Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 49-61

Vol. 13/ No. 4/ Winter 2025
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

A Two-Stage Energy Management Framework for a Microgrid Integrated with Renewable Energy Resource and Cryptocurrency Mining Farm

Payman Rezaei, *PhD Candidate,*
Masoud AliAkbar Golkar, *Professor*, *IEEE Senior Member*

K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
payman.rezaei@email.kntu.ac.ir
Golkar@kntu.ac.ir

Abstract:
Cryptocurrencies, which represent a groundbreaking fusion of cryptography and financial currency, are gaining popularity across the globe. The surge in their use and value has led to an increased integration of cryptocurrency mining operations into the power grid. This integration poses new challenges for electrical networks, including heightened peak demand, substantial fluctuations in energy demand, and diminished network reliability. In response, governments and regulatory bodies are exploring strategies to mitigate the impact of cryptocurrency mining on the electrical infrastructure. This paper introduces a model for the operation of cryptocurrency mining devices, proposing an energy management framework for isolated microgrids that incorporate renewable energy sources and a cryptocurrency mining operation. The model is executed in two phases: day-ahead planning and real-time adjustment. The day-ahead planning aims to minimize operational costs, enhance reliability, and maximize income for the cryptocurrency mining operation. The real-time phase adjusts the initial schedule to minimize the costs associated with fluctuations over 15-minute intervals. Our findings reveal that the proposed model, when applied, can reduce operational costs by 20%. Furthermore, with a 40% increase in demand from the cryptocurrency mining operation, the reliability of the microgrid is improved by approximately 4.6%, assuming the mining farm operates at its nominal capacity.

Keywords: Cryptocurrency mining farm, Machine learning, Multi-objective decision-making, Reliability, Social welfare

Date of sending the article: 2024/03/07
Acceptance date of the article: 2025/02/14

Name of the Corresponding Masoud AliAkbar Golkar
Corresponding Author's Address: K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۶۱-۴۹

Vol. 13 / No. 4/ Winter 2025
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

چارچوب مدیریت انرژی دو مرحله‌ای برای ریزشبکه ادغام شده با منابع انرژی تجدیدپذیر و مزرعه استخراج رمزارز

نوع مطالعه: پژوهشی
پیمان رضائی[1]، مقطع دکتری، مسعود علی‌اکبر گلکار[2]، استاد
۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- ایران
payman.rezaei@email.kntu.ac.ir -
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- ایران
Golkar@kntu.ac.ir -

چکیده: ارزهای رمزنگاری شده که ترکیبی جدید از رمزنگاری و ارز در حوزه‌های مالی می‌باشند، بطور فزاینده‌ای در سراسر جهان در حال گسترش هستند. گسترش استفاده و افزایش قابل توجه ارزش این ارزهای دیجیتال سبب رشد سطح نفوذ مزارع استخراج رمزارز در شبکه قدرت شده است. حضور فزاینده‌ی مزارع استخراج رمزارز در شبکه‌های برق، به عنوان یک بار الکتریکی نوظهور، می‌تواند چالش‌های متعددی مانند افزایش پیک، نوسانات قابل توجه در تقاضای انرژی و افت قابلیت اطمینان شبکه منجر شوند. دولت‌ها و مقامات تنظیمی به دنبال راه‌هایی برای مدیریت تاثیرات ناشی از استخراج رمزارز بر شبکه برق هستند. بنابراین، در این مقاله، ضمن ارائه مدلی برای بهره‌برداری از مزارع رمزارز، یک چارچوب مدیریت انرژی برای یک ریزشبکه جزیره‌ای در حضور منابع تجدیدپذیر و مزرعه استخراج رمزارز ارائه شده است. مدل پیشنهادی شامل دو مرحله برنامه‌ریزی روز آینده و زمان واقعی می‌باشد. مرحله اول به برنامه‌ریزی روز بعد با کمینه کردن هزینه بهره‌برداری، افزایش قابلیت اطمینان شبکه و درآمد مزرعه رمزارز می‌پردازد. مرحله دوم برنامه‌ریزی مرحله اول را با هدف کمینه کردن هزینه نوسان برای بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای بروز می‌کند. تاثیر افزایش تقاضای مزرعه استخراج رمزارز بر هزینه بهره‌برداری مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج نشان می‌دهند که با اعمال چارچوب پیشنهادی هزینه بهره‌برداری ۲۰ درصد کاهش یافته است. همچنین با افزایش ۴۰ درصدی تقاضای مزرعه استخراج رمزارز، قابلیت اطمینان نزدیک به ۴.۶ درصد نسبت به قبل از اعمال مدل پیشنهادی به ریزشبکه در ظرفیت نامی مزرعه بهبود می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مزرعه استخراج رمزارز، یادگیری ماشین، تصمیم‌گیری چند هدفه، قابلیت اطمینان، رفاه اجتماعی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۲/۱۲/۱۷
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۳/۱۱/۲۶

نام نویسنده‌ی مسئول : مسعود علی اکبر گلکار
نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، صنعت بیتکوین و سایر ارزهای دیجیتال و استخراج آنها با استفاده از سخت‌افزارهای قدرتمند رشد روزافزونی داشته است. دستگاه‌های استخراج رمزارز با حل مسائل ریاضیاتی، برای تأیید تراکنش‌های انجام شده در شبکه‌ی بلاکچین، از طریق ایجاد بلوک‌های جدید، پاداش دریافت می‌کنند (Yaga و همکاران، ۲۰۱۹). استخراج رمزارز به دلیل نیاز به مصرف انرژی بسیار زیاد، به یکی از عوامل اصلی افزایش بار الکتریکی در شبکه برق تبدیل شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، مصرف برق ماینرها در سال ۲۰۲۱، بیشتر از مصرف برق برخی کشورها مانند آرژانتین و هلند بوده است (Náñez و همکاران، ۲۰۲۱). این مسئله به دو دلیل مهم می‌تواند مخصوصاً برای کشورهایی که برای تأمین برق خود به منابع خارجی وابسته هستند، مشکل‌ساز باشد. اولاً، افزایش مصرف برق ماینرها می‌تواند باعث افزایش هزینه‌های تأمین برق شود و دوماً، باعث افزایش تقاضای برق در ساعات پر بار می‌شود که می‌تواند باعث بروز قطعی در تأمین برق شود. به همین دلیل، مطالعه روی تأثیر مزارع استخراج رمزارز به عنوان یک تقاضای بزرگ متمرکز در یک نقطه شبکه بسیار مهم است. بررسی و مطالعه این مزارع می‌تواند به شناسایی چالش‌های این صنعت، بهبود مدیریت انرژی، کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت و قابلیت اطمینان شبکه برق کمک کند. علاوه بر این، این مطالعات می‌توانند به عنوان ابزاری برای توسعه راهکارهایی برای کاهش تأثیرات منفی مزارع استخراج رمزارز بر شبکه برق مورد استفاده قرار گیرند.

مطالعات مختصری مزارع استخراج ارز دیجیتال را در نظر گرفته‌اند. در (Li و همکاران، ۲۰۱۹) تجزیه و تحلیل آماری برای بررسی افزایش میزان مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه با افزایش نفوذ فناوری بلاکچین و سیستم‌های استخراج رمزارز در شبکه برق پرداخته شده است. نتایج افزایش تقاضای انرژی در عین کاربردهای امیدوارکننده فناوری بلاکچین در بازار انرژی را نشان می‌دهند. این افزایش تحمیل شده به شبکه در برخی کشورها سبب ممنوع بودن سازوکار استخراج رمزارز مخصوصا در شبکه‌هایی که با مشکل در تامین تقاضا مواجه هستند شده است. اما مشکل اول شناسایی این مزارع در شبکه برق است. در (Dindar و Gül، ۲۰۲۲) استفاده از نویز و یا ویژگی‌های هارمونیک منحصر به فرد دستگاه‌های استخراج رمزارز برای شناسایی مزارع غیرقانونی پیشنهاد شده است. در این مطالعه نشان داده شده است که شرکت‌های توزیع برق می‌توانند با نظارت بر داده‌های کیفیت انرژی، مراکز داده غیرقانونی رمزارزها را با استفاده از برق غیرقانونی بالقوه شناسایی کنند. یک طبقه‌بندی جدید برای تشخیص سیستم‌های غیرقانونی استخراج رمزارز براساس الگوکاوی به کمک روش‌های یادگیری ماشین در (Amiri و Askari، ۲۰۲۲) پیشنهاد شده است که همبستگی بین ویژگی‌های مختلف را در نظر می‌گیرد و الگوهای رفتاری مشتریان را به صراحت استخراج می‌کند. طبقه‌بندی‌کننده برای تشخیص ماینر بر اساس الگوکاوی شامل دو مرحله است: در مرحله اول الگوهای مکرر استخراج می‌شوند و ویژگی‌های جداکننده ماینرها و غیرماینرها تعیین می‌شوند. در مرحله بعد، یک درخت تصمیم بر اساس فراوانی الگوها آموخته می‌شود.

گسترش نفوذ فناوری بلاکچین در نظر گرفتن این واحدها بصورت یک نوع بار نوظهور در شبکه قدرت را اجتناب ناپذیر کرده است. در (Hajipour و همکاران، ۲۰۲۲) ماینرهای ارز دیجیتال به عنوان نوع جدیدی از بار الکتریکی در مدیریت انرژی یک ریزشبکه در نظر گرفته شده است. در (Jirdehi و Tabar، ۲۰۲۳) برنامه‌ریزی یک ریزشبکه ادغام شده با ایستگاه‌های شارژ در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و ماینرهای ارز دیجیتال به عنوان یک بار بحرانی نوظهور با مصرف انرژی بالا با ارائه مدلی برای محاسبه بار مصرفی انجام شده است. در (Hajiaghapour-Moghimi و همکاران، ۲۰۲۲) یک برنامه بهره‌وری انرژی شامل ابزارهای اطلاعاتی، مقرراتی و سیاست‌های پولی برای متقاعد کردن مالکان دستگاه‌های استخراج رمزارز به استفاده از سیستم‌های با کارایی بالاتر ارائه شده است. این مطالعه دو ابزار کنترلی شامل سطوح مالیات و بهای برق را پیشنهاد می‌کند. مالکان دستگاه‌های پربازده هنگام خرید دستگاه خود با تخفیف مالیاتی مواجه می‌شوند و در هنگام بهره‌برداری از آنها نرخ برق پایین‌تری دریافت می‌کنند. دستگاه‌های استخراج رمزارز به عنوان یک بار غیر مدیریت‌پذیر در (Rezaei و Golkar، ۲۰۲۳ و Tabar و همکاران، ۲۰۲۳) نظر گرفته شده‌اند. در (Rezaei و Golkar، ۲۰۲۳) مطالعه چارچوب مدیریت انرژی دو سطحی برای یک ریزشبکه مسکونی با در نظر گرفتن حضور مزرعه استخراج رمزارز پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی شامل دو مرحله برنامه‌ریزی روز آینده و بلادرنگ است. مرحله اول بر بهبود هزینه بهره‌برداری و قابلیت اطمینان و مرحله دوم بر هزینه نوسانات تمرکز دارند. نتایج افزایش ۷.۳۴ درصدی هزینه بهره‌برداری، با وجود افزایش ۵۰ درصدی تقاضای مزرعه را نشان می‌دهند. بطور مشابه، چارچوب مدیریت انرژی تصادفی یک مجتمع مسکونی هیبریدی در یک شبکه واقعی با در نظر گرفتن تجهیزات استخراج رمزارز، پارکینگ خودروهای الکتریکی و برنامه‌های پاسخگویی بار در

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]

(Tabar و همکاران، ۲۰۲۳) ارائه شده است. نتایج نشان دادند که اثر این دستگاه‌ها بر بهره‌برداری از شبکه بطور مشخص به منابع محلی، قیمت انرژی و بازار ارزهای دیجیتال متکی است. یک سیستم مدیریت انرژی بهینه برای یک شبکه کوچک کاملاً تجدیدپذیر و عاری ازکربن در (Bhatt و همکاران، ۲۰۲۴) توسعه داده شده است که از باتری‌های دست دوم و دستگاه‌های ماینر استفاده می‌کند. نتایج نشان دادند که استفاده از این ترکیب می‌تواند هزینه‌های بهره‌برداری شبکه را تا حدود ۲۰ درصد کاهش دهد. همچنین، افزایش قیمت رمزارز سبب کاهش نیاز به ظرفیت باتری‌های جدید و دست دوم خواهد شد. در (Tabar و همکاران، ۲۰۲۲) تأثیر مزارع استخراج ارز دیجیتال و ایستگاه‌های شارژ به عنوان مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی با نرخ بالا بر عملکرد یک سیستم چند حامل انرژی توسط برنامه‌نویسی مبتنی بر ریسک بررسی شده است. تاثیر مزرعه استخراج رمزارز به عنوان یک بار الکتریکی بزرگ بر سه عامل انتشار کربن، قابلیت اطمینان شبکه و قیمت بازار برق شبکه برق تگزاس در (Menati و همکاران، ۲۰۲۳) بررسی شده است. نتایج نشان دادند که مکان و انعطاف‌پذیری عوامل حیاتی هستند که سیاست‌گذاران و بهره‌برداران شبکه باید در هنگام طراحی برنامه‌های خدمات جانبی در نظر بگیرند. در (Menati و همکاران، ۲۰۲۳) تاثیر ادغام دستگاه‌های استخراج رمزارز بر انعطاف‌پذیری تقاضا و بازار برق شبکه برق بررسی شده است. در این مطالعه برنامه‌های مختلف پاسخگویی بار به خدمت گرفته شده است و نتایج افزایش قیمت برق در بازار و نوسانات بیشتر به شیوه‌ای غیریکنواخت را نشان می‌دهند.

وجود بارهای بزرگ در ریزشبکه‌های جزیره‌ای می‌تواند به طور قابل توجهی بر قابلیت اطمینان، پایداری و مقرون به صرفه بودن آنها تأثیر بگذارد. در (Shezan و همکاران، ۲۰۲۳) چالش‌ها و راهکارهای بهینه‌سازی سیستم‌های ریزشبکه جزیره‌ای بررسی شده است. از جمله چالش‌های کلیدی مطرح شده، نوسانات ولتاژ، انحرافات فرکانس و تغییرات ناگهانی تولید یا مصرف هستند که باعث کاهش پایداری و افزایش هزینه‌ها در این سیستم‌ها می‌شوند. تحقیقات اخیر اهمیت سیستم‌های مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها را برای مقابله با این چالش‌ها برجسته می‌کنند. استراتژی‌های کنترلی مختلف، از جمله رویکردهای متمرکز، غیرمتمرکز و سلسله مراتبی، برای مدیریت موثر ولتاژ و توزیع توان به کار گرفته می‌شوند (Al-Ismail و همکاران، ۲۰۲۴). (Nargeszar و همکاران، ۲۰۲۴) به بررسی بهینه‌سازی بهره‌برداری ریزشبکه‌های جزیره‌ای با منابع انرژی تجدیدپذیر شامل توربین‌های بادی، جزر و مدی، سیستم‌های فتوولتائیک و واحدهای تولید برق مبتنی بر سوخت فسیلی می‌پردازد. برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، از باتری‌ها برای ذخیره انرژی مازاد تولید شده توسط منابع تجدیدپذیر استفاده می‌شود و توان تولیدی واحدهای سوختی بهینه‌سازی می‌شود. نتایج عددی نشان می‌دهند که تغییر ناگهانی بارهای بزرگ تأثیر قابل‌توجهی بر قابلیت اطمینان ریزشبکه دارد. در (Amini و همکاران، ۲۰۲۴) یک مدل دو سطحی برای برنامه‌ریزی و تقسیم شبکه توزیع به چند ریزشبکه با در نظر گرفتن بارهای پاسخگو به تقاضا و عدم قطعیت‌های بهره‌برداری ارائه شده است. در سطح اول، محل نصب کلیدها و منابع انرژی تعیین می‌شود تا هزینه‌های سرمایه‌گذاری به حداقل برسد. در سطح دوم، تبادل توان بین ریزشبکه‌ها، مشارکت بارهای پاسخگو، کاهش تلفات و ریسک سیستم به منظور افزایش سود بهینه می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که ریزشبکه‌ها در حالت جزیره‌ای هزینه‌های بیشتری دارند، اما مشارکت بارهای پاسخگو می‌تواند این هزینه‌ها را به طور قابل‌توجهی کاهش دهد. یک سیستم مدیریت انرژی با هدف ارزیابی و بهبود قابلیت اطمینان شبکه توزیع در چندریزشبکه متصل به شبکه بالادست به ویژه در شرایط اضطراری که چند ریزشبکه به عنوان منبع پشتیبان برای شبکه عمل می‌کند در (Omri و همکاران، ۲۰۲۴) ارائه شده است. مدل پیشنهادی در این مطالعه بروی شبکه ۳۳ باسه اجرا و اعتبار سنجی شده است. در (Rahmani و همکاران، ۲۰۲۳) برنامه‌ریزی زمان‌بندی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی به عنوان یک بار مدیریت‌پذیر در ریزشبکه‌ها با هدف افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌ها در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای پیشنهاد شده است. نتایج بهبود قابلیت اطمینان تا ۲۰ و هزینه‌ها تا ۱۵ درصد را نشان داده است.

تاکید بیشتر بر برنامه‌ریزی مبتنی بر بازار در شبکه‌های توزیع انرژی لازم است. در این رویکرد، بازار به عنوان واسط بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان عمل می‌کند و قیمت انرژی بر اساس عرضه و تقاضا تعیین می‌شود. این رویکرد می‌تواند به طور همزمان بهینه شدن میزان تزریق انرژی و حفظ رفاه اجتماعی را به دست آورد. همچنین، این رویکرد باعث می‌شود تا اپراتور شبکه به عنوان یک بازیگر مشتری محور عمل کند و به بیشترین ارزش برای مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان برسد. در (Ali و همکاران، ۲۰۱۹) یک برنامه پاسخگویی تقاضای توزیع شده برای چند ریزشبکه‌های جزیره‌ای بر اساس بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی هر یک از ریزشبکه‌ها ارائه شده است. از تابع رفاه اجتماعی ریزشبکه‌های مختلف، توان بهینه به آنها در دو مرحله اختصاص داده می‌شود. در مرحله اول، توان مازاد و کمبود توان شبکه تعیین می‌شود. در مرحله دوم، توان اضافی به ریزشبکه‌هایی که کمبود توان دارند اختصاص داده می‌شود. در نهایت، از مقدار توان اختصاص داده شده و مقدار کمبود در ریزشبکه استفاده می‌شود تا مقدار بار قابل قطع تعیین شود. کنترل و تجارت انرژی سلسله مراتبی مبتنی بر فناوری بلاکچین در (Yang

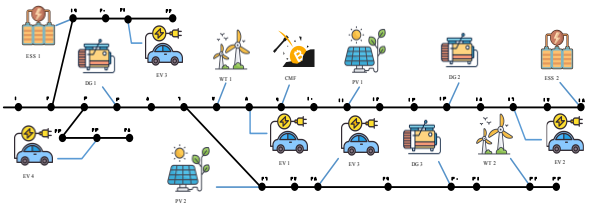
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]

و همکاران، ۲۰۲۲) ارائه شده است. در این مطالعه تبادل و ثبت اطلاعات بازار و کنترل ثانویه در بستر سیستم بلاکچین صورت گرفته است و برای ارزیابی چارچوب سلسله مراتبی ارائه شده از تابع رفاه اجتماعی شبکه به عنوان یک شاخص استفاده شده است.

حضور تجهیزات فناوری بلاکچین مخصوصا در کشورهایی که با مشکل در تامین تقاضا مواجه هستند به یکی از چالش‌های پیش روی گسترش فناوری بلاکچین تبدیل شده است. هدف از این مطالعه ارائه یک رویکرد دوجانبه برای مواجهه با این چالش می‌باشد. بنابراین، در این مقاله، ضمن ارائه مدلی برای بهره‌برداری از مزارع رمزارز، یک چارچوب مدیریت انرژی دو مرحله‌ای برای ریزشبکه جزیره‌ای شکل ۱ در حضور منابع تجدیدپذیر و مزرعه استخراج رمزارز، به عنوان نوع جدیدی از بارهای الکتریکی، ارائه شده است. اهمیت این نوع جدید از بار الکتریکی متمرکز بودن حجم زیاد تقاضا در یک نقطه از شبکه می‌باشد. مرحله اول چارچوب پیشنهادی برنامه‌ریزی روز بعد برای بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای با هدف کمینه‌کردن هزینه بهره‌برداری، بیشینه کردن قابلیت اطمینان و درآمد مزرعه رمزارز انجام می‌شود. مرحله دوم برای تضمین اجرای برنامه‌ریزی مرحله اول، یک برنامه‌ریزی بلادرنگ با پنجره کنترلی ۱۵ دقیقه‌ای با هدف کمینه‌کردن هزینه عدم تعادل اجرا می‌شود. همچنین در مطالعات بازار برق مبتنی بر بلاکچین میزان مصرف تجهیزات استخراج رمزارز بصورت تقریبی، درصدی از بار مصرفی، یا ناچیز فرض می‌شود که دقت محاسبات را کاهش می‌دهد. مدل ارائه شده در این مطالعه می‌تواند در واقعی شدن نتایج این مطالعات موثر باشد. بنابراین، مشارکت‌های اصلی این مطالعه به شرح زیر است:

- مدلی برای بهره‌برداری از تجهیزات استخراج رمزارز که یکی از انواع بار الکتریکی نوظهور می‌باشند و اهمیت زیادی در اقتصادی بودن بکارگیری آنها دارد، ارائه شده است.
- ارائه یک چارچوب دو مرحله‌ای، در مرحله اول برنامه‌ریزی روز بعد یک ریزشبکه جزیره‌ای با هدف بهبود هزینه بهره‌برداری، درآمد مزرعه استخراج رمزارز و قابلیت اطمینان شبکه انجام می‌شود.
- تضمین برنامه‌ریزی روز بعد ریزشبکه با برنامه‌ریزی بلادرنگ برای کمینه‌کردن نوسانات ناشی از عدم قطعیت‌های سیستم در نظر گرفته می‌شود.
- تعداد بهینه دستگاه‌های استخراج رمزارز فعال در یک مزرعه را می‌توان با استفاده از مدل پیشنهادی ارزیابی کرد.

ساختار ادامه مقاله بدین شرح است: در بخش ۲، اجزای شبکه و استخراج داده‌های ورودی شرح داده خواهند شد. در بخش ۳، مدل ریاضی چارچوب پیشنهادی برای برنامه‌ریزی مدیریت انرژی ارائه خواهد شد. نتایج عددی و شبیه‌سازی در بخش ۴ بیان می‌شوند و نهایتا در بخش آخر مقاله با ارائه نتیجه‌گیری خاتمه می‌یابد.



شکل(۱): شبکه مورد مطالعه

فهرست علائم

اندیس‌ها

اندیس بازه‌های زمانی	t
اندیس شینه‌ها	$b'.b$
اندیس نوع گاز آلاینده	e

پارامترها

هزینه بهره‌برداری از پنل فتوولتائیک و توربین بادی (کیلووات ساعت / دلار)	ρ^{PV}،ρ^{WT}
ضرایب هزینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی	α_b^{ES}،β_b^{ES}
ضرایب هزینه خودروهای الکتریکی	α_b^{EV}،β_b^{EV}
بیشینه نرخ شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی (کیلووات)	$P_b^{MAX,CH}$،$P_b^{MAX,DCH}$
بیشینه نرخ شارژ و دشارژ باتری خودروی الکتریکی (کیلووات)	$x_{t,b}^{MAX,CH}$،$x_{t,b}^{MAX,DCH}$
بازده شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی	$\eta_b^{ES,CH}$،$\eta_b^{ES,DCH}$
بازده شارژ و دشارژ باتری خودروی الکتریکی	$\eta_b^{EV,CH}$،$\eta_b^{EV,DCH}$
بیشینه و کمینه وضعیت شارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی (کیلووات)	$SOC_b^{ES,MIN}$،$SOC_b^{ES,MAX}$
بیشینه و کمینه وضعیت شارژ باتری خودروی الکتریکی (کیلووات)	$SOC_b^{EV,MIN}$،$SOC_b^{EV,MAX}$
پارامتر باینری و مکمل باینری حضور خودرو در پارکینگ	$f_{t,b}$،$\overline{f_{t,b}}$
انرژی اولیه و نهایی باتری خودروهای الکتریکی (کیلووات ساعت)	$E_b^{initial}$،E_b^{final}
ظرفیت باتری و انرژی مورد نیاز برای طی مسیر بعدی (کیلووات ساعت)	$E_b^{capacity}$ ،$E_b^{next_trip}$
هزینه انتشار هر نوع گاز آلاینده (پوند/دلار)	$Ex_{b,e}^{DG}$
ضریب انتشار دیزل ژنراتور برای هر نوع گاز آلاینده (کیلووات‌ساعت/پوند)	$EF_{b,e}^{DG}$
ضرایب تابع هزینه سوخت دیزل ژنراتور	c_b^{DG}،b_b^{DG}،a_b^{DG}

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]

هزینه راه‌اندازی و خاموش کردن دیزل ژنراتور (دلار)	SUC_b،SDC_b
کمینه و بیشینه توان تولیدی دیزل ژنراتور (کیلووات)	$P_b^{DG,MAX}$،$P_b^{DG,MIN}$
محدوده نرخ کاهش و افزایش رمپ	RUR_b،RDR_b
هزینه قطع بار	α_b^{LS}
توان ظاهری پایه (کیلو ولت آمپر)	S_{Base}
کندوکتانس و سوسپتانس بین دو شینه	$G_{b,b'}$،$B_{b,b'}$
ثابت پخش بار خطی	$\xi_{t,b,b'}$
بیشینه و کمینه ولتاژ شینه (پریونیت)	V_b^{MAX}،V_b^{MIN}
بیشینه و کمینه توان ظاهری عبوری بین دو شینه	$SL_{b,b'}^{MAX}$،$SL_{b,b'}^{MIN}$
ثابت مصرف بخش خنک‌کننده مزرعه استخراج رمزارز	ω
طول بازه زمانی	τ

متغیرها

توان خروجی پنل فتوولتائیک و توربین بادی (کیلووات)	$P_{t,b}^{PV}$،$P_{t,b}^{WT}$
توان شارژ و دشارژ شده توسط سیستم ذخیره‌ساز انرژی (کیلووات)	$P_{t,b}^{ES,CH}$،$P_{t,b}^{ES,DCH}$
متغیر باینری برای شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی	$u_{t,b}^{ES,CH}$،$u_{t,b}^{ES,DCH}$
توان شارژ و دشارژ شده توسط باتری خودروی الکتریکی (کیلووات)	$X_{t,b}^{EV,CH}$،$X_{t,b}^{EV,DCH}$
متغیر باینری برای شارژ و دشارژ باتری خودروی الکتریکی	$u_{t,b}^{EV,CH}$،$u_{t,b}^{EV,DCH}$
وضعیت شارژ سیستم ذخیره‌ساز و باتری خودروی الکتریکی (٪)	$SOC_{t,b}^{EV}$،$SOC_{t,b}^{ES}$
هزینه انتشار و سوخت دیزل ژنراتور (دلار)	$EC_{t,b}^{DG}$، $FC_{t,b}^{DG}$
متغیر باینری وضعیت تعهد واحدهای دیزل ژنراتور	$u'_{t,b}$،$u_{t,b}$
توان مصرفی دستگاه استخراج رمزارز و بار قطع شده (کیلووات)	$P_{t,b}^{Miner}$، $P_{t,b}^{LS}$
توان اکتیو (کیلووات) و راکتیو (کیلووار) تقاضای مصرفی	$P_{t,b}^{D}$،$Q_{t,b}^{D}$
توان اکتیو (کیلووات) و راکتیو (کیلووار) تولیدی	$P_{t,b}^{G}$،$Q_{t,b}^{G}$
توان اکتیو و راکتیو عبوری بین دو شینه	$PL_{t,b,b'}$،$QL_{t,b,b'}$
ولتاژ و زاویه ولتاژ شینه‌ها	$V_{t,b}$،$\theta_{t,b}$

۲- مدلسازی و اجزای شبکه

۲-۱- پنل فتوولتائیک

توان خروجی پنل‌های فتوولتائیک به کمک یادگیری ماشین و بر اساس داده‌های واقعی یک روز معمولی محاسبه شده است. رابطه ۱ هزینه بهره‌برداری از پنل فتوولتائیک را نشان می‌دهد.

$$C_{t,b}^{PV} = \rho^{PV} \times P_{t,b}^{PV} \quad (۱)$$

۲-۲- توربین بادی

توان خروجی توربین‌های بادی به کمک یادگیری ماشین و بر اساس داده‌های واقعی یک روز معمولی محاسبه شده است. رابطه ۲ هزینه بهره‌برداری از توربین بادی را ارائه می‌دهد.

$$C_{t,b}^{WT} = \rho^{WT} \times P_{t,b}^{WT} \quad (۲)$$

۲-۳- سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی

با توجه به سرعت پاسخگویی بالای سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی از آن‌ها برای پوشش عدم قطعیت‌های تولید و مصرف استفاده می‌شود. در این مطالعه از دو دستگاه ذخیره‌ساز انرژی باتری همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود استفاده شده است. هزینه و محدودیت‌های بهره‌برداری از این سیستم‌ها در روابط ۳-۸ ارائه شده است (Rezaei و همکاران، ۲۰۲۲).

$$C_{t,b}^{ES} = \alpha_b^{ES}\left(P_{t,b}^{ES,CH} + P_{t,b}^{ES,DCH}\right) + \beta_b^{ES} \quad (۳)$$

$$0 \le P_{t,b}^{CH} \le P_b^{MAX,CH} u_{t,b}^{ES,CH} \quad (۴)$$

$$0 \le P_{t,b}^{ES,DCH} \le P_b^{MAX,DCH} u_{t,b}^{ES,DCH} \quad (۵)$$

$$u_{t,b}^{ES,DCH} + u_{t,b}^{ES,CH} \le 1 \quad (۶)$$

$$SOC_{t,b}^{ES} = SOC_{t-1,b}^{ES} + (P_{t,b}^{ES,CH}\eta_b^{ES,CH} - P_{t,b}^{ES,DCH} / \eta_b^{ES,DCH})\tau \quad (۷)$$

$$SOC_b^{ES,MIN} \le SOC_{t,b}^{ES} \le SOC_b^{ES,MAX} \quad (۸)$$

۲-۴- خودروی الکتریکی

اثرات و نقش یک وسیله نقلیه الکتریکی بصورت مجزا ناچیز است، اما مجموع آن‌ها اثرات قابل توجهی بر شبکه می‌گذارند. صاحبان خودروهای الکتریکی با شارژ و دشارژ هوشمند باتری خودروها (شارژ در بازه‌های غیرپیک و دشارژ در بازه‌های پیک) هم خود منتفع شده و هم برای شبکه سودمند هستند. در این مطالعه فرض شده است که مالکان خودرو تمایل کامل به شرکت در چارچوب پیشنهادی دارند. هزینه بهره‌برداری و محدودیت‌های پارکینگ خودروهای الکتریکی در روابط ۹-۱۸ ارائه شده است (Rezaei و Golkar، ۲۰۲۳).

$$C_{t,b}^{EV} = \alpha_b^{EV} P_{t,b}^{EV} + \beta_b^{EV} \quad (۹)$$

$$P_{t,b}^{EV} = \left(x_{t,b}^{CH} + x_{t,b}^{DCH}\right) f_{t,b} \quad (۱۰)$$

$$۰ \le x_{t,b}^{CH} \le x_{t,b}^{MAX,CH} u_{t,b}^{EV,CH} \quad (۱۱)$$

$$۰ \le x_{t,b}^{DCH} \le x_{t,b}^{MAX,DCH} u_{t,b}^{EV,DCH} \quad (۱۲)$$

$$u_{t,b}^{EV,CH} + u_{t,b}^{EV,DCH} \le ۱ \quad (۱۳)$$

$$0 \le E_b^{initial} + \sum_{K\in[0,i-1]} \tau P_{t,b}^{EV} \le E_b^{capacity} \quad (۱۴)$$

$$E_b^{final} = E_b^{initial} + \sum_i \tau P_{t,b}^{EV} \ge E_b^{next_trip} \quad (۱۵)$$

$$\left(x_{t,b}^{CH} + x_{t,b}^{DCH}\right)\overline{f_{t,b}} = 0 \quad (۱۶)$$

$$SOC_{t,b}^{EV} = SOC_{t-1,b}^{EV} + P_{t,b}^{EV}(\eta_b^{EV,CH} - 1/\eta_b^{EV,DCH})\tau \quad (۱۷)$$

$$SOC_b^{EV,MIN} \le SOC_{t,b}^{EV} \le SOC_b^{EV,MAX} \quad (۱۸)$$

۲-۵- دیزل ژنراتور

در این مطالعه از دیزل ژنراتور به عنوان منابع تولید پراکنده قابل کنترل استفاده شده است. هزینه بهره‌برداری دیزل ژنراتور به صورت ۱۹-۲۲ فرموله شده است. همچنین محدودیت‌های بهره‌برداری از تولیدات پراکنده بصورت روابط ۲۳-۲۶ ارائه شده است (Rezaei و همکاران، ۲۰۲۲).

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]

$$C_{t,b}^{DG} = FC_{t,b}^{DG} + SC_{t,b}^{DG} + EC_{t,b}^{DG} \quad (۱۹)$$

$$FC_{t,b}^{DG} = (a_b^{DG}(P_{t,b}^{DG})^2 + b_b^{DG}(P_{t,b}^{DG}) + c_b^{DG})u_{t,b} \quad (۲۰)$$

$$SC_{t,b}^{DG} = SUC_b(u_{t,b} - u'_{t,b}) + \mathrm{SDC}_b(u_{t-1,b} - u'_{t,b}) \quad (۲۱)$$

$$EC_{t,b}^{DG} = \sum_e (Ex_{b,e}^{DG} \times EF_{b,e}^{DG}) \times P_{t,b}^{DG} \quad (۲۲)$$

$$P_b^{DG,MIN} u_{t,b} \le P_{t,b}^{DG} \le P_b^{DG,MAX} u_{t,b} \quad (۲۳)$$

$$P_{t,b}^{DG} - P_{t-1,b}^{DG} \le (u_{t,b} - u'_{t,b}) P_b^{DG,MIN} + (1 - u_{t,b} + u'_{t,b}) RUR_b \quad (۲۴)$$

$$P_{t-1,b}^{DG} - P_{t,b}^{DG} \le (u_{t-1,b} - u'_{t-1,b}) P_b^{DG,MIN} + (1 - u_{t-1,b} + u'_{t-1,b}) RDR_b \quad (۲۵)$$

$$u_{t-1,b} + u_{t,b} - 1 \le u'_{t,b} \le u_{t,b} \quad (۲۶)$$

در این مطالعه انتشار آلودگی به انتشار دی‌اکسید کربن، اکسیدهای گوگرد و اکسیدهای نیتروژن اشاره دارد که هزینه انتشار آلودگی برای منابع تولید پراکنده فسیلی به روش قیمت‌گذاری کربن مطابق رابطه ۲۲ مدل شده است. در این روش یک هزینه اضافی ثابت به ازای تولید هر تن آلایندگی تعیین می‌گردد. ضریب جریمه و نرخ انتشار منابع تولید از (Mirbarati و همکاران، ۲۰۲۲) گرفته شده است.

۲-۶- بار قطع شده

برای حفظ محدودیت‌های فنی شبکه در مواقع ضروری بار قطع شده در نظر گرفته شده است. هزینه بار قطع شده به کمک رابطه ۲۷ قابل محاسبه است.

$$C_{t,b}^{LS} = \alpha_b^{LS} \times P_{t,b}^{LS} \quad (۲۷)$$

۲-۷- مزرعه استخراج رمزارز

با گسترش علاقه به فناوری بلاکچین، دستگاه‌های استخراج رمزارز به یکی از انواع جدید بار الکتریکی در شبکه‌های قدرت تبدیل شده‌اند (Tabar و همکاران، ۲۰۲۲). در این مطالعه یک مزرعه استخراج رمزارز که مشکلات زیادی را مخصوصا برای کشورهایی که در تامین تقاضای شبکه مشکل دارند ایجاد کرده است، در نظر گرفته شده است. در این راستا فرض شده است که مزرعه از دستگاه‌های ماینر Bitcoin Miner S19k Pro شرکت Bitmain استفاده می‌کند. توان مصرفی و روابط ماینرهای رمزارز بصورت روابط ۲۸-۳۲ مدل شده است.

$$\eta^{efficiency} = \varsigma \frac{Hash\ Rate}{Hash\ Rate\ Nominal} \quad (۲۸)$$

$$P_t^{Cooling} = N_t \times \omega \times P^{Miner,Nominal} \ , \ 0 \le \omega \le 1 \quad (۲۹)$$

$$P_t^{Miner} = N_t \times (1+\omega) \times P^{Miner,Nominal} \quad (۳۰)$$

$$MI = \sum_t N_t \times \eta^{efficiency} \times \eta^{difficulty} \times P^{Miner,Nominal} \times \tau \times CPC \times CP \quad (۳۱)$$

$$0 \le N_t \le N^{max} \ , \ \mathrm{N} \in \mathbf{Z} \quad (۳۲)$$

در این روابط $\eta^{efficiency}$ و $\eta^{difficulty}$ بترتیب ضریب بهره‌وری و ضریب سختی می‌باشند و مقداری بین ۰ و ۱ دارند. ضریب بهره‌وری به قدرت پردازش سخت‌افزار دستگاه‌ها و ضریب سختی به میزان دشواری معمای سیستم بلاکچین اشاره دارند. دستگاه‌های ماینر در صورت روشن بودن یک مقدار ثابت و مشخصی از توان را مصرف می‌کنند. در یک مزرعه استخراج رمزارز که شامل تعداد زیادی از این دستگاه‌ها است، مجموع توان مصرفی مزرعه به صورت پله‌ای تغییر می‌کند. این تغییرات ناشی از روشن یا خاموش شدن تعداد مشخصی از ماینرها است، بنابراین توان مصرفی کل مزرعه همواره مضربی از توان مصرفی یک دستگاه ماینر خواهد بود و نمی‌تواند به هر مقداری تغییر کند. این محدودیت در رابطه 30 درنظر گرفته شده است بطوریکه N_t تعداد ماینرهای فعال در هر بازه زمانی می‌باشد. همچنین CP بهای رمزارز و CPC رمزارز استخراج شده به ازای یک واحد انرژی می‌باشند. درآمد مزرعه از رابطه ۳۱ قابل محاسبه است.

۲-۸- پخش بار

برنامه‌ریزی مدیریت انرژی یک ریزشبکه بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی شبکه می‌تواند منجر به بروز مشکلاتی شود. در این مطالعه از محدودیت پخش بار AC خطی شده بصورت روابط ۳۹-۳۳ استفاده شده است (Vatandoust و همکاران، ۲۰۲۲).

$$\left(P_{t,b}^G - P_{t,b}^D\right)/\mathrm{S}_{Base} = \begin{pmatrix} \left(2V_{t,b} - 1\right)\mathrm{G}_{b,b'} + \sum_{b \ne b'} \mathrm{G}_{b,b'}\left(V_{t,b} + V_{t,b'} - 1\right) \\ +\mathrm{B}_{b,b'}\left(\theta_{t,b} - \theta_{t,b'}\right) \end{pmatrix} \quad (۳۳)$$

$$\left(Q_{t,b}^G - Q_{t,b}^D\right)/\mathrm{S}_{Base} = \begin{pmatrix} -\left(2V_{t,b} - 1\right)B_{b,b'} + \sum_{b \ne b'} -B_{b,b'}\left(V_{t,b} + V_{t,b'} - 1\right) \\ +\mathrm{G}_{b,b'}\left(\theta_{t,b} - \theta_{t,b'}\right) \end{pmatrix} \quad (۳۴)$$

$$\mathrm{PL}_{t,b,b'} = \mathrm{G}_{b,b'}\left(V_{t,b} - V_{t,b'}\right) + B_{b,b'}\left(\theta_{t,b} - \theta_{t,b'}\right) \quad (۳۵)$$

$$\mathrm{QL}_{t,b,b'} = -\mathrm{B}_{b,b'}\left(V_{t,b} - V_{t,b'}\right) + G_{b,b'}\left(\theta_{t,b} - \theta_{t,b'}\right) \quad (۳۶)$$

$$\mathrm{SL}_{t,b,b'} = \mathrm{PL}_{t,b,b'} + \xi_{t,b,b'}\mathrm{QL}_{t,b,b'} \quad (۳۷)$$

$$\mathrm{V}_b^{MIN} \le V_{t,b} \le \mathrm{V}_b^{MAX} \quad (۳۸)$$

$$\mathrm{SL}_{b,b'}^{MIN} \le SL_{t,b,b'} \le \mathrm{SL}_{b,b'}^{MAX} \quad (۳۹)$$

۲-۹- بازار برق

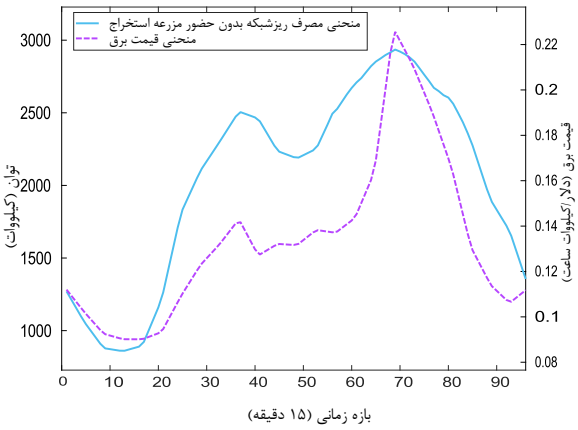
بازار برق بصورت بازار برق روز بعد و بلادرنگ می‌باشد. براساس برنامه‌ریزی انجام شده تجارت انرژی برای روز بعد انجام می‌شود. تعیین قیمت توسط تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان بر اساس میزان عرضه و تقاضا تعیین می‌شود. پس از اتمام معاملات وظیفه تامین انرژی بر عهده مدیریت شبکه می‌باشد. انحراف از تعهدات ایجاد شده در بازار روز بعد به کمک کمینه‌کردن هزینه عدم تعادل در زمان واقعی تسویه می‌شود.

۲-۱۰- داده‌های ورودی

داده‌های بار مصرفی، خروجی منابع تجدیدپذیر و بهای برق براساس داده‌های واقعی و به روش توضیح داده شده در (Rezaei و Golkar، ۲۰۲۲) پیش‌بینی شده است. استفاده از داده‌های واقعی سبب نزدیکی نتایج به واقعیت می‌شود. شکل ۲ منحنی تقاضای ریزشبکه بدون حضور مزرعه استخراج رمزارز و بهای برق را نشان می‌دهد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]

مشخصات دیزل ژنراتور، ذخیره‌ساز انرژی، خودروهای الکتریکی و دستگاه‌های استخراج رمزارز بترتیب در جدول‌های ۱-۴ ارائه شده‌اند.



شکل(۲): منحنی تقاضا و قیمت برق ریزشبکه

جدول (۱): مشخصات دیزل ژنراتور

شینه	a_b^{DG}	b_b^{DG}	c_b^{DG}	$P_b^{DG,Max}$	$P_b^{DG,Min}$	SDC_b	SUC_b
۴	۰.۰۰۰۰۲۶	۰.۰۰۰۵	۰.۰۰۲۳	۹۰۰	۹۰	۳	۱۵
۱۴	۰.۰۰۰۰۲۵	۰.۰۰۰۴۸	۰.۰۰۲	۷۰۰	۶۵	۱۰	۴۵
۳۰	۰.۰۰۰۰۲۴	۰.۰۰۰۴۷	۰.۰۰۱۹	۵۰۰	۵۰	۱۰	۴۵

جدول(۲): مشخصات سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی

شینه	$\eta_b^{ES,CH}$	$\eta_b^{ES,DCH}$	$P_b^{MAX,CH}$	$P_b^{MAX,CH}$	$E_b^{capacity}$
۱۸	۰.۹۵	۰.۹۳	۱۰۰	۱۰۰	۷۵۰
۱۹	۰.۹۶	۰.۹۱	۵۰	۵۰	۵۰۰

جدول (۳): مشخصات خودروهای الکتریکی

شینه	$P_b^{MAX,CH}$	$P_b^{MAX,DCH}$	$E_b^{initial}$	$E_b^{capacity}$	$E_b^{next_trip}$
۸	۱۷.۲	۱۷.۲	۳۲.۴۳	۱۰۰	۱۴.۶
۱۶	۶.۶	۶.۶	۹.۱۸	۳۶	۴.۱۳
۲۱	۱۴.۵	۱۴.۵	۳۲.۰۷	۹۰	۱۴.۴۳
۲۴	۹.۴	۹.۴	۱۹.۳۴	۶۰	۸.۷
۲۸	۱۵.۲	۱۵.۲	۳۰.۹۹	۱۰۰	۱۳.۹۴

جدول (۴): مشخصات دستگاه‌های استخراج رمزارز

$Hash\ Rate\ Nominal$	$P^{Miner,Nominal}$	ω	N^{max}	CPC	CP	$\eta^{efficiency}$
۱۲۰ Th/s	۲,۷۶ kW	۰,۰۰۴	۵۰۰	۰,۰۰۰۰۲۳۸	۰,۰۰۴۷۲	۰,۹۸

۳- چارچوب مدیریت انرژی پیشنهادی

چارچوب مدیریت انرژی پیشنهادی برای بهره‌برداری از ریزشبکه شامل دو مرحله روز بعد و بلادرنگ می‌باشد. مدیریت انرژی روز بعد شامل یک سیستم بهینه‌سازی دو سطحی است. چارچوب مدیریت انرژی پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳-۱- مرحله اول: برنامه‌ریزی روز بعد

در این بخش، فرمول ریاضی چارچوب پیشنهادی برای بهره‌برداری روز بعد ریزشبکه ارائه شده است. این چارچوب شامل یک بهینه‌سازی چند هدفه دو سطحی می‌باشد.

(۱) توابع هدف اولیه

هزینه بهره‌برداری و درآمد مزرعه استخراج رمزارز توابع هدف اولیه هستند، که بصورت روابط ۴۰ و ۴۱ فرموله شده‌اند.

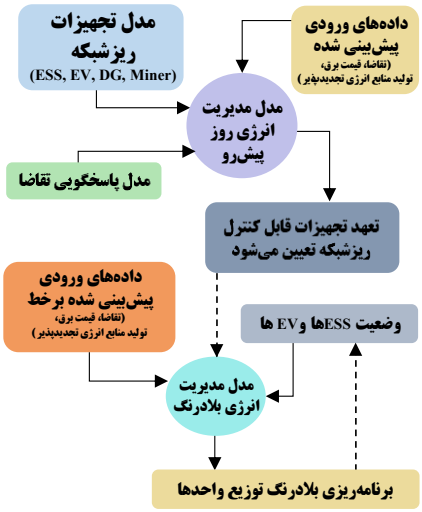
$$Min\ f_1 = \sum_{t,b}\left(C_{t,b}^{DG} + C_{t,b}^{ES} + C_{t,b}^{EV} + C_{t,b}^{PV} + C_{t,b}^{WT} + C_{t,b}^{LS}\right) \quad (۴۰)$$

$$Max\ f_2 = \sum_{t,b}\left(\tau N_{t,b} P_b^{Miner,Nominal} \eta_b^{efficiency}\right) CPC \times CP \quad (۴۱)$$

(۲) تابع هدف ثانویه

مزارع استخراج رمزارز به عنوان یک نقطه داغ در شبکه قدرت مشکلات حیاتی را در سال‌های اخیر در برخی شبکه‌های قدرت ایجاد کرده‌اند مانند کاهش قابلیت اطمینان و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی برای پوشش تقاضای بار الکتریکی که به شبکه اعمال می‌کنند. بنابراین تابع هدف ثانویه بصورت رابطه ۴۲ در نظر گرفته شده است.

$$Min\ EENS = \sum_{t,b} P_{t,b}^{LS} \times \tau \quad (۴۲)$$



شکل (۳): چارچوب مدیریت انرژی پیشنهادی

۳-۲- بهینه‌سازی چند هدفه

روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه شامل دستیابی به تصمیمات بهینه در میان دو یا چند هدف به‌صورت همزمان می‌باشند. توابع هدف در چارچوب مدیریت انرژی روز بعد پیشنهادی شامل هزینه بهره‌برداری، درآمد مزرعه استخراج رمزارز و قابلیت اطمینان هستند. در مرحله اول، یک رویکرد ترکیبی از رویکرد زبان‌شناسی-فازی برای

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]

بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود. مراحل بهینه‌سازی به شرح زیر است:

مرحله ۱) در این مرحله، چارچوب مدیریت انرژی پیشنهادی به‌طور همزمان هزینه بهره‌برداری و درآمد مزرعه استخراج رمزارز را بهینه می‌کند. برای دستیابی به این هدف، از روش فازی برای بهینه‌سازی اهداف ناهمگن طبق معادله ۴۳ استفاده می‌شود (Bidgoli و همکاران، ۲۰۲۱).

$$MaxMin\left\{\varphi_d, \varphi_k\right\} \tag{۴۳}$$

$$\varphi_d = \frac{F_d - F_d^{Nadir}}{F_d^{Ideal} - F_d^{Nadir}} \qquad \forall d \in \{۱,...,s\} \tag{۴۴}$$

$$\varphi_k = \frac{F_k^{Nadir} - F_k}{F_k^{Nadir} - F_k^{Ideal}} \qquad \forall k \in \{s+۱,...,s+r\} \tag{۴۵}$$

معادله 43 از یک رویکرد فازی غیرجبرانی استفاده می‌کند که تنها بر بدترین حالت تمرکز دارد. برای بهبود این رویکرد، از معادله اصلاح شده ۴۶ استفاده شده است.

$$Maximize\ f_3 = \left\{\frac{۱}{s+r}\left[\sum_l \varphi_l + \sum_k \varphi_k\right]\right\} \tag{۴۶}$$

مرحله ۲) بهبود قابلیت اطمینان ریزشبکه با بهینه‌سازی رابطه ۴۲. مقادیر بدست آمده در مرحله قبل، به عنوان بهترین نتیجه، مطابق رابطه ۴۷ به عنوان یک محدودیت در مرحله دوم استفاده می‌شود. این رابطه اطمینان حاصل می‌کند که هزینه بهره‌برداری و درآمد مزرعه در محدوده قابل قبول باقی می‌مانند.

$$f_3' = \tau\ f_3 \tag{۴۷}$$

۳-۳- مرحله دوم: برنامه‌ریزی بلادرنگ

پس از تعیین تعهد واحدها در مرحله اول، با هدف تضمین برنامه‌ریزی انجام شده، برنامه‌ریزی مدیریت انرژی بلادرنگ با کمینه کردن هزینه عدم تعادل مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر زمان‌واقعی برای پنجره‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای پیاده‌سازی می‌شود. روابط ۴۸ و ۴۹ تابع هدف مرحله بلادرنگ را نشان می‌دهند.

$$Min \sum_{t,b} \mu_t \left(P_{t,b}^{x,Estimated} - P_{t,b}^{x,RealTime}\right) \tag{۴۸}$$

$$P_{t,b}^{x} = \begin{pmatrix} P_{t,b}^{DG} + P_{t,b}^{ES,DCH} - P_{t,b}^{ES,CH} + P_{t,b}^{PV} + P_{t,b}^{WT} + P_{t,b}^{LS} \\ + P_{t,b}^{EV,DCH} - P_{t,b}^{EV,CH} - P_{t,b}^{Miner} - P_{t,b}^{load} \end{pmatrix} \tag{۴۹}$$

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مورد مطالعه

برای بررسی موثرتر نتایج چارچوب پیشنهادی دو مورد مطالعه بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

(۱) مورد مطالعه ۱

در این مورد مطالعه برنامه‌ریزی مدیریت انرژی چند ریزشبکه در حالتی که مزرعه استخراج رمزارز بصورت یک بار غیرمدیریت‌پذیر در شبکه حضور دارد انجام شده است. در مرحله اول کمینه کردن هزینه بهره‌برداری، بیشینه کردن درآمد مزرعه استخراج رمزارز و بهبود قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است. در مرحله دوم برای تضمین اجرای برنامه‌ریزی یک بهینه‌سازی بلادرنگ با هدف کمینه کردن هزینه نوسانات انجام می‌شود. این مورد تاثیر حضور بدون برنامه‌ریزی این مزارع را نشان می‌دهد.

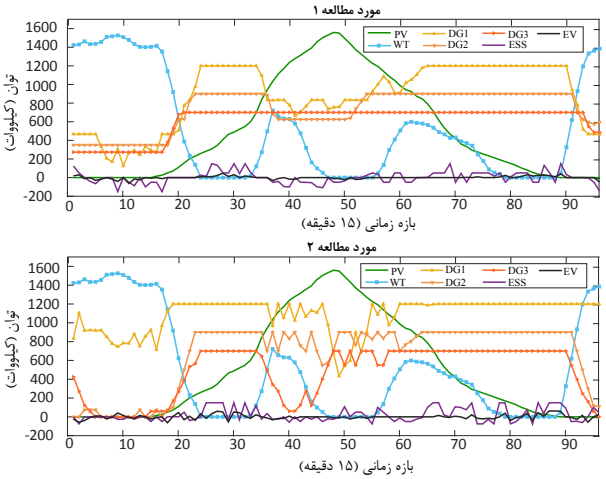
(۲) مورد مطالعه ۲

در این مورد مطالعه مزرعه استخراج رمزارز بصورت یک بار مدیریت‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. چارچوب مدیریت انرژی پیشنهادی مدت و ظرفیت فعال مزرعه استخراج رمزارز را تعیین می‌کند. این مورد تاثیر حضور با برنامه‌ریزی این مزارع را نشان می‌دهد.

چارچوب دو مرحله‌ای پیشنهادی برای مدیریت انرژی ریزشبکه در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر، منابع ذخیره‌ساز انرژی و مزرعه استخراج رمزارز روی شبکه شکل ۱ به کمک نرم‌افزار گمز[۳] اجرا شده است. زمانبندی انرژی منابع تولید پراکنده قابل کنترل، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و خودروهای الکتریکی مطالعات موردی در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، سطح زیر منحنی تولید منابع تولید قابل کنترل در مورد ۱ به علت تامین توان ثابت مزرعه استخراج رمزارز کمی بیشتر و دارای نوسان کمتری نسبت به مورد ۲ است. در هر دو مورد، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی زمانی شروع به شارژ شدن می‌کنند که قیمت برق پایین است و در دوره‌های اوج تخلیه می‌شوند. در نتیجه، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی علاوه بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، سود تجارت انرژی را افزایش می‌دهند.

[۳] GAMS

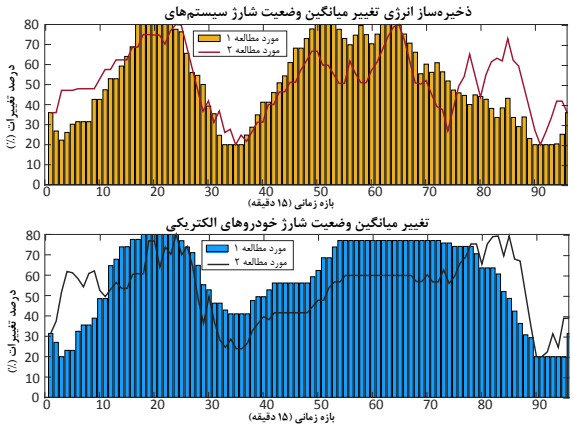
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]



شکل (۴): زمانبندی انرژی تجهیزات شبکه تحت دو مورد مطالعه

در ابتدا و انتهای روز که علاوه بر کم بودن تقاضای انرژی تولید بادی خوبی هم وجود دارد، میزان تولید دیزل ژنراتورها کاهش می‌یابد. در مورد ۲ شاهد شارژ بیشتری نسبت به مورد ۱ توسط منابع ذخیره‌ساز (سیستم‌های ذخیره‌ساز و خودروهای الکتریکی) هستیم تا با مدیریت‌پذیر شدن مزرعه استخراج رمزارز علاوه بر حفظ هزینه بهره‌برداری در محدوده مجاز، به حداکثر شدن سود مزرعه در طول روز کمک کنند.

در این مطالعه برای پوشش نوسانات تولید و مصرف انرژی از منابع ذخیره‌ساز انرژی در ریزشبکه استفاده شده است. شکل ۵ مقایسه میانگین وضعیت شارژ سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و باتری خودروهای الکتریکی در دو مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این منابع با شارژ در ساعات غیر پیک انرژی از شبکه جذب کرده و در ساعاتی که تولید منابع تجدیدپذیر کاهش می‌یابد در کنار دیزل ژنراتورها علاوه بر کمک به تامین تقاضا به افزایش ظرفیت مزرعه استخراج رمزارز در مورد ۲ کمک می‌کنند. همچنین، دفعات شارژ و دشارژ در مورد ۲ بیشتر است زیرا وقتی مزرعه استخراج رمزارز به یک بار مدیریت‌پذیر تبدیل می‌شود، اولویت منابع ذخیره‌ساز افزایش قابلیت اطمینان ریزشبکه جزیره‌ای در عین افزایش ظرفیت فعال مزرعه است.



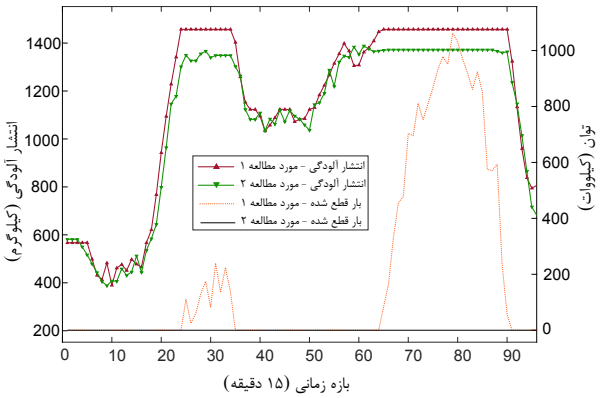
شکل (۵): منحنی تغییرات وضعیت شارژ منابع ذخیره‌ساز ریزشبکه

مقدار انتشار و بار قطع شده دو مورد مطالعه در مقایسه با یکدیگر در شکل ۶ ارائه شده است. بار قطع شده خیلی شدیدی در بازه‌های زمانی که تولید منابع انرژی تجدیدپذیر به صفر می‌رسد در مورد ۱ وجود دارد. در حالیکه مزرعه استخراج رمزارز با حرکت به سمت کاهش مصرف انرژی این بار قطع شده را در مورد ۲ به صفر می‌رساند. از سوی دیگر میزان انتشار در مورد ۲ در ساعات اوج کاهش می‌یابد با وجود رفتار مشابه در انتشار که وابسته به بار مصرفی می‌باشد.

۴-۲- تحلیل سود و رفاه

کارکرد رفاه اجتماعی یک مفهوم محوری در اقتصاد است که رفاه جمعی یک جامعه را بر اساس تخصیص منابع و کالاها کمیت می‌کند. این مفهوم به عنوان چارچوبی برای ارزیابی کارایی و برابری توزیع منابع عمل می‌کند و به سیاست‌گذاران و محققان اجازه می‌دهد تا مبادلات بین منافع فردی و اشتراکی را تجزیه و تحلیل کنند. در اصل، عملکرد رفاه اجتماعی، خدمات فردی را در یک معیار واحد جمع می‌کند و مقایسه وضعیت‌ها یا سیاست‌های اقتصادی مختلف را از نظر تأثیر کلی آنها بر رفاه اجتماعی تسهیل می‌کند. این کارکرد نقش مهمی در طراحی و ارزیابی سیاست‌های عمومی ایفا می‌کند و تضمین می‌کند که آنها نه تنها کارایی اقتصادی بلکه انصاف و عدالت اجتماعی را نیز ارتقا می‌دهند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]



شکل (۶): منحنی تغییرات انتشار و بارقطع شده تحت دو مورد مطالعه

در سیستم‌های قدرت، تابع رفاه اجتماعی یک رویکرد نوآورانه را برای مدیریت و بهینه‌سازی توزیع توان الکتریکی مخصوصا در شبکه‌های محلی معرفی می‌کند. استراتژی‌های بهره‌برداری ریزشبکه‌ها را می‌توان برای به حداکثر رساندن مطلوبیت جمعی همه شرکت‌کنندگان، از جمله مصرف‌کنندگان، تولیدکنندگان و اپراتور ریزشبکه، فرموله کرد. این مستلزم تعادل دقیق بین هزینه تولید برق، بازده توزیع و ارضای نیازهای انرژی مصرف‌کنندگان است. به این ترتیب، عملکرد رفاه اجتماعی در ریزشبکه‌ها نه تنها کارایی و قابلیت اطمینان توزیع برق را افزایش می‌دهد، بلکه استفاده عادلانه و پایدار از منابع انرژی را ارتقا می‌دهد و با اهداف محیطی و اجتماعی گسترده‌تر همسو می‌شود. در این مطالعه از تابع رفاه اجتماعی به عنوان یک شاخص برای ارزیابی چارچوب پیشنهادی استفاده شده است.

تابع رفاه اجتماعی[۲] به صورت رابطه ۵۰ فرموله می‌شود. بطوریکه $U_i(P_i, w)$ تابع مطلوبیت برای مصرف‌کننده (تولیدکننده) iام بسته به مقدار برق خریداری شده (فروخته شده) P_i و بهای خرید (فروش) برق w می‌باشد. $C_i(P_i)$ تابع هزینه تولید انرژی بسته به مقدار انرژی تولیدی و N تعداد مصرف‌کنندگان (تولیدکنندگان) می‌باشد (Liu و همکاران، ۲۰۲۲).

$$Social\ Welfare = \sum_{i=1}^{N} U_i(P_i, w) - C_i(P_i) \qquad (۵۰)$$

با افزایش نفوذ فناوری بلاکچین و کاربردهای متنوع و مورد توجه آن حضور زیرساخت‌های این فناوری در شبکه‌های الکتریکی اجتناب ناپذیر شده است. در این مطالعه با پذیرش این واقعیت چارچوب مدیریت انرژی جدیدی در حضور این فناوری ارائه شده است تا راه‌حلی برای کاهش آثار منفی حضور این فناوری و بهبود شاخص‌های شبکه باشد. بنابراین، در جدول ۵ مقایسه‌ای بین نتایج دو مورد مطالعه و نتایجی که از بهره‌برداری شبکه بدون حضور مزرعه استخراج رمزارز را ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که حضور هوشمند مزرعه استخراج رمزارز تحت مدل پیشنهادی، هزینه بهره‌برداری را تقریبا ۲۳.۵ درصد کمتر از مورد حضور غیرهوشمند افزایش می‌دهد درحالیکه رفاه اجتماعی را، به دلیل افزایش رفاه تولیدکنندگان، ۱۲.۷ درصد افزایش می‌هد. اما با اعمال چارچوب پیشنهادی برای برنامه‌ریزی ظرفیت استخراج مزرعه استخراج رمزارز، با وجود کاهش تقریبا ۱۰.۲۵ درصدی درآمد مزرعه استخراج رمزارز، میزان انتشار تقریبا ۸.۸۶ درصد و هزینه بهره‌برداری ۱۱۶۶ دلار کاهش داشتند. همچنین اعمال چارچوب پیشنهادی میزان بار قطع شده را به صفر رسانده است و رفاه اجتماعی کل چندریزشبکه را تقریبا ۱۰.۳۱ درصد افزایش داده است. میزان بهبود وضعیت شبکه به اندازه‌ای است که بهره‌بردار میل به حضور مزارع در شبکه خواهد داشت و با سیاست‌های تشویقی مثل قیمت برق متفاوت می‌تواند علاقه به گسترش نفوذ مزارع و شرکت در این چارچوب را افزایش دهد.

۴-۳- آنالیز حساسیت

در این بخش تجزیه و تحلیل حساسیت بر روی پارامتر ظرفیت کل مزرعه استخراج رمز ارز به عنوان نقطه داغ بار روی هزینه بهره‌برداری، انتشار، انرژی مورد انتظار تامین نشده، رفاه اجتماعی و درآمد مزرعه استخراج رمزارز برای ارزیابی عملکرد چارچوب برنامه‌ریزی پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. پارامتر ظرفیت کل مزرعه استخراج رمزارز از ۰.۷ ظرفیت تا ۱.۵ برابر ظرفیت تغییر می‌کند. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۶ ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ۴۰ درصدی ظرفیت کل مزرعه استخراج رمزارز، میزان انرژی مورد انتظار تامین نشده ۴.۶ درصد کمتر از مقداری است که در مورد ۱ و با ظرفیت نامی مزرعه استخراج رمزارز به وقوع می‌پیوندد. همانطور که قابل مشاهده است، افزایش ظرفیت بیشترین تاثیر را بر درآمد خود مزرعه می‌گذارد. و کمترین تاثیر برای رفاه اجتماعی می‌باشد. همچنین هر چقدر ظرفیت مزرعه افزایش پیدا می‌کند، تغییر رفاه کمتر می‌شود که علت آن افزایش انرژی مورد انتظار تامین نشده می‌باشد.

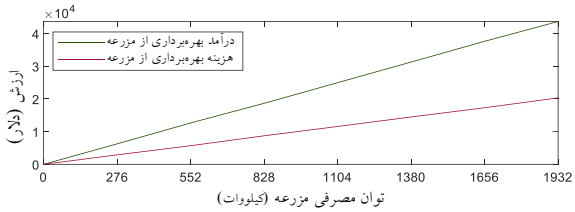
در شکل ۷ منحنی تغییرات درآمد مزرعه استخراج رمزارز در مقایسه با هزینه بهره‌برداری نسبت به تغییر تقاضای مزرعه رسم شده است. بر اساس مدل خطی پیشنهاد شده منحنی تغییرات هزینه بهره‌برداری و درآمد بهره‌برداری بصورت خطی افزایش می‌یابند.

[۴] Social welfare function

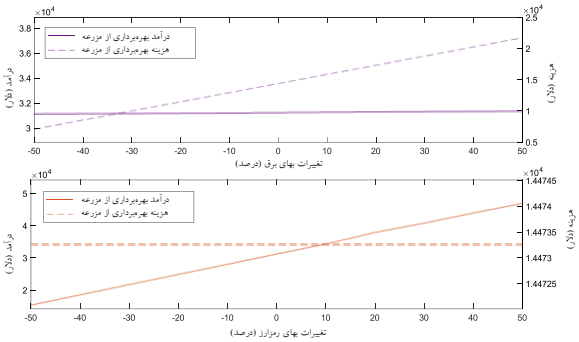
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]

مطابق شکل با افزایش مصرف مزرعه نسبت هزینه به درآمد کاهش می‌یابد.

منحنی تغییرات درآمد و هزینه بهره‌برداری از مزرعه استخراج رمزارز نسبت به بهای برق و رمز ارز در شکل ۸ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش بهای برق هزینه بهره‌برداری از مزرعه افزایش خواهد یافت. درحالیکه درآمد مزرعه تغییر محسوسی نمی‌کند. طبق رابطه ۳۱، درآمد مزرعه بطور مستقیم با تغییرات بهای برق تغییر نخواهد کرد. اما با افزایش بهای برق منابع ذخیره‌ساز انرژی میل بیشتری به شارژ و دشارژ پیدا می‌کنند که به مصرف بیشتر مزرعه در ساعات غیرپیک و افزایش ناچیز درآمد می‌انجامد. در این منحنی بهای رمزارز ۴۷۲۰۰ دلار آمریکا درنظر گرفته شده است. همچنین هزینه بهره‌برداری با تغییر بهای رمزارز هیچ تغییری نمی‌کند و فقط درآمد ماینرها افزایش خواهد یافت.

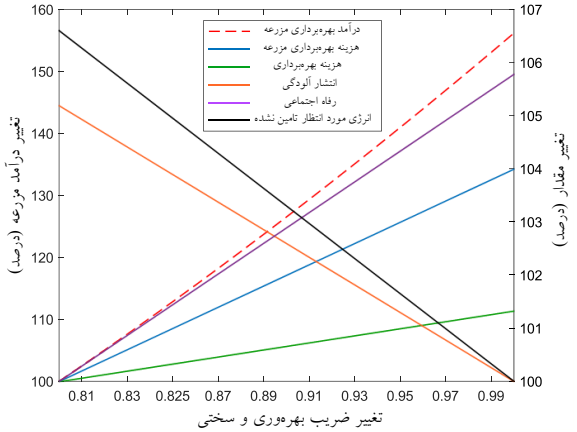


شکل (۷): هزینه و درآمد ماینرها نسبت به تغییر توان مصرفی مزرعه.



شکل (۸): هزینه و درآمد مزرعه نسبت به تغییر بهای برق و رمزارز.

در این مطالعه، دستگاه استخراج ارز دیجیتال Bitcoin Miner S19k Pro مورد استفاده قرار گرفت که شامل ویژگی‌های فنی مشخصی مانند مصرف خنک‌کننده، مصرف انرژی و نرخ هش می‌باشد. بنابراین برای بررسی تاثیر تغییرات ضریب سختی و ضریب بهره‌وری بر عملکرد مدل پیشنهادی مقادیر مختلف این ضرایب درنظر گرفته شده است. نتایج این بررسی در شکل ۹ ارائه شده است. همانطور که قابل مشاهده است، تغییر ضرایب بیشترین تاثیر را بر درآمد مزرعه داشته و سایر پارامترها تغییرات ناچیزی دارند. همچنین، بهای برق در مقایسه با سایر پارامترها بیشترین تأثیر را بر هزینه‌ی بهره‌برداری از مزرعه دارد. این در حالی است که درآمد بهره‌برداری از مزرعه ۱۵۶.۲۵ درصد تغییر می‌کند.



شکل (۹): آنالیز حساسیت نسبت به تغییرات ضریب بهره‌وری و سختی.

۴- نتیجه‌گیری

فناوری بلاکچین یکی از محبوب‌ترین نوآوری‌های دهه گذشته در نظر گرفته می‌شوند که اعتمادسازی غیرمتمرکز ایمن را ممکن می‌سازد. با این حال، در سال‌های اخیر، با افزایش سریع مصرف انرژی محاسبات مبتنی بر بلاکچین برای استخراج ارزهای دیجیتال، نگرانی‌های فزاینده‌ای در مورد عملکرد پایدار آنها در شبکه‌های الکتریکی وجود داشته است. در این مقاله، ضمن ارائه مدلی برای بهره‌برداری از مزارع رمزارز، یک چارچوب دو مرحله‌ای برای مدیریت انرژی ریزشبکه در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر، منابع ذخیره‌ساز و مزرعه استخراج رمزارز به عنوان یک بار مدیریت‌پذیر پیشنهاد شده است. در مرحله اول برنامه‌ریزی روز بعد با هدف بهبود هزینه بهره‌برداری، قابلیت اطمینان و درآمد مزرعه استخراج رمزارز در نظر گرفته شده است. در مرحله دوم برنامه‌ریزی زمان واقعی با هدف کمینه کردن هزینه نوسانات برای پنجره‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای انجام شده است. اهمیت این پژوهش در نظر گرفتن مزرعه استخراج رمزارز به عنوان یکی از انواع بارهای نوظهور است که بصورت حجم زیاد تقاضای الکتریکی متمرکز در یک نقطه مشکلات زیادی را برای شبکه ایجاد می‌کند. همچنین، در مطالعات بازار برق مبتنی بر بلاکچین میزان مصرف تجهیزات استخراج رمزارز بصورت تقریبی، درصدی از بار مصرفی، یا ناچیز فرض می‌شود که دقت محاسبات را کاهش می‌دهد. در این مقاله مدلی برای بهره‌برداری از این تجهیزات ارائه شده است که می‌تواند در واقعی شدن نتایج این مطالعات موثر باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با اعمال چارچوب پیشنهادی برای برنامه‌ریزی تعداد دستگاه‌های فعال مزرعه استخراج رمزارز، میزان انتشار تقریبا ۸.۸۶ درصد و هزینه بهره‌برداری ۱۱۶۶ دلار کاهش داشتند. همچنین اعمال چارچوب پیشنهادی رفاه اجتماعی کل چندریزشبکه را تقریبا ۱۰.۳۱ درصد افزایش داده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]

است. علاوه بر این، بررسی تاثیر تغییر ظرفیت مزرعه استخراج رمزارز، تغییر بهای برق و تغییر بهای رمزارز بررسی شده است. نتایج نشان دادند که با افزایش ۴۰ درصدی ظرفیت کل مزرعه استخراج رمزارز، میزان انرژی مورد انتظار تامین نشده کمتر از زمانی است که ظرفیت مزرعه در مقدار نامی است و از چارچوب پیشنهادی استفاده نمی‌شود که کارآمدی چارچوب پیشنهادی را تایید می‌کند.

جدول (۵): مقایسه نتایج دو مورد مطالعه اعمال شده بر ریزشبکه

مورد مطالعه	هزینه بهره‌برداری (دلار)	انتشار آلودگی (کیلوگرم)	انرژی مورد انتظار تامین نشده (کیلووات‌ساعت)	رفاه اجتماعی (دلار)	درآمد مزرعه استخراج رمزارز (دلار)
مورد ۱	۶۹۷۷.۳۱۵	۱۱۰۷۳۸.۷۵	۴۷۴۶.۸۰۹	۲۲۵۹۳.۲۹۲	۳۶۴۷۶.۸۹
مورد ۲	۵۸۱۱.۴۱۴	۱۰۱۷۲۶.۲۷۸	۰	۲۴۹۲۳.۴۰۵	۳۳۲۷۰.۵۷۳
عدم حضور مزرعه استخراج رمزارز	۴۹۷۷.۳۴۸	۹۶۶۷۲.۴۲۳	۰	۲۱۷۵۷.۹۲۱	۰

جدول (۶): آنالیز حساسیت پارامتر ظرفیت مزرعه استخراج رمزارز بر مقادیر بهره‌برداری ریزشبکه

تغییر تقاضای مزرعه استخراج رمزارز (درصد)	-۳۰	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
هزینه بهره‌برداری (دلار)	۴۶۶۰.۸۶۶	۵۰۴۶.۳۴۷	۵۴۲۵.۵۶۸	۵۸۱۱.۴۱۴	۶۲۳۱.۱۶	۶۶۰۶.۱۹۲	۷۰۴۳.۰۷۹	۷۳۸۲۳.۴۷۴	۷۸۱۶.۶۱۵
انتشار آلودگی (کیلوگرم)	۸۷۹۲۴.۷۲	۹۲۷۶۶.۷۰۹	۹۲۷۶۶.۷۰۹	۱۰۱۷۲۶.۲۷۸	۱۰۵۴۵۲.۴۵۷	۱۰۸۸۹۷.۴۰۶	۱۱۱۵۲۱.۸۳۴	۱۱۴۲۵۴.۹۵۲	۱۱۷۰۴۴.۲۶۸
انرژی مورد انتظار تامین نشده (کیلووات‌ساعت)	۰	۰	۰	۰	۹۱۷.۵۴۲	۱۸۷۷.۶۹۱	۳۱۰۶.۰۳۳	۴۵۳۷.۶۴۴	۶۹۰۱.۵۲۳
رفاه اجتماعی (دلار)	۲۲۸۲۳.۴۹۹	۲۳۳۴۹.۶۸۳	۲۳۳۴۹.۶۸۳	۲۴۹۲۳.۴۰۵	۲۵۳۹۳.۰۲۷	۲۵۸۱۱.۶۲۲	۲۶۱۴۵.۹۵۶	۲۶۳۷۶.۵۸۶	۲۶۵۴۴.۴۲۵
درآمد مزرعه استخراج رمزارز (دلار)	۲۴۸۲۷	۲۷۷۹۹.۲	۲۷۷۹۹.۲	۳۳۲۷۰.۵۷۳	۳۷۳۷۲.۳	۳۹۸۵۲.۹	۴۲۸۸۵.۷۲	۴۵۹۸۸.۰۸۴	۵۰۶۹۱.۳۵۵

منابع

Yaga, D., Mell, P., Roby, N., & Scarfone, K. (2019). Blockchain technology overview. arXiv preprint arXiv:1906.11078.

Náñez Alonso, S. L., Jorge-Vázquez, J., Echarte Fernández, M. Á., & Reier Forradellas, R. F. (2021). Cryptocurrency mining from an economic and environmental perspective. Analysis of the most and least sustainable countries. Energies, 14(14), 4254.

Li, J., Li, N., Peng, J., Cui, H., & Wu, Z. (2019). Energy consumption of cryptocurrency mining: A study of electricity consumption in mining cryptocurrencies. Energy, 168, 160-168.

Dindar, B., & Gül, Ö. (2022). The detection of illicit cryptocurrency mining farms with innovative approaches for the prevention of electricity theft. Energy & Environment, 33(8), 1663-1678.

Amiri, M., & Askari, H. (2022). Illegal Miner Detection based on Pattern Mining: A Practical Approach. Journal of Computing and Security, 9(2), 1-10.

Hajipour, E., Khavari, F., Hajiaghapour-Moghimi, M., Hosseini, K. A., & Vakilian, M. (2022). An economic evaluation framework for cryptocurrency mining operation in microgrids. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 142, 108329.

Jirdehi, M. A., & Tabar, V. S. (2023). Risk-aware energy management of a microgrid integrated with battery charging and swapping stations in the presence of renewable resources high penetration, crypto-currency miners and responsive loads. Energy, 263, 125719.

Hajiaghapour-Moghimi, M., Azimi Hosseini, K., Hajipour, E., & Vakilian, M. (2022). An approach to targeting cryptocurrency mining loads for energy efficiency enhancement. IET Generation, Transmission & Distribution, 16(23), 4775-4790.

Rezaei, P., & Golkar, M. A. (2023). Two-Stage Energy Management System of Microgrid in the Presence of Cryptocurrency Mining Farms. 2023 13th Smart Grid Conference (SGC),

Tabar, V. S., Tohidi, S., & Ghassemzadeh, S. (2023). Stochastic risk-embedded energy management of a hybrid green residential complex based on downside risk constraints considering home crypto miners, adaptive parking lots and responsive loads: A real case study. Sustainable Cities and Society, 95, 104589.

Bhatt, A., Ongsakul, W., & Pawar, J. (2024). Optimal energy management system for carbon–neutral microgrid integrating second-life batteries and crypto mining devices. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 64, 103686.

Tabar, V. S., Ghassemzadeh, S., & Tohidi, S. (2022). Risk-based day-ahead planning of a renewable multi-carrier system integrated with multi-level electric vehicle charging station, cryptocurrency mining farm and flexible loads. Journal of Cleaner Production, 380, 134898.

Menati, A., Zheng, X., Lee, K., Shi, R., Du, P., Singh, C., & Xie, L. (2023). High resolution modeling and analysis of cryptocurrency mining's impact on power grids: Carbon footprint, reliability, and electricity price. Advances in Applied Energy, 10, 100136.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]

averse optimal bidding of electric vehicles and energy storage aggregator in day-ahead frequency regulation market. IEEE Transactions on Power systems, 34(3), 2036-2047.

Bidgoli, M. M., Karimi, H., Jadid, S., & Anvari-Moghaddam, A. (2021). Stochastic electrical and thermal energy management of energy hubs integrated with demand response programs and renewable energy: A prioritized multi-objective framework. Electric Power Systems Research, 196, 107183.

Liu, H., Shen, Y., Zabinsky, Z. B., Liu, C.-C., Courts, A., & Joo, S.-K. (2008). Social welfare maximization in transmission enhancement considering network congestion. IEEE Transactions on Power systems, 23(3), 1105-1114.

Menati, A., Lee, K., & Xie, L. (2023). Modeling and analysis of utilizing cryptocurrency mining for demand flexibility in electric energy systems: A synthetic texas grid case study. IEEE Transactions on Energy Markets, Policy and Regulation, 1(1), 1-10.

Shezan, S. A., Kamwa, I., Ishraque, M. F., Muyeen, S., Hasan, K. N., Saidur, R., Rizvi, S. M., Shafiullah, M., & Al-Sulaiman, F. A. (2023). Evaluation of different optimization techniques and control strategies of hybrid microgrid: A review. Energies, 16(4), 1792.

Al-Ismail, F. S. (2024). A critical review on DC microgrids voltage control and power management. IEEE Access.

Nargeszar, A., Ghaedi, A., Nafar, M., & Simab, M. (2024). Optimal scheduling of the stand-alone micro grids considering the reliability cost. The Journal of Engineering, 2024(7), e12387.

Amini Khanavandi, H., Gandomkar, M., & Nikoukar, J. (2024). Reliability-Based Planning and Partitioning of Multiple Micro-Grid Considering Demand Side Response Program. Journal of Electrical Engineering & Technology, 19(8), 4749-4765.

Omri, M., Jooshaki, M., Abbaspour, A., & Fotuhi-Firuzabad, M. (2024). Modeling Microgrids for Analytical Distribution System Reliability Evaluation. IEEE Transactions on Power systems, 39(5), 6319-6331.

Rahmani, E., Mohammadi, S., Zadehbagheri, M., & Kiani, M. (2023). Probabilistic reliability management of energy storage systems in connected/islanding microgrids with renewable energy. Electric Power Systems Research, 214, 108891.

Ali, H., Hussain, A., Bui, V.-H., Jeon, J., & Kim, H.-M. (2019). Welfare maximization-based distributed demand response for islanded multi-microgrid networks using diffusion strategy. Energies, 12(19), 3701.

Yang, J., Dai, J., Gooi, H. B., Nguyen, H. D., & Wang, P. (2022). Hierarchical blockchain design for distributed control and energy trading within microgrids. IEEE Transactions on Smart Grid, 13(4), 3133-3144.

Rezaei, P., Heidari, N., Mirbarati, S. H., Nikoofard, A., Golkar, M. A., & Khaloozadeh, H. (2022). A Novel Energy Management Scheme for a Microgrid with Renewable Energy Sources Considering Uncertainties and Demand Response. 2022 12th Smart Grid Conference (SGC),

Rezaei, P., & Golkar, M. A. (2021). Economic Load Curve Flattening by EVs Charge and Discharge Scheduling in the Smart Grid Considering Machine Learning-based Forecasted Load. 2021 11th Smart Grid Conference (SGC),

Mirbarati, S. H., Heidari, N., Nikoofard, A., Danish, M. S. S., & Khosravy, M. (2022). Techno-Economic-Environmental Energy Management of a Micro-Grid: A Mixed-Integer Linear Programming Approach. Sustainability, 14(22), 15036.

Vatandoust, B., Ahmadian, A., Golkar, M. A., Elkamel, A., Almansoori, A., & Ghaljehei, M. (2018). Risk-

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-02]