

Development and implementation of smart energy networks using blockchain technology: challenges and opportunities

Alireza Joshan

Department of Electrical Engineering, University of Guilan,Rasht, Guilan, Iran
Alireza.joshan.guilan@gmail.com

Abstract: Considering the growing demand for energy and the need to optimize energy resources, the development of smart networks has been proposed as a basic solution in the energy industry. These networks need innovative technologies that help facilitate the management and distribution of energy. One of these technologies is blockchain, which, as a decentralized and secure tool, provides the possibility of exchanging information and conducting transactions. This review article examines the role of blockchain in the development and implementation of smart energy networks and analyzes the opportunities and challenges associated with it. First, the basic concepts of smart grids and blockchain are introduced, and then the potential applications of blockchain in improving the transparency, efficiency and security of energy systems are examined. The results show that this technology can facilitate the exchange of energy between producers and consumers, reduce transaction costs and improve the security of energy infrastructure. However, challenges such as scalability, lack of reliable data, and issues related to public acceptance are obstacles in the way of implementing this technology. By identifying the developable areas of blockchain in smart energy networks, this study provides suggestions for future research, the integration of blockchain in energy networks can lead to a great transformation in the electricity and energy industry and provide new solutions for optimal management of energy consumption and production.

Keywords: smart energy networks, blockchain technology, energy management, decentralized systems, smart contracts

JCDSA, Vol. 3, No. 1, Spring 2025
 Received: 2024-09-02

Online ISSN: 2981-1295
 Accepted: 2025-05-06

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>
 Published: 2025-06-21

CITATION

Joshan, A., "Development and implementation of smart energy networks using blockchain technology: challenges and opportunities", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 3, No. 1, pp. 54-62, 2025.
 DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

In recent years, blockchain technology, as one of the important innovations in the field of digital technologies, has created new opportunities in the energy industry. This technology has been able to play an important role in improving the transparency, security and efficiency of energy distribution and management networks. Blockchain enables the conclusion of smart contracts, permanent and immutable records of transactions and reducing dependence on intermediaries, which can create significant changes in the traditional and interconnected structures of this industry. Practical applications and sample projects demonstrate the high potential of this technology in improving efficiency, reducing costs and developing local and smart markets in the energy sector. The purpose of this study is to deeply examine the applications of blockchain in the energy industry, analyze data from practical projects and identify future challenges and opportunities.

2- Methodology

This research uses library resource analysis, practical project reports, and statistical data collection related to blockchain activities in the energy sector. The data includes the number of projects, areas of activity, geographical scope, and related technologies such as the Internet of Things, artificial intelligence, and cryptocurrency, which are presented in the form of statistical tables and graphs. Also, case studies of successful projects in different countries and analysis of benefits, challenges, and implementation solutions through scientific documents and articles have been conducted. This approach has enabled a comprehensive and comparative assessment of the efficiency and effectiveness of blockchain in the energy sector.

3- Results and discussion

The results show that a wide range of blockchain projects are being implemented and tested around the world, such as grid management, decentralized energy trading, and local market development. Statistical data shows that different countries, with a focus on emerging markets, are playing an important role in advancing the technology. Examples such as the TransActive Grid project in the United States and the SUNNY platform are demonstrating that blockchain can reduce costs, reduce errors and fraud, and increase transparency in energy transactions. Also, an analysis of existing projects shows that the integration of blockchain with technologies such as the Internet of Things and artificial intelligence will transform the future of energy resource management and has the potential to achieve sustainable development. At the same time, challenges such as scalability limitations, high energy consumption, lack of global standards, and cultural

resistance are the main obstacles to the widespread development of this technology, which require appropriate solutions and international cooperation policies.

4- Conclusion

Overall, blockchain technology plays a vital and transformative role in developing and improving the structures of the energy industry. The potential of this technology to reduce costs, increase transparency, facilitate transactions and create local and smart markets promises a sustainable and efficient future. However, to fully exploit the potential of blockchain, we need to take steps such as developing global standards, improving technical infrastructure, investing in research and development, educating stakeholders and adjusting policies. Interagency and international cooperation and establishing strong legal frameworks will not only solve technical and legal problems but also facilitate public and industrial adoption of the technology in the energy sector. As a result, realizing a bright and smart future in the energy industry requires continuous adaptation to new technologies and strategic and coordinated policies, in which blockchain plays a key role.





توسعه و پیاده سازی شبکه های هوشمند انرژی با استفاده

از فناوری بلاک چین: چالش ها و فرصت ها

علیرضا جوشن^{۱*}

۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان، ایران (Alireza.joshan.guilan@gmail.com)

چکیده: با توجه به رشد فزاینده تقاضا برای انرژی و نیاز به بهینه سازی منابع انرژی، توسعه شبکه های هوشمند به عنوان یک راه حل اساسی در صنعت انرژی مطرح شده است. این شبکه ها به فناوری های نوآورانه ای نیاز دارند که به تسهیل مدیریت و توزیع انرژی کمک کند. یکی از این فناوری ها، بلاک چین است که به عنوان ابزاری غیرمتمرکز و امن، امکان تبادل اطلاعات و انجام معاملات را فراهم می آورد. این مقاله مروری، به بررسی نقش بلاک چین در توسعه و پیاده سازی شبکه های هوشمند انرژی می پردازد و فرصت ها و چالش های مرتبط با آن را تحلیل می کند. در ابتدا، مفاهیم اساسی شبکه های هوشمند و بلاک چین معرفی شده و سپس کاربردهای بالقوه بلاک چین در بهبود شفافیت، کارایی و امنیت سیستم های انرژی مورد بررسی قرار می گیرند. نتایج نشان می دهد که این فناوری می تواند تبادل انرژی میان تولیدکنندگان و مصرف کنندگان را تسهیل کرده، هزینه های معاملاتی را کاهش دهد و امنیت زیرساخت های انرژی را ارتقا بخشد. با این حال، چالش هایی مانند مقیاس پذیری، کمبود داده های قابل اعتماد و مسائل مربوط به پذیرش عمومی، موانعی در مسیر پیاده سازی این فناوری محسوب می شوند. این مطالعه با شناسایی زمینه های توسعه پذیر بلاک چین در شبکه های هوشمند انرژی، پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ارائه می دهد. ادغام بلاک چین در شبکه های انرژی می تواند به تحولی بزرگ در صنعت برق و انرژی منجر شود و راهکارهایی نوین برای مدیریت بهینه مصرف و تولید انرژی ارائه دهد.

واژه های کلیدی: شبکه های هوشمند انرژی، فناوری بلاک چین، مدیریت انرژی، سیستم های غیرمتمرکز، قراردادهای هوشمند.

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: مروری

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲

۱- مقدمه

امنیت، و همچنین افزایش پایداری انرژی کمک کند [۵]. همچنین، بلاک چین با فراهم آوردن امکان ایجاد قراردادهای هوشمند، به تسریع روند معاملات و برنامه ریزی انرژی منجر می شود.

هرچند پتانسیل های قابل توجهی برای ادغام بلاک چین در شبکه های هوشمند وجود دارد، اما چالش هایی نیز فراروی این فناوری قرار دارد. از جمله این چالش ها می توان به نگرانی های مربوط به مقیاس پذیری، کمبود داده های استناددار، و نیاز به پذیرش عمومی اشاره کرد [۶-۹]. هدف این مقاله مروری، بررسی و تحلیل کاربردهای بلاک چین در توسعه و پیاده سازی شبکه های هوشمند انرژی، و نیز شناسایی چالش ها و فرصت های موجود در این زمینه است. با ارائه یک مروری جامع بر ادبیات موجود، این مقاله به تعبیر پتانسیل های بلاک چین در برطرف کردن معضلات حال حاضر صنعت انرژی کمک کرده و به محققان و سیاست گذاران راهکارهایی نوین ارائه می دهد. در این مقاله، با پرداختن به موضوعات کلیدی و شفاف سازی ضرورت های نوآورانه در صنعت انرژی، سعی خواهد شد تا زمینه های بیشتری برای تحقیق و توسعه در این زمینه به وجود بیاید. با این حال، باید به این

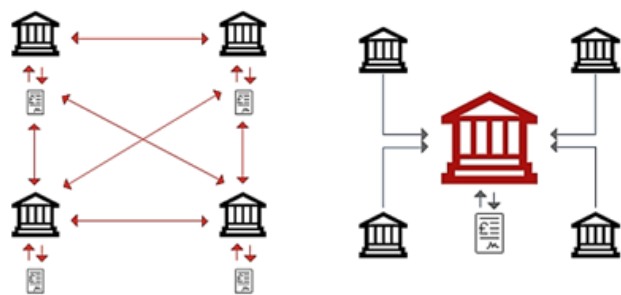
در دهه های اخیر، صنعت انرژی با چالش های فراوانی مواجه شده است؛ از جمله افزایش تقاضا برای انرژی، نوسانات قیمت، و نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای. این عوامل، فشار روزافزونی را بر روی سیستم های تولید و توزیع انرژی تحمیل نموده اند [۱]. در این راستا، شبکه های هوشمند انرژی به عنوان راهبردی موثر برای بهینه سازی تولید، توزیع، و مصرف انرژی معرفی شده اند. این شبکه ها با استفاده از فناوری های نوین، نظیر سنسورها و سیستم های اطلاعاتی، امکان مدیریت بهینه و آنی جریان انرژی را فراهم می آورند [۲ و ۳]. یکی از فناوری هایی که به تازگی در جهت بهبود عملکرد شبکه های هوشمند مورد توجه قرار گرفته، فناوری بلاک چین است. بلاک چین با ارائه یک سیستم غیرمتمرکز و ایمن، موجب تسهیل تبادل اطلاعات و معاملات در میان تولیدکنندگان و مصرف کنندگان انرژی می شود [۴]. این فناوری می تواند به کاهش هزینه های معاملاتی، بهبود شفافیت و



شفافیت در زنجیره‌های تأمین و معاملات کمک می‌کند، زیرا هر تراکنش به‌طور دائمی و عمومی ثبت می‌شود و هیچ فرد یا نهادی نمی‌تواند به‌تنهایی آن را دست‌کاری کند. همچنین، فناوری بلاک‌چین قابلیت ایجاد قراردادهای هوشمند را فراهم می‌آورد؛ قراردادهایی که به‌طور خودکار و بر اساس شرایط مشخصی اجرا می‌شوند و نیاز به واسطه را کاهش می‌دهند. اهمیت بلاک‌چین نه‌تنها در انتقال دارایی‌ها، بلکه در دنیای شبکه‌های انرژی نیز به وضوح مشهود است. این فناوری می‌تواند تسهیل تعاملات میان تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی کمک کرده و به بهینه‌سازی مصرف و تولید انرژی کمک کند. به‌طور کلی، بلاک‌چین به‌عنوان یک مفهوم نوین و تحول‌ساز در عرصه‌های مختلف به‌ویژه انرژی، به‌طرز شگرفی شیوه‌های فعلی کسب‌وکار و مدیریت اطلاعات را تغییر می‌دهد [۱۴ و ۱۵].

۳-۱- معرفی بلاک‌چین

بلاک‌چین یک فناوری نوین است که به عنوان یک دفتر کل توزیع شده و غیرمتمرکز عمل می‌کند (شکل ۱). این فناوری به‌طور اصلی برای ثبت و تأیید تراکنش‌ها در ارزهای دیجیتال مانند بیت‌کوین توسعه یافته است، اما کاربرد های آن فراتر از این حوزه می‌رود. در بلاک‌چین، اطلاعات در قالب بلوک‌هایی ذخیره می‌شوند که هر بلوک شامل مجموعه‌ای از تراکنش‌ها و یک هش منحصر به فرد از بلوک قبلی است. این ویژگی باعث می‌شود که هر تغییر در اطلاعات به راحتی قابل شناسایی باشد و امنیت داده‌ها تضمین شود [۱۴ و ۱۵]. بلاک‌چین از طریق شبکه‌ای از گره‌ها (نودها) مدیریت می‌شود که هر کدام نسخه‌ای از دفتر کل را نگهداری می‌کنند. این ساختار توزیع شده نه تنها از تقلب جلوگیری می‌کند، بلکه امکان شفافیت و دسترسی عمومی به داده‌ها را فراهم می‌آورد. همچنین، بلاک‌چین با استفاده از الگوریتم‌های رمزنگاری، امنیت و حریم خصوصی اطلاعات را تأمین می‌کند [۱۵]. بلاک‌چین می‌تواند در زمینه‌های مختلفی مانند زنجیره تأمین، رای‌گیری الکترونیکی، ثبت املاک و دارایی‌های دیجیتال مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به مزایای آن، بسیاری از صنایع به دنبال پیاده‌سازی این فناوری برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها هستند. در نهایت، بلاک‌چین به عنوان یک نوآوری مهم در دنیای دیجیتال، پتانسیل تغییرات بنیادینی در نحوه تعاملات اقتصادی و اجتماعی بشر را دارد [۱۶ و ۱۷].



شکل (۱): الف- دفتر کل متمرکز؛ ب- دفتر کل توزیع شده

پرداخته شود که استفاده از بلاک‌چین تا چه حدی توانایی برآورده کردن الزامات فعلی کنترل، عملیات و مدیریت شبکه هوشمند را دارد. در این پژوهش، پس از معرفی فناوری بلاک‌چین و تشریح مفاهیم اساسی مرتبط آن، کاربردهای این فناوری در بخش انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، ایده‌های نوآورانه مرتبط با این حوزه به تفصیل بیان شده و نمونه‌های عملی موفق اجرا شده در سراسر جهان تحلیل می‌شوند. در بخش پایانی، چالش‌های کلیدی و ملاحظات مهم در راستای استفاده از بلاک‌چین در صنعت انرژی مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- مبانی نظری شبکه‌های هوشمند انرژی

شبکه‌های هوشمند انرژی به‌عنوان یک سیستم پیچیده و یکپارچه، ساختاری را فراهم می‌آورند که امکان مدیریت بهینه تولید، توزیع و مصرف انرژی را ایجاد می‌کند [۱۰]. در این شبکه‌ها، تکنولوژی‌های پیشرفته‌ای مانند سنسورها، کنترل‌کننده‌های هوشمند و سیستم‌های اطلاعاتی به کار گرفته شده‌اند تا داده‌های واقعی و آنی در مورد وضعیت انرژی به‌دست آید. این داده‌ها به مدیران و مصرف‌کنندگان قابلیت می‌دهند که تصمیمات هوشمندانه‌تری بگیرند و بنابراین مصرف انرژی را بهینه کنند. شبکه‌های هوشمند انرژی به‌ویژه با هدف کاهش اتلاف انرژی، بهبود کیفیت برق و افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع طراحی شده‌اند [۱۱]. این نوع شبکه‌ها همچنین توانایی ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی و بادی را دارا هستند؛ که به‌طور قابل توجهی در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی موثرند. امکان مدیریت دوطرفه انرژی در این شبکه‌ها به افراد این امکان را می‌دهد که نه تنها مصرف‌کننده، بلکه تولیدکننده نیز باشند، به‌ویژه در مورد انرژی‌های تجدیدپذیر در مقیاس خانگی. عملکرد شبکه‌های هوشمند به‌طور عمده بر اساس جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و پردازش آن‌ها و اجرای تصمیمات بر مبنای اطلاعات به‌دست آمده است. در حالی که حفاظت از اطلاعات و امنیت سایبری چالش‌های مهمی برای این سیستم‌ها محسوب می‌شوند، توسعه و پیاده‌سازی این شبکه‌ها می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود تأمین انرژی و کاهش هزینه‌ها در طولانی‌مدت شوند [۱۲ و ۱۳].

۳- فناوری بلاک‌چین: تعریف و ویژگی‌ها

فناوری بلاک‌چین یک سیستم غیرمتمرکز برای ذخیره‌سازی و تبادل داده‌ها است که به‌طور اصولی بر مبنای ایجاد و حفظ یک دفتر کل توزیع‌شده عمل می‌کند. این فناوری به‌دلیل ویژگی‌های خاصی که دارد، به‌ویژه در حوزه‌هایی مانند صنعت انرژی و مالی توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. یکی از ویژگی‌های بارز بلاک‌چین، قابلیت غیرقابل تغییر بودن داده‌هاست؛ به‌طوری که هر بلاک جدید به‌صورت زنجیره‌ای به بلاک قبلی متصل می‌شود و هرگونه تغییر در اطلاعات موجود باید توسط همه نودهای شبکه تأیید گردد. بلاک‌چین از پروتکل‌های رمزنگاری استفاده می‌کند که امنیت و حریم خصوصی داده‌ها را تضمین می‌کند. با وجود این ویژگی‌ها، بلاک‌چین به افزایش

۴- نقش بلاک چین در مدیریت انرژی

بلاک چین به عنوان یک فناوری تحول ساز، نقش مهمی در مدیریت انرژی ایفا می کند و به بهینه سازی فرآیندها و بهبود کارایی سیستم های انرژی کمک می کند. یکی از کاربردهای اصلی بلاک چین، تسهیل ارتباطات میان منابع انرژی تجدیدپذیر و مصرف کنندگان است. با استفاده از بلاک چین، امکان ایجاد بازارهای محلی انرژی به وجود می آید که در آن تولیدکنندگان می توانند انرژی خود را به طور مستقیم به مصرف کنندگان بفروشند، بدون نیاز به واسطه های سنتی. علاوه بر این، بلاک چین به بهبود پیش بینی و مدیریت بار کمک می کند. با تجزیه و تحلیل داده های جمع آوری شده از سنسورها و دستگاه های هوشمند، بلاک چین می تواند پیش بینی های دقیق تری در مورد تقاضا و عرضه انرژی ارائه دهد. این امر به مدیران شبکه کمک می کند تا تصمیمات بهتری در مورد برنامه ریزی و توزیع انرژی اتخاذ کنند [۱۶]. بلاک چین همچنین به افزایش شفافیت در فرآیندهای مدیریت انرژی کمک می کند. به واسطه ثبت دائمی و غیرقابل تغییر داده ها در بلاک چین، تمامی ذینفعان می توانند به راحتی در مورد معاملات و فرآیندهای مربوط به انرژی نظارت کنند و به این ترتیب خطرات تقلب و سوءاستفاده کاهش می یابد. همچنین، بلاک چین می تواند به تسهیل در پرداخت ها و تراکنش ها کمک کند، که موجب می شود زمان و هزینه های مرتبط با فرآیندهای مالی کاهش یابد. به علاوه، با امکان مدیریت قراردادهای هوشمند، قوانین و شرایط معاملاتی به صورت خودکار اجرا می شوند که به کارایی و سرعت فرآیندهای تجاری اضافه می کند. در مجموع، بلاک چین به عنوان یک ابزار کارآمد برای مدیریت انرژی، به تحول در این صنعت کمک قابل توجهی می کند [۱۷].

۵- مزایای بلاک چین در صنعت برق

فناوری بلاک چین به عنوان یک نوآوری برجسته، مزایای قابل توجهی را به صنعت برق ارائه می دهد که می تواند به بهبود کارایی و شفافیت این صنعت کمک کند. یکی از اصلی ترین مزایای بلاک چین، قابلیت غیرمتمرکز بودن آن است. این ویژگی به تولیدکنندگان و مصرف کنندگان انرژی این امکان را می دهد که به صورت مستقیم با یکدیگر تعامل کنند و نیاز به واسطه ها را کاهش دهند، که خود به کاهش هزینه ها منجر می شود. بلاک چین همچنین به بهبود شفافیت در زنجیره تأمین انرژی کمک می کند. تمام معاملات و تراکنش ها به صورت دائمی ثبت می شوند، که این امر امکان پیگیری و تأیید تراکنش ها را برای همه ذینفعان فراهم می آورد. این شفافیت می تواند به اعتماد بیشتر میان تولیدکنندگان و مصرف کنندگان انرژی منجر شود و از رفتارهای غیرمنصفانه جلوگیری کند. یکی دیگر از مزایای بلاک چین، امکان استفاده از قراردادهای هوشمند است که به طور خودکار اجرا می شوند. این قراردادها می توانند به خودکارسازی پروسه های معاملاتی کمک کنند و از لحاظ زمان و هزینه بهینه سازی های چشمگیری به وجود آورند. به علاوه، بلاک چین می تواند به مدیریت بهتر منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی و

بادی، کمک کند و به تسهیل تجمیع و فروش آن ها توسط مصرف کنندگان جزء (مانند خانوارها) بپردازد. در نهایت، افزایش امنیت در تبادلات انرژی یکی دیگر از مزایای بلاک چین است. سیستم های سنتی معمولاً در برابر حملات سایبری آسیب پذیرند؛ اما بلاک چین با ویژگی های رمزنگاری خود، این خطرات را به حداقل می رساند. به طور کلی، بلاک چین می تواند به تحولی بزرگ در صنعت برق منجر شود و شیوه های فعلی معاملات و مدیریت انرژی را بهبود بخشد [۲۰-۱۸].

۶- چالش های فنی بلاک چین در صنعت انرژی

با وجود پتانسیل های بسیار بالای فناوری بلاک چین در صنعت انرژی، چالش های فنی متعددی وجود دارد که می توانند مانع از گسترش آن شود. یکی از اصلی ترین معضلات، مقیاس پذیری است. بسیاری از شبکه های بلاک چین در حال حاضر قادر به پردازش حجم بالای تراکنش ها در زمان واقعی نیستند. این مشکل می تواند در زمان های اوج بار، که نیاز به تبادل سریع اطلاعات وجود دارد، موجب افت عملکرد و سرعت شود. علاوه بر این، هم سوایی و سازگاری بلاک چین با زیرساخت های موجود در صنعت انرژی نیز یک چالش جدی است. بسیاری از سیستم های فعلی انرژی بر اساس تکنولوژی های سنتی طراحی شده اند و هماهنگی آنها با بلاک چین می تواند زمان بر و پرهزینه باشد. مسئله دیگری که باید به آن پرداخته شود، مدیریت داده ها و امنیت سایبری است. در پیاده سازی بلاک چین، اطلاعات حساس و حیاتی انرژی باید محافظت شوند. هرگونه دسترسی غیرمجاز می تواند عواقب گسترده ای برای سیستم های انرژی و امنیت ملی به همراه داشته باشد. نیاز به زیرساخت های فنی مناسب نیز از دیگر چالش ها است. برای پیاده سازی مؤثر بلاک چین، وجود سخت افزار و نرم افزارهای مناسب ضروری است که هنوز در بسیاری از مناطق توسعه نیافته است. در نهایت، عدم آگاهی و آموزش کافی از فناوری بلاک چین در بین ذینفعان و متخصصان این صنعت نیز به عنوان یک مانع برای پیاده سازی آن تلقی می شود. ضروری است که با برگزاری دوره های آموزشی و کارگاه های تخصصی، سطح دانش فنی در این حوزه ارتقاء یابد تا بتوان بر این چالش ها فائق آمد [۲۱ و ۲۲].

۷- چالش های اجتماعی و فرهنگی بلاک چین در

صنعت انرژی

پیاده سازی فناوری بلاک چین در صنعت انرژی تنها با چالش های فنی و قانونی محدود نمی شود، بلکه با مسائل اجتماعی و فرهنگی نیز روبه رو است. یکی از اصلی ترین چالش ها، عدم آگاهی و درک جامعه از فناوری بلاک چین و کاربردهای آن در مدیریت انرژی است. بسیاری از مصرف کنندگان و تولیدکنندگان ممکن است نسبت به این فناوری دیدی منفی داشته باشند یا اطلاعات کافی در مورد مزایای آن نداشته باشند، که می تواند مانع از پذیرش آن شود. علاوه بر این، ترس از تغییر و انتقال به سیستم های جدید نیز می تواند از موانع جدی باشد. ذینفعان سنتی، از جمله شرکت های بزرگ انرژی، ممکن است به دلیل منافع



۹- مقایسه بلاک چین و سیستم‌های سنتی انرژی

مقایسه بلاک چین و سیستم‌های سنتی انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا شناخت نقاط قوت و ضعف هر کدام می‌تواند راهگشای تحول در صنعت انرژی باشد. در سیستم‌های سنتی، انرژی از تولیدکنندگان بزرگ به مصرف‌کنندگان منتقل می‌شود و این فرآیند اغلب شامل واسطه‌های متعدد است که باعث افزایش هزینه‌ها و زمان انتقال می‌شود. به عکس، بلاک چین با امکان تعامل مستقیم بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، می‌تواند این فرآیند را سریع‌تر و کمتر هزینه‌بر کند. یکی از مهم‌ترین مزایای بلاک چین، افزایش شفافیت در تراکنش‌ها است. در سیستم‌های سنتی، اطلاعات مربوط به تأمین و توزیع انرژی معمولاً در دسترس عموم قرار ندارد و این امر می‌تواند به نقایص امنیتی منجر شود. اما بلاک چین اطلاعات را به صورت غیرقابل تغییر و در دسترس همه قرار می‌دهد، که به عملکرد بهتر و قابل اعتمادتر سیستم کمک می‌کند [۲۸ و ۲۹]. همچنین، در سیستم‌های سنتی، امکان خطا و تقلب در گزارش‌گیری وجود دارد. اما بلاک چین با استفاده از الگوریتم‌های رمزنگاری و سیستم‌های تأیید چندگانه، این ریسک را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. مسائل مربوط به دسترسی و هزینه نیز از دیگر تفاوت‌های مهم هستند. سیستم‌های سنتی ممکن است عملکرد ضعیفی در مناطق دورافتاده یا کم‌جمعیت داشته باشند، در حالی که بلاک چین می‌تواند به راحتی در این نقاط اجرا شود و به تأمین انرژی محلی کمک کند. در نهایت، چالش‌های فنی سیستم‌های سنتی معمولاً به پیچیدگی زیرساخت‌ها مربوط می‌شود؛ اما بلاک چین با ارائه یک پلتفرم تخصصی و مبتنی بر داده‌های غیرمتمرکز، راه‌حل‌های نوآورانه‌ای برای تسهیل عملیات انرژی ارائه می‌دهد. این مقایسه تأکید می‌کند که بلاک چین می‌تواند به عنوان یک گزینه جذاب و کارآمد برای آینده صنعت انرژی مطرح باشد [۳۰].

۱۰- پروژه‌های موفق بلاک چین در صنعت انرژی

با رشد فناوری بلاک چین، پروژه‌های موفق در سطح جهانی در زمینه صنعت انرژی راه‌اندازی شده‌اند که نشان‌دهنده پتانسیل این فناوری در بهبود ساختارهای مدیریت انرژی هستند. یکی از نمونه‌های بارز، پروژه Power Ledger در استرالیا است که یک پلتفرم تبادل انرژی مبتنی بر بلاک چین ارائه می‌دهد. این پلتفرم به مصرف‌کنندگان این امکان را می‌دهد که انرژی تولیدی خود از منابع تجدیدپذیر را به صورت مستقیم به سایرین بفروشند، بدون نیاز به واسطه. پروژه دیگر در آلمان، WePower نام دارد که در آن بلاک چین برای تأمین مالی پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شود. این پلتفرم به تولیدکنندگان انرژی کمک می‌کند تا قراردادهای خرید و فروش بلندمدت را با مصرف‌کنندگان آینده به صورت شفاف و امن منعقد کنند و به این ترتیب، منابع مالی لازم برای توسعه پروژه‌های جدید را تأمین نمایند. در ایالات متحده، LO3 Energy با راه‌اندازی شبکه‌ای مبتنی بر بلاک چین به نام TransActive Grid، به مصرف‌کنندگان امکان می‌دهد تا انرژی خود را در مقیاس محلی به یکدیگر بفروشند. این

اقتصادی خود، تمایلی به پذیرش بلاک چین نداشته باشند. این مقاومت فرهنگی نیازمند تغییرات عمده‌ای در نحوه تفکر و اقدامات این ذینفعان است. چالش دیگری که ناشی از فرهنگ استفاده از انرژی‌های غیر تجدیدپذیر است، ممکن است باعث کند شدن روند انتقال به انرژی‌های تجدیدپذیر و استفاده از بلاک چین در این حوزه شود. برای غلبه بر این چالش‌ها، نیاز است که برنامه‌های آموزشی و اطلاع‌رسانی به صورت مؤثر طراحی و اجرا شوند تا فرهنگ پذیرش نوآوری‌های فناورانه را در جامعه تقویت کنند. همچنین، باید به دغدغه‌های اجتماعی، از جمله دسترسی عادلانه به فناوری بلاک چین و اطمینان از اینکه همه اقشار جامعه از مزایای آن بهره‌مند شوند، توجه ویژه‌ای شود. ترویج همکاری میان ذینفعان مختلف، از جمله دولت، فعالان صنعت، و جامعه مدنی، می‌تواند به ایجاد یک اکوسیستم پایدار و هم‌پیوند در پذیرش بلاک چین کمک کند [۲۵-۲۳].

۸- تأثیرات اقتصادی بلاک چین در صنعت انرژی

بلاک چین به عنوان یک فناوری نوین، تأثیرات عمیقی بر اقتصاد صنعت انرژی دارد. یکی از مهم‌ترین این تأثیرات، کاهش هزینه‌ها در زنجیره تأمین انرژی است. با حذف واسطه‌ها و تسهیل معاملات مستقیم بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، هزینه‌های مربوط به انتقال و توزیع انرژی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند منجر به کاهش قیمت انرژی برای مصرف‌کنندگان شود. علاوه بر این، بلاک چین امکان ایجاد بازارهای انرژی محلی و خودکفا را فراهم می‌آورد. این بازارها به تولیدکنندگان محلی این امکان را می‌دهند که انرژی تولیدی خود را مستقیماً به همسایگان یا مصرف‌کنندگان نزدیک بفروشند، که می‌تواند به تحریک اقتصاد محلی و افزایش درآمد برای تولیدکنندگان منجر شود. بلاک چین همچنین می‌تواند به نوآوری در مدل‌های کسب و کار جدید در صنعت انرژی کمک کند. به عنوان مثال، می‌توان سیستم‌های عضویت یا اشتراک‌گذاری انرژی را ایجاد کرد که در آن مصرف‌کنندگان انرژی مازاد خود را به دیگران ارائه می‌دهند. این مدل‌سازی می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش ضایعات کمک کند. تأثیر بلاک چین بر تأمین مالی پروژه‌های انرژی نیز قابل توجه است. این فناوری امکان تأمین مالی جمعی را برای پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر فراهم می‌کند و به افراد و سرمایه‌گذاران کوچک اجازه می‌دهد تا در توسعه این پروژه‌ها مشارکت کنند. این امر به افزایش سرمایه‌گذاری در انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر کمک می‌کند. در نهایت، بلاک چین به افزایش شفافیت و اعتماد در بازار انرژی کمک می‌کند. با ثبت تراکنش‌ها به صورت غیرقابل تغییر بر روی زنجیره، نهادها و افراد می‌توانند با اطمینان بیشتری در بازار انرژی فعالیت کنند. این ویژگی‌ها به ویژه در حالتی که شبهه و عدم اعتماد به اطلاعات جاری وجود دارد؛ بسیار حیاتی است. به طور کلی، بلاک چین می‌تواند به یک تغییر اساسی در جنبه‌های اقتصادی صنعت انرژی منجر شود و به ایجاد سیستمی پایدار و کارآمد کمک کند [۲۶ و ۲۷].

جدول (۱): داده‌های پروژه‌های معرفی شده، اجرا شده و آزمایش شده در خصوص بلاکچین در بخش صنعت انرژی

گستره جغرافیایی	تعداد پروژه	زمینه های فعالیت
آمریکا	۲۵	مدیریت شبکه/مبادله غیرمتمرکز انرژی/اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه - گذاری/امنیت داده
آلمان	۱۶	مدیریت شبکه/مبادله غیرمتمرکز انرژی/اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه - گذاری/امنیت داده
هلند	۱۴	مبادله غیرمتمرکز انرژی/مدیریت شبکه /کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری /امنیت داده/فناوری های نوین
سوئیس	۱۰	مدیریت شبکه/مبادله غیرمتمرکز انرژی/اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری/امنیت داده
انگلستان	۱۰	مدیریت شبکه/مبادله غیرمتمرکز انرژی/اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری/امنیت داده
استرالیا	۸	تجارت کربن/محرکه های برقی/اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/مبادله غیرمتمرکز انرژی
سنگاپور	۶	مبادله غیرمتمرکز انرژی/مدیریت شبکه/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری
فرانسه	۵	مبادله غیرمتمرکز انرژی/اینترنت اشیاء/امنیت داده/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری
اسپانیا	۴	امنیت داده/مبادله غیرمتمرکز انرژی/فناوری نوین
ژاپن	۴	مبادله غیرمتمرکز انرژی/امنیت داده/کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری
بلژیک	۴	مبادله انرژی، اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی
چین	۴	مبادله انرژی، اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی
اتریش	۴	اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/مبادله غیرمتمرکز انرژی/تجارت کربن
کانادا	۳	مبادله غیرمتمرکز انرژی/تجارت کربن
آفریقای جنوبی	۲	کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری/محرکه برقی
رومانی	۲	مبادله غیرمتمرکز انرژی
دانمارک	۲	امنیت داده/مبادله غیرمتمرکز انرژی
برزیل	۲	مبادله غیرمتمرکز انرژی/کریپتو کارنسی، توکن
روسیه	۲	اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/تجارت کربن
آندورا	۲	اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی/مبادله انرژی
اتحادیه اروپا	۲	فناوری های نوین
فنلاند	۲	اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی
تایلند	۱	مبادله غیرمتمرکز انرژی
هند	۱	مبادله غیرمتمرکز انرژی
امارات	۱	کریپتو کارنسی، توکن و سرمایه گذاری
اسلونی	۱	مبادله غیرمتمرکز انرژی
کره جنوبی	۱	اینترنت اشیاء و مدیریت دارایی
نیوزلند	۱	مبادله غیرمتمرکز انرژی
هنگ کنگ	۱	تجارت کربن

پروژه به‌طور قابل توجهی هزینه‌ها و پیچیدگی‌های مربوط به فرآیندهای سنتی را کاهش داده و به افزایش جذابیت انرژی‌های تجدیدپذیر کمک کرده است. در کنار این پروژه‌ها، SUNNY نیز به‌عنوان یک پلتفرم جدید معرفی شده که امکان تسهیل تراکنش‌های مالی بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی را فراهم می‌آورد و همچنین به کاهش کربن و بهره‌وری انرژی کمک می‌کند. این نمونه‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای بلاکچین در تحول صنعت انرژی هستند و اهمیت سرمایه‌گذاری در این تکنولوژی را برای شرکت‌های فعال در این حوزه مشخص می‌سازند [۳۸-۳۱].

۱۰-۱- داده‌های آماری پروژه‌های عملی بلاکچین در بخش انرژی

در این بخش از مقلله، داده‌های آماری از پروژه‌های بلاکچین در بخش انرژی [۱۷و ۳۶] در ۱۴۰ عنوان پروژه و در ۸ گروه که در جدول (۱) نمایش داده شده عنوان شده است.

۱۱- چشم‌انداز آینده بلاکچین در صنعت انرژی

چشم‌انداز آینده بلاکچین در صنعت انرژی با پتانسیل‌های بی‌نظیری همراه است که می‌تواند شیوه‌های سنتی مدیریت انرژی را به‌طور بنیادین تغییر دهد. با افزایش تمرکز بر پایداری و انرژی‌های تجدیدپذیر، بلاکچین به عنوان ابزاری کارآمد برای مدیریت و توزیع انرژی در حال شکل‌گیری است. این فناوری می‌تواند به تسهیل تعاملات میان تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان و نهادهای نظارتی کمک کند و در نتیجه به ارتقاء کارایی سیستم‌های انرژی منجر شود. افزایش پذیرش قراردادهای هوشمند بر بستر بلاکچین به خودکارسازی فرآیندهای معاملاتی کمک کرده و امکان اجرای سریع و بدون واسطه توافقات را فراهم می‌آورد [۳۹]. این ویژگی‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌های انرژی و تسهیل در تبادل انرژی‌های تجدیدپذیر بین مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان منجر شود. همچنین، استفاده از بلاکچین در تجزیه و تحلیل داده‌های انرژی نیز چشم‌اندازهای جدیدی را برای بهینه‌سازی مصرف و تولید انرژی به‌وجود می‌آورد. با تجزیه و تحلیل دقیق اطلاعات، شرکت‌ها می‌توانند در زمان واقعی به تغییرات تقاضا و عرضه پاسخ دهند و بهبود مستمر در مدیریت منابع را فراهم سازند [۴۰و ۴۱]. در نهایت، همکاری‌های بین‌المللی و تحقیق و توسعه در فناوری بلاکچین می‌تواند به ایجاد استانداردهای جهانی کمک کنند که پذیرش این فناوری را تسهیل کند. با ترکیب بلاکچین با سایر فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی، می‌توان به بلوغ بیشتری در مدیریت انرژی دست یافت و به تحقق اهداف توسعه پایدار کمک کرد [۴۲و ۴۳].



۱۲- نتیجه و پیشنهاد‌های آینده

کمک کند. در پایان، برقراری ساز و کارهای تشویقی برای پذیرش بلاک‌چین در میان مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان انرژی می‌تواند از موانع موجود عبور کرده و روند انتقال به سیستم‌های انرژی هوشمند و پایداری را تسریع کند. با اجرای این راهبردها، می‌توان آینده‌ای روشن برای بلاک‌چین در صنعت انرژی متصور شد.

مراجع

- [1] andoni, merlinda, et al. blockchain technology in the energy sector: a systematic review of challenges and opportunities. *renewable and sustainable energy reviews*, 2019, 100: 143174. doi: 10.1016/j.rser.2018.10.014.
- [2] choobineh, moein, et al. energy innovations through blockchain: challenges, opportunities, and the road ahead. *the electricity journal*, 2022, 35.1: 107059. doi: 10.1016/j.tej.2021.107059.
- [3] hasankhani, arezoo, et al. blockchain technology in the future smart grids: a comprehensive review and frameworks. *international journal of electrical power & energy systems*, 2021, 129: 106811. doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106811.
- [4] sharma, pradip kumar; kumar, neeraj; park, jong hyuk. blockchain technology toward green iot: opportunities and challenges. *ieee network*, 2020, 34.4: 263-269. doi: 10.1109/mnet.001.1900526.
- [5] kapassa, evgenia, et al. blockchain in smart energy grids: a market analysis. in: information systems: 17th european, mediterranean, and middle eastern conference, emcis 2020, dubai, united arab emirates, november 25–26, 2020, proceedings 17. springer international publishing, 2020. p. 113-124. doi: 10.1007/978-3-030-63396-7_8.
- [6] cioara, tudor, et al. smart grid management using blockchain: future scenarios and challenges. in: *2020 19th roedunet conference: networking in education and research (roedunet)*. ieee, 2020. p. 1-5. doi: 10.1109/roedunet51892.2020.9324874.
- [7] lu, hongfang, et al. blockchain technology in the oil and gas industry: a review of applications, opportunities, challenges, and risks. *ieee access*, 2019, 7: 41426-41444. doi: 10.1109/access.2019.2907695.
- [8] ferreira, joao c., et al. blockchain, iot, and smart grids challenges for energy systems. in: *international conference on smart computing and communication*. singapore: springer nature singapore, 2024. p. 65-80. doi: 10.1007/978-981-97-1323-3_6.
- [9] al sibahee, mustafa a., et al. blockchain- smart environments: a systematic literature review. *ieee internet of things journal*, 2024. doi: 10.1109/jiot.2024.3422678.
- [10] xu, yizhe, et al. smart energy systems: a critical review on design and operation optimization. *sustainable cities and society*, 2020, 62: 102369. doi: 10.1016/j.scs.2020.102369.
- [11] xiao, yang. communication and networking in smart grids. crc press, 2012. doi: 10.1201/b11897.
- [12] kranz, johann, et al. smart energy: where do we stand and where should we go?. *electronic markets*, 2015, 25: 7-16. doi: 10.1007/s12525-015-0180-3.
- [13] mbungu, nsilulu t., et al. overview of the optimal smart energy coordination for microgrid applications. *ieee access*, 2019, 7: 163063163084. doi: 10.1109/access.2019.2951459.
- [14] tyagi, nitin, et al. a framework for blockchain technology including features. emerging technologies in data mining and information security: proceedings

فناوری بلاک‌چین به عنوان یک ابزار تحول آفرین در توسعه و بهینه سازی شبکه‌های هوشمند انرژی، نقش مهمی در افزایش شفافیت، امنیت و کارایی این سیستم‌ها ایفا می‌کند. بررسی پروژه‌های معرفی شده، اجرا شده و آزمایش شده در این حوزه نشان می‌دهد که استفاده از بلاک‌چین می‌تواند چالش‌های اساسی، از جمله مقیاس‌پذیری، امنیت داده‌ها، مدیریت غیرمتمرکز تراکنش‌های انرژی و بهینه‌سازی توزیع را تا حد زیادی برطرف کند. این فناوری با امکان قیمت‌گذاری پویا، تسویه بلادرنگ معاملات انرژی و کاهش وابستگی به واسطه‌ها، زمینه را برای ایجاد بازارهای انرژی هوشمندتر و پاسخگوتر فراهم می‌آورد. با این حال، پیاده‌سازی گسترده بلاک‌چین در این حوزه همچنان با چالش‌هایی همراه است. موانعی همچون نیاز به زیرساخت‌های محاسباتی قوی، مصرف بالای انرژی برخی از مدل‌های بلاک‌چین و پیچیدگی‌های تطابق با قوانین و استاندارد‌های موجود، نیازمند بررسی و بهینه‌سازی مستمر هستند. پروژه‌های بررسی شده نشان می‌دهند که با توسعه پروتکل‌های کم مصرف‌تر، بهبود قابلیت‌های مقیاس‌پذیری و همکاری میان سیاست‌گذاران، صنایع و محققان، می‌توان این چالش‌ها را مدیریت کرد و از ظرفیت‌های بالقوه بلاک‌چین در مدیریت انرژی بهره برداری بهتری داشت. در نهایت، ادغام فناوری بلاک‌چین با شبکه‌های هوشمند انرژی نه تنها امکان مدیریت کارآمدتر منابع انرژی را فراهم می‌کند، بلکه به افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و توانمندسازی مصرف‌کنندگان منجر می‌شود. آینده این حوزه وابسته به ادامه تحقیقات، توسعه استاندارد‌های بین‌المللی و سرمایه‌گذاری در راهکارهای نوآورانه است تا این فناوری بتواند به صورت عملی و گسترده در سیستم‌های انرژی آینده پیاده‌سازی شود. به منظور بهبود پیاده‌سازی بلاک‌چین در صنعت انرژی، اتخاذ راهبردهای مؤثر و جامع ضروری است. اولین قدم ایجاد چارچوب‌های قانونی و مقرراتی مناسب است که به جذب سرمایه‌گذاران و نهادهای مختلف کمک کند. این چارچوب‌ها باید به وضوح نقش‌ها و مسئولیت‌های هر یک از ذینفعان را مشخص کرده و از حقوق مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان حمایت کنند. دومین راهبرد، افزایش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه است. با تخصیص منابع مالی بیشتر به پروژه‌های تحقیقاتی، می‌توان نوآوری‌های جدید و بهینه‌سازی‌های فناورانه را در این حوزه تسریع کرد. همچنین، توسعه پلتفرم‌های آموزشی به منظور آگاه‌سازی ذینفعان از مزایا و کاربردهای بلاک‌چین در انرژی بسیار حائز اهمیت است. سومین راهبرد، برقراری همکاری‌های بین‌بخشی است. ایجاد تیم‌های کاری متشکل از دولت، صنعت و دانشگاه‌ها می‌تواند به شناسایی چالش‌های مشترک و یافتن راه‌حل‌های کارآمد کمک کند. این تبادل دانش و تجربیات می‌تواند اجرای پروژه‌های بلاک‌چین را تسهیل کند. ایجاد اکوسیستم‌های همکارانه برای آزمایش فناوری‌های نوآورانه و تبادل اطلاعات میان استارت‌آپ‌ها و شرکت‌های بزرگ نیز بسیار مهم است. همچنین، استفاده از فناوری‌های مکمل مانند اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی می‌تواند به گسترش قابلیت‌های بلاک‌چین در صنعت انرژی

- [30] meng, xianghui; zhu, lingling. augmenting cybersecurity in smart urban energy systems through iot and blockchain technology within the digital twin framework. *sustainable cities and society*, 2024, 106: 105336.doi: 10.1016/j.scs.2024.105336.
- [31] mollah, muhammad baqer, et al. blockchain for future smart grid: a comprehensive survey. *ieee internet of things journal*, 2020, 8.1: 18-43.doi: 10.1109/jiot.2020.2993601.
- [32] mendoza tovar, eutimio. *blockchain for environmental sustainability*. 2023. phd thesis. masaryk university, faculty of economics and administration.doi: 10.1201/9781003260905.
- [33] lin, jason; pipattanasomporn, manisa; rahman, saifur. comparative analysis of auction mechanisms and bidding strategies for p2p solar transactive energy markets. *applied energy*, 2019, 255: 113687.doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113687.
- [34] orlov, alisa. blockchain in the electricity market: identification and analysis of business models. 2017. master's thesis. <http://hdl.handle.net/11250/2486421>.
- [35] lamers, david. *possibilities for blockchain in the energy transition*. 2018. master's thesis. university of twente. <https://purl.utwente.nl/essays/74364>.
- [36] mendoza tovar, eutimio. of thesis: blockchain for environmental sustainability. 2022. <https://is.muni.cz/th/hyrel/?lang=en>.
- [37] lv, yongjun. transitioning to sustainable energy: opportunities, challenges, and the potential of blockchain technology. *frontiers in energy research*, 2023, 11: 1258044.doi: 10.3389/fenrg.2023.1258044.
- [38] barceló, ernest, et al. regulatory paradigm and challenge for blockchain integration of decentralized systems: example renewable energy grids. *sustainability*, 2023, 15.3: 2571.doi: 10.3390/su15032571.
- [39] budiarto, mukti, et al. future energy using blockchain systems. in: *2022 international conference on science and technology (icostech)*. ieee, 2022. p. 1-9.doi: 10.1109/icostech54296.2022.9829123.
- [40] taherdoost, hamed; madanchian, mitra. blockchain-based new business models: a systematic review. *electronics*, 2023, 12.6: 1479.doi: 10.3390/electronics12061479.
- [41] liu, yishu; li, ziyuan; huang, lihua. the application of blockchain technology in smart sustainable energy business model. *energy reports*, 2022, 8: 7063-7070.doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.002.
- [42] rao, k. varaprasada; murala, dileep kumar; panda, sandeep kumar. blockchain: a study of new business model. in: *recent advances in blockchain technology: real-world applications*. cham: springer international publishing, 2023. p. 187214.doi: 10.1007/978-3-031-22835-3_9.
- [43] tang, wenhu, et al. exploring the potential of iot-blockchain integration technology for energy community trading: opportunities, benefits, and challenges. *csee journal of power and energy systems*, 2025.doi: 10.17775/cseejpes.2024.02160.
- [44] ferreira, joao c., et al. blockchain, iot, and smart grids challenges for energy systems. in: *international conference on smart computing and communication*. singapore: springer nature singapore, 2024. p. 65-80.doi: 10.1007/978-981-97-1323-3_6.
- [45] taherdoost, hamed; madanchian, mitra. 4 blockchain integration in renewable energy. *applications of blockchain and computational intelligence in environmental sustainability*, 2025, 54.doi: 10.1201/9781003609865-4.
- ofiemis2020, volume 1, 2021, 633645.doi: 10.1007/978-981-15-9927-9_62.
- [15] komalavalli, c.; saxena, deepika; laroia, chetna. overview of blockchain technology concepts. in: *handbook of research on blockchain technology*. academic press, 2020. p. 349-371.doi: 10.1016/b978-0-12-819816-2.00014-9.
- [16] miglani, arzoo, et al. blockchain for internet of energy management: review, solutions, and challenges. *computer communications*, 2020, 151: 395418.doi: 10.1016/j.comcom.2020.01.014.
- [17] li, joey, et al. methods and applications for artificial intelligence, big data, internet of things, and blockchain in smart energy management. *energy and ai*, 2023, 11: 100208.doi: 10.1016/j.egyai.2022.100208.
- [18] nour, morsy; chaves ávila, josé pablo; sánchez-miralles, álvaro. review of blockchain potential applications in the electricity sector and challenges for large scale adoption. *ieee access*, 2022, 10: 4738447418.doi: 10.1109/access.2022.3171227.
- [19] borkovcova, anna; černá, miloslava; sokola, marcela. blockchain in the energy sector: systematic review. *sustainability*, 2022, 14.22: 14793.10.3390/su142214793.
- [20] aljaroodi, jameela; mohamed, nader. blockchain in industries: a survey. *ieee access*, 2019, 7: 36500-36515.doi: 10.1109/access.2019.2903554.
- [21] mika, bartek; goudz, alexander. blockchain technology in the energy industry: blockchain as a driver of the energy revolution? with focus on the situation in germany. *energy systems*, 2021, 12.2: 285-355.doi: 10.1007/s12667-020-00391-y.
- [22] boumaiza, ameni. a blockchain-based scalability solution with microgrids peer-to-peer trade. *energies*, 2024, 17.4: 915.doi: 10.3390/en17040915.
- [23] shin, donghee; ibahrine, mohammed. the socio-technical assemblages of blockchain system: how blockchains are framed and how the framing reflects societal contexts. *digital policy, regulation and governance*, 2020, 22.3: 245-263.doi: 10.1108/dprg-11-2019-0095.
- [24] teisserenc, benjamin; sepaşgozar, samad. adoption of blockchain technology through digital twins in the construction industry 4.0: a pestels approach. *buildings*, 2021, 11.12: 670.doi: 10.3390/buildings11120670.
- [25] friedman, nicola; ormiston, jarrod. blockchain as a sustainability-oriented innovation?: opportunities for and resistance to blockchain technology as a driver of sustainability in global food supply chains. *technological forecasting and social change*, 2022, 175: 121403.doi: 10.1016/j.techfore.2021.121403.
- [26] ahl, amanda, et al. challenges and opportunities of blockchain energy applications: interrelatedness among technological, economic, social, environmental, and institutional dimensions. *renewable and sustainable energy reviews*, 2022, 166: 112623.doi: 10.1016/j.rser.2022.112623.
- [27] whig, pawan; velu, arun; naddikatu, rahul reddy. the economic impact of ai-enabled blockchain in 6g-based industry. in: *ai and blockchain technology in 6g wireless network*. singapore: springer nature singapore, 2022. p. 205-224.doi: 10.1007/978-981-19-2868-0_10.
- [28] su, xiaole, et al. a blockchain-based smart contract model for secured energy trading management in smart microgrids. *security and privacy*, 2024, 7.1: e341.doi: 10.1109/isis64839.2024.10887444.
- [29] liu, ziming, et al. pricing game and blockchain for electricity data trading in low-carbon smart energy systems. *ieee transactions on industrial informatics*, 2024.doi: 10.1109/tii.2023.3345450.

