتی مانند اثبات سهام و اثبات کار برای تسهیل تبادل انرژی در چارچوب دو سطحی ما مناسب نیستند. در محیط‌های ریزشبکه، مدیریت معاملات انرژی معمولاً به





داده‌های پیش‌بینی شده برای دوره‌های آتی بستگی دارد. تضمین اینکه شرکت‌کنندگان به طور مداوم توافقات تجاری خود را دنبال کنند، به دلیل خطرات اقدامات مخرب و محدودیت‌های عملیاتی مختلف، دشوار است. یک مکانیزم توافقی ایده‌آل باید کاربران را به طور مؤثر به انجام تعهداتشان تشویق کند. بنابراین، ایجاد یک مکانیزم توافقی مؤثر، چالش بزرگی است که هنوز در چارچوب معاملات انرژی دو سطحی ما به آن پرداخته نشده است. در ساختار همکاری ریزشبکه‌ها، محققان رویکردهای متعددی برای معاملات پیشنهاد کرده‌اند که عمدتاً به دسته‌های متمرکز و غیرمتمرکز تقسیم می‌شوند. به عنوان مثال، یک تلاش تحقیقاتی [۱۳] یک مدل بهینه‌سازی برای زمان‌بندی یک روز پیش معرفی کرد که دینامیک‌های مدیریت قدرت تعاملی را در نظر می‌گیرد. یک رویکرد جایگزین ارائه شده توسط [۱۴] بر توسعه چارچوب مدیریت انرژی مبتنی بر عامل تمرکز داشت که هدف آن دستیابی به نتایج بهینه پاراتو با استفاده از استراتژی رقابتی بود. در این چارچوب، یک فرآیند تصمیم‌گیری متمرکز ایجاد شد، که در آن چندین ریزشبکه هماهنگ شده به یک سیستم کنترل یکپارچه متکی بودند تا تعادل بین عرضه و تقاضا را حفظ کنند [۱۵]. خودروهای برقی به عنوان وسیله‌ای برای انتقال انرژی دیده می‌شوند که منجر به توسعه استراتژی برای مدیریت شارژ و دشارژ آنها به منظور دستیابی به تعادل بین ریزشبکه‌های مختلف می‌شود. علاوه بر این، یک چارچوب بهینه‌سازی غیرمتمرکز برای کاهش هزینه‌های عملیاتی کلی معرفی شد. در عملکرد مستقل ریزشبکه‌ها، مدل‌های متعددی برای بهبود منافع اقتصادی اپراتورهای ریزشبکه و مصرف‌کنندگان توسط محققان پیشنهاد شده است. یک مطالعه چارچوب قیمت‌گذاری انرژی مبتنی بر نظریه بازی استاکلبرگ را ارائه داد، جایی که اپراتورهای ریزشبکه معاملات انرژی را میان تولیدکنندگان انرژی خورشیدی تسهیل می‌کنند، با هدف افزایش سود فردی آنها [۱۸]. علاوه بر این، تحقیق دیگری مدل بهینه‌سازی نوآورانه‌ای را معرفی کرد که برای توزیع اقتصادی بلادرنگ در ریزشبکه‌های ایزوله‌شده طراحی شده و هزینه‌های گذشته سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی را همراه با مزایای عملیاتی پیش‌بینی شده در نظر می‌گیرد [۱۹]. همچنین، محققان الگوریتم غیرمتمرکز دو سطحی [۲۰] را برای کاهش هزینه‌های عملیاتی در شبکه‌های ریزشبکه معرفی کردند. در این مدل تبادل انرژی دو سطحی، آنها یک سیستم مدیریت آنلاین برای ذخیره انرژی پیشنهاد کردند که به استاندارد خدمات برق (QoSE) تأکید دارد [۲۱]. با این حال، این روش به طور لایمبه‌لایه عمل می‌کند و به تداخل‌ها و محدودیت‌های موجود بین آنها توجه نمی‌کند. هدف اصلی آن افزایش سود اپراتور ریزشبکه است. از سوی دیگر، فناوری بلاک‌چین یک وسیله مؤثر برای حل مشکلات امنیتی در معاملات انرژی ارائه می‌دهد. چندین چارچوب امن برای معاملات مبتنی بر بلاک‌چین پیشنهاد شده است. یک نمونه قابل توجه است که یک مدل معامله انرژی مبتنی بر بلاک‌چین است که برای نظارت و تنظیم فرآیند معامله انرژی طراحی شده است و در نتیجه یک محیط امن برای معاملات ایجاد کرده و کیفیت کلی انرژی را بهبود می‌بخشد [۲۲]. یک مکانیزم برای معاملات منابع با استفاده از نظریه بازی استاکلبرگ از طریق قراردادهای هوشمند در بلاک‌چین ایجاد شده است [۲۳]. همچنین، یک چارچوب معاملاتی مبتنی بر بلاک‌چین برای ریزشبکه‌ها از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشرفته برای شناسایی رویکردهای پیشنهاد قیمت ایده‌آل استفاده می‌کند تا حداکثر سود را برای تمام طرف‌های شرکت‌کننده تضمین کند [۲۴]. یک تلاش تحقیقاتی دیگر [۲۵] رویکرد کنترلی مبتنی بر عدالت تناسبی برای توزیع انرژی در ریزشبکه‌ها معرفی کرد که از فناوری بلاک‌چین و قراردادهای هوشمند برای تسهیل صدور صورتحساب غیرمتمرکز استفاده می‌کند. علاوه بر این، یک مدل معاملاتی مبتنی بر بلاک‌چین کنسرسیومی برای حمایت از تبادل انرژی بین هم‌تاهای طراحی شد که از پروتکل اصابت سهام استفاده می‌کند [۲۶]. در تحقیق مستند شده در [۲۷]، نویسندگان جنبه‌های عملکردی مکانیزم توافقی PBFT را که به طور خاص برای محیط‌های بلاک‌چین مجاز طراحی شده است، بررسی کرده و بر اهمیت قابلیت اطمینان سیستم و دستیابی به توافق توزیع شده در چارچوب قدیمی تأکید کردند. تحقیق [۲۸] چشم‌انداز فعلی رمزنگاری منحنی بیضوی را بررسی کرده و به کارایی آن و نقشی که در بهبود امنیت در چارچوب‌های رمزنگاری ایفا می‌کند، پرداخته است. تحقیق [۲۹] نیز به جنبه‌های امنیتی و عوامل عملی در پیاده‌سازی طرح رمزنگاری منحنی بیضوی یکپارچه پرداخته و بر مقاومت آن در برابر چالش‌های رمزنگاری تمرکز دارد. در مطالعه [۳۰]، سیستم مدیریت انرژی سه‌جانبه‌ای برای منابع انرژی توزیع شده در شبکه‌های هوشمند معرفی شده که هدف آن بهینه‌سازی هزینه‌ها و توزیع انرژی است. تحقیق [۳۱] از مدل رشد گومپرتزی برای پیش‌بینی الگوهای رشد زیستی استفاده کرده و بینشی کاربردی در مطالعات زیستی ارائه می‌دهد. در تحقیق [۳۲]، الگوریتم بهینه‌سازی میرکات به عنوان یک تکنیک فراابتکاری جدید برای حل مسائل مهندسی با قیود معرفی شده که همگرایی بهبودیافته‌ای را ارائه می‌دهد. در مطالعه [۳۳]، یک سیستم پرداخت شبکه‌ای ترکیبی معرفی شده که کارایی و قابلیت همکاری بین شبکه‌های بلاکچین مختلف را افزایش می‌دهد. در مطالعه [۳۴]، راه‌حلی برای مدیریت معاملات انرژی دولایه در ریزشبکه‌ها با استفاده از سیستم‌های چند بلاکچین





ارائه شده که تراکنش‌ها را بهینه کرده و مقیاس‌پذیری را بهبود می‌بخشد. مطالعه [۳۵] فناوری کانتینری‌سازی Docker را با تمرکز بر استفاده آن در خدمات وب آمازون (AWS) برای استقرار برنامه‌های مقیاس‌پذیر بررسی می‌کند. تحقیق [۳۶] روش‌های یادگیری ماشین را در پیش‌بینی بیماری‌ها به کار گرفته و هدف آن بهبود دقت و تشخیص زودهنگام در سیستم‌های سلامت است. در تحقیق [۳۷] چالش‌ها و راه‌حل‌های مرتبط با ادغام بلاکچین در حوزه بهداشت و درمان بررسی شده و بر امنیت داده‌ها و مدیریت بیماران تأکید شده است. در مطالعه [۳۸] مدل‌های کنترل دسترسی برای سیستم‌های امنیتی مرور شده و نقش اساسی آن‌ها در مدیریت مجوزهای کاربران در کاربردهای مختلف برجسته شده است.

در دنیای امروز، با رشد روزافزون جمعیت و افزایش تقاضای انرژی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی‌های خورشیدی و بادی به یک نیاز اساسی تبدیل شده است. ریزشبکه‌ها به عنوان سیستم‌های خودکفا و کوچک انرژی، به دلیل قابلیت‌های مدیریت تقاضا و تولید انرژی محلی، در بسیاری از نقاط جهان مورد توجه قرار گرفته‌اند. این سیستم‌ها توانایی بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها را دارند، به‌ویژه در شرایطی که نیاز به تعاملات انرژی میان واحدهای مختلف وجود دارد. با توجه به تحولات اخیر در فناوری‌های شبکه‌های توزیع انرژی و رشد سریع استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، یکی از چالش‌های اصلی مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها، نحوه تعامل و تجارت انرژی میان ریزشبکه‌ها و کاربران آنها است. این تجارت انرژی نیازمند یک مدل بهینه‌سازی پیچیده است که علاوه بر کاهش هزینه‌ها، به بهبود سود اقتصادی برای تمامی ذینفعان (از جمله اپراتورهای ریزشبکه و مصرف‌کنندگان) کمک کند. بنابراین، نیاز به طراحی و توسعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدید که بتوانند این نیازها را برآورده کنند، کاملاً مشهود است. علاوه بر این، امنیت معاملات انرژی در ریزشبکه‌ها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است، به‌ویژه در شرایطی که تعداد زیادی از کاربران و اپراتورها درگیر فرآیندهای تجاری هستند. استفاده از فناوری‌های نوین مانند بلاکچین برای تضمین امنیت معاملات انرژی، یکی از مسیرهای پژوهشی مهم به شمار می‌رود که هنوز در بسیاری از مطالعات به‌طور جامع بررسی نشده است. با توجه به چالش‌های موجود و ضرورت بهینه‌سازی فرآیندهای انرژی و امنیت در ریزشبکه‌ها، تحقیق حاضر به دنبال توسعه یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی برای تجارت انرژی میان ریزشبکه‌ها و کاربران، همراه با یک مکانیزم توافقی مناسب برای امنیت و کارایی بیشتر معاملات انرژی است.

مقاله حاضر به معرفی یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی جدید برای تجارت انرژی در ریزشبکه‌ها می‌پردازد که هدف آن بهینه‌سازی هزینه‌ها و سود اقتصادی برای اپراتورهای ریزشبکه و مصرف‌کنندگان انرژی است. این مدل به‌ویژه در شرایط جزیره‌ای ریزشبکه‌ها که تعامل انرژی میان چندین ریزشبکه و کاربران آن‌ها مورد نیاز است، کاربرد دارد. یکی از نوآوری‌های کلیدی این تحقیق، پیشنهاد رویکردی مبتنی بر استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته برای برنامه‌ریزی زمان‌بندی بهینه در دو لایه متفاوت است که شامل معاملات انرژی میان ریزشبکه‌ها و همچنین بین کاربران و اپراتورهای ریزشبکه می‌شود.

علاوه بر این، تحقیق حاضر به‌طور خاص به چالش‌های امنیتی در معاملات انرژی پرداخته و با استفاده از فناوری بلاکچین به عنوان یک راه‌حل نوآورانه برای تضمین امنیت و اعتبار این معاملات، از یک مکانیزم توافقی جدید استفاده می‌کند که به جلوگیری از اقدامات مخرب و محدودیت‌های عملیاتی کمک می‌کند. این رویکرد برای اولین بار در چارچوب مدل‌های دو سطحی تجارت انرژی در ریزشبکه‌ها به کار برده شده و به ارتقای کارایی و امنیت سیستم‌های انرژی توزیع‌شده می‌انجامد.

در نهایت، مقاله حاضر با توجه به استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ترکیبی و مدل‌سازی نوین در زمینه ریزشبکه‌ها، به‌طور چشمگیری از مدل‌های موجود پیشی می‌گیرد و به حل مسائل پیچیده اقتصادی و امنیتی در شبکه‌های انرژی به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ کمک می‌کند. این نوآوری‌ها می‌توانند پایه‌گذار مدل‌های جدیدتری در زمینه مدیریت انرژی و تجارت در ریزشبکه‌ها باشند که منجر به توسعه پایدارتر و بهینه‌تر سیستم‌های انرژی در آینده خواهند شد.

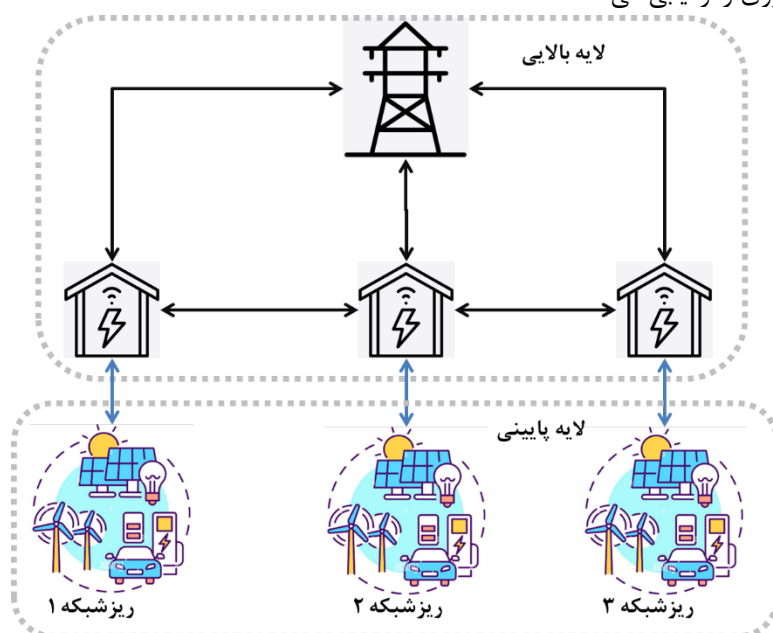
ساختار این مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم، جزئیات چارچوب مدل پیشنهادی و اصول طراحی آن توضیح داده می‌شود. بخش سوم به معرفی الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی (HOA) و نحوه کاربرد آن در مدیریت تبادلات انرژی اختصاص دارد. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های واقعی ارائه و تحلیل می‌شود. در بخش پنجم، محدودیت‌های مدل و پیشنهادات برای تحقیقات آینده بررسی می‌شوند. در نهایت، نتیجه‌گیری کلی و خلاصه‌ای از دستاوردهای مقاله در بخش ششم ارائه شده است.



۲- ساختار نظارت بر تجارت انرژی پیشنهادی

این بخش یک زمینه تجارت انرژی دو لایه را توصیف می‌کند و سیستم مدیریتی برای تجارت انرژی با استفاده از روش چند زنجیره بلوک^۱ معرفی می‌کند.

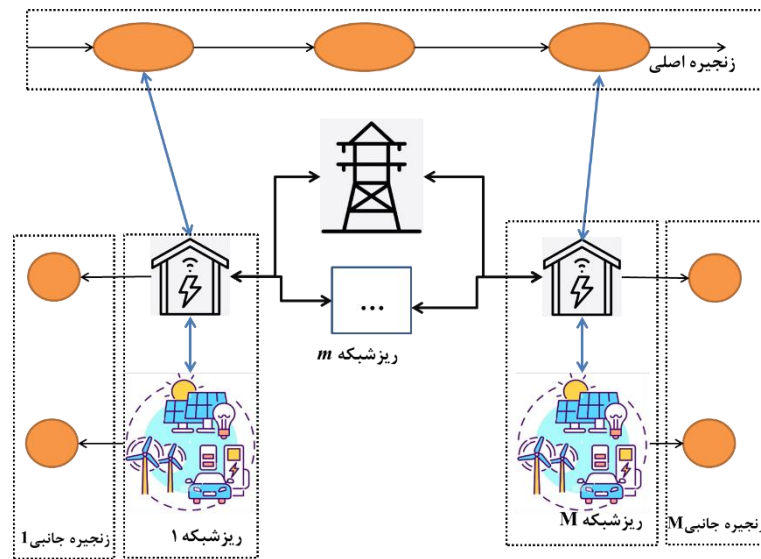
سیستم تجارت انرژی به دو لایه مجزا تقسیم شده است که در شکل (۱) نشان داده شده است. لایه بالایی مسئول تسهیل تبادل انرژی میان ریزشبکه‌ها و شبکه کلان است که در تعادل عرضه و تقاضای انرژی میان ریزشبکه‌ها به‌ویژه در شرایط آب و هوایی سخت نقش حیاتی دارد. از سوی دیگر، لایه پایین مدیریت تراکنش‌های انرژی میان کاربران داخل هر ریزشبکه خاص را بر عهده دارد. کاربران به دو دسته تقسیم می‌شوند: گروه اول شامل کاربران با منابع انرژی توزیع شده^۲ (DER) هستند که توانایی تولید و مصرف انرژی را دارند، و گروه دیگر شامل کاربران عمومی^۳ (GU) هستند که تنها مصرف‌کنندگان انرژی هستند. کاربران با DER این امکان را دارند که انرژی را در داخل ریزشبکه خود یا با اپراتور ریزشبکه (MGO) مبادله کنند، در حالی که کاربران عمومی فقط می‌توانند انرژی را از کاربران DER یا MGO دریافت کنند. هر کاربر به سنسورهای مجهز است که داده‌هایی برای پیش‌بینی تولید و مصرف انرژی جمع‌آوری می‌کند و همچنین توزیع انرژی را ردیابی می‌کند.



شکل (۱): چارچوب تجارت انرژی دو لایه

برای تضمین تراکنش‌های امن در چارچوب تجارت انرژی دو لایه، یک سیستم مدیریتی قوی برای تجارت انرژی پیاده‌سازی کرده‌ایم که از طراحی چند زنجیره بلوک استفاده می‌کند. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، اپراتورهای ریزشبکه (MGOها) در لایه بالایی همکاری می‌کنند تا یک زنجیره بلوک کنسرسیومی ایجاد کنند که به عنوان زنجیره اصلی عمل می‌کند، در حالی که همه شرکت‌کنندگان و MGO در هر ریزشبکه یک زنجیره بلوک عمومی در لایه پایین تشکیل می‌دهند که به عنوان زنجیره فرعی شناخته می‌شود. عملیات مستقل و هم‌زمان تراکنش‌ها میان ریزشبکه‌های مختلف به طور چشمگیری کارایی و تاب‌آوری کلی سیستم را بهبود می‌بخشد. تراکنش‌های لایه بالایی از طریق مکانیزم تحمل خطای بیزانسی عملی^۴ (PBFT) تأیید می‌شوند و سپس در زنجیره اصلی ثبت می‌شوند. در مقابل، تراکنش‌های لایه پایین با استفاده از روش^۵ DPoR پیشنهادی احراز هویت می‌شوند و در زنجیره‌های فرعی ثبت می‌شوند. این آرایش حریم خصوصی را تقویت می‌کند با تفکیک داده‌های تراکنش به جای تجمع همه سوابق در یک زنجیره واحد که برای همه کاربران و MGOها قابل مشاهده است. زنجیره اصلی و زنجیره‌های فرعی به طور مستقل عمل می‌کنند و هر کدام از سیستم‌های منحصر به فردی برای حسابداری و تشکیل بلوک‌ها استفاده می‌کنند. همان‌طور که MGOها تراکنش‌های انرژی را در سطوح مختلف انجام می‌دهند، ارز دیجیتال آن‌ها باید بین زنجیره اصلی و زنجیره‌های فرعی جابجا شود. برای پشتیبانی از این عملیات، از فناوری تأیید پرداخت ساده^۶ (SPV) استفاده می‌کنیم تا ارتباطی بین زنجیره اصلی و زنجیره‌های فرعی برقرار کرده و جریان ارز

دیجیتال را ممکن سازیم. برای تراکنش‌ها، از NRGcoin استفاده می‌کنیم که یک ارز دیجیتال پشتیبانی‌شده از منابع انرژی است. NRGcoin هم در زنجیره اصلی و هم در زنجیره‌های فرعی عمل می‌کند و می‌تواند با نسبت یک به یک معامله شود.



شکل (۲): ساختار مدیریت تجارت انرژی با استفاده از فناوری چند بلاک چین

روش انتقال NRGcoin بین زنجیره اصلی و زنجیره فرعی در هر دو جهت یکسان است. برای توضیح این فرآیند، تمرکز خود را بر روی انتقال از زنجیره اصلی به زنجیره فرعی قرار خواهیم داد. مراحل لازم برای این انتقال به شرح زیر است:

۱. اپراتور ریزشبکه (MGO) مقدار مشخصی از NRGcoin را به یک آدرس قفل‌شده در زنجیره اصلی ارسال می‌کند تا از ایمنی این سکه‌ها اطمینان حاصل شود. پس از این تراکنش، MGO یک مدرک SPV دریافت می‌کند.

۲. MGO سپس این مدرک SPV را به نودهای اجماع در زنجیره فرعی ارائه می‌دهد.

۳. پس از تأیید صحت مدرک SPV توسط نودهای اجماع در زنجیره فرعی، مقدار معادل NRGcoin در زنجیره فرعی صادر می‌شود.

۴. حالا MGO می‌تواند از این NRGcoin‌ها برای انجام تراکنش‌ها در زنجیره فرعی استفاده کند.

برای پیش‌بینی تولید و مصرف انرژی در آینده نزدیک، افراد از داده‌های جمع‌آوری‌شده از دستگاه‌های هوشمند، شامل حسگرهای دما و کنتورهای انرژی استفاده می‌کنند. با این حال، دقت این پیش‌بینی‌ها معمولاً به دلیل عواملی مانند شرایط جوی و تغییرات دما کاهش می‌یابد. به دلیل این پیش‌بینی‌پذیری پایین، پیش‌بینی دقیق الگوهای تولید و مصرف انرژی در طول زمان دشوار است. برای بهینه‌سازی مدیریت، زمان به فواصل یکنواخت تقسیم شده است که هر یک ساعت به عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود. در فرآیند تجارت انرژی، ابتدا لایه بالایی یک استراتژی تجاری بین اپراتورهای ریزشبکه (MGOs) بر اساس تأمین و تقاضای انرژی آنها ایجاد می‌کند. سپس هر MGO یک روش تجارت انرژی اختصاصی برای ریزشبکه خود در لایه پایین توسعه می‌دهد.

فرآیند مدیریت تجارت انرژی پیشنهادی به شرح زیر عمل می‌کند:

- ثبت‌نام کاربران برای دریافت مجوز، هر فرد باید با اپراتور ریزشبکه (MGO) ثبت‌نام کند. پس از ثبت‌نام، هر کاربر مجموعه‌ای از کلیدهای رمزنگاری منحصر به فرد شامل یک کلید عمومی^{۱۲} (PK) و یک کلید خصوصی^{۱۳} (SK) با استفاده از رمزنگاری منحنی بیضوی دریافت می‌کند، همراه با امتیاز اعتبار اولیه (Repini) [۲۸]. کاربران یک کیف پول^{۱۴} (W) با استفاده از SK خود ایجاد می‌کنند تا تراکنش‌ها را تسهیل کنند. در یک لحظه مشخص، کاربران پیش‌بینی تولید و مصرف انرژی خود را برای بازه زمانی بعدی پیش‌بینی کرده و این اطلاعات را به MGO خود ارسال می‌کنند که نشان‌دهنده تعهد آنهاست.

- در سازمان‌های ریزشبکه (MGOs)، اعضا از طریق یک فرآیند رأی‌گیری، یک رهبر را برای یک بازه زمانی خاص تعیین می‌کنند. برای حفظ محرمانگی تبادل داده‌ها، MGOs از طرح رمزنگاری یکپارچه منحنی بیضوی^{۱۵} (ECIES) [۲۹] استفاده می‌کنند که امکان



رمزگذاری تراکنش‌های انرژی با حداقل بار محاسباتی و ارتباطی را فراهم می‌آورد. رهبر منصوب شده یک پیشنهاد تجاری تهیه می‌کند که بهینه‌سازی توابع مطلوب تمامی MGOs در لایه بالایی [۳,۷] را هدف قرار می‌دهد و آن را بین سایر اعضا توزیع می‌کند.

- پیشنهاد تجاری از طریق فرآیند PBFT بررسی می‌شود و به یک چارچوب رسمی تبدیل شده و در زنجیره اصلی ثبت می‌شود.

- در لایه پایه، MGO یک مدل تجاری دقیق‌تر [۲۱] ایجاد می‌کند که هدف آن بهینه‌سازی توابع مطلوب برای همه شرکت‌کنندگان در ریزشبه خود، از جمله منافع خود آنها [۹,۱۱] است. پس از تکمیل فرآیند تأیید DPoR، مدل در زنجیره فرعی ثبت می‌شود. برای هر تراکنش، یک قرارداد هوشمند ایجاد می‌شود که در آن خریدار انرژی باید پیش از انجام تراکنش، مقدار NRGcoin مورد نیاز را در آدرس قرارداد واریز کند.

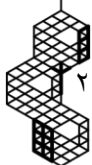
- در یک ریزشبه، تراکنش‌های انرژی توسط MGO به همراه شرکت‌کنندگان تسهیل می‌شود. پس از فرآیند تجارت، جزئیات تراکنش تأیید می‌شود و عملکرد تأمین‌کننده انرژی توسط رهبر کمیته اجماع با استفاده از داده‌های کنتورهای هوشمند ارزیابی می‌شود. هر دو طرف درگیر در معامله تراکنش تأیید شده و ارزیابی را امضاء می‌کنند. اعتبار فروشنده (Rep) بر اساس این ارزیابی‌ها تنظیم می‌شود [۱۷]. در نهایت، جزئیات تراکنش توسط DPoR تأیید شده و در زنجیره فرعی ثبت می‌شود.

تجارت انرژی توسط اپراتورهای ریزشبه (MGOs) در لایه بالاتر سیستم تسهیل می‌شود. پس از نهایی شدن تراکنش‌ها، آنها از طریق پروتکل PBFT تأیید شده و سپس در زنجیره اصلی ثبت می‌شوند. بهبود تجارت انرژی از طریق یک ساختار دو لایه نیازمند مدیریت انواع عوامل مرتبط با یکدیگر است که بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. برای ساده‌سازی این فرآیند پیچیده، تجارت انرژی به دو لایه مجزا برای فرآیند بهینه‌سازی تقسیم می‌شود. لایه بالایی به بهبود تراکنش‌ها میان ریزشبه‌های مختلف اختصاص دارد، در حالی که لایه پایین به بهبود تراکنش‌ها در هر ریزشبه خاص می‌پردازد. این روش به وابستگی‌ها و محدودیت‌های موجود بین دو لایه توجه دارد. در بحث‌های قبلی، زمان به بخش‌های از پیش تعیین‌شده تقسیم شد تا استراتژی‌های تجارت انرژی برای دوره بعدی در طول دوره جاری توسعه یابد. شرکت‌کنندگان موظف هستند تا پیش‌بینی تولید و مصرف انرژی خود را برای دوره بعدی به اپراتور ریزشبه خود (MGO) اطلاع دهند. با استفاده از این اطلاعات، اپراتورهای ریزشبه مقدار انرژی که باید خرید یا فروش کنند را تعیین می‌کنند. پس از این مرحله، MGOها یافته‌های خود را با یکدیگر به اشتراک می‌گذارند و یک هماهنگ‌کننده برای ایجاد استراتژی تجاری منصوب می‌شود که هدف آن بهبود توابع مطلوب برای تمام MGOهای درگیر است.

عوامل اعتبار برای اپراتورهای ریزشبه معمولاً در توسعه استراتژی تجارت انرژی لایه بالایی لحاظ نمی‌شود، زیرا این سازمان‌ها معمولاً توسط نهادهای دولتی، مانند شبکه دولتی، مدیریت می‌شوند که به دلیل حفظ تعهدات خود شناخته شده هستند. برای وضوح بیشتر، نماد t برای نمایندگی پارامترها و متغیرهایی که به یک زمان خاص مربوط می‌شوند، استفاده می‌شود، در حالی که این علامت‌گذاری برای عناصری که به زمان حال مرتبط هستند، به کار نمی‌رود.

مجموعه M نمایانگر تعداد کل ریزشبه‌ها است، که در آن $m_k \in M$ هر ریزشبه را نشان می‌دهد (با $k \leq K \geq 1$). مجموعه U_k مجموعه کاربران داخل ریزشبه m_k است، که در آن N_k تعداد کاربران موجود در U_k می‌باشد، و $u_n^k \in U_k$ هر کاربر را در نظر می‌گیرد (با $n \leq N_k \geq 1$). کاربران پیش‌بینی تولید و مصرف انرژی خود را برای بازه زمانی بعدی انجام می‌دهند، که به ترتیب با P_n^k (تولید انرژی) و C_n^k (مصرف انرژی) نشان داده می‌شود. ریزشبه m_k داده‌ها را از تمامی کاربران در محدوده خود جمع‌آوری کرده و سپس تصمیمات مربوط به خرید یا فروش انرژی را طبق معیارهای از پیش تعیین شده اتخاذ می‌کند. این فرآیند اطمینان می‌دهد که تقاضای انرژی در داخل ریزشبه به صورت کارآمد برآورده شده و همچنین منابع انرژی موجود از کاربران و سیستم شبکه گسترده‌تر در نظر گرفته می‌شود. هدف این است که تعادلی بین عرضه و تقاضای انرژی حفظ شود و در عین حال هزینه‌ها بهینه‌سازی شده و قابلیت اطمینان سیستم تضمین شود.

$$(1) \quad \begin{cases} \sum_{n=1}^{N_k} (P_n^k - C_n^k) < 0, m_k \in MB \\ \sum_{n=1}^{N_k} (P_n^k - C_n^k) > 0, m_k \in MS \end{cases}$$





اصطلاحات MB و MS به دو دسته ریزشبه‌هایی که در بازار انرژی مشارکت دارند اشاره دارند. در اینجا، MB به ریزشبه‌هایی اطلاق می‌شود که انرژی خریداری می‌کنند و MS به ریزشبه‌هایی که انرژی می‌فروشند، اشاره دارد. شرط $\sum_{n=1}^{N_k} (P_n^k - C_n^k) = 0$ نشان می‌دهد که ریزشبه m_k به طور مستقل عمل می‌کند و درگیر تبادلات انرژی با سطح بالاتر نیست. از این رو، ریزشبه‌هایی که در تبادل انرژی مشارکت دارند، به دو گروه جداگانه تقسیم می‌شوند: (۱) MB و (۲) MS. ریزشبه‌های موجود در منطقه MB با m_i شناسایی می‌شوند، جایی که شاخص i از ۱ تا I متغیر است و I تعداد کل ریزشبه‌های موجود در MB را نشان می‌دهد. به طور مشابه، در منطقه MS، ریزشبه‌ها با m_j مشخص می‌شوند، جایی که j از ۱ تا J تغییر می‌کند و J تعداد کل ریزشبه‌های موجود در MS را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که تعداد کل ریزشبه‌ها باید شرایط زیر را برآورده کند: $I+J \leq K$.

با ارجاع به معادله (۱)، انرژی خریداری شده توسط m_i با EB_i نشان داده می‌شود که با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$EB_i = \sum_{n=1}^{N_i} (C_n^i - P_n^i)$$

ریزشبه‌ای که به عنوان m_i شناخته می‌شود، می‌تواند انرژی را هم از m_j و هم از Ma دریافت کند. مقدار انرژی دریافتی از m_j به صورت $a(i,j)$ تعریف می‌شود و قیمت مربوطه $p(i,j)$ است. به طور مشابه، مقدار انرژی از Ma به صورت $a(i, Ma)$ نشان داده می‌شود و قیمت آن $p(i, Ma)$ است. بنابراین، کل هزینه برای m_i با استفاده از فرمول زیر تعیین می‌شود:

$$\text{Total expenditure of } m_i = \sum_{j=1}^J a(i,j)p(i,j) + a(i, Ma)p(i, Ma) \quad (2)$$

$$Co(m_i) = \sum_{j=1}^J a(i,j)p(i,j) + a(i, Ma)p(i, Ma)$$

در مدل سنتی، m_i محدود به خرید انرژی فقط از Ma است. در مقابل، روش پیشنهادی ما قیمت‌گذاری انرژی پویا را معرفی می‌کند که بر اساس نوسانات عرضه و تقاضا تغییر می‌کند. به طور معمول، m_i متوجه می‌شود که تأمین انرژی از ریزشبه‌های دیگر (MGOs) به مراتب مقرون به صرفه‌تر است. بنابراین، ما تابع مطلوبیت آن را با در نظر گرفتن صرفه‌جویی‌هایی که در مقایسه با خرید انرژی کامل از Ma به دست می‌آورد، تعریف می‌کنیم. به این ترتیب، تابع مطلوبیت برای m_i به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Uti(m_i) = p(i, Ma)EB_i - Co(m_i) \quad (3)$$

$$= p(i, Ma) \left(\sum_{j=1}^J a(i,j) + a(i, Ma) \right) - \left(\sum_{j=1}^J a(i,j)p(i,j) + a(i, Ma)p(i, Ma) \right)$$

$$= \sum_{j=1}^J (p(i, Ma) - p(i,j))a(i,j)$$

$$\sum_{j=1}^J a(i,j) + a(i, Ma) = EB_i, 1 \leq j \leq J \quad (4)$$

تابع (۳) به طور خاص برای ارزیابی صرفه‌جویی هزینه در ریزشبه‌هایی که انرژی را از منابع مختلف تأمین می‌کنند طراحی شده است. این تابع، تفاوت هزینه‌های واقعی با هزینه‌های مرجع تأمین انرژی از شبکه اصلی (Ma) را محاسبه می‌کند. هدف از استفاده از این تابع، اندازه‌گیری میزان بهینه‌سازی اقتصادی برای اپراتورهای ریزشبه است، به طوری که انتخاب‌های انرژی با هزینه کمتر نسبت به شبکه اصلی تشویق شود. این صرفه‌جویی در هزینه‌ها نه تنها موجب افزایش بهره‌وری اقتصادی ریزشبه می‌شود، بلکه به طور غیرمستقیم کاربران را به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و محلی ترغیب می‌کند. که این تابع می‌تواند با توجه به نحوه انتخاب انرژی از ریزشبه‌های مختلف، قیمت‌ها و مقدار انرژی، به صورت ریاضی بیشتر توضیح داده شود.

محدودیت چهارم تضمین می‌کند که انرژی دریافتی توسط m_i با نیازهای مصرفی آن هماهنگ باشد. عبارت $p(i, Ma)EB_i$ هزینه‌ای را که برای تأمین کل انرژی از Ma وجود دارد، تعیین می‌کند، در حالی که $Co(m_i)$ هزینه‌های واقعی که توسط m_i متحمل





می‌شود را ارزیابی می‌کند. در نتیجه، $Uti(m_i)$ صرفه‌جویی‌های به دست آمده در هزینه‌ها را می‌سنجد. انرژی کل فروخته شده توسط m_j به عنوان ES_j در معادله (۱) نشان داده می‌شود. این مقدار از طریق جمع تفاوت بین انرژی تولید شده P_n^j و انرژی مصرفی C_n^j برای همه کاربران به دست می‌آید. بنابراین، می‌توان آن را به صورت ریاضی به شکل زیر بیان کرد:

$ES_j = \sum_{n=1}^{N_j} (P_n^j - C_n^j)$ ریزشبه m_j قادر است انرژی را به هر دو m_i و Ma تأمین کند. مقدار انرژی تأمین شده به Ma به صورت $a(j, Ma)$ نشان داده می‌شود و قیمت فروش آن توسط $p(j, Ma)$ نمایان می‌شود. با توجه به تفکیک بین m_i و m_j ، انرژی در هنگام انتقال از بین می‌رود که به وسیله $al(j, i)$ کمی‌سازی می‌شود، جایی که $l(j, i)$ فاصله را نشان می‌دهد و α نرخ اتلاف انرژی برای هر واحد فاصله است. اگر فرض کنیم که فروشنده مسئول این اتلاف انرژی باشد، درآمد حاصل از m_j به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{Revenue of } m_j = p(j, Ma)a(j, Ma) - al(j, i)a(j, i)$$

که در آن $a(j, Ma)$ میزان انرژی تأمین شده به Ma و $a(j, i)$ مقدار انرژی تأمین شده به m_i است.

$$\ln(m_j) = \sum_{i=1}^I a(i, j)p(i, j) + a(j, Ma)p(j, Ma) \quad (5)$$

در چارچوب سنتی، موجودیت m_j محدود به فروش انرژی فقط به Ma است. در مقابل، مدل ما به m_j این امکان را می‌دهد که انرژی را با قیمت‌های بالاتری به اپراتورهای مختلف ریزشبه (MGOs) بفروشد. به همین دلیل، بهره‌مندی برای m_j از طریق سود اضافی که در مقایسه با سناریوی فروش تمام انرژی فقط به Ma به دست می‌آید، تعیین می‌شود. تابع بهره‌مندی برای m_j را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$Uti(m_j) = \ln(m_j) - p(j, Ma)ES_j \quad (6)$$

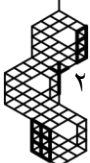
$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^I a(i, j)p(i, j) + a(j, Ma)p(j, Ma) \\ &\quad - p(j, Ma) \left(\sum_{i=1}^I (a(i, j) + al(i, j)f(i, j)) + a(j, Ma) \right) \\ &= \sum_{i=1}^I (p(i, j) - p(j, Ma))a(i, j) - p(j, Ma) \sum_{i=1}^I al(i, j)f(i, j) \end{aligned}$$

$$f(i, j) = \begin{cases} 0, & a(i, j) = 0 \\ 1, & a(i, j) > 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I (a(i, j) + al(i, j)f(i, j)) + a(j, Ma) = ES_j, 1 \leq i \leq I \quad (8)$$

محدوده قید (۸) تضمین می‌کند که انرژی تأمین شده توسط m_j مطابق با انرژی باقی‌مانده موجود است. عبارت $p(j, Ma)ES_j$ درآمد حاصل از فروش تمام انرژی به Ma را تعیین می‌کند، در حالی که $\ln(m_j)$ درآمد واقعی کسب‌شده توسط m_j را ارزیابی می‌کند. بنابراین، $Uti(m_j)$ نشان‌دهنده سود اضافی است که در مقایسه با سناریوی فروش تمام انرژی به Ma به دست آمده است. مهم است که توجه داشته باشیم که $p(i, Ma)$ و $p(j, Ma)$ مقادیر ثابتی هستند که توسط Ma طبق مقررات کشور تعیین می‌شوند. بنابراین، زمانی که زمان ثابت باقی بماند، بهینه‌سازی توابع سود برای m_i و m_j شامل کاهش هزینه‌ها برای m_i و افزایش درآمد برای m_j است.

در سطح بنیادی، هر اپراتور ریزشبه (MGO) یک استراتژی برای تبادل انرژی در ریزشبه مربوط به خود تدوین می‌کند. این استراتژی هدفش بهینه‌سازی توابع سود برای همه کاربران در ریزشبه و خود اپراتور است، در حالی که استراتژی‌های تجاری تعیین‌شده در سطح بالاتر را نیز در نظر می‌گیرد. همچنین ضروری است که توجه داشته باشیم که ناهماهنگی‌ها در پیش‌بینی‌ها و احتمال رفتار فریبکارانه می‌تواند باعث انحراف برخی از کاربران از برنامه‌های پیش‌بینی‌شده‌شان شود، که ارزیابی اعتبار کاربران را ضروری می‌سازد.





توابع سود کاربران: در سطح بنیادی، تبادلات انرژی باید شامل تمام K ریزشبکه‌ها باشد، به طوری که تراکنش‌های کاربران در ریزشبکه‌هایی که در سطح بالاتر در تبادل انرژی مشارکت نمی‌کنند نیز در نظر گرفته شوند. برای مثال، فرض کنید یک ریزشبکه به نام m_k از مجموعه M داریم. حالا نحوه ساخت توابع سود برای کاربران آن ریزشبکه را بررسی می‌کنیم. در ابتدا، کاربران در m_k باید ارزیابی کنند که آیا انرژی خریداری کنند یا بفروشند، بر اساس راهنمای زیر:

$$Uti(u_n^k) = \text{سود بر اساس استراتژی‌های مصرف و تولید انرژی، با توجه به قیمت‌های بازار و دقت پیش‌بینی‌ها}$$

در اینجا، $Uti(u_n^k)$ تابع سود برای کاربر u_n^k در ریزشبکه m_k است که تصمیم می‌گیرد آیا انرژی خریداری کند یا بفروشد.

$$\begin{cases} P_n^k - C_n^k < 0, & u_n^k \in UB_k \\ P_n^k - C_n^k > 0, & u_n^k \in US_k \end{cases} \quad (9)$$

در این مدل، US_k و UB_k به ترتیب گروه‌های کاربران مشارکت‌کننده در خرید و فروش انرژی در داخل m_k را نشان می‌دهند. شرایطی که در آن $P_n^k - C_n^k = 0$ برقرار باشد، به این معنی است که کاربر u_n^k به استقلال انرژی دست یافته و در هیچ‌گونه فعالیت تجاری شرکت نمی‌کند. بنابراین، کاربران شرکت‌کننده در تبادل انرژی به دو دسته مجزا تقسیم می‌شوند. کاربران طبقه‌بندی شده در UB_k به عنوان u_b^k شناخته می‌شوند، که در آن نمایه b از ۱ تا B_k متغیر است، و B_k نشان‌دهنده تعداد کل کاربران در UB_k است. در مقابل، کاربران موجود در US_k به عنوان u_s^k مشخص می‌شوند، که نمایه s از ۱ تا S_k متغیر است، و S_k تعداد کل کاربران در US_k را نشان می‌دهد. به این ترتیب، مجموع B_k و S_k باید کمتر یا مساوی با N_k باشد. بر اساس معادله (۹)، انرژی به‌دست‌آمده توسط کاربر u_b^k به عنوان EB_b^k نشان داده می‌شود که می‌توان آن را به‌صورت زیر نوشت:

$EB_b^k = C_b^k - P_b^k$ این کاربر این امکان را دارد که انرژی را از هر دو منبع u_s^k و m_k تأمین کند. به‌طوری‌که $a(b,s)$ و $p(b,s)$ به ترتیب مقدار و هزینه انرژی دریافتی از u_s^k را نشان می‌دهند، در حالی که $a(b,m_k)$ و $p(b,m_k)$ مقدار و هزینه انرژی دریافتی از m_k را مشخص می‌کنند. طبق نتایج ارائه‌شده در [۳۰]، تابع سود کلی برای هر کاربر ترکیبی از سود حاصل از استفاده از انرژی و منافع حاصل از تبادل انرژی است.

بنابراین، توابع سود برای کاربرانی که در خرید انرژی مشارکت دارند، به‌صورت زیر ساختار بندی می‌شود:

$$Uti(u_b^k) = \lambda_b \ln(1 + C_b^k) - \sum_{s=1}^{S_k} a(b,s) \frac{p(b,s)}{Rep^t(s,b)} - a(b,m_k) \frac{p(b,m_k)}{Rep^t(m_k,b)} \quad (10)$$

$$\sum_{s=1}^{S_k} a(b,s) + a(b,m_k) = EB_b^k, \quad 1 \leq s \leq S \quad (11)$$

در این زمینه، λ_b نشان‌دهنده عامل وزنی مربوط به u_b^k است. متغیرهای $Rep^t(s,b)$ و $Rep^t(m_k,b)$ به ترتیب مقادیر اعتبار (شهرت) برای u_s^k و m_k در طول تراکنش‌های $(u_s^k \rightarrow u_b^k)$ و $(m_k \rightarrow u_b^k)$ در زمان t می‌باشند. شرط بیان‌شده در معادله (۱۱) اطمینان می‌دهد که انرژی به‌دست‌آمده توسط کاربر u_b^k با نیازهای مصرفی او هم‌راستا است. عبارت $\lambda_b \ln(1 + C_b^k)$ نشان‌دهنده منافع حاصل از مصرف انرژی برای (u_b^k) است.

هزینه‌های مربوط به به‌دست‌آوردن انرژی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$\sum_{s=1}^{S_k} a(b,s) \left(\frac{p(b,s)}{Rep^t(s,b)} \right) + a(b,m_k) \left(\frac{p(b,m_k)}{Rep^t(m_k,b)} \right)$ مشخص است که افزایش در امتیاز شهرت (Rep) منجر به کاهش هزینه‌ها می‌شود.

انرژی کلی که کاربر u_s^k می‌فروشد با ES_s^k نشان داده می‌شود که در معادله (۹) آمده است. این مقدار به‌صورت زیر نوشته می‌شود:





مقدار انرژی فروخته شده به m_k باشد و $p(s, m_k)$ قیمت مربوطه را نشان دهد، توابع سود برای کاربرانی که در فروش انرژی مشارکت دارند، به صورت زیر ساختار بندی می شود:

$$Uti(u_s^k) = \lambda_s \ln(1 + C_s^k) \quad (12)$$

$$+ \sum_{b=1}^{B_k} a(b, s) p(b, s) Rep^t(s, b) + a(s, m_k) p(s, m_k) Rep^t(s, m_k)$$

$$\sum_{b=1}^{B_k} a(b, s) + a(s, m_k) = ES_s^k, 1 \leq b \leq B \quad (13)$$

در این چارچوب، متغیر λ_s نشان دهنده ضریب اولویت مربوط به u_s^k است. معیار شهرت $Rep^t(s, m_k)$ به u_s^k در طول تراکنش ($u_s^k \rightarrow m_k$) در زمان خاص t ارتباط دارد. شرط بیان شده در معادله (13) اطمینان می دهد که میزان انرژی معامله شده توسط u_s^k با منابع انرژی در دسترس او هم راستا است. عبارت $\lambda_s \ln(1 + C_s^k)$ نشان دهنده منافع حاصل از استفاده انرژی توسط u_s^k را تعیین می کند. معادله $\left(a(b, s) p(b, s) \frac{1}{Rep^t(s, b)} + a(s, m_k) p(s, m_k) \frac{1}{Rep^t(s, m_k)} \right)$ در آمد حاصل از فروش انرژی توسط u_s^k را محاسبه می کند. در اینجا، افزایش در امتیاز شهرت (Rep) با افزایش درآمد همراه است. هنگامی که توابع سود $Uti(u_s^k)$ و $Uti(u_b^k)$ را توسعه می دهیم، مشاهده می شود که شهرت بالاتر باعث افزایش کل سود می شود، و این امر کاربران را ترغیب می کند تا برای بهبود شهرت خود تلاش کنند.

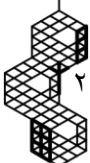
توابع سود MGO ها: هنگامی که یک میکرو شبکه به طور مستقل عمل می کند و از مشارکت در تبادلات انرژی سطح بالاتر خودداری می کند، از مشارکت در معاملات سطح پایین نیز اجتناب می کند، زیرا کاربران داخلی آن نیازهای خود را از طریق معاملات درون شبکه ای تأمین می کنند. به همین ترتیب، MGO هایی که در معاملات سطح پایین مشارکت دارند، می توانند به دو گروه متمایز تقسیم شوند: MB و MS.

ما فرایند را با تعیین توابع سود مربوط به میکرو شبکه های گروه MB که در معاملات انرژی در سطح پایین درگیر هستند، آغاز می کنیم. به عنوان مثال، میکرو شبکه m_i که انرژی را از میکرو شبکه های دیگر یا از Ma در سطح بالاتر به دست می آورد و سپس آن را به مصرف کنندگان خود می فروشد. این میکرو شبکه فقط با کاربرانی که به خرید انرژی نیاز دارند، تعامل می کند. برای نمایش کاربران در داخل میکرو شبکه m_i اجازه دهید u_b^i تعریف شود، جایی که $b \leq B_i$ و B_i تعداد کل کاربران خرید انرژی در میکرو شبکه m_i است. مقدار معامله ای که بین m_i و u_b^i رخ می دهد به صورت $a(b, m_i)$ نشان داده می شود و قیمت مربوطه با $p(b, m_i)$ مشخص می شود. در نتیجه، تابع سود میکرو شبکه m_i توسط تفاوت میان درآمد آن در سطح پایین و هزینه هایی که در سطح بالاتر متحمل می شود، تعریف می شود. از نظر ریاضی، تابع سود برای میکرو شبکه m_i به صورت زیر بیان می شود:

$$Uti'(m_i) = \sum_{b=1}^{B_i} a(b, m_i) p(b, m_i) Rep^t(m_i, b) - Co(m_i) \quad (14)$$

$$\sum_{b=1}^{B_i} a(b, m_i) = EB_i, 1 \leq b \leq B_i \quad (15)$$

در این زمینه، $Rep^t(m_i, b)$ نمایانگر ارزیابی قابلیت اطمینان میکرو شبکه m_i برای معامله ($m_i \rightarrow u_b^i$) در زمان t است. شرط ذکر شده در قید (15) تضمین می کند که میزان انرژی به دست آمده توسط m_i از سطح بالاتر معادل انرژی توزیع شده به کاربران داخل میکرو شبکه است. علاوه بر این، عبارت $\sum_{b=1}^{B_i} a(b, m_i) p(b, m_i) Rep^t(m_i, b)$ درآمد حاصل از تأمین انرژی توسط m_i به کاربران در سطح پایین را محاسبه می کند. $Co(m_i)$ بار مالی است که m_i زمانی که انرژی را از دیگر





اپراتورهای میکروشبکه (MGOها) و Ma در سطح بالاتر به دست می‌آورد، متحمل می‌شود. در نتیجه، $Uti^{\wedge}(m_i)$ درآمد کلی حاصل از فعالیت‌های m_i را منعکس می‌کند.

حال به فرمول‌بندی توابع سود برای میکروشبکه‌هایی می‌پردازیم که در تبادلات انرژی در سطح پایین شرکت دارند. برای مثال، میکروشبکه m_j انرژی را از کاربران در سطح پایین جمع‌آوری می‌کند و سپس آن را به میکروشبکه‌ها یا Ma در سطح بالاتر می‌فروشد. میکروشبکه m_j تنها به کاربران علاقه‌مند به فروش انرژی اختصاص دارد. اجازه دهید $u_s^{\wedge}j$ نمایانگر کاربران در میکروشبکه m_j باشد که قصد فروش انرژی دارند، جایی که $1 \leq s \leq S_j$ تعداد این کاربران را نشان می‌دهد. حجم معاملات بین m_j و کاربر $u_s^{\wedge}j$ به صورت $a(s, m_j)$ نمایش داده می‌شود و قیمت آن با $p(s, m_j)$ بیان می‌شود. تابع سود برای میکروشبکه m_j تفاوت میان درآمد حاصل در سطح بالاتر و هزینه‌هایی که در سطح پایین متحمل می‌شود را ارزیابی می‌کند. این نمایش ریاضی تابع سود برای m_j به صورت زیر است:

$$Uti^{\wedge}(m_j) = - \sum_{s=1}^{S_j} a(s, m_j) p(s, m_j) Rep^t(s, m_j) + \ln(m_j) \quad (16)$$

$$\sum_{s=1}^{S_j} a(s, m_j) = ES_j, \quad 1 \leq s \leq S_j \quad (17)$$

در این زمینه، $Rep^t(s, m_j)$ نمایانگر معیار اعتبار کاربر $u_s^{\wedge}j$ در معامله‌ای است که بین $u_s^{\wedge}j$ و m_j در زمان t انجام می‌شود. قید (17) تضمین می‌کند که مقدار انرژی تأمین‌شده توسط m_j در سطح بالاتر معادل انرژی به‌دست‌آمده از کاربران داخل میکروشبکه است. فرمول $\sum_{s=1}^{S_j} a(s, m_j) p(s, m_j) Rep^t(s, m_j)$ هزینه‌ای را که m_j برای خرید انرژی از کاربران در سطح پایین متحمل می‌شود، محاسبه می‌کند. علاوه بر این، $\ln(m_j)$ درآمد حاصل از فروش انرژی توسط m_j به دیگر اپراتورهای میکروشبکه (MGOs) و Ma در سطح بالاتر را نشان می‌دهد. در نتیجه، $Uti^{\wedge}(m_j)$ سود کل حاصل از فعالیت‌های m_j را ارزیابی می‌کند. هنگام ساختن $Uti^{\wedge}(m_i)$ و $Uti^{\wedge}(m_j)$ ، اعتبار کاربران یک عامل حیاتی است. اعتبار کاربران میزان قابلیت اطمینان آن‌ها را در انجام معاملات وعده داده‌شده ارزیابی می‌کند. از این رو، $Uti^{\wedge}(m_i)$ و $Uti^{\wedge}(m_j)$ سودآوری m_i و m_j را با در نظر گرفتن ریسک عدم انجام معاملات توسط کاربران طبق وعده‌هایشان اندازه‌گیری می‌کنند.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی

این بخش به بررسی اصول اساسی و ساختار ریاضی الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی (HOA) پرداخته و عملکرد این الگوریتم و کارایی محاسباتی آن را مورد تحلیل قرار می‌دهد. الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی (HOA) از چالش‌هایی الهام گرفته است که افراد هنگام صعود به قله‌های کوه‌ها، تپه‌ها یا صخره‌ها با آن‌ها مواجه می‌شوند، بسته به شرایط محیطی. در حین پیاده‌روی، افراد معمولاً به طور آگاهانه یا غریزی شیب زمین را مدنظر قرار می‌دهند. برای حفظ سرعتی ثابت، معمولاً از مسیرهای بسیار شیب‌دار اجتناب می‌کنند. شیب‌های تند و مسیرهای دشوار می‌توانند سرعت حرکت را کاهش دهند و مدت زمان پیاده‌روی را افزایش دهند. کوهنوردانی که با توپوگرافی منطقه آشنا هستند، قادرند زمان لازم برای رسیدن به قله را تخمین بزنند. این مفهوم مشابه فرآیند بهینه‌سازی است که در آن عامل‌ها تلاش می‌کنند تا به راه‌حل‌های بهینه محلی یا جهانی دست یابند. فضای جستجوی بهینه‌سازی یا چشم‌انداز آن می‌تواند با زمین‌های ناهمواری که کوهنوردان در مسیر خود با آن‌ها مواجه می‌شوند، مقایسه شود. همچنین، در فرآیند جستجو برای یافتن بهترین راه‌حل، عامل‌ها ممکن است به دلیل پیچیدگی مسئله در نواحی خاصی از فضای جستجو گیر کنند که این امر مشابه موانعی است که کوهنوردان ممکن است در مسیر خود با آن‌ها روبرو شوند و موجب کند شدن پیشرفت آن‌ها می‌شود. این رویکرد به بازسازی چالش‌های پیاده‌روی به عنوان راهی برای حل مسائل بهینه‌سازی پرداخته است. مبنای نظری الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی (HOA) از تابع کوهنوردی توپلر نشأت گرفته که توسط والدو توپلر، جغرافی‌دان و نقشه‌نگار آمریکایی-سوئیسی مطرح شده است. این تابع مدل





نمایی است که برای برآورد سرعت حرکت یک کوهنورد با در نظر گرفتن شیب یا گرادیان مسیر استفاده می‌شود. مرجع [۲۳] فرمول‌بندی ریاضی تابع کوهنوردی توپلر را ارائه داده است:

$$\mathcal{W}_{i,t} = 6e^{-3.5|S_{i,t}+0.05|} \quad (۱۸)$$

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:

$$S_{i,t} = \frac{dh}{dx} = \tan \theta_{i,t} \quad (۱۹)$$

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

$$\mathcal{W}_{i,t} = \mathcal{W}_{i,t-1} + \gamma_{i,t}(\beta_{\text{best}} - \alpha_{i,t}\beta_{i,t}) \quad (۲۰)$$

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 sweep (SF) برای کوهنورد i است که در بازه $[1, 3]$ محدود می‌شود. عامل SF به کوهنورد کمک می‌کند تا به موقعیت پیشرو نزدیک بماند و مسیر پیشرو را دنبال کرده و با سیگنال‌های ارسال شده توسط او ارتباط برقرار کند. با توجه به سرعت کوهنورد i در معادله (۱۸)، موقعیت جدید $\beta_{i,t+1}$ برای کوهنورد i به شکل زیر محاسبه می‌شود:

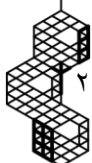
$$\beta_{i,t+1} = \beta_{i,t} + \mathcal{W}_{i,t} \quad (۲۱)$$

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

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

$$\beta_{i,t} = \phi_j^1 + \delta_j(\phi_j^2 - \phi_j^1) \quad (۲۲)$$

δ_j مقداری است که به طور تصادفی از یک توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ انتخاب می‌شود. همچنین، ϕ_j^1 و ϕ_j^2 به ترتیب حداقل و حداکثر مقادیر متغیر تصمیم‌گیری j در مسئله بهینه‌سازی را نشان می‌دهند. عامل فاکتور جارو (SF) پارامتر مهمی است که تعادل بین جستجو و بهره‌برداری را در الگوریتم HOA تنظیم می‌کند. این عامل مشخص می‌کند که تا چه میزان رهبر از سایر شرکت‌کنندگان فاصله می‌گیرد، همان‌طور که در معادله (۲۰) توضیح داده شده است. همچنین، شیب مسیر بر سرعت حرکت کوهنوردان تأثیرگذار است، همان‌طور که در معادلات (۱۸) و (۱۹) شرح داده شده، و تأثیر قابل توجهی بر فعالیت‌های جستجو و بهره‌برداری HOA دارد. با افزایش دامنه SF، HOA بیشتر به سمت بهره‌برداری از راه‌حل‌های موجود تمایل پیدا می‌کند. در مقابل، کاهش دامنه SF باعث می‌شود HOA بر جستجو و یافتن راه‌حل‌های جدید تمرکز کند. همچنین، شیب کمتر مسیر باعث می‌شود HOA بیشتر به بهره‌برداری از راه‌حل‌های شناخته‌شده گرایش پیدا کند. تمامی این عوامل تأثیر مهمی در رفتار و کارایی HOA در مواجهه با چالش‌های بهینه‌سازی





دارند، HOA یک روش جستجوی جهانی است که برای کاوش در فضای راه‌حل‌های یک مسئله بهینه‌سازی طراحی شده است و الهام گرفته از نحوه حرکت کوهنوردان در مسیرهای مختلف می‌باشد. برای شروع پیاده‌روی، نقاط شروع تمامی کوهنوردان تعیین می‌شود و با استفاده از تابع پیاده‌روی توپلر، موقعیت‌های جدید آن‌ها پس از مدت زمان مشخص پیش‌بینی می‌شود. عملکرد هر کوهنورد ارزیابی می‌شود و بهترین عملکرد به عنوان رهبر انتخاب می‌گردد. در هر تکرار، موقعیت رهبر مجدداً ارزیابی می‌شود تا اطمینان حاصل شود که بهترین کوهنورد همیشه در مقام رهبری قرار دارد. پیچیدگی محاسباتی HOA با نماد O بزرگ مشخص می‌شود که محدوده بالای نیازهای منابع الگوریتم را تعیین 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 $O(T \cdot I)$ نمایش داده می‌شود، که در آن T نمایانگر حداکثر تعداد تکرارها یا زمان صرف‌شده در فرآیند پیاده‌روی است و I تعداد کل کوهنوردان مشارکت‌کننده در فرآیند را نشان می‌دهد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

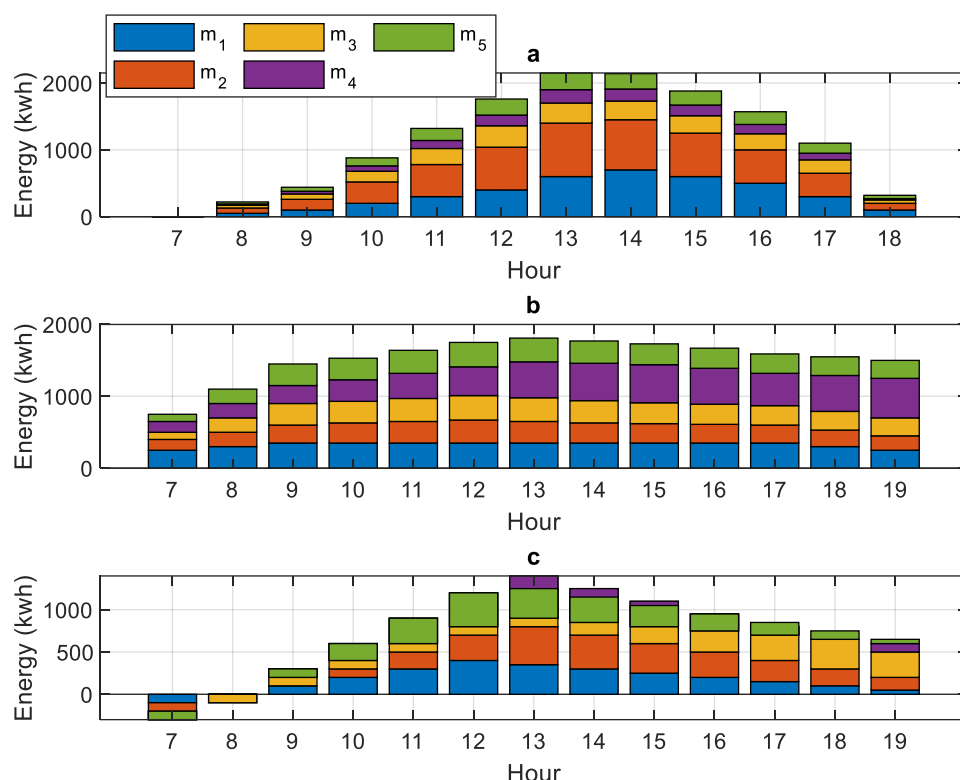
در این بخش، عملکرد مدل پیشنهادی خود را با استفاده از داده‌های واقعی جمع‌آوری‌شده در طول یک ماه از ۲۵ کاربر مستقر در پنج ریزشبکه در استان گویزو، چین، ارزیابی می‌کنیم. این کاربران از فناوری‌های اینترنت اشیا مانند کنترهای هوشمند، حسگرهای دما و آشکارسازهای نور برای نظارت بر مصرف انرژی، نوسانات دما، سطح نور و سایر پارامترهای کلیدی مورد نیاز برای پیش‌بینی تولید انرژی استفاده می‌کنند. برخی از این کاربران به عنوان گره‌های تولیدکننده (GNUs) و برخی دیگر به عنوان واحدهای توزیع انرژی (DEUs) عمل می‌کنند. با توجه به اینکه ریزشبکه‌ها در شعاع ۲ کیلومتری از یکدیگر قرار دارند، تلفات انرژی در طول انتقال بی‌اهمیت در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای کلیدی مدل شامل $\alpha = 80.121$ ، $\beta = 20.94$ ، $\delta = 0.025$ ، $\tau = 0.8$ و مقدار اولیه اعتبار (" R_epini ") برابر با ۰.۸ است. بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده، ما انرژی را به قیمت ۱ kWh/¥ خریداری کرده و به قیمت ۲ kWh/¥ می‌فروشیم.

ما یک معماری چند زنجیره‌ای بلاکچین به‌طور خاص برای اعتبارسنجی تراکنش‌ها در سیستم تجارت انرژی طراحی کرده‌ایم. این معماری از یک زنجیره بلاکچین مرکزی و پنج زنجیره جانبی پشتیبانی می‌کند. زنجیره بلاکچین مرکزی به عنوان مدل کنسرسیوم عمل می‌کند که شامل پنج گره MGO و یک گره Ma است و بر روی Fabric^۱ ساخته شده است و بهبودهای سفارشی‌شده‌ای مانند ادغام کیف پول و پشتیبانی از ارزهای دیجیتال را شامل می‌شود. مکانیزم اجماع استفاده‌شده در زنجیره بلاکچین مرکزی، تحمل خطای بیزانسی عملی (PBFT) است که توسط پنج گره MGO مدیریت می‌شود، در حالی که گره Ma فرآیند را نظارت می‌کند بدون اینکه مستقیماً در اجماع مشارکت کند. هر ریزشبکه یک زنجیره جانبی مبتنی بر نسخه محلی‌شده اتریوم را اجرا می‌کند که در مجموع پنج زنجیره جانبی خواهد بود. هر یک از این زنجیره‌های جانبی شامل شش گره است: پنج گره کاربر و یک گره MGO، و از الگوریتم اجماع نمایندگی اثبات شهرت (DPoR) استفاده می‌کند. قراردادهای هوشمند در زنجیره بلاکچین اصلی به زبان JAVA نوشته شده‌اند، در حالی که قراردادهای هوشمند برای زنجیره‌های جانبی به زبان Solidity نوشته و برای اجرا از طریق JAVA بسته‌بندی شده‌اند.

برای تسهیل ارتباط میان زنجیره اصلی و زنجیره‌های جانبی، از فناوری پیوند دوطرفه^{۱۶} با استفاده از فناوری تایید پرداخت ساده (SPV) بهره می‌بریم. پیاده‌سازی SPV بر اساس روش‌های ذکرشده در [۳۳] و متناسب با سیستم تجاری دوعاملی انرژی است. این ساختار شامل ناظران در هر دو زنجیره اصلی و جانبی است که جزئیات تراکنش‌های مربوط به آدرس‌های خاص را نظارت می‌کنند. امضاکنندگان مسئول ایجاد اثبات‌های SPV هستند، در حالی که یک سرویس ذخیره‌سازی کلید خصوصی وظیفه مدیریت کلیدهای خصوصی و انجام عملیات امضا را بر عهده دارد. پردازش و تأیید تراکنش‌ها با استفاده از ارز NRGcoin به عنوان پاداش انجام می‌شود. تمامی آزمایش‌های انجام‌شده در این مطالعه با استفاده از این چارچوب بلاکچین انجام شده است.

پس از بررسی دقیق، مشاهده می‌شود که کاربران الگوهای تولید و مصرف روزانه بسیار پایداری دارند. برای نشان دادن این روند روزانه مشترک، یک روز خاص به صورت تصادفی انتخاب شده است. در شکل (۳)، نمودارها تولید انرژی، مصرف انرژی و انرژی خالص (که به عنوان تفاوت بین تولید انرژی و مصرف انرژی تعریف شده است) برای آن روز خاص را نشان می‌دهند.



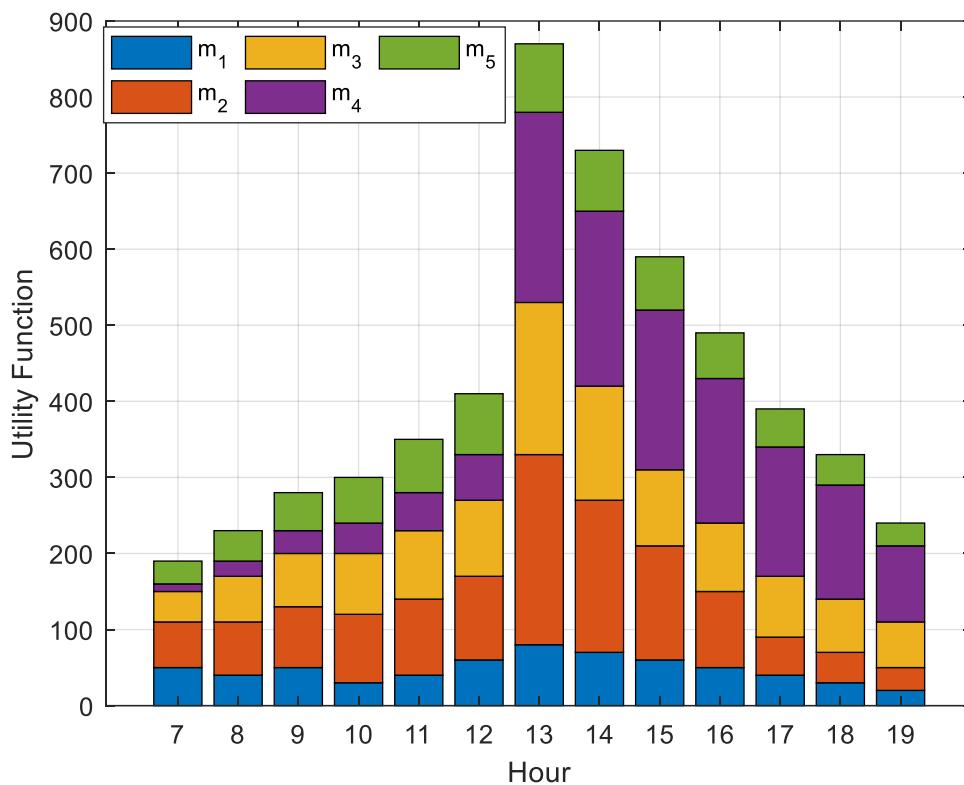


شکل (۳): (الف) تولید انرژی، (ب) مصرف انرژی، و (ج) تعادل انرژی تولید شده و مصرف شده نشان داده شده است

شکل (۴) تابع‌های مطلوبیت پنج اپراتور ریزشبکه (MGO) شرکت‌کننده در فرآیند معاملات انرژی در سطح بالا را نشان می‌دهد. هر دو شکل (۳) و (۴) کاهش تابع‌های مطلوبیت MGOs را با افزایش حجم معاملات انرژی تجدیدپذیر نشان می‌دهند. تحلیل دقیق‌تر این روند در بخش بعدی ارائه شده است. در ساعات صبح (۷:۰۰-۹:۰۰) و عصر (۱۷:۰۰-۱۹:۰۰)، تولید انرژی تجدیدپذیر حداقل بوده و تأمین انرژی عمدتاً توسط Ma انجام می‌شود. بنابراین، تابع‌های مطلوبیت MGOs در این ساعات پایین است. به طور خاص، در ساعت ۱۹:۰۰، تولید انرژی کاربران کمتر از تقاضای مصرف آن‌ها است. برای تأمین نیازهای انرژی کاربران، MGOs مجبور به خرید انرژی از Ma و فروش آن به کاربران با همان قیمت هستند، که این امر به مطلوبیت حداقلی منجر می‌شود. در بازه زمانی ظهر تا ساعت ۱۴:۰۰، منابع انرژی توزیع‌شده (DERs) انرژی بیشتری تولید می‌کنند، که منجر به افزایش معاملات انرژی بین MGOs می‌شود. در نتیجه، تابع‌های مطلوبیت MGOs افزایش می‌یابند، به‌ویژه برای m_3 و m_4 که شاخص‌تر هستند. به طور کلی، معامله حجم کمتری از انرژی خالص و مقادیر بیشتری از انرژی تولید شده توسط DERs، منجر به افزایش مقدار تابع مطلوبیت می‌شود.

ریزشبکه‌های مورد آزمایش به دو گروه تقسیم می‌شوند: m_1 و m_3 که تولید انرژی تجدیدپذیر بالایی دارند، و m_2 ، m_4 و m_5 که تولید انرژی تجدیدپذیر آن‌ها نسبتاً کمتر است. برای نمایش بهتر، ریزشبکه‌های m_3 و m_5 انتخاب شده‌اند تا تغییرات در تابع‌های مطلوبیت کاربران نشان داده شود.

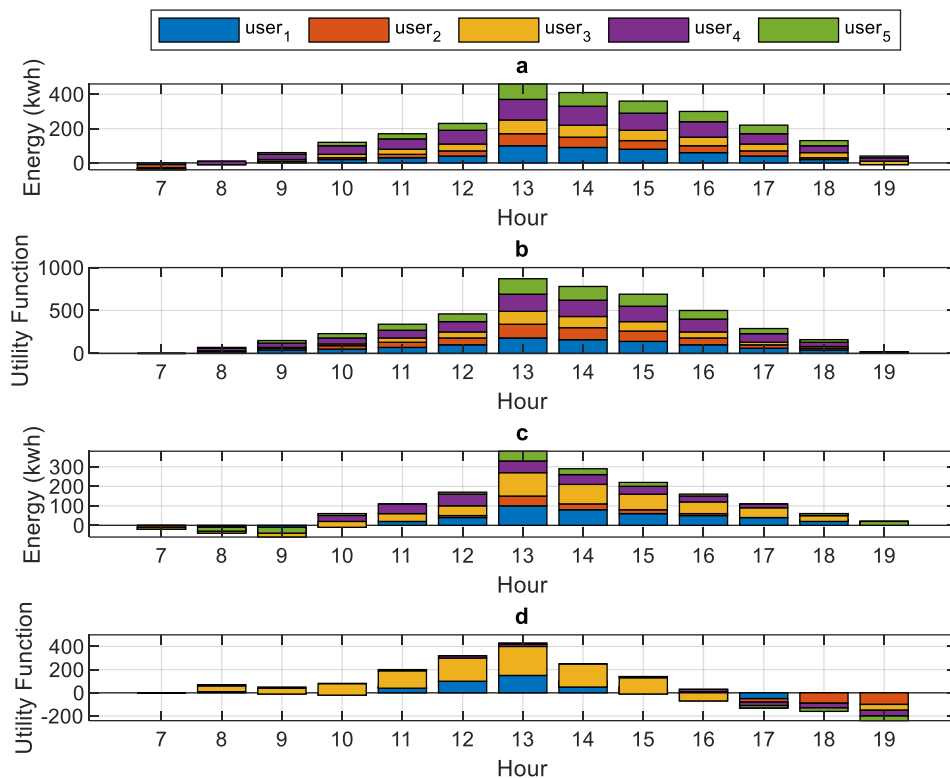




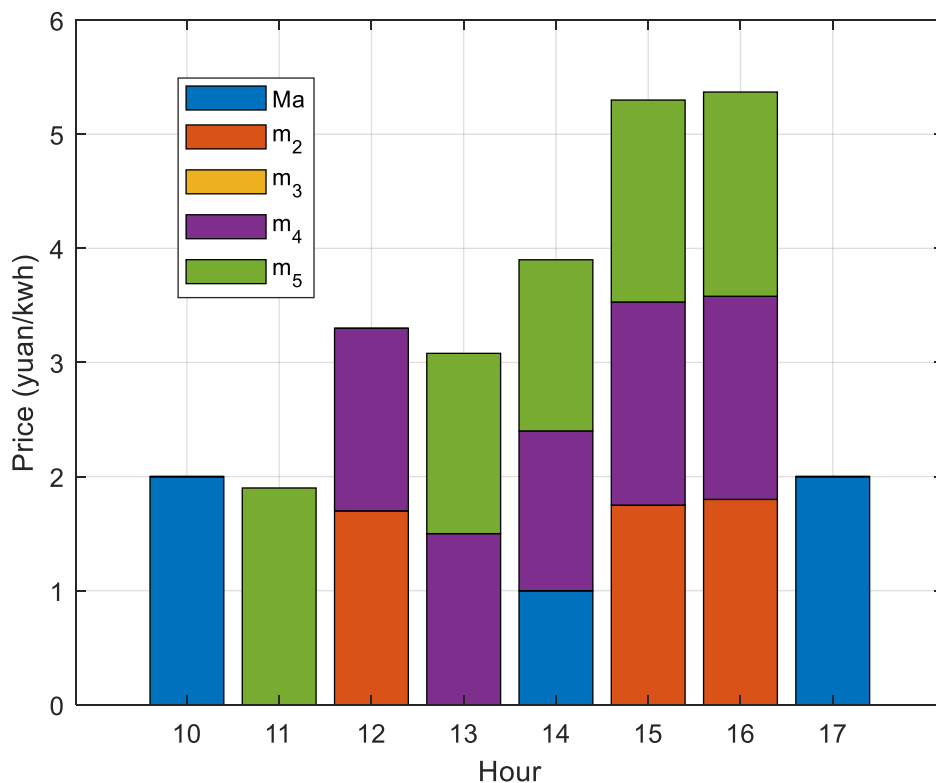
شکل (۴): توابع سودمند اپراتورهای ریزشک

در شکل (۵)، رابطه بین انرژی خالص و تابع‌های مطلوبیت کاربران در ریزشک‌های m_3 و m_5 نمایش داده شده است. بین تابع مطلوبیت و انرژی خالص یک همبستگی مستقیم وجود دارد؛ به گونه‌ای که با افزایش فروش انرژی توسط کاربران، مقدار مطلوبیت آن‌ها به طور متناسب افزایش می‌یابد.

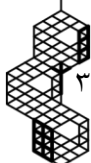
قیمت‌گذاری معاملات انرژی در چارچوب ما به پویایی عرضه و تقاضای منابع انرژی توزیع‌شده (DER) در بازار محلی وابسته است. این رابطه در شکل (۶) نمایش داده شده است که میانگین قیمت معاملات انرژی بین ریزشک‌های m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 و Ma را در دوره‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که در ساعات ابتدایی صبح (۷:۰۰ تا ۹:۰۰) و عصر (۱۷:۰۰ تا ۱۹:۰۰)، قیمت معاملات انرژی به دلیل کاهش تولید منابع انرژی توزیع‌شده افزایش قابل توجهی دارد. در مقابل، در ساعات ظهر (۱۲:۰۰ تا ۱۴:۰۰) با افزایش تولید DER، قیمت‌ها کاهش می‌یابد. مشاهده‌ای مهم در ساعت ۱۴:۰۰ رخ می‌دهد که میانگین قیمت معاملات انرژی به 1.1 kWh کاهش می‌یابد، که به طور قابل توجهی کمتر از نرخ 2 kWh تعیین‌شده توسط Ma است. برای نشان دادن برتری مدل ما، عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی پیاده‌روی (HOA) را در مقایسه با الگوریتم NSGA و مدل جزیره‌ای [۱۸] بررسی کردیم. الگوریتم NSGA تجارت انرژی بین ریزشک‌ها را برای بهینه‌سازی منافع آنها تسهیل می‌کند. مطلوبیت‌های خروجی مدل ما با روش معرفی‌شده در [۳۴] ارزیابی و مقایسه شدند. شکل (۷) یافته‌های این تحلیل را نشان می‌دهد و مقایسه میانگین تابع‌های مطلوبیت برای پنج ریزشک مختلف را با استفاده از روش ما در مقابل الگوریتم NSGA^{۱۷} مرجع در [۳۴] ارائه می‌کند. تابع مطلوبیت هر ریزشک به صورت ساعتی از ۷ صبح تا ۷ عصر طی یک ماه ثبت و میانگین‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهند که روش ما عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم NSGA دارد و باعث بهبود ۲۳.۹۸ درصدی در میانگین تابع‌های مطلوبیت اپراتورهای ریزشک شده است. علاوه بر این، روش ما در یک محیط کاملاً رقابتی کار می‌کند و تأثیر Ma بر قیمت‌گذاری معاملات انرژی را در نظر می‌گیرد، که عملی بودن و کارایی آن را افزایش می‌دهد.

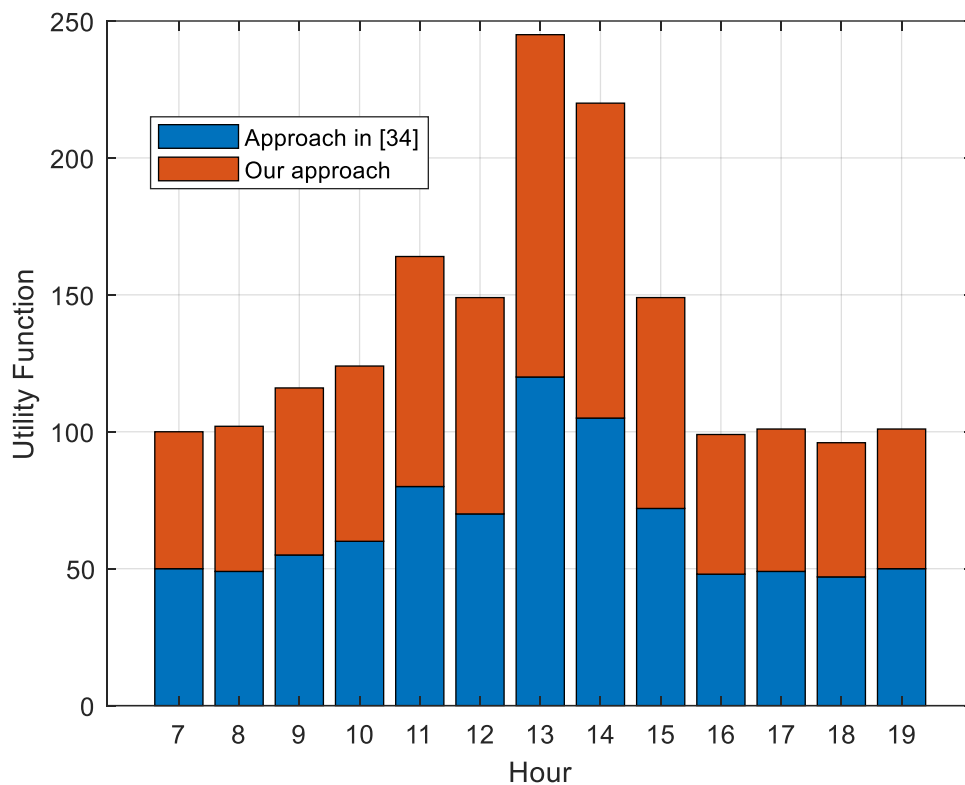


شکل (۵): پویایی تولید انرژی، مصرف و انرژی تامین شده توسط ریزشبه را نشان می دهد. پانل (a) کل انرژی در دسترس کاربران را بر حسب m_3 نمایش می دهد. پانل (b) توابع ابزار قابل اجرا برای کاربران در m_3 را نشان می دهد. پانل (c) انرژی خالص قابل دسترسی کاربران را در m_5 نشان می دهد. در نهایت، پانل (d) توابع ابزار مربوط به کاربران را در m_5 به تصویر می کشد



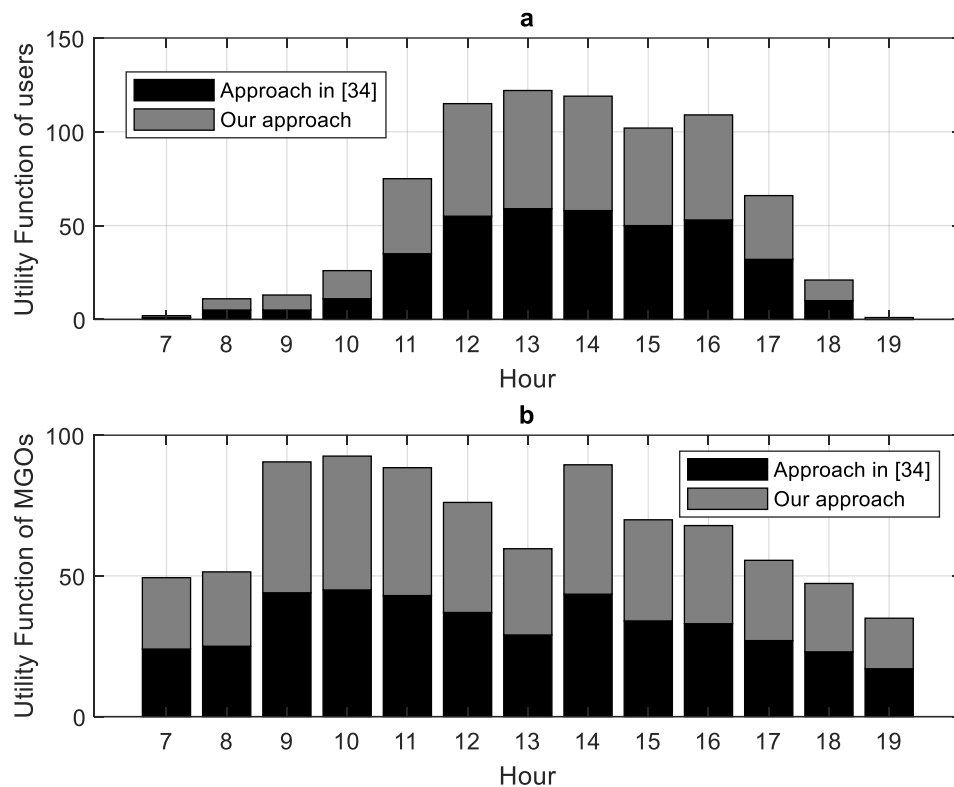
شکل (۶): قیمت های مرتبط با تجارت انرژی برای m_1



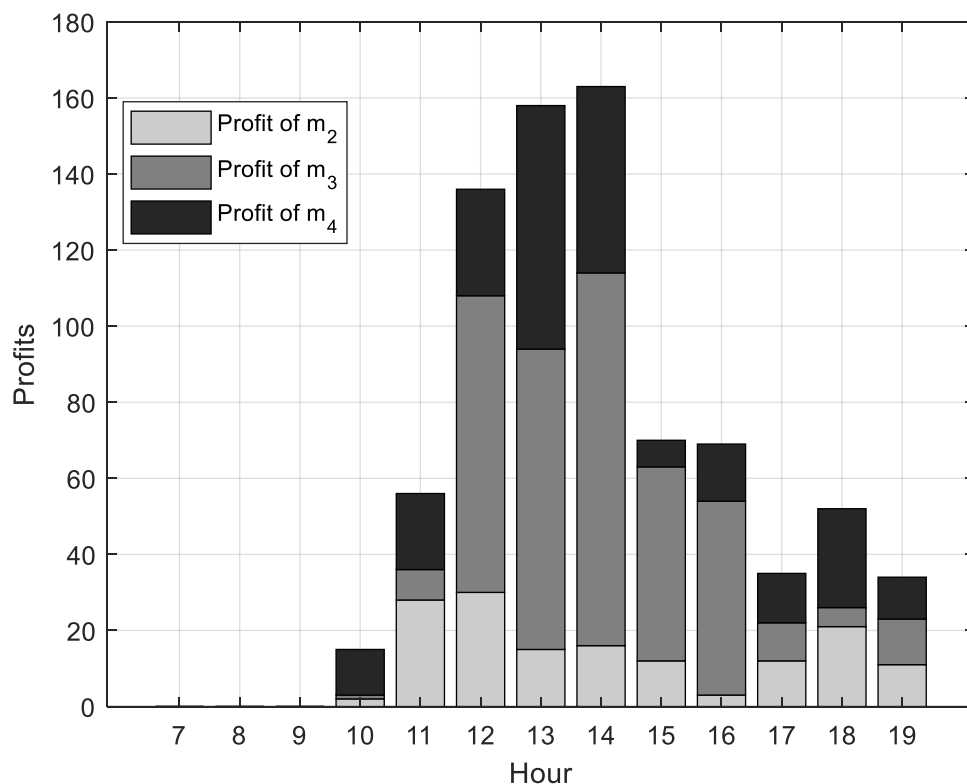


شکل (۷): در زمینه ریزشبکه‌ها، ما جنبه‌های تولید انرژی، استفاده و انرژی ارائه شده توسط سیستم ریزشبکه را بررسی می‌کنیم. (الف) کل انرژی در دسترس مصرف‌کنندگان بر حسب m_3 . (ب) توابع سود برای مصرف‌کنندگان در m_3 . (ج) کل انرژی قابل دسترسی مصرف‌کنندگان بر حسب m_5 . (د) توابع سود برای مصرف‌کنندگان در m_5 .

در مدل جزیره‌ای، تعاملات بین کاربران و اپراتورهای ریزشبکه در داخل یک ریزشبکه به‌منظور بهینه‌سازی منافع انجام می‌شود. برای ارزیابی عملکرد، مزایای کاربران و اپراتورها در چارچوب پیشنهادی ما با چارچوب معرفی‌شده در [۱۸] مقایسه شدند. نتایج آزمایش‌ها در شکل (۸) ارائه شده است که تفاوت‌های میان روش ما و مدل مورد بحث در [۱۸] را در رابطه با میانگین تابع‌های مطلوبیت کاربران و اپراتورها نشان می‌دهد. در طول یک ماه، داده‌های ساعتی حداکثر مقادیر مطلوبیت برای هر کاربر و اپراتور ریزشبکه (MGO) جمع‌آوری و میانگین آنها محاسبه شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که الگوریتم معرفی‌شده در این پژوهش عملکردی فراتر از انتظارات داشته است. در مقایسه با مدل جزیره‌ای، روش ما میانگین مقادیر مطلوبیت کاربران و اپراتورها را از ۱۷.۳ و ۲۸.۲ به ۳۱.۴ و ۳۸.۹۸ افزایش داده است، که به‌ترتیب ۹۶.۲٪ و ۳۴.۵۸٪ افزایش را نشان می‌دهد. برخلاف روش مدیریت متمرکز در [۱۸]، مدل ما به اپراتورهای ریزشبکه امکان می‌دهد انرژی مازاد یا استفاده‌نشده را با سایر اپراتورها مبادله کنند، که در مقایسه با معامله تنها با Ma انعطاف‌پذیری بیشتری در قیمت‌گذاری ایجاد می‌کند. این انعطاف‌پذیری سودآوری اپراتورها را افزایش می‌دهد. برای نشان دادن سودآوری اپراتورهای ریزشبکه، شکل (۹) ارائه شده است. این شکل درآمد اپراتورهای چندشبکه‌ای (MGOS) در ریزشبکه‌های ۲ تا ۴ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های (۹) و (۳) مشاهده می‌شود، سودآوری اپراتورها رابطه مستقیمی با حجم انرژی تجدیدپذیر مبادله‌شده دارد، که این موضوع آنها را به سرمایه‌گذاری در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر تشویق می‌کند.



شکل (۸): مقایسه ای از توابع ابزار برای کاربران و اپراتورهای ریزشبکه (MGOs) در هر دو مدل دو لایه ما و مدل جزیره ای اشاره شده در [۱۴] را نشان می دهد. بخش (الف) بر عملکردهای سودمند کاربران تمرکز دارد، در حالی که بخش (ب) عملکرد MGO ها را بررسی می کند.



شکل (۹): درآمد اپراتورهای چندشبکه ای در ریزشبکه های ۲ تا ۴.





نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی و الگوریتم مورد استفاده در مقایسه با مدل‌های مشابه، به‌طور قابل توجهی عملکرد بهتری در بهبود مقادیر مطلوبیت کاربران و اپراتورهای ریزشبه داشته است. به‌طور خاص، این روش توانسته است مقادیر متوسط مطلوبیت کاربران را تا ۹۶.۲ درصد و مقادیر متوسط مطلوبیت اپراتورها را تا ۳۴.۵۸ درصد افزایش دهد. این پیشرفت‌ها ناشی از برتری ساختاری رویکرد در ارائه انعطاف‌پذیری بیشتر در قیمت‌گذاری و امکان معامله مستقیم انرژی مازاد یا کمبود انرژی بین اپراتورهای ریزشبه که به جای وابستگی صرف به شبکه اصلی است، که سودآوری اپراتورها را به میزان قابل توجهی ارتقا داده است. الگوریتم به کاررفته در این مطالعه نیز نقش کلیدی در دستیابی به این نتایج داشته است. این الگوریتم با ایجاد تعادل بهینه بین جستجو و بهره‌برداری، و نیز توانایی مدیریت همزمان چندین معیار در فرآیند تصمیم‌گیری، موفق شده است تعاملات انرژی را به شکلی بهینه‌سازی کند که منافع تمام طرف‌ها حداکثر شود. این ویژگی‌ها باعث شده که الگوریتم مورد استفاده برتری قابل توجهی نسبت به روش‌های پیشین، از جمله مدل جزیره‌ای و الگوریتم‌های چندهدفه، داشته باشد. علاوه بر این، رابطه مستقیم میان حجم انرژی تجدیدپذیر معامله‌شده و سودآوری اپراتورها مشاهده شد، به گونه‌ای که افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر منجر به افزایش سودآوری اپراتورهای ریزشبه شد. این امر انگیزه‌ای قوی برای سرمایه‌گذاری در توسعه و به کارگیری فناوری‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر ایجاد می‌کند و در عین حال بهره‌وری کلی سیستم را نیز بهبود می‌بخشد. در مجموع، رویکرد و الگوریتم پیشنهادی نه تنها موجب بهینه‌سازی تعاملات انرژی و بهبود سودآوری می‌شود، بلکه نقش مهمی در ارتقای پایداری محیط‌زیستی از طریق ترویج استفاده از منابع تجدیدپذیر ایفا می‌کند و می‌تواند به عنوان یک مدل موفق در دیگر مناطق نیز مورد استفاده قرار گیرد. علی‌رغم عملکرد بهینه و نتایج امیدوارکننده مدل پیشنهادی، محدودیت‌هایی وجود دارد که می‌توانند در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرند:

۱. **وابستگی به داده‌های دقیق پیش‌بینی:** دقت عملکرد مدل تا حد زیادی به صحت داده‌های پیش‌بینی شده تولید و مصرف انرژی وابسته است. خطاهای پیش‌بینی، به‌ویژه در شرایط آب‌وهوایی متغیر، می‌توانند عملکرد بهینه‌سازی را تحت تأثیر قرار دهند.
۲. **محدودیت‌های محاسباتی در مقیاس‌های بزرگ:** با افزایش تعداد کاربران و ریزشبه‌ها، پیچیدگی محاسباتی مدل و الگوریتم HOA ممکن است افزایش یابد. این موضوع می‌تواند نیازمند منابع محاسباتی بیشتری باشد که ممکن است در برخی کاربردها به صرفه نباشد.
۳. **چالش‌های فنی در اجرای چندبلاک‌چین:** در حالی که فناوری چندبلاک‌چین امنیت و شفافیت تراکنش‌ها را افزایش می‌دهد، هماهنگی میان زنجیره‌های اصلی و جانبی ممکن است منجر به تأخیر در ثبت تراکنش‌ها و افزایش هزینه‌های عملیاتی شود.
۴. **محدودیت در مقیاس‌پذیری:** مدل فعلی برای شبکه‌های کوچک و متوسط طراحی شده است و اثربخشی آن در شبکه‌های بسیار بزرگ یا توزیع‌شده جهانی نیاز به ارزیابی بیشتر دارد.
۵. **تأثیرپذیری از سیاست‌های انرژی و مقررات محلی:** موفقیت این مدل به شدت به شرایط قانونی و سیاست‌های حاکم بر بازار انرژی وابسته است. تغییرات در این سیاست‌ها می‌تواند محدودیت‌هایی در پذیرش مدل ایجاد کند.
۶. **عدم در نظر گرفتن برخی عوامل زیست‌محیطی و اجتماعی:** مدل بر بهینه‌سازی اقتصادی و امنیتی تمرکز دارد و تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی ناشی از اجرای آن به‌طور جامع بررسی نشده است.

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه سیستمی نوین برای مدیریت تبادلات انرژی در ریزشبه‌های دولایه ارائه داد که از الگوریتم بهینه‌سازی کوهنوردی (HOA) و فناوری چندبلاک‌چین بهره می‌برد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های واقعی نشان داد که مدل پیشنهادی در بهینه‌سازی هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری کاربران و اپراتورهای ریزشبه مؤثر بوده است. به‌طور خاص، مطلوبیت کاربران را تا ۹۶.۲٪ و مطلوبیت اپراتورها را تا ۳۴.۵۸٪ نسبت به روش‌های مرجع بهبود یافت. همچنین، با استفاده از منابع انرژی توزیع‌شده، هزینه معاملات انرژی تا ۴۵٪ کاهش یافت. الگوریتم HOA با همگرایی سریع‌تر، پایداری بیشتر، و کارایی محاسباتی بالاتر نسبت به الگوریتم‌های

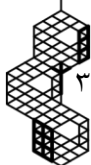




سنتی مانند NSGA، توانست به راه‌حلی جامع‌تر برای مدیریت انرژی در شرایط رقابتی دست یابد. از سوی دیگر، بهره‌گیری از فناوری چندبلاک‌چین به‌طور قابل توجهی امنیت و شفافیت تراکنش‌های انرژی را افزایش داد، که این موضوع به جلب اعتماد کاربران و کاهش احتمال رفتارهای مخرب کمک کرد. این دستاوردها نشان‌دهنده ظرفیت بالای مدل پیشنهادی برای پیاده‌سازی در مقیاس‌های مختلف از ریزشبکه‌ها و بهبود پایداری انرژی است. استفاده از این مدل می‌تواند به اپراتورها کمک کند تا بهره‌وری را افزایش دهند، هزینه‌ها را کاهش دهند و در عین حال به اهداف زیست‌محیطی دست یابند. در آینده، گسترش مدل پیشنهادی به سیستم‌های بزرگ‌تر و ترکیب فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند هوش مصنوعی و یادگیری عمیق می‌تواند افق‌های جدیدی در مدیریت انرژی باز کند. همچنین، بررسی تأثیرات اجتماعی و اقتصادی این مدل در مناطق جغرافیایی مختلف می‌تواند زمینه‌ای برای تحقیقات بیشتر باشد.

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," *J. Clean. Prod.*, 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, Y. Zhou, Z. Lin, S. Zhu, R. Qiu, Y. Chen, and J. Yan, "Robust energy management through aggregation of flexible resources in multi-home micro energy hub," *Appl. 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 Convers. Manag.*, 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," *Sust. Cities Soc.*, 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," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 202, art. no. 114648, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114648.
- [8] R. Xu, S. Khan, W. Jin, A. N. Khan, Q. W. Khan, S. Lim, and D. H. Kim, "A decentralized federated learning based interoperable and heterogeneity aware predictive optimization method for energy and comfort in smart homes environment," *Appl. Soft Comput.*, 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," *Environ. Technol. Innov.*, 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 Syst. J.*, 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," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 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 Trans. Sustain. 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," *Sol. 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," *Appl. 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," *Appl. 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 Syst. with Appl.*, 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," *Knowl.-Based Syst.*, vol. 296, art. no. 111880, 2024, doi: 10.1016/j.knosys.2024.111880.
- [24] M. Liu, M. Wang, J. Men, and D. Yang, "Microgrid trading game model based on blockchain technology and optimized particle swarm algorithm," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 225602–225612, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3009697.
- [25] M. Goranović, M. Meisel, L. Fotiadis, S. Wilker, A. Treytl, and T. Sauter, "Blockchain applications in microgrids: An overview of current projects and concepts," in *Proc. 43rd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, Oct. 2017, pp. 6153–6158.
- [26] J. Yang, A. Paudel, and H. B. Gooi, "Compensation for power loss by a proof-of-stake consortium blockchain microgrid," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 17, no. 5, pp. 3253–3262, May 2020, doi: 10.1109/TII.2020.2977213.
- [27] J. M. Sukhwani, J. M. Martinez, X. Chang, K. S. Trivedi, and A. Rindos, "Performance modeling of PBFT consensus process for permissioned blockchain network (Hyperledger Fabric)," in *Proc. IEEE 36th Symp. Rel. Distrib. Syst. (SRDS)*, Sep. 2017, pp. 253–255.
- [28] N. Kobitz, A. Menezes, and S. A. Vanstone, "The state of elliptic curve cryptography," *Designs Codes Cryptogr.*, vol. 19, no. 2, pp. 173–193, 2000, doi: 10.1023/A:1010007512298.
- [29] V. G. Martínez, L. H. Encinas, and A. Q. Dios, "Security and practical considerations when implementing the elliptic curve integrated encryption scheme," *Cryptologia*, vol. 39, no. 3, pp. 244–269, Jul. 2015, doi: 10.1007/s10516-015-9346-6.
- [30] W. Tushar *et al.*, "Three-party energy management with distributed energy resources in smart grid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 4, pp. 2487–2498, Apr. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2369123.
- [31] L. Norton, R. Simon, H. D. Brereton, and A. Bogden, "Predicting the course of gompertzian growth," *Nature*, vol. 264, no. 5586, pp. 542–545, 1976.
- [32] S. Xian and X. Feng, "Meerkat optimization algorithm: A new meta-heuristic optimization algorithm for solving constrained engineering problems," *Expert Syst. with Appl.*, vol. 231, art. no. 120482, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2023.120482.
- [33] Y. Gu, S. Shi, and M. Jiang, "Network payment system based on hybrid cross-chain," U.S. Patent 10,363,623, 2020.





- [34] X. Huang, Y. Zhang, D. Li, and L. Han, "A solution for bilayer energy-trading management in microgrids using multiblockchain," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 15, pp. 13886–13900, Aug. 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3142815.
- [35] A. Mouat and R. Tamagawa, "Docker," Amazon, Tech. Rep., 2016. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/docker/> [Accessed: Sep. 22, 2023].
- [36] V. Kulkarni, S. Surwase, K. Pingale, S. Sarage, and A. Karve, "Prediction of disease using machine learning," *IRJET*, vol. 7, no. 5, pp. 56–72, May 2020.
- [37] M. M. H. Onik, S. Aich, J. Yang, C. Kim, and H. Kim, "Blockchain in healthcare: Challenges and solutions," in *Big Data Analytics for Intelligent Healthcare Management*, New York, NY, USA: Academic, 2019, ch. 8, pp. 197–226.
- [38] T. Mudarri and S. A. Al-Rabeei, "Security fundamentals: Access control models," *Interdisciplinarity Theory Pract.*, pp. 1–4, Aug. 2015.

زیر نویس ها

-
- ¹ Renewable energy
 - ² Microgrid
 - ³ Hiking Optimization Algorithm
 - ⁴ Blockchain
 - ⁵ Microgrid operator
 - ⁶ multi-blockchain
 - ⁷ Distributed energy resource
 - ⁸ General user
 - ⁹ Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)
 - ¹⁰ Dynamic Partial Order Reduction (DPOR)
 - ¹¹ Simplified Payment Verification
 - ¹² Public Key
 - ¹³ Secret key
 - ¹⁴ Wallet
 - ¹⁵ Elliptic Curve Cryptography
 - ¹⁶ Two-way Pegging
 - ¹⁷ Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

