



Blockchain-Based Peer-to-Peer Market for Energy Efficiency: A Novel Approach to Addressing Energy Imbalance in Iran

Amir Vahabpour¹ | Roghayeh Ghasempour^{2*} | Moein Moeini-Aghtaie³

1. PhD Candidate in Energy Systems Engineering, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran. Email: vahabpour@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Associated Professor, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran. Email: ghasempour.r@ut.ac.ir
3. Associated Professor, Faculty of Energy Engineering, Sharif University of Technology. Email: moeini@sharif.edu

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 21 August 2025

Revised: 21 November 2025

Accepted: 21 December 2025

Published Online: 28 May 2026

Keywords:

Blockchain Technology,
Energy Efficiency,
Negawatt Trading,
P2P Energy Markets,
Smart Contracts.

ABSTRACT

Energy imbalance in Iran, arising from rapidly growing consumption, heavy subsidy payments, and low energy efficiency, constitutes one of the fundamental challenges of the national economy. Global experience indicates that the third energy transition and the technological transformations accompanying it create new opportunities to address this crisis. Within this context, the concept of the “Negawatt,” defined as saved energy, occupies a central position in effective energy policy frameworks. However, the absence of transparent mechanisms for measuring and exchanging this resource has hindered the formation of competitive markets. This study, drawing on blockchain technology and smart contracts, proposes a framework for establishing a peer-to-peer market for saved energy. Blockchain, through its features such as transparency, immutability, and the elimination of intermediaries, can provide a reliable platform for the registration, settlement, and exchange of Negawatts among saving/consuming participants. In addition to electricity, this model can be extended to other energy carriers such as natural gas and heat, thereby enabling the creation of decentralized multi-carrier markets. While extensive research has been conducted on peer-to-peer markets for generated electricity, Negawatt markets—particularly in a multi-carrier context—remain largely unexplored and nascent. The findings of this research indicate that implementing such a market in Iran can not only enhance transparency and reduce transaction costs, but also offer a practical and cost-effective solution for mitigating energy imbalance and achieving sustainability objectives.

Cite this article: Vahabpour, A.; Ghasempour, R. & Moeini-Aghtaie, M. (2026). Blockchain-Based Peer-to-Peer Market for Energy Efficiency: A Novel Approach to Addressing Energy Imbalance in Iran. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (2), 367-391. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.402927.1186>



© Amir Vahabpour, Roghayeh Ghasempour, Moein Moeini-Aghtaie

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.402927.1186>

Introduction and Problem Statement

The global energy system is undergoing a profound structural transformation driven by sustainability concerns, climate change, and the need for higher system efficiency. Unlike previous energy transitions that primarily focused on fuel substitution, the current transition emphasizes demand-side management, decentralization, and digital market mechanisms. In this context, energy efficiency—conceptualized as tradable energy savings or “Negawatts”—has emerged as a cost-effective alternative to supply-side expansion. Iran faces particularly acute challenges due to its energy-intensive economy, widespread price distortions caused by heavy subsidies, and chronic imbalances across major energy carriers. Historically, national energy policies have prioritized increasing supply rather than optimizing consumption, resulting in excessive demand growth, fiscal pressure, and infrastructure stress. To address these issues, the Energy Optimization and Environment Market was introduced as a

policy initiative aimed at monetizing energy savings and attracting private investment. However, the centralized structure of this market, combined with transparency, trust, and verification challenges, has significantly limited its effectiveness. This study argues that decentralized, blockchain-based peer-to-peer energy-saving markets provide a viable institutional and technological solution to overcome these structural barriers.

Review of Literature

The existing literature on modern energy markets highlights two closely related research streams: blockchain-based smart contracts and markets for energy savings. Smart contracts are widely recognized as a key enabler of decentralized energy systems due to their ability to automate transactions, enforce rules transparently, and eliminate reliance on centralized intermediaries. Numerous studies demonstrate their effectiveness in peer-to-peer electricity trading, local energy markets, and distributed renewable integration. In parallel, energy-saving markets—often implemented through white certificate or efficiency certificate schemes—have been adopted in several countries to incentivize demand-side optimization. These markets aim to transform verified energy savings into tradable assets, thereby internalizing efficiency benefits. However, the literature reveals that most existing energy-saving markets remain centralized and electricity-focused, with limited attention to decentralized peer-to-peer structures or non-electric energy carriers such as gas and liquid fuels. Moreover, challenges related to measurement, reporting, and verification of savings remain a critical barrier. The review indicates a clear research gap at the intersection of smart contracts and multi-carrier energy-saving markets, particularly in developing economies with distorted price signals and institutional constraints.

Research Findings

The findings of this study, derived from an extensive review of more than 350 academic sources, indicate that peer-to-peer energy trading has reached a relatively mature stage in electricity markets but remains underdeveloped in the domain of energy savings. Most existing implementations focus on megawatt-based exchanges rather than Negawatt-based mechanisms, and decentralized approaches are rarely extended beyond electricity. The analysis shows that blockchain technology significantly improves transparency, trust, and transaction efficiency, making it especially suitable for markets involving numerous small participants. For Iran, where fiscal limitations constrain new energy supply investments, energy efficiency represents the most economically viable solution to reducing energy imbalances. The findings suggest that a decentralized peer-to-peer market for tokenized energy savings could directly address current shortcomings of the Energy Optimization and Environment Market by reducing administrative costs, improving verification credibility, and enabling real price discovery. Additionally, extending such markets to multiple energy carriers enhances system-level optimization and flexibility. Overall, the results confirm both the technical feasibility and policy relevance of blockchain-based peer-to-peer energy-saving markets in Iran's energy context.

Conclusion

This study concludes that decentralized peer-to-peer energy-saving markets represent a promising institutional innovation for addressing structural inefficiencies in Iran's energy system. By shifting the focus from energy production to energy savings, such markets align economic incentives with national efficiency and sustainability objectives. Blockchain technology and smart contracts provide the necessary digital infrastructure to ensure transparency, automation, and trust, particularly in environments where centralized governance mechanisms face credibility challenges. The literature review and research findings demonstrate a substantial gap in existing studies regarding multi-carrier, decentralized Negawatt markets, highlighting the originality and relevance of this research direction. The proposed conceptual approach lays the groundwork for future quantitative modeling and pilot implementation. From a policy perspective, adopting blockchain-based peer-to-peer energy-saving markets could support subsidy reform, mobilize private capital, and improve overall energy system resilience. Ultimately, integrating digital technologies with energy optimization policies offers a realistic pathway toward a more efficient, transparent, and sustainable energy market structure in Iran.



بازار همتابه‌متای انرژی صرفه‌جویی‌شده بر پایه فناوری بلاک‌چین: راهکاری نوین برای رفع مشکل ناترازی انرژی

امیر وهاب‌پور^۱ | رقیه قاسم‌پور^{۲*} | معین معینی اقطاعی^۳

۱. دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران. رایانامه: vahabpour@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسؤل، دانشیار دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران. رایانامه: ghasempour.r@ut.ac.ir
۳. استادیار دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف. رایانامه: moeini@sharif.edu

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷

کلیدواژه:

بازار همتابه‌متای انرژی،
بازار بهینه‌سازی انرژی،
تجارت نگاهات،
فناوری بلاک‌چین،
قرارداد هوشمند.

ناترازی انرژی در ایران، که ناشی از رشد فزاینده مصرف، پرداخت یارانه‌های سنگین و ضعف بهره‌وری است، یکی از چالش‌های بنیادین اقتصاد ملی به شمار می‌آید. تجربه جهانی نشان می‌دهد دوران سوم گذار انرژی و تحولات فناورانه‌ای که با خود به همراه آورده است، فرصت‌های نوینی برای حل این بحران فراهم می‌سازد. در این میان، مفهوم «نگاوات» به عنوان انرژی صرفه‌جویی‌شده، جایگاهی کلیدی در سیاست‌های کارآمد انرژی دارد. با این حال، نبود سازوکارهای شفاف برای اندازه‌گیری و تبادل این منبع، مانع شکل‌گیری بازارهای رقابتی شده است. این پژوهش با تکیه بر فناوری بلاک‌چین و قراردادهای هوشمند، چارچوبی برای ایجاد بازار همتابه‌متای انرژی صرفه‌جویی‌شده ارائه می‌دهد. بلاک‌چین با ویژگی‌هایی همچون شفافیت، تغییرناپذیری و حذف واسطه‌ها، می‌تواند بستر معتبری برای ثبت، تسویه و تبادل نگاهات در میان صرفه‌جویی/مصرف‌کنندگان فراهم کند. علاوه بر برق، این مدل قابلیت تعمیم به سایر حامل‌های انرژی همچون گاز و حرارت را نیز دارد و به این ترتیب، امکان ایجاد بازارهای چندحاملی غیرمتمرکز فراهم می‌شود. پژوهش‌های متعددی درباره بازارهای همتابه‌متای برق تولیدی انجام شده، اما بازارهای نگاهات، به‌ویژه در بستر چندحاملی، تقریباً بکر و نوظهور هستند. نتایج این تحقیق بیانگر آن است که پیاده‌سازی چنین بازاری در ایران، علاوه بر ارتقای شفافیت و کاهش هزینه‌های مبادلات، می‌تواند راهکاری عملی و مقرون‌به‌صرفه برای رفع ناترازی انرژی و تحقق اهداف پایداری باشد.

استناد: وهاب‌پور، امیر؛ قاسم‌پور، رقیه و معینی اقطاعی؛ معین (۱۴۰۵). بازار همتابه‌متای انرژی صرفه‌جویی‌شده بر پایه فناوری بلاک‌چین: راهکاری نوین برای رفع مشکل ناترازی انرژی. *فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار*، ۵ (۲) ۳۶۷-۳۹۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.402927.1186>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© امیر وهاب‌پور، رقیه قاسم‌پور، معین معینی اقطاعی

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.402927.1186>



۱. مقدمه و بیان مسئله

تاریخ بشر با تکامل مداوم شیوه‌های استحصال و بهره‌برداری از انرژی گره خورده است. طی دوپست سال اخیر، دسترسی به منابع انرژی فرآوری شده و باکیفیت نقشی کلیدی در پیشرفت‌های صنعتی و اقتصادی جوامع ایفا کرده است. اولین دوران گذار انرژی در قرن‌های هجدهم و نوزدهم میلادی با انقلاب صنعتی و جایگزینی سوخت‌های سنتی مانند چوب با زغال‌سنگ آغاز شد. در ادامه، دوران گذار دوم در قرن بیستم با کشف و تولید صنعتی نفت و گاز شکل گرفت. این منابع به دلیل سهولت انتقال و چگالی انرژی بالاتر، به سرعت جایگزین زغال‌سنگ شدند و نزدیک به ۸۰ درصد از انرژی اولیه جهان را تأمین می‌کردند [۱].

پیامد استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی افزایش شدید گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی بود. این افزایش به‌ویژه از سال ۱۹۶۰ به بعد با شتابی بی‌سابقه همراه بوده و ضرورت یک تحول اساسی را نمایان می‌سازد. سیستم جهانی انرژی امروز در حال سپری کردن دوران گذار سوم است که به خلاف دوره‌های قبلی فقط بر تغییر منابع متمرکز نیست. این گذار بر پایه چهار کلان‌روند اصلی شکل گرفته که به 4D معروف هستند و همگی در جهت پایداری و کاهش کربن‌محوری سیستم انرژی حرکت می‌کنند [۲]. این تحول در واقع پاسخی جامع به چالش‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی پیش روی جهان امروز است.

کشور ایران نیز به عنوان یک کشور در حال توسعه ناگزیر است در بستر دوران گذار جهانی به توسعه بخش انرژی خود برای پاسخ‌گویی به انرژی مورد نیاز فرایند توسعه اهتمام داشته باشد. به‌خصوص با در نظر داشتن این نکته که بخش زیادی از منابع مورد نیاز برای توسعه کشور در بخش انرژی به شکل یارانه‌های مستقیم و پنهان از دست می‌رود و فشار مضاعفی بر اقتصاد کشور وارد می‌کند. متأسفانه طی نیم قرن گذشته پاسخ به نیاز روزافزون سیستم انرژی همواره از طریق گسترش و افزایش عرضه انجام گرفته و از مدیریت و بهینه‌سازی تقاضا غفلت شده است. این موضوع به ناکارآمدی در بخش انرژی دامن زده و ناترازی‌های عمیقی را در تأمین حامل‌های انرژی ایجاد کرده است. لذا وضعیت کنونی بخش انرژی، ضرورت تحولات ساختاری را اجتناب‌ناپذیر نشان می‌دهد.

مهم‌ترین طرحی که برای رفع این معضل در ایران مدون شده، طرح موسوم به «بازار بهینه‌سازی انرژی و محیط زیست» است. این طرح گرچه بسیار هوشمندانه طراحی شده و روی کاغذ پتانسیل‌های بسیار امیدوارکننده‌ای برای اصلاح ساختاری سیستم انرژی کشور دارد، اما در مسیر اجرا با چالش‌های گوناگونی روبه‌روست. از جمله مهم‌ترین این چالش‌ها می‌توان به نبود بستری برای جریان شفاف اطلاعات، عدم دسترسی مناسب فروشندگان و خریداران به یکدیگر برای انجام معاملات، نامشخص بودن مکانیسم کشف قیمت و ابزارهای کنترلی روی بهای حامل‌های انرژی، تمرکز غیرضروری و غیرمفید بازار در نهاد دولتی، جزیره‌ای بودن بازار حامل‌های مختلف و عدم اتصال آن‌ها به یکدیگر، دشواری، کندی و قابل خدشه بودن معاملات و... اشاره کرد. این پژوهش به دنبال آن است که نشان دهد چگونه می‌توان با امکانات فناورانه‌ای که در دوران سوم گذار انرژی برای تبادلات غیرمتمرکز انرژی فراهم شده است، با استفاده از یک آنالوژی برای مشابهت‌یابی میان بازارهای مشابه، ساختاری برای پیاده‌سازی بازار بهینه‌سازی انرژی و محیط زیست ایران در بستر بلاک‌چین پیشنهاد کرد، و برای چالش‌های این بازار راهکار مناسب ارائه داد. راهکاری که این مقاله با بررسی و متناظرسازی پژوهش‌های پیشین ارائه و تبیین می‌کند، بازارهای غیرمتمرکز و همتابه‌ممتای صرفه‌جویی انرژی چندحاملی روی بستر فناوری بلاک‌چین است، که برای پاسخ به نیازهای خاص کشور ایران در شرایط بحرانی سیستم انرژی کشور، راهکاری از جهت فنی ایده‌آل و از جهت اجرایی کاملاً واقع‌بینانه و شدنی است.

۱-۱. دوران سوم گذار انرژی و کلان‌روندهای آن

دوران گذار سوم انرژی، که به عنوان «انتقال انرژی یکپارچه» نیز شناخته می‌شود، پاسخی به چالش‌های جهانی مانند تغییرات اقلیمی و رشد صعودی تقاضای انرژی است. این تحول با چهار مؤلفه کلیدی شکل گرفته است:

(۱) کربن‌زدایی^۱: کربن‌زدایی با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بر گذار از سوخت‌های فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی تمرکز دارد. استفاده فزاینده از وسایل نقلیه الکتریکی و فناوری‌هایی نظیر تولید هیدروژن سبز و جذب و ذخیره‌سازی کربن، از مصادیق این روند است [۳].

(۲) تمرکززدایی^۱: این روند بیانگر آن است که تولید انرژی در حال انتقال از نیروگاه‌های بزرگ به منابع کوچک‌تر و محلی است. تمرکززدایی با رشد «تولید پراکنده» و کاهش هزینه‌های فناوری‌های تجدیدپذیر تسریع شده است و به مصرف‌کنندگان اجازه می‌دهد تا به «تولید/مصرف‌کننده»^۲ تبدیل شوند. این مدل، اتلاف انرژی در شبکه‌های انتقال را کاهش داده و پایداری و امنیت انرژی را افزایش می‌دهد [۴].

(۳) بهینه‌سازی مصرف انرژی^۳: بهینه‌سازی مصرف به عنوان ارزان‌ترین و پایدارترین راه حل برای تأمین نیازهای انرژی مطرح است. این مفهوم بر ایده «نگاوات»^۴ استوار است، به این صورت که ارزش یک وات انرژی صرفه‌جویی‌شده، از یک وات انرژی تولیدی بیشتر است، زیرا صرفه‌جویی نیازمند هزینه‌های زیرساختی کمتری نسبت به تولید است و فواید زیست‌محیطی نیز به همراه دارد [۲ و ۵].

(۴) دیجیتالی شدن^۵: دیجیتالی شدن به معنای نفوذ استفاده از فناوری‌های نوینی مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و بلاک‌چین برای افزایش کارایی، امنیت و پایداری سیستم‌های انرژی است. این فناوری‌ها امکان مدیریت هوشمندانه عرضه و تقاضا را فراهم می‌کنند. بلاک‌چین به عنوان یک نمونه از فناوری‌های زیرساختی، با ویژگی‌هایی مانند شفافیت و عدم نیاز به واسطه، امکان ایجاد بازارهای انرژی غیرمتمرکز را فراهم می‌آورد [۶ و ۷].

با در نظر داشتن پیشرفت‌های قابل توجهی که در حوزه منابع انرژی و مصارف آن‌ها صورت گرفته، دستاوردهای مختلف فناوری‌های که بر بخش انرژی اثر گذاشته، و نیز فعل و انفعالات سیاسی، اجتماعی و اقتصادی گسترده‌ای که در جهان به وقوع پیوسته، مشخص است که تحولات دوران سوم گذار انرژی در چارچوب مؤلفه‌های یادشده بسیار فراگیر و دارای ابعاد مختلفی خواهد بود. نکته مهم در این کلان‌روندها همبستگی درونی آن‌هاست؛ به این معنا که پیشرفت‌های هر حوزه نیاز به پیشرفت در سایر حوزه‌ها را نیز فراهم و از آن حمایت می‌کند و باعث می‌شود که این چهارمحور هم‌زمان با هم پیگیری شوند و ارتقا یابند.

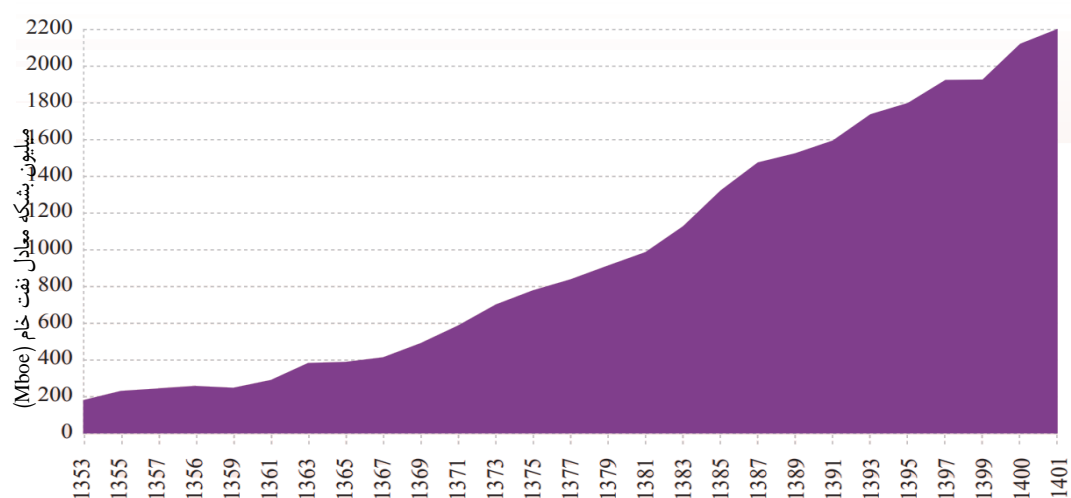
دوران گذار انرژی، فراتر از یک تغییر ساده فنی، شامل تغییرات اساسی در ساختار بازار و قوانین حاکم بر آن است. یکی از تحولات مهم، مقررات‌زدایی و حضور پررنگ بخش خصوصی در سمت عرضه انرژی است [۸]. در این شرایط و با تکیه بر چهار روند پیش‌گفته، سیستم انرژی در حال حرکت به سمت بازارهای غیرمتمرکز، آزاد و رقابتی است که در آن، واسطه‌ها حذف می‌شود و امکان مشارکت مستقیم بازیگران کوچک فراهم می‌آید [۹]. این بازارها به دلیل افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر و ظهور فعالان جدیدی مانند تولید/مصرف‌کنندگان، شکل نوینی از تبادل انرژی را به وجود آورده‌اند که در آن مصرف‌کنندگان خود هم‌زمان به تولید انرژی نیز (مثلاً از طریق پنل‌های خورشیدی) می‌پردازند [۱۰ و ۱۱]. این مدل، با نام‌هایی مانند بازارهای انرژی «همتابه‌همتا»^۶ شناخته می‌شود که در آن، افراد می‌توانند انرژی اضافی خود را به صورت مستقیم به دیگران بفروشند و به این ترتیب در پایداری شبکه و کاهش هزینه‌ها مشارکت داشته باشند [۱۲].

با وجود این پیشرفت‌ها، شکل‌گیری این سیستم‌ها چالش‌های جدیدی را ایجاد می‌کند که نیاز به مدیریت و ارائه راهکارهای فناوری‌ها دارد. افزایش تولید پراکنده از منابع تجدیدپذیر، که ذاتاً متغیر هستند، مدیریت پایداری و امنیت شبکه را حیاتی ساخته است [۱۳]. این امر مستلزم راه‌حل‌های هوشمند و پیچیده‌ای است که بتواند به صورت لحظه‌ای عرضه و تقاضا را مدیریت کند [۱۴]. فناوری بلاک‌چین به عنوان یک ابزار کلیدی، امکان ایجاد بازارهای شفاف و خودکار را فراهم می‌کند. این فناوری با ارائه یک زیرساخت قابل اعتماد و غیرمتمرکز نه تنها به معاملات تولید/مصرف‌کنندگان کمک می‌کند، بلکه به مدیریت هوشمند شبکه و ارتقای کارایی کلی سیستم انرژی نیز منجر می‌شود. در این زمینه، توضیحات بیشتری در ادامه ارائه خواهد شد.

1. Decentralization
2. Prosumer
3. Decreased Consumption / Efficiency
4. Negawatt: Negative Watt
5. Digitalization
6. Peer-to-peer (P2P)

۱-۲. وضعیت سیستم انرژی ایران

در حالی که روندهای دوران سوم گذار انرژی با سرعت در جهان پیگیری می‌شود، وضعیت در ایران تا حد زیادی متفاوت است. سیستم انرژی ایران را به‌اختصار می‌توان با دو ویژگی عمده آن معرفی کرد: «روند همواره فزاینده مصرف انرژی» و «تأمین تعادل سیستم از طریق گسترش سامانه عرضه». بر اساس آخرین آمار رسمی منتشرشده در ترازنامه انرژی وزارت نیرو، عرضه انرژی اولیه کشور در سال ۱۴۰۱ حدود ۲۲۰۰ میلیون بشکه معادل نفت خام بوده که با شتابی به مراتب بیش از رشد جمعیت و تولید ناخالص داخلی همراه بوده است [۱۵]. این روند مصرف بی‌رویه به افزایش حدود ۲۰ درصدی شدت انرژی در یک دهه گذشته منجر شده است. ارزش اقتصادی منابع طبیعی تخریب‌شده معادل ۹۳ میلیارد دلار برآورد می‌شود که ۲۸ درصد از تولید ناخالص داخلی کشور را در بر می‌گیرد. این در حالی است که این نسبت در کشورهای صنعتی حدود ۵ تا ۷ درصد است [۱۶].



شکل ۱. روند صعودی عرضه انرژی اولیه در ایران [۱۵]

عامل اصلی این نابسامانی، پرداخت حجم بالایی از یارانه‌های انرژی است که به یک بیماری مزمن در اقتصاد کشور تبدیل شده است. یارانه‌های انرژی به شکل مستقیم یا غیرمستقیم، قیمت حامل‌ها را پایین‌تر از نرخ تعادلی بازار نگه می‌دارند [۱۷]. در حالی که هدف اولیه این یارانه‌ها حمایت از اقشار کم‌درآمد و تولید بوده، اما در عمل هیچ‌یک از این دو هدف محقق نشده‌اند. یارانه‌ها یک «رانت پنهان» برای مصرف‌کنندگان پرمصرف و صنایع بزرگ ایجاد کرده و انگیزه‌های لازم برای بهینه‌سازی و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کارآمد را از بین برده است [۱۸].

بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی در سال ۲۰۲۲، ایران با حدود ۵۸ میلیارد دلار، پس از روسیه در جایگاه دوم بزرگ‌ترین ارائه‌دهندگان یارانه انرژی در جهان قرار دارد [۱۹]. این مبلغ که معادل ۵۶ درصد کل یارانه‌های پرداختی کشور است و ۱۵ درصد ارزش تولید ناخالص ملی را تشکیل می‌دهد، به سه حامل اصلی انرژی تخصیص یافته: سوخت‌های مایع (۴۰ درصد)، گاز طبیعی (۳۳ درصد) و برق (۲۷ درصد).

پیامدهای یارانه‌های انرژی ابعاد چندوجهی دارد و در مورد هریک از حامل‌های اصلی مورد نیاز جامعه اختلالاتی به وجود آورده است:

- قاچاق سوخت: اختلاف فاحش قیمت سوخت با کشورهای همسایه، انگیزه قدرتمندی برای قاچاق ایجاد می‌کند. به عنوان مثال، در زمان نگارش این مقاله، قیمت بنزین و گازوئیل در کشور همسایه یعنی ترکیه به ترتیب حدود ۸۳ و ۴۱۷ برابر قیمت‌های یارانه‌ای این سوخت‌ها در داخل کشور است [۲۰]. این اختلاف قیمت به قاچاق روزانه میلیون‌ها لیتر سوخت منجر می‌شود که خسارت آن معادل ۴ تا ۵ میلیارد دلار در سال برآورد شده است [۲۱].

- کسری و ناترازی گاز: مصرف گاز در ایران با رشد میانگین ۵ درصد در ده سال اخیر، در ماه‌های سرد سال به بیش از ۷۵۰ میلیون متر مکعب در روز رسیده که با کسری ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلیون متر مکعبی تولید مواجه است [۲۲ و ۲۳]. این روند، امنیت انرژی کشور را در آینده با خطر جدی مواجه می‌کند.
 - فروپاشی زیرساخت برق: با وجود پرداخت ۱۶ میلیارد دلار یارانه در صنعت برق، این منابع به توسعه شبکه کمک نکرده و صنعت برق کشور را در آستانه فروپاشی قرار داده است. ناترازی شبکه به بیش از ۲۲ هزار مگاوات رسیده و با وجود پتانسیل بالای انرژی‌های تجدیدپذیر، سهم نیروگاه‌های حرارتی همچنان غالب است [۲۴].
- این شرایط نشان‌دهنده ضرورت حیاتی اصلاحات ساختاری در بخش انرژی کشور و حرکت به سمت مکانیزم‌های بازارمحور و بهینه‌سازی است. یارانه‌ها در ایران، در واقع به عنوان «هزینه فرصت» به حساب می‌آیند، زیرا این مبلغ می‌توانست به عنوان درآمد ملی در اختیار دولت قرار گیرد، اما در عمل به صورت رانت در اختیار مصرف‌کنندگان قرار گرفته است [۲۵].

۳-۱. بازار بهینه‌سازی انرژی: چالش‌ها و پیچیدگی‌ها

صرفه‌جویی در مصرف انرژی برای تمامی کشورها، چه توسعه‌یافته و چه درحال توسعه، اهمیتی حیاتی دارد. این موضوع، به‌ویژه برای کشورهای درحال توسعه‌ای مانند ایران، با کاهش هزینه‌های انرژی، افزایش رقابت‌پذیری صنعتی و ارتقای امنیت انرژی همراه است و می‌تواند به حل بحران‌هایی که در بخش قبلی اشاره شد کمک کند. در کشورهای توسعه‌یافته نیز صرفه‌جویی حاصل از بهینه‌سازی مصرف، علاوه بر کمک به تحقق اهداف آب‌وهوایی، سبب کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تقویت پایداری اقتصادی می‌شود [۲۶].

برای ترویج بهینه‌سازی انرژی، بازارهای مختلفی بر مبنای گواهی‌های صرفه‌جویی توسعه یافته‌اند. از معروف‌ترین آن‌ها، بازار گواهی‌های سفید یا گواهی‌های بهره‌وری انرژی است. در این سازوکار، شرکت‌های تأمین‌کننده انرژی موظف به اجرای طرح‌هایی برای کاهش مصرف انرژی مشتریان خود هستند. آن‌ها می‌توانند با اجرای این طرح‌ها، گواهی کسب کنند یا آن را از سایر شرکت‌های فعال در حوزه بهینه‌سازی خریداری کنند. این بازارها در کشورهای اروپایی به عنوان ابزاری مؤثر در سیاست‌گذاری‌های انرژی شناخته شده و به موفقیت‌های قابل توجهی دست یافته‌اند [۲۷].

در کشور ما ایران نیز، پیرو مطالعات جامع انرژی که در دهه ۱۳۸۰ انجام پذیرفت، طرح بازار بهینه‌سازی انرژی و محیط زیست به عنوان پاسخی جامع به چالش‌های ریشه‌ای سیستم انرژی کشور - به‌ویژه مصرف بی‌رویه و یارانه‌های گسترده - تدوین شد و در سال ۱۳۹۶ به تصویب شورای عالی انرژی رسید [۲۸]. این طرح با این پیش‌فرض آغاز شده است که نظام فعلی توزیع یارانه‌ها به جای کمک حقیقی به اقتصاد، یک «بیماری مزمن» ایجاد کرده که به نابسامانی‌های اقتصادی و محیط زیستی منجر شده، و در عمل انگیزه برای بهینه‌سازی انرژی را از بین برده است. هدف اصلی این طرح، ایجاد بازاری شفاف و کارآمد برای گواهی‌های صرفه‌جویی انرژی است. در این مدل صرفه‌جویی در انرژی از یک فعالیت غیرقابل ارزش‌گذاری به یک دارایی قابل معامله تبدیل می‌شود که در بازارهای مالی قابل خرید و فروش است [۲۹].

این بازار بر مبنای اختلاف تعرفه‌های فعلی حامل‌های انرژی بنا شده است. به این صورت که با توجه به تفاوت چشمگیر قیمت فروش انرژی به بخش‌های مختلف (مانند بخش خانگی، صنعتی، و تجاری) و قیمت منطقه‌ای یا جهانی آن، یک ارزش اقتصادی به ازای هر واحد صرفه‌جویی تعریف می‌شود. این ارزش اقتصادی، در قالب گواهی‌های مخصوص و زمان‌داری به صرفه‌جویی‌کنندگان اعطا می‌شود که می‌توانند آن را به مصرف‌کنندگانی بفروشند که قادر به کاهش مصرف نیستند. از جمله مکانیسم‌های کلیدی طرح می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲۹]:

- تبدیل صرفه‌جویی به دارایی مالی: طرح، با تعریف استانداردهایی برای اندازه‌گیری و راستی‌آزمایی صرفه‌جویی، آن را به یک ابزار مالی قابل معامله تبدیل می‌کند. این گواهی‌ها می‌توانند به عنوان وثیقه یا دارایی‌های قابل مبادله در نظر گرفته شوند.
- جذب سرمایه‌گذاری خصوصی: با ایجاد بازاری جذاب و شفاف برای گواهی‌های صرفه‌جویی، بخش خصوصی تشویق به سرمایه‌گذاری در پروژه‌های بهینه‌سازی انرژی می‌شود.

- کاهش ناترازی‌ها: این طرح با مدیریت بهینه عرضه و تقاضا، به کاهش ناترازی‌های انرژی در بخش‌هایی مانند برق و گاز کمک می‌کند و از فروپاشی زیرساخت‌های فرسوده جلوگیری می‌کند.
- اصلاح ساختار یارانه‌ها: در نهایت، این طرح به تدریج یارانه‌های پنهان را با یک مکانیزم بازارمحور جایگزین کرده و به توزیع عادلانه‌تر منابع و کاهش فساد کمک می‌کند.

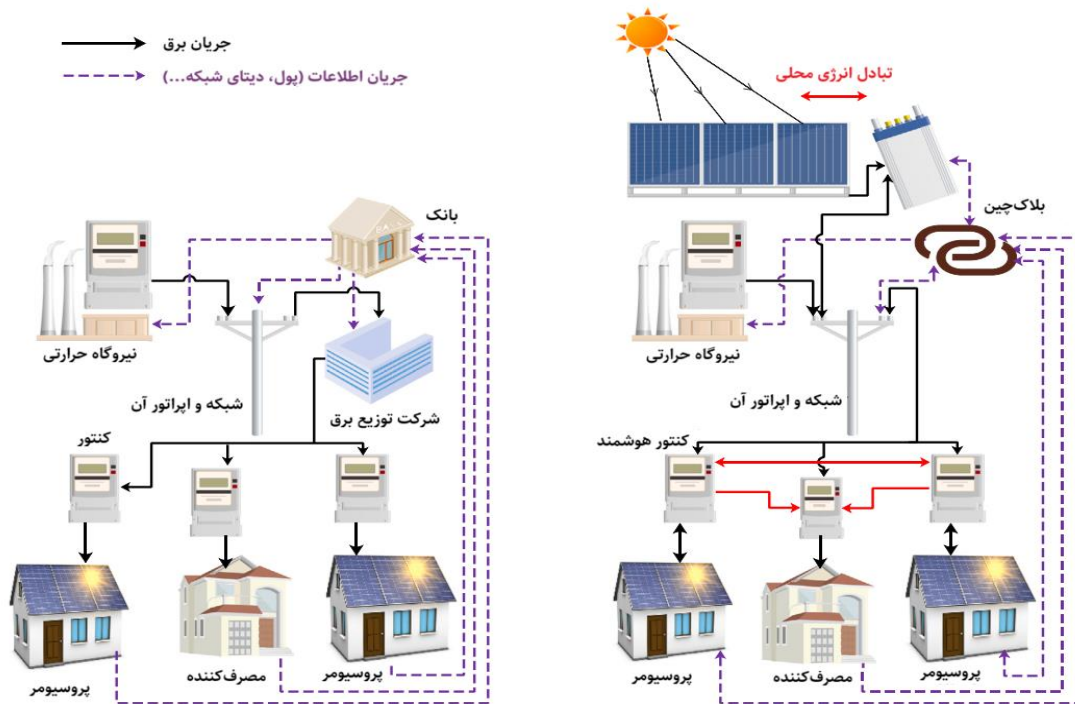
البته راه‌اندازی و مدیریت بازارهای صرفه‌جویی انرژی به طور کلی و بازار بهینه‌سازی انرژی و محیط زیست ایران به طور خاص، با چالش‌هایی نیز همراه است. به عنوان نمونه، شکل‌گیری این بازارها نیازمند چارچوب‌های قانونی و مقرراتی مناسب است که در بسیاری از کشورها، به‌ویژه در اقتصادهای نوظهور، به طور کامل ایجاد نشده‌اند [۲۶]. اما شاید مهم‌ترین چالش پیش روی بازارهای بهینه‌سازی انرژی، انجام دقیق فرایند اندازه‌گیری، گزارش‌دهی و راستی‌آزمایی (یا به اختصار MRV^۱) برای صرفه‌جویی‌های حاصل شده است. گواهی‌های صرفه‌جویی، نماینده میزان مشخصی از انرژی صرفه‌جویی شده هستند، که به خلاف انرژی فیزیکی ناملموس بوده و اندازه‌گیری آن‌ها دشوار است. سیستم‌های سنتی MRV اغلب پرهزینه و مستعد تقلب هستند و نبود یک زیرساخت شفاف و قابل اعتماد، به عدم اطمینان در بازار دامن می‌زند [۳۰]. برای رفع این چالش راه‌کارهای نوآورانه مبتنی بر فناوری‌های ارتباطات و اطلاعات^۲ بسیار مهم و ضروری است. از این میان، فناوری بلاک‌چین به عنوان راهکاری برای حل این چالش‌های مدیریت داده در این بازارها مطرح است. این فناوری با ارائه یک دفترکل توزیع‌شده و تغییرناپذیر، می‌تواند یک سیستم MRV شفاف و خودکار ایجاد کند و به معاملات انرژی صرفه‌جویی‌شده در بازارهای غیرمتمرکز، اعتبار و مشروعیت ببخشد [۳۱].

۱-۴. نقش فناوری‌های ارتباطات و اطلاعات در بازارهای نوین انرژی

فناوری‌های ارتباطات و اطلاعات در تحولات حوزه انرژی و گذار به سمت یک سیستم هوشمند و غیرمتمرکز نقشی حیاتی دارند. عواملی همچون فراگیر شدن اینترنت، رشد فناوری‌های مربوط به اینترنت اشیا، پیشرفت در علوم داده، و استفاده گسترده از رایانش ابری، زیرساخت لازم برای شکل‌گیری بازارهای انرژی نوین را فراهم کرده‌اند [۶، ۱۴ و ۳۲]. این فناوری‌ها، به سیستم انرژی امکان می‌دهند تا با جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای، بهینه‌سازی فرایندها و مدیریت هوشمندانه عرضه و تقاضا، کارآمدی خود را به طرز چشمگیری افزایش دهد [۱۳]. این تحولات فناورانه، به ظهور مفهوم تولید/ مصرف‌کننده منجر شده است. تولید/ مصرف‌کنندگان، در حقیقت مصرف‌کنندگانی هستند که خود به طور هم‌زمان تولید انرژی نیز دارند [۳۳ و ۳۴]. این مفهوم، به لطف کاهش هزینه فناوری‌های تولید انرژی تجدیدپذیر مانند پنل‌های خورشیدی، به یک واقعیت قابل دسترس تبدیل شده است. تولید/ مصرف‌کنندگان می‌توانند انرژی مازاد خود را از طریق بازارهای محلی انرژی به سایر مصرف‌کنندگان یا تولید/ مصرف‌کنندگان دیگر بفروشند و به این ترتیب، به کاهش اتلاف انرژی و افزایش پایداری شبکه کمک کنند [۳۵]. شکل ۱ تفاوت مفهومی بازارهای متداول که تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان سنتی و مدیریت متمرکز دارند را با بازارهای مدرن و جدید انرژی که تولید/ مصرف‌کنندگان در آن ایفای نقش جدی دارند نشان می‌دهد.

این بازارهای جدید، با مفاهیمی مانند «شبکه هوشمند»^۳ و «نیروگاه مجازی»^۴ در هم تنیده شده‌اند. شبکه هوشمند، با استفاده از حسگرها و فناوری‌های ارتباطی، به مدیریت دوطرفه جریان انرژی و اطلاعات می‌پردازد و به این ترتیب، امکان پایش و کنترل لحظه‌ای را فراهم می‌کند [۳۶ و ۳۷]. از سوی دیگر، نیروگاه‌های مجازی، مجموعه‌ای از منابع پراکنده تولید انرژی (مانند پنل‌های خورشیدی خانگی) و مصرف‌کنندگان را به صورت مجازی در قالب یک نیروگاه واحد گردآوری می‌کنند. توسعه فنی این مفاهیم به مدیریت بهینه منابع پراکنده و مشارکت آن‌ها در بازارهای عمده‌فروشی انرژی کمک می‌کند [۳۸].

1. Measurement, Reporting & Validation (MRV)
 2. Information & Communication Technology (ICT)
 3. Smart Grid
 4. Virtual Power Plant (VPP)



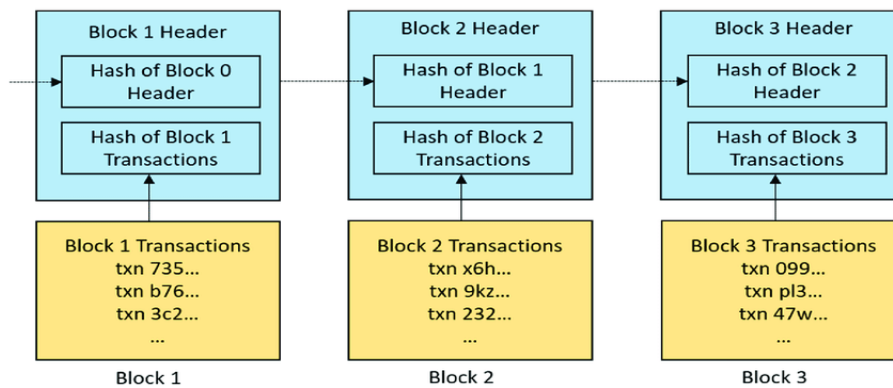
شکل ۲. مقایسه بازارهای تبادل برق (سمت چپ: سنتی و متمرکز، سمت راست: مدرن و غیرمتمرکز)

۲. فناوری بلاک‌چین و قراردادهای هوشمند

در این بخش به تناسب نیاز بحث، مفاهیم ضروری فناوری بلاک‌چین به اختصار توضیح داده می‌شوند و پس از آن به تشریح کاربردهای این فناوری در مبادلات انرژی پرداخته خواهد شد.

۱-۲. تعاریف و اصول پایه فناوری بلاک‌چین

بلاک‌چین که در ساده‌ترین تعریف، می‌توان آن را یک دفتر کل توزیع‌شده^۱ دانست، ترکیبی از چندین تکنولوژی موجود است که با یکدیگر همکاری می‌کنند تا شبکه‌ای امن و قابل اعتماد برای ذخیره‌سازی اطلاعات ایجاد کنند. نحوه کارکرد آن به این صورت است که داده‌ها در بلوک‌هایی ذخیره می‌شوند که به ترتیب زمانی و با استفاده از رمزنگاری به یکدیگر متصل شده‌اند و یک زنجیره را تشکیل می‌دهند. هر بلوک حاوی یک تابع هش^۲ از بلوک قبل از خود است و به این ترتیب هرگونه تغییر در اطلاعات یک بلوک، باعث تغییر هش آن و در نتیجه، نامعتبر شدن کل زنجیره می‌شود [۳۹].



شکل ۳. شماتیک اتصال بلوک‌های داده به یکدیگر در سیستم بلاک‌چین

1. Distributed Ledger
2. Hash Function

برای تأمین امنیت، بلاک‌چین از رمزنگاری کلید عمومی^۱ و همچنین مکانیسم‌های اجماع^۲ استفاده می‌کند. مکانیسم اجماع، مجموعه‌ای از پروتکل‌ها است که اطمینان می‌دهد تمامی مشارکت‌کنندگان در شبکه، در مورد وضعیت دفتر کل به توافق می‌رسند. از جمله معروف‌ترین مکانیسم‌های اجماع می‌توان به گواه اثبات کار^۳ و گواه اثبات سهام^۴ اشاره کرد [۴۰].

بلاک‌چین‌ها را می‌توان بر اساس سطح دسترسی و مجوز به سه دسته اصلی تقسیم کرد:

(۱) بلاک‌چین‌های عمومی مانند بیت‌کوین و اتریوم، که به هر کسی اجازه می‌دهند در شبکه شرکت کند؛

(۲) بلاک‌چین‌های خصوصی که مدیریت آن‌ها توسط یک نهاد مرکزی صورت می‌گیرد؛

(۳) بلاک‌چین‌های کنسرسیومی که مدیریت آن‌ها بین چندین نهاد مورد اعتماد توزیع شده است [۴۱].

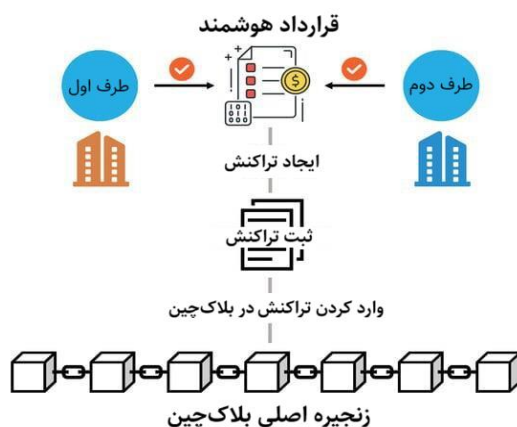
این تنوع در ساختار، بلاک‌چین را به ابزاری انعطاف‌پذیر برای کاربردهای مختلف در حوزه‌هایی مانند مدیریت زنجیره تأمین، امور مالی، و دولت الکترونیک تبدیل کرده است.

۲-۲. قراردادهای هوشمند

قراردادهای هوشمند^۵ کدهایی هستند که روی بلاک‌چین اجرا می‌شوند و وظیفه مدیریت خودکار تبادلات را به عهده دارند [۴۲]. این قراردادها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با تحقق شرایط از پیش تعیین شده، به صورت خودکار عمل می‌کنند و نیازی به واسطه‌های انسانی ندارند [۴۳]. در واقع، قراردادهای هوشمند، قوانین و منطق یک توافق را به صورت کد درمی‌آورند و آن را در یک محیط غیرقابل تغییر و شفاف اجرا می‌کنند. استفاده از این قراردادها، به حذف واسطه‌ها، کاهش هزینه‌های معاملاتی، افزایش سرعت و بهبود کارایی فرآیندها منجر می‌شود [۴۴].

۲-۳. کاربرد بلاک‌چین برای سیستم‌های انرژی

استفاده از بلاک‌چین در بخش انرژی مزایای قابل توجهی را به همراه دارد، و البته مهم‌ترین این مزیت‌ها، شفافیت و امنیت در بازارهای مبادله انرژی است. بلاک‌چین با ثبت تمامی تراکنش‌ها در یک دفتر کل غیرقابل تغییر، اعتماد را بین مشارکت‌کنندگان فراهم می‌کند. این امر به ویژه در بازارهای انرژی غیرمتمرکز که بازیگران متعددی در آن حضور دارند، بسیار حائز اهمیت است. از دیگر مزایا می‌توان به افزایش تاب‌آوری^۶ سیستم در برابر حملات سایبری و کاهش هزینه‌های عملیاتی اشاره کرد. به طور کلی، فناوری بلاک‌چین به عنوان یک بستر امن غیرمتمرکز برای نگهداری اطلاعات، بهترین راهکار به منظور یکپارچه‌سازی سیستم‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری در یک سیستم انرژی پیچیده و ارتباط آن با بازارهای مالی است. در شکل ۵ برخی از مهم‌ترین کاربردهای بلاک‌چین که در سطوح پژوهشی یا تجاری و کاربردی مطرح هستند به اختصار نام برده شده است.



شکل ۴. شماتیک شیوه عملکرد قرارداد هوشمند

1. Public-key cryptography
2. Consensus mechanism
3. Proof of Work (PoW)
4. Proof of Stake (PoS)
5. Smart Contracts
6. Resilience

سیستم‌های فیزیکی	ارتباطات سنسورها	تجارت انرژی	خدمات ارزش افزوده
<ul style="list-style-type: none"> مدیریت یکپارچه تجهیزات و منابع مدیریت گرفتگی و ترافیک خطوط محاسبات جریان بار 	<ul style="list-style-type: none"> جمع‌آوری داده از سنسورها امنیت ارتباطی داده‌ها کنترهای هوشمند شبکه هوشمند کنترل تجهیزات IoT 	<ul style="list-style-type: none"> مدیریت شبکه‌های برق مبادلات P2P انرژی نیروگاه‌های مجازی پاسخگویی بار صیانت از حریم خصوصی 	<ul style="list-style-type: none"> احراز هویت دیجیتال تجارت سبز کربن گواهی صرفه‌جویی انرژی گواهی انرژی تجدیدپذیر سرمایه‌گذاری انرژی

شکل ۵. جدول دسته‌بندی کاربردهای بلاک‌چین در حوزه انرژی

۲-۴. کاربردهای فناوری بلاک‌چین در رفع چالش‌های بازارهای همتابه‌متای انرژی

فناوری بلاک‌چین، با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد خود، پتانسیل بالایی در حل چالش‌های موجود در بازارهای نوین انرژی، به‌ویژه در حوزه تبادلات همتابه‌متا (P2P) دارد. این فناوری، رویکردی غیرمتمرکز، شفاف و امن برای مدیریت تبادلات ارائه می‌دهد و می‌تواند بسیاری از موانع سنتی را از میان بردارد. ویژگی‌های منحصر به فرد فناوری بلاک‌چین آن را برای بازارهای همتابه‌متای مبادله انرژی به یک گزینه مناسب تبدیل می‌کند. مهم‌ترین کاربردهای بلاک‌چین در تبادلات همتابه‌متای انرژی به قرار زیر است:

- ۱) مدیریت تبادلات: بلاک‌چین با ارائه یک دفتر کل توزیع‌شده و تغییرناپذیر، بستری قابل اعتماد برای ثبت و مدیریت تمامی معاملات انرژی فراهم می‌کند. این امر، نیاز به یک واسطه مرکزی را از بین می‌برد و امکان تبادل مستقیم انرژی میان تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان را فراهم می‌آورد [۴۵].
- ۲) شفافیت و تسهیل کشف قیمت: تمامی تراکنش‌ها روی بلاک‌چین قابل ردیابی و شفاف هستند. این شفافیت به مشارکت‌کنندگان امکان می‌دهد تا به قیمت‌های واقعی دسترسی داشته باشند، که در نهایت به کشف قیمت عادلانه‌تر منجر می‌شود [۴۶].
- ۳) مدیریت تراکنش‌های مالی: بلاک‌چین می‌تواند به صورت خودکار، پرداخت‌های مربوط به معاملات انرژی را انجام دهد. این امر، هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و سرعت تسویه حساب‌ها را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد [۴۷].
- ۴) تنظیم و مدیریت شبکه: بلاک‌چین می‌تواند به مدیریت جریان انرژی و تنظیم شبکه کمک کند. با استفاده از قراردادهای هوشمند، می‌توان قوانین مربوط به تعادل عرضه و تقاضا را به صورت خودکار اجرا کرد و به این ترتیب، از اضافه بار شبکه جلوگیری کرد [۴۸].

۲-۵. پروژه‌های پیشگام و موفق جهانی

- کاربردهای بلاک‌چین در حوزه انرژی تنها به ابعاد نظری محدود نمی‌شود و پروژه‌های موفق زیادی در سطح جهانی در حال توسعه و اجرا هستند. برخی از مهم‌ترین و معروف‌ترین پروژه‌ها عبارت‌اند از:
- Power Ledger: این پروژه استرالیایی، یک پلتفرم مبتنی بر بلاک‌چین برای معاملات انرژی همتابه‌متا است که به افراد و مشاغل اجازه می‌دهد انرژی خورشیدی مازاد خود را به صورت مستقیم به همسایگان خود بفروشند. این پلتفرم در کشورهای مختلفی از جمله تایلند و هند پیاده‌سازی شده است [۴۹].
 - LO3 Energy: این پروژه در دل ریزشبه^۱ منطقه بروکلین در نیویورک، از بلاک‌چین برای ایجاد یک بازار انرژی محلی استفاده کرده است. این پلتفرم به تولید/مصرف‌کنندگان اجازه می‌دهد انرژی تجدیدپذیر تولیدی خود را به صورت مستقیم با سایر اعضای جامعه محلی معامله کنند [۳۳].
 - Electron: این شرکت بریتانیایی از بلاک‌چین برای بهبود مدیریت داده‌های شبکه و تسهیل تعامل میان بازیگران مختلف بازار انرژی استفاده می‌کند [۵۰].

این پروژه‌ها، به عنوان نمونه‌های پیشگام، نشان می‌دهند چگونه فناوری بلاک‌چین می‌تواند به صورت عملی، به حل چالش‌های موجود در بازارهای انرژی کمک کند و زمینه را برای یک سیستم انرژی غیرمتمرکز و پایدار فراهم آورد. در جدول ۱ فهرستی از دیگر پروژه‌های مهمی که در سال‌های اخیر در مقیاس تجاری به اجرا درآمده‌اند مشاهده می‌شود.

جدول ۱. برخی از مهم‌ترین پروژه‌های مبتنی بر قرارداد هوشمند در حوزه انرژی

نام پروژه	اهداف	محل اجرا
Energy Web Foundation [۵۱]	تسریع در توسعه پروژه‌های انرژی در بستر بلاک‌چین	سوئیس، عملیات در سراسر جهان
Power ledger [۵۲]	تجارت غیرمتمرکز انرژی، عملیات شبکه، قابلیت ردیابی و تجارت CO ₂	استرالیا، عملیات در سراسر جهان
Grid singularity [۵۳]	شبیه‌سازی، بهره‌برداری و ساده‌سازی مدیریت انرژی محلی	آلمان، شبیه‌سازی در سراسر جهان
LO3 Energy [۵۴]	ایجاد معاملات انرژی غیرمتمرکز و تبادلات همتابهمتا	ایالات متحده آمریکا، و پروژه‌هایی در بریتانیا، آلمان، دانمارک
Prosume.io [۵۵]	تمرکز بر تجارت انرژی همتابهمتا، صورت‌حساب هوشمند و تعادل شبکه	ایتالیا
IBM's Hyperledger Fabric [۵۶]	بلاک‌چین مدولار و مجوزدار برای برنامه‌های تجاری	آمریکا، کانادا، اروپا
Car eWallet [۵۷]	حمل‌ونقل الکتریکی، پارکینگ، شارژ و قابلیت ردیابی وسایل نقلیه	آلمان
Electron [۵۸]	بازارهای انرژی توزیع‌شده، صورتحساب انرژی، نظارت و ذخیره‌سازی داده‌ها	انگلستان
Ponton [۵۹]	تجارت غیرمتمرکز انرژی و مدیریت شبکه	آلمان
Grid+ [۶۰]	بازارهای خرده‌فروشی برق و صدور صورتحساب	ایالات متحده آمریکا
TenneT-Vandebrom-Sonnen [۶۱]	مدیریت شبکه، تعادل و خدمات جانبی با استفاده از ذخیره‌سازی	آلمان

۳. بازارهای انرژی صرفه‌جویی‌شده و تبادل چندحاملی انرژی

۳-۱. توکنیزه کردن انرژی

برای ورود به بحث بازارهای مبادله انرژی در بستر بلاک‌چین به خصوص بازارهای صرفه‌جویی انرژی، لازم است مختصری در مورد مفهوم «توکن انرژی» توضیح داده شود. توکنیزه کردن انرژی فرایندی است که در آن دارایی‌های فیزیکی مانند انرژی تولیدشده یا صرفه‌جویی‌شده به دارایی‌ها یا همان توکن‌های دیجیتال روی یک بلاک‌چین تبدیل می‌شوند. این رویکرد باعث افزایش چشم‌گیر قابلیت ردیابی، شفافیت و نقدشوندگی انرژی می‌شود. توکن‌های انرژی می‌توانند نماینده بسته‌های انرژی تولیدی، گواهی‌های انرژی‌های تجدیدپذیر، یا گواهی‌های صرفه‌جویی انرژی بر حسب یک واحد مشخص (مثلاً کیلووات‌ساعت) باشند [۶۲]. به عنوان مثال، در یک ریزشبکه هر واحد انرژی خورشیدی تولیدی می‌تواند به یک توکن تبدیل شده و به صورت P2P معامله شود. این روش بازارهای انرژی را از طریق کاهش هزینه‌های عملیاتی و تسهیل دسترسی برای بازیگران کوچک، کارآمدتر می‌سازد [۶۳].

توکن‌ها به طور کلی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: توکن‌های مثلی^۱ و توکن‌های غیرمثلی^۲. توکن‌های مثلی (مانند اتر یا بیت‌کوین) یکسان و قابل جایگزینی هستند و در بخش انرژی از آن‌ها می‌توان برای تبادل واحدهای استاندارد انرژی بهره برد. در مقابل، NFTها منحصر به فرد هستند و برای توکنیزه کردن دارایی‌های خاص مانند یک گواهی صرفه‌جویی انرژی که به یک ساختمان یا دستگاه خاص تعلق دارد، کاربرد دارند [۶۴].

1. Fungible Tokens
2. Non-Fungible Tokens (NFTs)

این تنوع در استانداردسازی توکن‌ها امکان ایجاد یک بازار چندحاملی را فراهم می‌کند. در این بازارها، توکن‌ها می‌توانند به عنوان یک ابزار مشترک برای ارتباط بازار حامل‌های مختلف انرژی (مانند برق، گاز و گرما) به کار روند. برای این منظور، از یک مبنای استاندارد، مانند ارزش حرارتی یا اقتصادی، برای تعیین ضرایب تبدیل حامل‌های انرژی به یکدیگر استفاده می‌شود [۶۵ و ۶۶]. علاوه بر این، توکن‌های انرژی کاربردهای گسترده‌تری نیز دارند. آن‌ها می‌توانند به عنوان گواهی انتشار کربن^۱ یا گواهی انرژی‌های تجدیدپذیر^۲ به کار روند تا سرمایه‌گذاری روی پروژه‌های انرژی پاک را تسهیل کنند [۶۷]. در این حالت، هر توکن می‌تواند نماینده یک واحد کاهش کربن یا یک مگاوات‌ساعت برق تجدیدپذیر باشد [۶۸]. استفاده از این توکن‌ها برای تسهیل تبادلات همتابه‌همتای بهینه‌سازی انرژی نیز رو به رشد است. در این مدل، یک صرفه‌جویی/مصرف‌کننده^۳ می‌تواند صرفه‌جویی انرژی خود را به صورت توکن درآورده و آن را در یک بازار P2P معامله کند (مفهوم صرفه‌جویی/مصرف‌کننده قبلاً در جایی مطرح نشده است و ابتکار نگارندگان این مقاله است). این فرایند، با استفاده از قراردادهای هوشمند، به صورت خودکار و شفاف اجرا می‌شود و امکان ردیابی عملکرد بهینه‌سازی را فراهم می‌آورد [۶۹].

۲-۳. بازارهای همتابه‌همتای انرژی صرفه‌جویی‌شده

بازارهای همتابه‌همتای انرژی صرفه‌جویی‌شده^۴ (نگاوات) یک مدل نوظهور در مدیریت انرژی هستند که تفاوت‌های ماهوی با بازارهای سنتی تبادل انرژی (کیلووات) دارند. در حالی که بازارهای همتابه‌همتای سنتی بر تبادل فیزیکی انرژی تولیدی (مانند برق خورشیدی) تمرکز می‌کنند، بازارهای نگاوات بر ارزش اقتصادی انرژی صرفه‌جویی‌شده تمرکز دارند [۷۰]. این صرفه‌جویی که از طریق اقدامات بهینه‌سازی حاصل می‌شود به یک کالای قابل معامله تبدیل می‌شود. در این بازارها، افراد و شرکت‌ها می‌توانند نگاوات تولیدی خود را به دیگرانی بفروشند که نیاز به کاهش مصرف انرژی یا رعایت الزامات قانونی دارند. این رویکرد پتانسیل اقتصادی قابل توجهی برای مشارکت‌کنندگان ایجاد می‌کند [۲۷].

بلاک‌چین در بازارهای نگاوات برق نقشی حیاتی در مدیریت تبادلات ایفا می‌کند. به عنوان مثال در یک ریزشبکه، قراردادهای هوشمند می‌توانند به صورت خودکار صرفه‌جویی یک خانوار را محاسبه کنند و توکن‌های نگاوات را به آن تخصیص دهند. این توکن‌ها سپس می‌توانند در یک بازار P2P محلی با سایر خانوارها معامله شوند. این سازوکار نیاز به واسطه مرکزی را از بین می‌برد و شفافیت کامل را تضمین می‌کند [۷۱].

این مفهوم فقط به برق محدود نمی‌شود و امکان گسترش آن به سایر حامل‌های انرژی مانند گاز و حرارت نیز وجود دارد. با این حال، پیاده‌سازی این مدل‌ها برای حامل‌های انرژی غیر از برق، با چالش‌های فنی و نظارتی بیشتری همراه است، چرا که اندازه‌گیری و راستی‌آزمایی صرفه‌جویی در این حامل‌ها پیچیده‌تر است. تفاوت اصلی میان این دو بازار در ماهیت فیزیکی آن‌هاست؛ در حالی که برق یک حامل یکپارچه است، سایر حامل‌ها مانند گرما و گاز نیازمند سیستم‌های اندازه‌گیری و شبکه‌های توزیع متفاوتی هستند که این امر مدیریت تبادلات را دشوارتر می‌سازد [۷۲].

۳-۳. پروژه‌های موفق بلاک‌چین در بازارهای انرژی صرفه‌جویی انرژی

تا کنون پروژه‌های متعددی در سراسر جهان به صورت موفقیت‌آمیز، مدل‌های تبادل نگاوات را با استفاده از بلاک‌چین پیاده‌سازی کرده‌اند. در بسیاری از این طرح‌ها، بلاک‌چین برای ثبت و ردیابی داده‌های مربوط به بهینه‌سازی و صرفه‌جویی انرژی به کار گرفته شده است [۷۳]. به عنوان مثال در پروژه‌ای در آمریکا، ژانگ و همکاران از بلاک‌چین برای ایجاد یک پلتفرم تبادل نگاوات میان مصرف‌کنندگان و شرکت‌های خدماتی استفاده نموده‌اند. این پلتفرم با استفاده از قراردادهای هوشمند، فرایند خریدوفروش نگاوات را به صورت خودکار انجام می‌دهد و به مشارکت‌کنندگان امکان می‌دهد تا از مزایای مالی صرفه‌جویی انرژی بهره‌مند شوند [۷۴].

1. Carbon Credits (CCs)
2. Renewable Energy Certificates (RECs)
3. Savesumer (= Energy Saver & Consumer)
4. P2P Negawatt Trading

در پروژه‌های دیگر، بلاک‌چین به منظور ایجاد یک بازار محلی برای تبادل نگاهات در ریزشبکه‌ها استفاده شده است. این سیستم به مصرف‌کنندگان اجازه می‌دهد تا صرفه‌جویی‌های خود را به صورت توکن درآوردند و آن را به سایر اعضای شبکه بفروشند [۷۵]. از آنجا که در حال حاضر، تمامی منابع مورد بحث روی بازار انرژی الکتریکی تمرکز دارند، ارجاع به پروژه‌های صرفه‌جویی در سایر حامل‌ها امکان‌پذیر نیست و پژوهش‌های آتی در این زمینه می‌تواند به این حوزه بپردازد. در این زمینه بیشتر بحث خواهیم کرد.

۳-۴. بازارهای چندحاملی انرژی

در سیستم‌های انرژی مدرن، بازارهای چندحاملی که تبادل انرژی را میان حامل‌های مختلف مانند برق، گاز، و گرما امکان‌پذیر می‌سازند، نقش فزاینده‌ای پیدا کرده‌اند. این بازارها به لطف فناوری‌های ICT و مدل‌های بهینه‌سازی پیشرفته قادر به ایجاد ارتباط میان حامل‌های انرژی از طریق «هاب‌های انرژی» هستند. این هاب‌ها انرژی را به اشکال مختلف دریافت کرده و با استفاده از مبدل‌های انرژی آن را به سایر حامل‌ها تبدیل می‌کنند تا به نیازهای متغیر مصرف‌کنندگان پاسخ دهند [۷۶].

مزایای بازارهای چندحاملی همتابه‌همتا (P2P) در مدیریت بهینه انرژی شامل افزایش انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان کلی سیستم است. این بازارها با فراهم کردن امکان تبادل مستقیم انرژی میان ریزشبکه‌ها و مصرف‌کنندگان، به کاهش تلفات شبکه و افزایش پایداری آن کمک می‌کنند [۷۷]. در این مدل، منابع پراکنده تولید انرژی، مانند سیستم‌های فتوولتائیک و ذخیره‌سازهای انرژی، می‌توانند به صورت بهینه مدیریت شوند. پژوهش‌های متعددی در این زمینه صورت گرفته که به بررسی نمونه‌های موفق در مدیریت هم‌زمان برق، گرما و گاز پرداخته‌اند. برای مثال، در یک پژوهش یانگ کویی و همکاران [۷۸] به بررسی مسئله تجارت انرژی همتابه‌همتای خارجی و تبدیل انرژی داخلی در ریزشبکه‌های چندحاملی به هم‌پیوسته پرداختند. آن‌ها برای نخستین بار مفهوم «سازگاری در تجارت انرژی» را برای جلوگیری از رفتارهای معاملاتی غیرمنطقی پیشنهاد دادند و مدلی برای مدیریت بهینه انرژی ریزشبکه‌های چندحاملی با استفاده از یادگیری تقویتی چندعاملی ارائه کردند.

با این حال پیاده‌سازی بازارهای چندحاملی همتابه‌همتا با چالش‌های فیزیکی، اطلاعاتی و قانونی قابل توجهی همراه است. از منظر فیزیکی، هر حامل انرژی دارای شبکه توزیع، زیرساخت و مقررات خاص خود است که ارتباط میان آن‌ها را پیچیده می‌سازد. از سوی دیگر، ایجاد ارتباط و اشتراک داده میان رگولاتورهای هر بازار به دلیل مسائل مربوط به حریم خصوصی، امنیت داده و تفاوت در قوانین یک مانع جدی محسوب می‌شود [۷۹]. چالش‌های حقوقی و قانونی به دلیل تفاوت در مدل‌های قیمت‌گذاری، تعرفه‌ها و قوانین حاکم بر هر بازار مانع از یکپارچه‌سازی کامل می‌شود. با این حال، استفاده از فناوری‌هایی مانند بلاک‌چین می‌تواند با ایجاد یک زیرساخت مشترک و شفاف، به حل این چالش‌ها کمک کند و امکان تبادل یکپارچه را فراهم آورد [۸۰].

۴. یافته‌های پژوهش

مرور مطالعات صورت‌گرفته در خصوص بازارهای همتابه‌همتای انرژی نمایانگر آن است که در سیستم انرژی در حال گذار امروزی، انعطاف‌پذیری بازیگران هم در سمت عرضه و هم در سمت تقاضا افزایش چشم‌گیری پیدا کرده است و فناوری‌های نوین ارتباطی، امکان مدیریت بهتر شبکه‌های انرژی را فراهم کرده‌اند. علاوه بر این، نشان داده شد که پیشرفت در فناوری دفتر کل توزیع‌شده به ویژه فناوری بلاک‌چین هم از سطح تحقیقاتی خارج شده و به اجرای پروژه‌های عملی رسیده است. این دو نکته نوید می‌دهد که گستره وسیعی از فرصت‌ها برای مبادلات همتابه‌همتای انرژی فراهم شده است.

با این وجود، در حالی که تجارت همتابه‌همتای انرژی (مگاوات) طی یک ده گذشته به طور فزاینده‌ای در جامعه تحقیقاتی مورد مطالعه قرار گرفته است، موضوع تجارت همتابه‌همتای انرژی صرفه‌جویی‌شده (نگاوات) موضوع بسیار جدیدتری است که تنها طی دو سه سال اخیر مورد توجه قرار گرفته و به طبع هنوز در مرحله تحقیقات مقدماتی قرار دارد. حتی با دقت بیشتر در همین منابع پژوهشی و مقالات محدود هم ملاحظه می‌شود که هرگاه صحبت از تجارت نگاهات می‌شود، در بیشتر موارد، منظور به طور خاص «انرژی الکتریکی صرفه‌جویی‌شده» است و تجارت انرژی حاصل از بهینه‌سازی انرژی در سایر حامل‌های انرژی را شامل نمی‌شود.

در جدول ۲ نتیجه بررسی صدها مقاله در حوزه بازارهای P2P انرژی که ظرف مدت ۱۰ سال اخیر منتشر شده‌اند و بسیاری از آن‌ها جزء مراجع همین مقاله هم بوده‌اند، آورده شده است. چون همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، در یک تقسیم‌بندی کلی ادبیات این حوزه را می‌توان از نظر ارائه راهکارهای متمرکز یا غیرمتمرکز، راهکارهای عادی یا هوشمند، در نظر گرفتن انرژی تولیدی (مگاوات) یا صرفه‌جویی‌شده (نگاوات)، و نیز از جهت نوع حامل‌های انرژی مورد بحث به دوازده دسته تقسیم کرد (به علت محدودیت فضا در هر دسته به تعداد محدودی از پژوهش‌ها به عنوان نمونه ارجاع داده شده است). در بعضی از این دسته‌ها بلوغ کافی شکل گرفته و جنبه عملیاتی در مقیاس تجاری پیدا کرده‌اند. بعضی دیگر از این دسته‌ها هنوز در مراحل پژوهشی قرار دارند و به آستانه تجاری‌سازی نرسیده‌اند. اما در این میان، حوزه بازارهای انرژی صرفه‌جویی‌شده همتابه‌همتا یک زمینه بکر و نوظهور است که تا کنون هیچ پژوهش خاصی روی آن انجام نگرفته، هرچند که در امتداد تحولات سال‌های اخیر آینده خوبی برای آن پیش‌بینی می‌شود.

جدول ۲. دسته‌بندی محتوایی مقالات و پژوهش‌های حوزه تبادل همتابه‌همتای انواع مختلف انرژی

نوع حامل انرژی					
انرژی صرفه‌جویی‌شده (Negawatt)			انرژی تولیدشده (Megawatt)		
سایر حامل‌ها	برق	سایر حامل‌ها	برق	از منظر هوشمندی	از منظر متمرکز بودن
بورس بهینه‌سازی انرژی ایران (گاز) [۸۱]	بورس بهینه‌سازی انرژی ایران (برق) [۸۱]	بازارهای آینده‌نگر ^۱ [۸۳، ۸۲]	بورس انرژی [۸۱]	غیرهوشمند	با واسطه مرکزی (متمرکز)
ادبیات توکنیزاسیون [۶۳، ۶۷، ۶۹، ۹۰-۹۴]	نمونه اجرا شده دارد [۸۹]	قابل انجام نیست (N/A)	بازارهای محلی تولید/ مصرف‌کنندگان [۸۴-۸۸]	غیرهوشمند	همتابه‌همتا (غیرمتمرکز)
وجود ندارد (موضوع پژوهش آینده)	گواهی سفید صرفه‌جویی برق [۱۰۰-۱۰۴]	هاب انرژی هوشمند [۹۸، ۹۹]	شبکه‌های هوشمند [۹۵-۹۸، ۴]	قرارداد هوشمند	همتابه‌همتا (غیرمتمرکز)

در مورد شیوه و ملاک ارزیابی مقالاتی که در خلاصه نتایج آن‌ها در جدول فوق آمده است، درخور یادآوری است که در این بررسی جامع، جست‌وجوی مقالات در پایگاه‌های Science Direct، Springer، IEEE با کلمات کلیدی همچون بازارهای همتابه‌همتا، شبکه هوشمند، توکنیزاسیون، بازار نگاواتی و... انجام پذیرفت و حدود ۳۵۰ مقاله دانلود و مورد بررسی قرار گرفت، که از این میان حدود ۸۰ درصد مربوط به سال‌های ۲۰۱۹ به بعد بودند. مقالات یادشده بر اساس مهم‌ترین نقاط قابل توجه در آن‌ها در پانزده دسته (مثلاً یارانه و بازارهای مالی، اصول مدل‌سازی، شبکه‌های هوشمند و تعاملی، توکنیزاسیون، ساختار و معماری بلاک‌چین و...) مرتب شده و از مراجع هر یک از این دسته‌ها در آنالوژی بخش مربوطه استفاده شد. در نهایت، برای نگارش این پژوهش، حدود ۱۰۰ مقاله‌ای که بیشترین ارتباط را با مباحث مطرح‌شده داشتند انتخاب شدند.

برای کشور ایران، تمام شواهد حاکی از آن است که به منظور رفع چالش مهم ناترازی انرژی هیچ راهی به‌صرفه‌تر و مؤثرتر از کنترل مصرف و بهینه‌سازی انرژی وجود ندارد. در چنین شرایطی وجود یک فناوری ICT مانند بلاک‌چین که می‌تواند تسهیل‌گر و سرعت‌دهنده تحول کشور به سمت پایداری انرژی باشد، بسیار امیدوارکننده است. چنان که اشاره شد، بهینه‌سازی انرژی ارزان‌ترین روش تأمین تقاضای تحقق نیافته یا همان ناترازی است، و برای تحقق آن چاره‌ای جز راه‌اندازی بازار برای ایجاد انگیزه اقتصادی وجود ندارد. چنین بازاری با استفاده از فرصت مبادلات P2P می‌تواند صورت اجرایی پیدا کند و در میان فعالان اقتصادی دنبال شود. فناوری بلاک‌چین بستر ایده‌آلی برای پیاده‌سازی بازار P2P انرژی صرفه‌جویی‌شده است که تا کنون کارایی خود را به‌خوبی نشان داده و کافی است برای تطابق با مختصات اقتصاد انرژی کشور هماهنگ و باظراحی شود.

البته با وجود کمبود یادشده در منابع پژوهشی، مشخص است که طراحی یک مسیر منطقی برای پیشبرد بازار بهینه‌سازی انرژی در ایران برای رفع ناترازی با پیچیدگی‌های روبرو است، چرا که با تجارت P2P بهینه‌سازی انرژی و تبادلات غیرمتمرکز

انرژی صرفه‌جویی شده - آن هم برای حامل‌های مختلف انرژی - سروکار دارد. همچنین ملاحظات روش‌شناسی را که به طور ذاتی ناظر به وضعیت ایده‌آل است را باید با ملاحظات منطقه‌ای و محلی در کشور ایران تطبیق دهد و بازار بهینه‌سازی انرژی و محیط زیست را به عنوان یک چارچوب نظری اساسی در راه‌حل‌های پیشنهادی مفروض بگیرد.

۴-۱. چارچوب مفهومی مدل‌سازی بازارهای همتابه‌متای صرفه‌جویی چندحاملی انرژی

با توجه به هدف این مقاله برای ایجاد یک بازار چندحاملی برای تبادل همتابه‌متای انرژی صرفه‌جویی شده، می‌توان الگویی برای مدل‌سازی ریاضی چنین بازاری به شکل زیر ارائه داد. این چارچوب مفهومی با اقتباس از مفاهیم مشابه در میان انبوه مقالات بررسی شده در بازارهای همتابه‌متای تبادل برق میان تولید/مصرف‌کنندگان نوشته شده و در آن قابلیت‌های چندحاملی و توکن‌سازی لحاظ شده است. این مدل یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه است که در آن، هر بازیگر (صرفه‌جویی/مصرف‌کننده) به دنبال بیشینه کردن منافع اقتصادی خود از طریق تبادل توکن‌های انرژی صرفه‌جویی شده است.

متغیرها و بازیگران

- مجموعه بازیگران: $N = \{1, 2, \dots, n\}$ (برای هر صرفه‌جویی/مصرف‌کننده)
- بازه زمانی: $T = \{1, 2, \dots, t_{max}\}$ (مثلاً هر ۱۵ دقیقه یا یک ساعت)
- انرژی‌های صرفه‌جویی شده:
 - $S_{E,i,t}$: مقدار برق صرفه‌جویی شده توسط صرفه‌جویی/مصرف‌کننده i در زمان t (بر حسب kWh)
 - $S_{G,i,t}$: مقدار گاز صرفه‌جویی شده توسط صرفه‌جویی/مصرف‌کننده i در زمان t (بر حسب m^3)
- توکن‌های مثلی:
 - $FT_{E,i,t}$: توکن‌های مثلی برق که برای تبادل مستقیم P2P استفاده می‌شوند. هر توکن معادل ۱ kWh است.
 - $FT_{G,i,t}$: توکن‌های مثلی گاز که برای تبادل مستقیم P2P استفاده می‌شوند. هر توکن معادل $1 m^3$ است.
 - $FT_{L,i,t}$: توکن‌های مثلی سوخت مایع که برای تبادل P2P استفاده می‌شوند. هر توکن معادل ۱ Lit است.
- از آنجا که سیستم شامل برق، گاز و سوخت مایع است، یک مدل توکنیزاسیون چندحاملی به این صورت تعریف می‌شود:

$$FT_{tot,i} = k_E FT_{E,i,t} + k_G FT_{G,i,t} + k_L FT_{L,i,t}$$

که در آن:

- $FT_{tot,i}$ مقدار انرژی کل استاندارد شده و صرفه‌جویی شده برای بازیگر i است.
- k_E , k_G و k_L ضرایب تبدیل برای استانداردسازی واحدها (مثلاً به معادل کیلووات‌ساعت) هستند.
- توکن‌های غیرمثلی:
 - $NFT_{i,t}$: هر NFT یک گواهی منحصر به فرد برای یک مقدار مشخص انرژی صرفه‌جویی شده (مثلاً ۱۰ kWh) برق یا $100 m^3$ گاز) است. هر NFT می‌تواند حاوی فراداده (Metadata) شامل زمان، مکان، نوع حامل، و فناوری صرفه‌جویی باشد.

• مقادیر مبادله‌ای:

$$FT_{i,j,t}^{G,ex} \text{ و } FT_{i,j,t}^{E,ex}: \text{مقادیر توکن‌های مثلی گاز و برق مبادله شده بین صرفه‌جویی/مصرف‌کننده } i \text{ و } j$$

• قیمت‌ها:

$$P_{E,t} \text{ و } P_{G,t}: \text{قیمت‌های تعادلی توکن‌های مثلی در بازار P2P.}$$

$$P_{NFT,t}: \text{قیمت حراج یا قیمت تعیین شده برای NFT در بازار بورس انرژی.}$$

○ $P_{Utility,t}$: قیمت خرید انرژی از شبکه اصلی (Utility Grid).

○ $P_{fuel,t}$: قیمت سوخت مایع در جایگاه‌های سوخت.

تابع هدف

هدف اصلی مدل، حداکثرسازی سود خالص برای هر صرفه‌جویی/مصرف‌کننده است:

$$\max \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} (Revenue_{i,t} - Cost_{i,t})$$

به طوری که در آن:

- $Revenue_{i,t}$: درآمد حاصل از فروش توکن‌ها در بازار P2P و فروش NFT است.
- $Cost_{i,t}$: هزینه خرید توکن‌ها، هزینه عملیات و سرمایه‌گذاری است.

قیود و معادلات

الف) تبدیل صرفه‌جویی به توکن:

انرژی صرفه‌جویی‌شده (S) توسط هر صرفه‌جویی/مصرف‌کننده به توکن‌های مثلی و غیرمثلی تبدیل می‌شود. این فرایند از طریق قرارداد هوشمند و با تأیید نهادهای MRV (سنجش، راستی‌آزمایی و گزارش‌دهی) انجام می‌شود.

مثلی:

○ توکن‌های

$$FT_{E,i,t} = S_{E,i,t} \cdot \alpha_E$$

$$FT_{G,i,t} = S_{G,i,t} \cdot \alpha_G$$

○ α_E, α_G : ضریب تبدیل برای استانداردسازی واحدها (مثلاً به واحد استاندارد TE)

if $S_{E,i,t} \geq \text{Min NFT}_E \Rightarrow \text{create a new NFT}_{E,i,t}$

if $S_{G,i,t} \geq \text{Min NFT}_G \Rightarrow \text{create a new NFT}_{G,i,t}$

○ توکن‌های غیرمثلی:

○ Min NFT : حداقل مقدار صرفه‌جویی مورد نیاز برای ایجاد یک NFT. این مقدار برای هر حامل انرژی می‌تواند متفاوت باشد.

تبادل تعادلات

هر صرفه‌جویی/مصرف‌کننده می‌تواند از توکن‌های خود برای مصرف، فروش در بازار P2P یا تبدیل به NFT استفاده کند.

$$\text{Supply}_t = \sum_{i \in N} (FT_{E,i,t})$$

$$\text{Demand}_t = \sum_{j \in N} (D_{E,j,t})$$

○ قید تعادل P2P:

○ Supply_t و Demand_t : عرضه و تقاضای کل توکن‌های مثلی در بازار P2P.

شایان یادآوری است چارچوب پارامتری ارائه‌شده برای مدل‌سازی مفهومی بسته به شرایط مسئله می‌تواند با اضافه کردن جزئیات بسیار بیشتری بسط داده شود و کلیه شرایط محیطی از جمله قیود اجتماعی و اقتصادی در آن لحاظ شود. بدیهی است که بسط بیشتر این معادلات و مدل‌سازی سیستم انرژی ایران بر این اساس در حوصله این مقاله نیست، و در اینجا فقط به ارائه کلیات مفهومی روش‌شناسی برای کمک به تثبیت موضوع بازارهای همتابه‌همتای صرفه‌جویی چندحاملی انرژی و سازوکارهای حاکم بر عملکرد صرفه‌جویی/مصرف‌کنندگان بسنده کرده‌ایم.

۴-۲. بحث: پیاده‌سازی بازارهای همتابه‌همتای صرفه‌جویی چندحاملی انرژی در بستر بلاک چین

نتایج بررسی‌های صورت‌گرفته در این پژوهش نشان می‌دهد آنالوژی و مشابهت‌یابی فنی میان مفاهیم مطرح در بازار همتابه‌همتای چندحاملی صرفه‌جویی انرژی، با بازارهای همتابه‌همتای چندحاملی در ساختار شبکه هوشمند، و همچنین بازار

همتابه‌متمای انرژی صرفه‌جویی‌شده در حامل برق، کاملاً امکان‌پذیر است. تنها جنبه‌ای که ننگاشت^۱ و ارتباط این بازارها را با دشواری مواجه می‌کند، الزامات حقوقی و چارچوب‌های قانونی مربوط به طرح بازار بهینه‌سازی انرژی و محیط زیست ایران است که می‌توان این موارد را نیز به صورت جزءبه‌جزء در قالب قیود مدل‌سازی ریاضی در کدنویسی بلاک‌چین وارد کرد. به طور کلی، برای پیاده‌سازی موفق یک سیستم بلاک‌چین برای بازارهای همتابه‌متمای صرفه‌جویی چندحاملی انرژی، چالش‌ها و فرصت‌های زیر متصور است:

- چالش‌ها: یکی از چالش‌های بزرگ فنی، مقیاس‌پذیری شبکه‌های بلاک‌چین است [۱۰۵]. بسیاری از بلاک‌چین‌های عمومی قادر به پردازش حجم بالای تراکنش‌های مورد نیاز در یک بازار انرژی در زمان واقعی نیستند. این امر می‌تواند به تأخیر در تسویه حساب‌ها و افزایش هزینه‌های تراکنش (گس^۲) منجر شود [۲۶]. در کنار آن، هزینه‌های پیاده‌سازی و عملیاتی نیز یک مانع جدی است، زیرا راه‌اندازی و نگهداری یک زیرساخت بلاک‌چین، به‌ویژه در مقیاس بزرگ، نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی است [۷۳]. از دیگر مشکلات فنی و اجرایی می‌توان به پیچیدگی یکپارچه‌سازی بلاک‌چین با شبکه‌های توزیع و سیستم‌های اندازه‌گیری سنتی اشاره کرد. موانع حقوقی و قانونی نیز در بسیاری از کشورها، به دلیل نبود چارچوب‌های مشخص برای تبادلات غیرمتمرکز انرژی، هنوز به طور کامل حل نشده‌اند [۱۰۶]. همچنین، در یک بازار چندحاملی، تفاوت در مقررات مربوط به هر حامل (برق، گاز، گرما) می‌تواند فرایند یکپارچه‌سازی را دشوار کند.
- فرصت‌ها: با وجود چالش‌هایی که به آن‌ها اشاره شد، فرصت‌های قابل توجهی برای پیاده‌سازی این سیستم‌ها وجود دارد. افزایش کارایی و شفافیت بازار، مهم‌ترین مزیت بلاک‌چین است. این فناوری با حذف واسطه‌ها و ثبت غیرقابل تغییر تراکنش‌ها، به کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش اعتماد در میان مشارکت‌کنندگان منجر می‌شود [۱۰۷]. مدیریت هزینه نیز بهبود می‌یابد، زیرا سیستم‌های مبتنی بر بلاک‌چین، امکان تبادل انرژی را با هزینه کمتری فراهم می‌کنند. همچنین، با تمرکززدایی، فرصت برای ظهور بازیگران جدید در بازار انرژی، مانند شرکت‌های کوچک بهینه‌سازی و صرفه‌جویی/ مصرف‌کنندگان فراهم می‌آید [۱۰۸]. در نهایت، این فناوری می‌تواند به توسعه بازارهای جدید مانند بازارهای گواهی کربن و گواهی‌های صرفه‌جویی انرژی کمک کرده و به عنوان یک ابزار قدرتمند در جهت تحقق اهداف پایداری و کاهش انتشار کربن عمل کند [۲۷].

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله با بیان سیر تحولات منتهی به دوران سوم گذار انرژی و بیان کلان‌روندهای جهانی این حوزه، به تشریح وضعیت سیستم انرژی ایران پرداخته شد. ضمن بیان مشکلات اصلی و مزمن انرژی در ایران از قبیل رشد فزاینده تقاضای انرژی اولیه و تلاش بی‌ثمر برای تأمین این تقاضا از طریق گسترش دائمی عرضه، ضرورت تحول ساختاری در سیستم انرژی کشور از طریق پرداختن به بهینه‌سازی انرژی با استفاده از ابزارهای پیشرفته از قبیل فناوری بلاک‌چین و قراردادهای هوشمند معرفی شد. سپس توضیحات فنی مختصری درمورد این فناوری‌ها به اجمال تشریح شد و انواع کاربردهای آن‌ها در حوزه انرژی مورد بررسی قرار گرفت. مروری بر پژوهش‌های صورت‌گرفته در خصوص بازارهای P2P برق تولیدی (مگاواتی) ایجادشده میان تولید/ مصرف‌کنندگان، و در ادامه بررسی تحقیقات متأخر درخصوص بازارهای P2P برق صرفه‌جویی‌شده (نگاواتی) میان صرفه‌جویی/ مصرف‌کنندگان، و در نهایت بررسی بازارهای مبادله چندحاملی در هاب انرژی هوشمند، باعث شکل‌گیری یک چارچوب قابل تعمیم برای بازارهای همتابه‌متمای انرژی صرفه‌جویی‌شده چندحاملی شد.

نویسندگان این مقاله بر این عقیده هستند که در شرایط خاص سیستم انرژی ایران که از یک سو با ناترازی شدید مواجه است و از سوی دیگر، تحریم‌های ظالمانه دسترسی به منابع اقتصادی را برای کشور محدود کرده است، به دلیل کاهش توان سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های انرژی برای افزایش عرضه، راهکاری بهتر از صرفه‌جویی و بهینه‌سازی انرژی به عنوان ارزان‌ترین روش تأمین عرضه وجود ندارد. خوشبختانه طرح بازار بهینه‌سازی انرژی الگوی خوبی برای ورود به این راهکار در

1. mapping
2. Gas Fee

اختیار می‌گذارد که البته در عمل با دشواری‌های برای پیاده‌سازی مواجه است و سرعت پیشرفت این طرح با نیازهای بخش انرژی هماهنگ نیست. در این میان فرصت‌های مختلفی که در دوران گذار انرژی برای تحقق سریع‌تر اقدامات بهینه‌سازی انرژی و راه‌اندازی بازارهای اقتصادی وجود دارد، باید به درستی مورد مطالعه قرار گرفته و به راهکارهای عملیاتی تبدیل شود. بازارهای همتابه‌همتای تبادل انرژی صرفه‌جویی‌شده چندحاملی راهکار پیشنهادی نگارندگان این مقاله برای حل این مشکل است. با بررسی جامعی روی تحقیقات گذشته، نشان دادیم فناوری بلاک‌چین و قراردادهای هوشمند به بلوغ کافی برای اداره غیرمتمرکز بازارهای تبادل انرژی رسیده‌اند و تجربه بازارهای برق که بر اساس مفهوم تولید/مصرف‌کننده شکل گرفته‌اند، می‌تواند به عنوان الگوی مناسبی برای بازارهای چندحاملی انرژی صرفه‌جویی‌شده نیز به کار گرفته شود. این ایده گرچه به صورت تئوری هیچ امتناعی ندارد و بر اساس تجربه می‌تواند راهکار عملی مفیدی برای رفع مشکل ناترازی باشد، اما هیچ‌گونه سابقه قبلی در پژوهش‌های پیشین ندارد و مفهومی نوظهور است که باید روی آن بررسی و تحقیقات بیشتری انجام گیرد.

به منظور تبیین این چارچوب روش‌شناسی به صورت کمی و قابل بیان با معادلات ریاضی، روابط ریاضی حاکم برای ساخت مدل بهینه‌سازی ریاضی که به طور معمول در چنین مدل‌هایی به کار گرفته می‌شود، معرفی شد. این مدل که بر اساس مرور تجربیات تحقیقاتی و با اقتباس از پژوهش‌های پیشین ساخته شده است، هرچند در این مقاله به اجمال معرفی شده است، اما قابلیت توسعه و تعمیم برای تطابق حداکثری با شرایط سیستم انرژی مورد نظر و به طور خاص کشور ایران را دارد. در نهایت، چالش‌ها و فرصت‌های استفاده از این رویکرد به بازار صرفه‌جویی انرژی هم مورد بحث قرار گرفت تا دید واقع‌بینانه‌تری نسبت به مسیر پیش رو برای اجرای عملی این ایده به دست آید.

منابع

- [1] Y. Yang, S. Xia, P. Huang, and J. Qian, "Energy transition: Connotations, mechanisms and effects," *Energy Strategy Reviews*, vol. 52, 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101320.
- [2] M. Asif, *The 4Ds of Energy Transition: Decarbonization, Decentralization, Decreasing Use, and Digitalization*, 1st ed. Wiley, 2022.
- [3] IRENA, "Innovation landscape brief: Blockchain, International Renewable Energy Agency," International Renewable Energy Agency, 9789292601171, 2019.
- [4] H. L. Gururaj *et al.*, *Blockchain technology for smart grids : implementation, management and security*. Institution of Engineering & Technology, 2022, pp. 308–308.
- [5] A. Amirmahani, A. Bagheri, and S. Jadid, "Three-level secondary Negawatt trading market mechanism with capability of congestion management," *IET Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 314–327, 2023, doi: 10.1049/stg2.12150.
- [6] P. S. C. Sharmeela, P. Sivaraman, Meera Joseph, *IoT, Machine Learning and Blockchain Technologies for Renewable Energy and Modern Hybrid Power Systems*. River Publishers, 2023.
- [7] P. M. Douglas Miller, Gordon Myers, Marina Niforos, "Blockchain: Opportunities for Private Enterprises in Emerging Markets," 2019.
- [8] A. K. Christoph Burger Philipp Richard Jens Weinmann, "Blockchain in the energy transition. A survey among decision-makers in the German energy industry," *DENA German Energy Agency*, 2016.
- [9] B. Teufel, A. Sentic, and M. Barmet, "Blockchain energy: Blockchain in future energy systems," *Journal of Electronic Science and Technology*, vol. 17, no. 4, 2019, doi: 10.1016/j.jnlest.2020.100011.
- [10] Y. Baashar, G. Alkaws, A. A. Alkahtani, W. Hashim, R. A. Razali, and S. K. Tiong, "Toward blockchain technology in the energy environment," in *Sustainability (Switzerland)* vol. 13, ed: MDPI AG, 2021.
- [11] M. Schletz, A. Cardoso, G. P. Dias, and S. Salomo, "How can Blockchain technology accelerate energy efficiency interventions? A use case comparison," *Energies*, vol. 13, no. 22, 2020/11// 2020, doi: 10.3390/en13225869.
- [12] E. Hossain, G. Muhammad, A. Almogren, and M. Alrubaian, "Cyber–physical social systems for P2P energy trading: A review," *Future Generation Computer Systems*, vol. 100, pp. 605–621, 2019, doi: 10.1016/j.future.2019.05.046.
- [13] P. F. Borowski, "Digitization, Digital Twins, Blockchain, and Industry 4.0 as Elements of Management Process in Enterprises in the Energy Sector," *Energies*, vol. 14, no. 7, 2021/4// 2021, doi: 10.3390/en14071885.
- [14] I. M. Atlam, R. J. Walters, and G. B. Wills, *Blockchain-Based Systems for the Modern Energy Grid: Architecture and Performance*. Springer, 2023.
- [15] Institute of International Energy Studies, Department of Supervision on Hydrocarbon Resources, Ministry of Petroleum, "National Hydrocarbon Balance in 2021", 2023. (Persian)
- [16] Energy Optimization and Environment Working Group, Secretariat of the Supervisory Commission of the Expediency Discernment Council of the System , "Gap Assessment, Vulnerability Analysis, and Exit Strategies from the Current State of the Energy Sector", 2021. (Persian)
- [17] E. A. D. International Energy Agency (IEA), "Carrots and sticks: taxing and subsidising energy," IEA, 2006.
- [18] Z. J. Boqiang Lin, "Estimates of energy subsidies in China and impact of energy subsidy reform," *Energy Economics*, 2011.
- [19] i. E. A. (IEA). "Fossil Fuels Consumption Subsidies in 2022." <https://www.iea.org/reports/fossil-fuels-consumption-subsidies-2022> (accessed).
- [20] "Gasoline and Diesel prices." https://www.globalpetrolprices.com/gasoline_prices/ (accessed).
- [21] Fars News Agency, "At Least USD 4 Billion in Losses Due to Fuel Smuggling / How Much Gasoline and Diesel Are Smuggled Daily?"; available at: farsnews.ir/news/14020210000179/. (Persian)

- [22] S. Tagliapietra, "Iran after the (Potential) Nuclear Deal: Iran's Gas Market," *Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM)*, 2014.
- [23] Islamic Republic News Agency (IRNA), "Owji in the Open Session of Parliament: 200 Million Cubic Meters of Imbalance Between Gas Production and Consumption," available at: <https://www.irna.ir/news/84915088/>. (Persian)
- [24] Taadol Economic Daily, Interview with the Former Head of the Iran Power Industry Syndicate and Head of the Industries Commission of the Iran Chamber of Commerce, "The Alarm Bell of Power Grid Collapse Has Been Sounded," available at: <https://rb.gy/bj6x4>. (Persian)
- [25] *World Energy Outlook 2014*. International Energy Agency (IEA), 2014.
- [26] A. Khatoun, P. Verma, J. Southernwood, B. Massey, and P. Corcoran, "Blockchain in energy efficiency: Potential applications and benefits," *Energies*, vol. 12, no. 17, 2019/8// 2019, doi: 10.3390/en12173317.
- [27] S. S. Zadsar, M. Rashidinejad, S. F. Fatemi Ardestani, A. Abdollahi, and S. Dorahaki, "A behavioural model for Negawatt sharing management based on the prospect theory in a citizen energy community," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 42, 2025/6// 2025, doi: 10.1016/j.segan.2025.101693.
- [28] Supreme Energy Council (2021), Resolution on Operationalizing the Executive By-law on the "Establishment of the Energy Optimization and Environment Market," available at: <https://qavanin.ir/Law/TreeText/?IDS=15172730395495171083>. (Persian)
- [29] "Energy Optimization and Environment Market Plan – Final Version," Fuel Consumption Optimization Company, 2021. (Persian)
- [30] M. P. a. S. R. Zejia Jing, "Blockchain-based Negawatt Trading Platform Conceptual Architecture and Case Studies," in *IEEE PES GTD Asia*, 2019.
- [31] S. Z. Arshyn Zhanbolatov, Nurkhat Zhakiyev, Korhan Kayisli, "Blockchain-Based Decentralized Peer-to-Peer Negawatt Trading in Demand-Side Flexibility Driven Transactive Energy System," *International Journal of Renewable Energy Research*, no. Vol12i3, 2022, doi: 10.20508/ijrer.v12i3.13195.g8530.
- [32] A. R. Rao and D. Clarke, "Perspectives on emerging directions in using IoT devices in blockchain applications," *Internet of Things*, 2019, doi: 10.1016/j.iot.2019.10.
- [33] P. Siano, G. De Marco, A. Rolan, and V. Loia, "A Survey and Evaluation of the Potentials of Distributed Ledger Technology for Peer-to-Peer Transactive Energy Exchanges in Local Energy Markets," *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 3454–3466, 2019, doi: 10.1109/jsyst.2019.2903172.
- [34] E. Mengelkamp, B. Notheisen, C. Beer, D. Dauer, and C. Weinhardt, "A blockchain-based smart grid: Towards sustainable local energy markets," *Computer Science - Research and Development*, vol. 33, pp. 207–214, 2018.
- [35] N. Karandikar, *Blockchain based energy transactions for a prosumer community*. 2021.
- [36] P. Ilak, I. Rajšl, S. Krajcar, L. Herenčić, and Z. Zmijarević, "Decentralised electricity trading in the microgrid Implementation of decentralized Peer-to-Peer Concept for Electricity Trading (P2PCET) MEET-Multidisciplinary and multi-context demonstration of EGS exploration and Exploitation Techniques and potentials View project IMPACT: IMplementation of Peer-to-Peer Advanced Concept for Electricity Trading View project Decentralised electricity trading in the microgrid Implementation of decentralized Peer-to-Peer Concept for Electricity Trading (P2PCET)." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/329093264>
- [37] S. Y. Seven, Yeliz, A. Soran, G. Yalcin Alkan, J. Jung, T. S. Ustun, and A. Onen, "Energy Trading on a Peer-to-Peer Basis between Virtual Power Plants Using Decentralized Finance Instruments," *Sustainability*, vol. 14, no. 20, 2022, doi: 10.3390/su142013286.
- [38] X. C. Zhenhua Cui, Yixun Xue, Zhongkai Yi, Zening Li, Hongbin Sun, "Distributed peer-to-peer electricity-heat-carbon trading for multi-energy virtual power plants considering copula-CVaR theory and trading preference," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2024.
- [39] D. H. Jiabin Bao, Min Luo, and Kim-Kwang Raymond Choo, "A Survey of Blockchain Applications in the Energy Sector," *IEEE systems journal*, 2020.

- [40] M. Afzal *et al.*, "Role of blockchain technology in transactive energy market: A review," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102646.
- [41] M. P and P. A. Salam, "Design and Development of P2P Negawatt Trading DApp with Blockchain," presented at the 2023 IEEE PES 15th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2023.
- [42] M. Andoni *et al.*, "Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities," in *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 100, ed: Elsevier Ltd, 2019, pp. 143–174.
- [43] G. Wang, Y. Liu, C. Zhang, and Y. Zhang, "A review of energy internet research considering interactive energy: The blockchain perspective," *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.999589.
- [44] M. B. Mollah *et al.*, "Blockchain for Future Smart Grid: A Comprehensive Survey," in *IEEE Internet of Things Journal* vol. 8, ed: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 18–43.
- [45] Q. Wang and M. Su, "Integrating blockchain technology into the energy sector - From theory of blockchain to research and application of energy blockchain," in *Computer Science Review* vol. 37, ed: Elsevier Ireland Ltd, 2020.
- [46] P. Vionis and T. Kotsilieris, "The Potential of Blockchain Technology and Smart Contracts in the Energy Sector: A Review," in *Applied Sciences (Switzerland)* vol. 14, ed: Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2024.
- [47] H. Muhsen, A. Allahham, A. A. Al-halhouli, M. Al-mahmodi, A. Alkhraibat, and M. Hamdan, "Business Model of Peer-to-Peer Energy Trading: A Review of Literature," in *Sustainability (Switzerland)* vol. 14, ed: MDPI, 2022.
- [48] J. P. Nepal, N. Yuangyai, S. Gyawali, and C. Yuangyai, "Blockchain-Based Smart Renewable Energy: Review of Operational and Transactional Challenges," in *Energies* vol. 15, ed: MDPI, 2022.
- [49] A. Thomas, M. P. Abraham, and A. M G, "Review of Peer-to-Peer Energy Trading for Indian Scenario: Challenges and Opportunities," presented at the 2021 International Conference on Communication, Control and Information Sciences (ICCISc), 2021.
- [50] E. A. Soto, L. B. Bosman, E. Wollega, and W. D. Leon-Salas, "Peer-to-peer energy trading: A review of the literature," *Applied Energy*, vol. 283, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116268.
- [51] "Energy Web Foundation." [Online]. Available: www.energyweb.org
- [52] "Power Ledger White Paper," 2019. [Online]. Available: <https://www.powerledger.io/company/power-ledger-whitepaper>
- [53] H. Sam, et al., "The Decentralized Autonomous Area Agent (D3A) Market Model," *Energy Web Foundation*, 2018.
- [54] J. G. Esther Mengelkamp Kerstin Rock Scott Kessler Lawrence Orsini Christof Weinhardt, "Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid," *Applied Energy*, 2018.
- [55] *ECP Whitepaper - The Energy Commons Protocol*, 2020.
- [56] e. a. E. Androulaki, "Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains," in Proceedings of the 13th EuroSys Conference," in *13th EuroSys Conference*, ed, 2018.
- [57] Z. e. GmbH, "Car ewaller webpage," ed, 2020.
- [58] The Electron Platform, "Book a demo Whitepaper Unlocking energy flexibility at scale with market platforms: An open-ecosystem approach," ed, 2020.
- [59] "Ponton GmbH." www.ponton.de (accessed).
- [60] *Grid+ Whitepaper v2.0*, 2017. [Online]. Available: www.gridplus.io.
- [61] T. H. B. V, "Tennet unlocks distributed flexibility via blockchain," 2020.
- [62] L. Chang, B. Wu, Y. He, and C. Zhou, "Optimizing decentralized peer-to-peer energy trading with energy-backed tokens through integration of renewable energy, battery storage, and electric vehicles," *Information Sciences*, vol. 717, 2025/11// 2025, doi: 10.1016/j.ins.2025.122294.
- [63] J. Gan and R. Li, "Contract Tokenization in the Renewable Energy Market," 2024.

- [64] N. Karandikar, A. Chakravorty, and C. Rong, "Blockchain Based Transaction System with Fungible and Non-Fungible Tokens for a Community-Based Energy Infrastructure," *Sensors*, vol. 21, no. 11, May 31 2021, doi: 10.3390/s21113822.
- [65] T. C. Oana Marin Ionut Anghel, "Blockchain Solution for Buildings' Multi-Energy Flexibility Trading Using Multi-Token Standard," *future internet*, 2023.
- [66] P. H. T. Trung *et al.*, "Decentralized Renewable Energy Trading: A Cross-Chain, NFT, and IPFS Framework," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2024, vol. 14792 LNCS: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 69–82, doi: 10.1007/978-3-031-68005-2_6.
- [67] B. Ghosh, M. Gubareva, N. Zulfiqar, and A. Bossman, "Is there a nexus between NFT, DeFi and carbon allowances during extreme events?," *China Finance Review International*, vol. 14, no. 3, pp. 456–479, 2023, doi: 10.1108/cfri-03-2023-0057.
- [68] Y. Zuo, "Tokenizing Renewable Energy Certificates (RECs) - a Blockchain Approach for REC Issuance and Trading," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 134477–134490, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3230937.
- [69] M. P and P. A. Salam, "Combined kiloWatt And Negawatt Trading with Blockchain," presented at the 2023 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), 2023.
- [70] M. I. Azim, W. Tushar, T. K. Saha, C. Yuen, and D. Smith, "Peer-to-peer kilowatt and Negawatt trading: A review of challenges and recent advances in distribution networks," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, 2022 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112908.
- [71] N. J. Rabiya Khalid, Sakeena Javaid, Muhammad Imran and Nidal Naseer, "A blockchain-based decentralized energy management in a P2P trading system," presented at the IEEE International Conference on Communications (ICC), Dublin, Ireland, 2020.
- [72] M. Zedan, M. Nour, G. Shabib, L. Nasrat, and A. A. Ali, "Review of peer-to-peer energy trading: Advances and challenges," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 10, 2024/12// 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100778.
- [73] V. Valsan, P. S. Sri Sai, K. Mukesh, A. S. Tharun Raju, and T. Sindukuri, "Blockchain Technology and Smart Contracts for Transformative Energy Trading," presented at the 2024 IEEE 4th International Conference on ICT in Business Industry & Government (ICTBIG), 2024.
- [74] J. Zhang and H. Ye, "A P2P Electricity Trading System by Integrating Blockchain with Optimization," in *2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering, CEEPE 2023*, 2023: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 1383–1388, doi: 10.1109/CEEPE58418.2023.10167053.
- [75] S. J. P. Eung Seon Kang, Jae Geun Song, Ju Wook Jang, "A Blockchain-Based Energy Trading Platform for Smart Homes in a Microgrid," presented at the 3rd International Conference on Computer and Communication Systems, 2018.
- [76] J. Zhao, T. Guo, Y. Cao, and C. Long, "P2P Transactive Energy Trading in Multi-Energy Network," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 14, no. 3, pp. 1693–1704, 2023.
- [77] H. X. Xiaowei Pu, Wei Pei, Yanhong Yang, Li Ma, Tengfei Ma and Shuai Zhang, "Optimal Energy Management of Networked Multi-Energy Microgrids Based on Improved Multi-Agent Federated Reinforcement Learning," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2024, doi: 10.17775/CSEEJPES.2023.05920.
- [78] Y. Cui, Y. Xu, Y. Wang, Y. Zhao, H. Zhu, and D. Cheng, "Peer-to-peer energy trading with energy trading consistency in interconnected multi-energy microgrids: A multi-agent deep reinforcement learning approach," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 156, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109753.
- [79] Y. Meng, G. Ma, Y. Ye, Y. Yao, W. Li, and T. Li, "Design of P2P trading mechanism for multi-energy prosumers based on generalized nash bargaining in GCT-CET market," *Applied Energy*, vol. 371, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123640.
- [80] B. Zheng and W. Wei, "Real-time peer-to-peer energy trading for networked multi-energy systems with hybrid energy storage," *Journal of Energy Storage*, vol. 105, 2025/1// 2025, doi: 10.1016/j.est.2024.114530.
- [81] ب. ب. ا. ایران <https://iee.ir/> (accessed).

- [82] Z. Y. Wenting Chen, Xin-Jiang He, "Pricing energy futures options: The role of seasonality and liquidity," *Energy Economics*, vol. 149, 2025, doi: 10.1016/j.eneco.2025.108737.
- [83] F.-R. R. Xiaomei Yuan, Tao-Feng Wu, "Oil Futures Dynamics and Energy Transition: Evidence from Macroeconomic and Energy Market Linkages," *Energies*, vol. 3889, no. 14, 2025, doi: 10.3390/en18143889.
- [84] U. Cali and A. Fifield, "Towards the decentralized revolution in energy systems using blockchain technology," *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 245–256, 2019/5// 2019, doi: 10.12720/sgce.8.3.245-256.
- [85] Y. Zou, Y. Xu, X. Feng, and H. D. Nguyen, "Peer-to-Peer Transactive Energy Trading of a Reconfigurable Multi-Energy Network," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 14, no. 3, pp. 2236–2249, 2023/5// 2023, doi: 10.1109/TSG.2022.3223378.
- [86] X. Jin, X. Wang, H. Jia, Y. Mu, Q. W. Wu, and W. Wei, "Peer-to-Peer Multi-Energy Trading Among Heterogeneous Building Prosumers via Asynchronous Distributed Algorithm," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 16, no. 2, pp. 1590–1603, 2025, doi: 10.1109/TSG.2024.3483280.
- [87] F. Jamil, N. Iqbal, Imran, S. Ahmad, and D. Kim, "Peer-to-Peer Energy Trading Mechanism Based on Blockchain and Machine Learning for Sustainable Electrical Power Supply in Smart Grid," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 39193–39217, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060457.
- [88] M. R. Jabbarpour and A. Saghiri, "Design and Implementation of a Local Blockchain-based Peer-to-Peer Energy Exchange Platform," *JIPET Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 56, pp. 169–194, 2024. [Online]. Available: <http://jipet.iaun.ac.ir/>.
- [89] Y. Z. B. H. T. E. K. Z. P. E. C. S. Mekhilef, "A Robust Centralized Peer-to-Peer Energy Trading in the Energy Community," presented at the International Conference on Smart Systems and Technologies (SST), Osijek, Croatia, 2024.
- [90] R. Akiladevi, S. Sardha, and R. Shruthi, "Tokenization of Energy Assets: A Multichain Blockchain Approach," in *Proceedings - 2024 5th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics, ICMCSI 2024*, 2024: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 702–709, doi: 10.1109/ICMCSI61536.2024.00110.
- [91] M. Naik, A. P. Singh, N. R. Pradhan, N. Kumar, A. Nayak, and M. Guizani, "TokenGreen: A Versatile NFT Framework for Peer-to-Peer Energy Trading and Asset Ownership of Electric Vehicles," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 8, pp. 13636–13646, 2024, doi: 10.1109/jiot.2023.3340155.
- [92] Y. S. C. Hyun Joong Kim a, et. al., "Pricing mechanisms for peer-to-peer energy trading Towards an integrated understanding of energy and network service pricing mechanisms," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 183, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113435.
- [93] N. Saeed, F. Wen, and M. Z. Afzal, "Decentralized peer-to-peer energy trading in microgrids: Leveraging blockchain technology and smart contracts," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 1753–1764, 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.07.053.
- [94] H. Naderi, A. Shojaei, and M. H. Heydari, "Automated Energy Performance Monitoring and Occupant Engagement in Buildings through Blockchain-Enabled Non-Fungible Tokens," *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 30, pp. 133–158, 2025, doi: 10.36680/j.itcon.2025.007.
- [95] M. Fan, C. Yu, Y. Zhang, and H. He, *Blockchain Technology for Smart Grids: Implementation, Management and Security*. The Institution of Engineering and Technology, 2022.
- [96] O. Marin, T. Cioara, and I. Anghel, "Blockchain Solution for Buildings' Multi-Energy Flexibility Trading Using Multi-Token Standards," *Future Internet*, vol. 15, no. 5, 2023/5// 2023, doi: 10.3390/fi15050177.
- [97] Y. Zou, Y. Xu, and J. Li, "Aggregator-Network Coordinated Peer-to-Peer Multi-Energy Trading via Adaptive Robust Stochastic Optimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 39, no. 6, pp. 7124–7137, 2024, doi: 10.1109/tpwrs.2024.3376808.
- [98] Y. Zhou and J. Liu, "Advances in emerging digital technologies for energy efficiency and energy integration in smart cities," *Energy and Buildings*, vol. 315, 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114289.

- [99] P. Zhao *et al.*, "Socially Governed Energy Hub Trading Enabled by Blockchain-Based Transactions," *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, vol. 11, no. 6, pp. 8227–8242, 2024, doi: 10.1109/tcss.2023.3308608.
- [100] E. B. Dario Di Santo, Daniele Forni, "White certificates as a tool to promote energy efficiency in industry," presented at the ECEEE industrial summer study - Going beyond energy efficiency to deliver savings, competitiveness and a circular economy, Berlin, 2016.
- [101] S. R. Paolo Bertoldi, "Tradable Certificates For Energy Savings (White Certificates)," Institute for Environment and Sustainability, European Commission, 2006.
- [102] E. Lees, "Options for Designing a White Certificate Scheme in the UK," *Energy Policy*, vol. 35, pp. 144–155, 2007.
- [103] N. Ashraf, S. Sharma, S. Aslam, and K. Aurangzeb, "Making tradable white certificates trustworthy, anonymous, and efficient using blockchains," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 4574–4581, 2023/11// 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.11.015.
- [104] K. D.-M. a. E. J.-S. Mikael Togeby, "Design of White Certificates (Comparing UK, Italy, France and Denmark)," Ea Energy Analyses, 2007.
- [105] X. Y. Zibo Wang, Yunfei Mu, Hongjie Jia, Qian Jiang, Xiaoyu Wang "Peer-to-Peer energy trading strategy for energy balance service provider (EBSP) considering market elasticity in community microgrid," *Applied Energy*, vol. 303, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117596.
- [106] C. T. Huang and I. J. Scott, "Peer-to-peer multi-period energy market with flexible scheduling on a scalable and cost-effective blockchain," *Applied Energy*, vol. 367, 2024/8// 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123331.
- [107] J. Woo, R. Fatima, C. J. Kibert, R. E. Newman, Y. Tian, and R. S. Srinivasan, "Applying blockchain technology for building energy performance measurement, reporting, and verification (MRV) and the carbon credit market: A review of the literature," *Building and Environment*, vol. 205, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108199.
- [108] A. Boumaiza, "Carbon and Energy Trading Integration within a Blockchain-Powered Peer-to-Peer Framework," *Energies*, vol. 17, no. 11, 2024/6// 2024, doi: 10.3390/en17112473.