The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems
Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Online ISSN: 2980-8693

Integrated analysis of advanced applications of artificial intelligence (AI) in modern energy systems

Amirali Saifoddin[1*] | Mohammad Hossein Gholizadeh[2] | Mohammadali Allahrabbi Shirazi[3]

1. Corresponding Author, Associate Professor, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, Head of the Institute of Soft Technologies, College of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: saifoddin@ut.ac.ir
2. Master's Student in Energy Systems Engineering, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: moho.gholizadeh@ut.ac.ir
3. PhD Candidate in Energy Systems Engineering, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: aliallahrabbi@ut.ac.ir

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:
Artificial Intelligence,
Smart Energy Systems,
Grid Resilience,
Algorithmic Energy Trading,
Energy-Water Nexus Optimization.

ABSTRACT

The energy industry is on the verge of a fundamental transformation, with power systems evolving into complex computational-physical ecosystems where digital markets, physical infrastructure, and cross-sector resources such as water are intricately intertwined. Managing this complexity requires moving from traditional tools to integrated and autonomous intelligence. This paper aims to provide a comprehensive analysis of the role of artificial intelligence as an enabling technology for the next generation of energy systems. In this review, key capabilities of artificial intelligence include fault prediction and detection, complex patterns, optimization of system performance, and support for decision-making in energy systems themselves. The analysis presented is based on four fundamental pillars of intelligence: (1) building energy markets through algorithmic trading and decentralized mechanisms, (2) enhancing grid resilience through rapid fault detection and recovery, (3) optimizing grid performance through power quality automation, and (4) enhancing system stability by optimizing the water-energy nexus. The innovation of this research lies in integrating these four domains and providing a multi-layered perspective that analyzes economic, technical, operational, and environmental aspects of enterprises. The findings show that artificial intelligence is shaping an integrated management paradigm that ranges from reinforcement algorithms and self-healing networks to robust optimization for renewable resources. The application of artificial intelligence improves power quality, extends asset lifetime, manages the water-energy nexus, and enhances grid resilience. However, challenges such as cybersecurity, reliability, and the simulation-reality gap remain.

Cite this article: Saifoddin, A.; Gholizadeh, M. H. & Allahrabbi Shirazi, M. (2026). Integrated analysis of advanced applications of artificial intelligence (AI) in modern energy systems. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (2), 297-327. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.402633.1185

© Amirali Saifoddin, Mohammad Hossein Gholizadeh, Mohammadali Allahrabbi Shirazi
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.402633.1185

Introduction

The transition to smart energy systems is essential in the new global landscape, as physical energy networks operate in a complex and intertwined manner with digital markets and critical infrastructures, such as water, and ensuring their sustainability and reliability is a major challenge. In this context, AI plays a pivotal role as a key enabling technology, operating in four main pillars:

market intelligence through algorithmic trading and decentralized mechanisms that enhance efficiency, transparency, and economic profitability; physical grid resilience through rapid fault detection and automated recovery that reduces the risk of outages; optimization of grid performance through automated power quality analysis and management that reduces disruptions and ensures operational stability; and enhancement of system stability by optimizing the water-energy nexus, which enables the management of critical resources in conditions of uncertainty and security risks. The innovation of this research lies in integrating these four dimensions into a multilayered analytical framework that, while filling the gap in the literature, provides practical solutions for the design, management, and policymaking in the field of smart energy systems.

Methodology

The methodology of this research is based on a comprehensive framework for improving the intelligence, resilience and sustainability of energy systems. First, energy market data is analyzed using machine learning and reinforcement learning algorithms, and optimal trading and risk management strategies are developed, while blockchain and smart contracts technologies are used to increase the transparency and security of transactions. At the same time, artificial intelligence algorithms such as SVM, Random Forest and deep neural networks are used for rapid fault detection and automatic recovery of power networks, and by implementing them on low-latency hardware, the speed and efficiency of the system are increased. In addition, power quality disturbances are identified and predicted with CNN-GRU hybrid models and time-frequency signal analysis, and their active control improves voltage stability and reduces harmonic distortion. Finally, the water-energy nexus is managed using robust optimization models and advanced analytical tools such as GEKKO and Python, and dependency indices and distributed optimization frameworks are used to ensure stable performance under conditions of uncertainty of renewable resources, so that the entire system operates in an integrated, intelligent, and resilient manner.

Result

This review showed that AI is not just a separate optimization tool but an integrated management paradigm for smart energy systems. In the energy markets, advanced algorithmic trading models, decentralized peer-to-peer structures, and the integration of technologies such as blockchain and quantum computing have increased efficiency, transparency, and liquidity. At the physical layer, deep learning algorithms and multi-agent systems, with rapid fault detection and recovery, are enhancing network resilience to unprecedented levels and paving the way for self-healing networks. AI also improves power quality with hybrid models such as CNN-GRU and smart controllers, ensuring that delivered energy meets the standards of modern sensitive equipment, extending asset lifetimes, and increasing overall system efficiency. At the macro level, AI-based robust and multi-objective optimization frameworks enable the management of the complexity of the water-energy nexus, allowing decision-makers to balance critical resources, economic objectives, and security risks sustainably and securely.

Discussion and Conclusion

Despite significant advances, the integration of smart systems poses complex challenges, including the balance between economic efficiency and physical resilience, cyber threats, the simulation-reality gap, ethical issues in automated markets, and the mismatch of objectives between layers. The importance of developing explainable AI to gain the trust of operators and regulators is also highlighted. Ultimately, this research shows that the future of the energy industry depends on creating an intelligent, autonomous, and adaptive central nervous system that enables optimal utilization of infrastructure and facilitates the transition to a decentralized, decarbonized, and democratic energy ecosystem. Realizing this vision requires coordinated collaboration between researchers, engineers, policymakers, and industry to steer AI toward a sustainable, secure, and equitable future.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۲۹۸۰-۸۶۹۳

تحلیل یکپارچهٔ کاربردهای پیشرفتهٔ هوش مصنوعی در سیستم‌های انرژی مدرن

امیرعلی سیف‌الدین[1*] | محمدحسین قلی‌زاده[2] | محمدعلی اله‌ربی شیرازی[3]

۱. نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، رئیس مؤسسهٔ فناوری‌های نرم، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: saifoddin@ut.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: moho.gholizadeh@ut.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: aliallahrabbi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷

کلیدواژه:

هوش مصنوعی،
سیستم‌های انرژی هوشمند،
تاب‌آوری شبکه،
تجارت الگوریتمی انرژی،
بهینه‌سازی پیوند آب انرژی.

چکیده

صنعت انرژی در آستانهٔ تحول بنیادین است و سامانه‌های قدرت به زیست‌بوم‌های رایانشی ـ فیزیکی پیچیده تبدیل شده‌اند که در آن بازارهای دیجیتال، زیرساخت‌های فیزیکی و منابع بین‌بخشی مانند آب به طور عمیق درهم‌تنیده‌اند. مدیریت این پیچیدگی به گذار از ابزارهای سنتی به هوشمندی یکپارچه و خودگردان نیاز دارد. هدف مقالهٔ حاضر، ارائهٔ تحلیلی جامع از نقش هوش مصنوعی به عنوان فناوری توانمندساز نسل آیندهٔ سیستم‌های انرژی است. مقالهٔ پیش رو، بر قابلیت‌های کلیدی هوش مصنوعی شامل پیش‌بینی و تشخیص خطا، یادگیری الگوهای پیچیده، بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌ها و پشتیبانی از تصمیم‌گیری خودگردان در سامانه‌های انرژی متمرکز است. چارچوب تحلیلی ارائه‌شده بر چهار رکن بنیادین تمرکز دارد: (۱) هوشمندسازی بازار انرژی از طریق تجارت الگوریتمی و سازوکارهای غیرمتمرکز؛ (۲) ارتقای تاب‌آوری شبکه با تشخیص و بازیابی سریع خطا؛ (۳) بهینه‌سازی عملکرد شبکه از طریق مدیریت خودکار کیفیت توان؛ (۴) افزایش پایداری سیستمی با بهینه‌سازی پیوند آب ـ انرژی. نوآوری این پژوهش در یکپارچه‌سازی این چهار حوزه و ارائهٔ دیدگاهی چندلایه است که تعامل میان ابعاد اقتصادی، فنی، عملیاتی و زیست‌محیطی را تحلیل می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد هوش مصنوعی در حال شکل‌دهی به یک پارادایم مدیریتی یکپارچه است که از الگوریتم‌های یادگیری تقویتی و شبکه‌های خودترمیم تا بهینه‌سازی مقاوم برای منابع تجدیدپذیر را شامل می‌شود. کاربرد هوش مصنوعی موجب بهبود کیفیت توان، افزایش طول عمر دارایی‌ها، تسهیل مدیریت پیوند آب ـ انرژی و تقویت تاب‌آوری شبکه می‌شود. با این‌حال، چالش‌هایی نظیر امنیت سایبری، اعتمادپذیری و شکاف شبیه‌سازی ـ واقعیت باقی است.

استناد: سیف‌الدین، امیرعلی؛ قلی‌زاده، محمدحسین و اله‌ربی شیرازی، محمدعلی (۱۴۰۵). تحلیل یکپارچهٔ کاربردهای پیشرفتهٔ هوش مصنوعی در سیستم‌های انرژی مدرن. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۵ (۲) ۲۹۷-۳۲۷.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.402633.1185

© امیرعلی سیف‌الدین، محمدحسین قلی‌زاده، محمدعلی اله‌ربی شیرازی

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2025.402633.1185

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

عبارت کامل فارسی (Full Persian Term)	عبارت کامل انگلیسی (Full English Term)	اختصار (Abbreviation)
شبکهٔ عصبی مصنوعی	Artificial Neural Network	ANN
جذب و ذخیره‌سازی کربن	Carbon Capture and Storage	CCS
شبکهٔ عصبی کانولوشنی	Convolutional Neural Network	CNN
ارزش در معرض خطر شرطی	Conditional Value-at-Risk	CVaR
شبکهٔ عصبی کانولوشنی عمیق	Deep Convolutional Neural Network	DCNN
منابع انرژی توزیع‌شده	Distributed Energy Resources	DERs
وسیلهٔ نقلیهٔ الکتریکی	Electric Vehicle	EV
آرایهٔ گیت قابل برنامه‌ریزی میدانی	Field-Programmable Gate Array	FPGA
تشخیص و عیب‌یابی خطا	Fault Detection and Diagnosis	FDD
واحد بازگشتی گیت‌دار	Gated Recurrent Unit	GRU
سخت‌افزار در حلقه	Hardware-in-the-Loop	HIL
سیستم‌های انرژی یکپارچه	Integrated Energy Systems	IESs
اینترنت اشیا	Internet of Things	IoT
حافظهٔ طولانی کوتاه‌مدت	Long Short-Term Memory	LSTM
یادگیری تقویتی چند عاملی	Multi-Agent Reinforcement Learning	MARL
بهینه‌سازی آنی با شتاب‌دهی یادگیری ماشین	Machine Learning-Accelerated Real-time Optimization	MARO
سیستم چندعاملی	Multi-Agent System	MAS
ریزشبکه‌های چند ـ انرژی	Multi-Energy Microgrids	MEMGs
ردیابی نقطهٔ حداکثر توان	Maximum Power Point Tracking	MPPT
همتابه‌همتا	Peer-to-Peer	P2P
بهینه‌سازی خط‌مشی پروگزیمال	Proximal Policy Optimization	PPO
کیفیت توان	Power Quality	PQ
اغتشاشات کیفیت توان	Power Quality Disturbances	PQD
فتوولتائیک	Photovoltaic	PV
تبرید کوانتومی	Quantum Annealing	QA
تابع پایه شعاعی	Radial Basis Function	RBF
شبکهٔ عصبی بازگشتی	Recurrent Neural Network	RNN
شاخص متوسط زمان خاموشی سیستم	System Average Interruption Duration Index	SAIDI
ماشین بردار پشتیبان	Support Vector Machine	SVM
اعوجاج هارمونیکی کل	Total Harmonic Distortion	THD
پیوند آب ـ انرژی	Water-Energy Nexus	WEN
پیوند آب ـ انرژی ـ غذا	Water-Energy-Food Nexus	WEFN
هوش مصنوعی قابل توضیح	Explainable Artificial Intelligence	XAI
درایوهای سرعت متغیر	Variable Speed Drives	VSD

۱. مقدمه

ضرورت گذار به سیستم‌های انرژی هوشمند در چشم‌انداز نوین جهانی به این صورت است که پیکربندی سیستم‌های انرژی در سطح جهانی یک دگرگونی بنیادین و اجتناب‌ناپذیر را تجربه می‌کند. فراتر از گذار به سمت منابع تجدیدپذیر، شاهد ظهور یک سیستم از سیستم‌ها هستیم که در آن، شبکه‌های فیزیکی انرژی با بازارهای دیجیتال پویا و سایر زیرساخت‌های حیاتی مانند آب، به شکلی عمیق و درهم‌تنیده عمل می‌کنند. در این چشم‌انداز نوین، تحول دیجیتال، بازارهای انرژی را به سمت پلتفرم‌های داده‌محور و خودکار سوق داده است [۱]. هم‌زمان، با افزایش پیچیدگی شبکه، تضمین پایداری و قابلیت اطمینان فیزیکی آن به یک چالش بزرگ تبدیل شده است؛ خطاهای الکتریکی، در صورت عدم تشخیص و رفع سریع، می‌توانند به خاموشی‌های گسترده منجر شوند و روش‌های سنتی تشخیص خطا دیگر کارآمد نیستند [۲ و ۳]. این پیچیدگی با در نظر گرفتن پیوندهای متقابل با سایر منابع، به‌ویژه در پیوند آب ـ انرژی، به اوج خود می‌رسد؛ جایی که پایداری و امنیت یک منبع به طور مستقیم به دیگری وابسته است [۴ و ۵]. مدیریت این اکوسیستم پیچیده، چندبعدی و پویا نیازمند یک پارادایم کاملاً جدید است.

هوش مصنوعی به مثابه پارادایم نوین در بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی در قلب این تحول، هوش مصنوعی، به عنوان یک فناوری توانمندساز کلیدی و یک پارادایم یکپارچه‌ساز ظهور می‌کند. هوش مصنوعی با قابلیت خود در پردازش حجم عظیمی از داده‌ها، تحلیل الگوهای پیچیده و اتخاذ تصمیمات بهینه، راهکارهایی برای مدیریت این سیستم‌ها ارائه می‌دهد [۱]. برای مثال، در مواجهه با پیچیدگی بازارهای دیجیتال، هوش مصنوعی امکان توسعهٔ استراتژی‌های تجارت الگوریتمی پیشرفته و حتی بازارهای کاملاً غیرمتمرکز همتابه‌همتا[1] را فراهم می‌آورد [۶ و ۷]. برای تضمین تاب‌آوری فیزیکی، الگوریتم‌های هوشمند تشخیص سریع خطا را با دقت‌های بی‌سابقه (تا ۹۶ درصد) ممکن می‌سازند و مسیر را برای ایجاد شبکه‌های خودترمیم هموار می‌کنند [۸ و ۹]. در لایه‌ای عمیق‌تر، هوش مصنوعی به تحلیل و بهبود خودکار کیفیت توان، که برای عملکرد صحیح تجهیزات مدرن حیاتی است، می‌پردازد [۱۰ و ۱۱]. در نهایت، در مقیاسی کلان‌تر، هوش مصنوعی با ارائهٔ چارچوب‌های بهینه‌سازی مقاوم، مدیریت بهینه و پایدار پیوند آب ـ انرژی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و ریسک‌های امنیتی امکان‌پذیر می‌سازد [۱۲ و ۱۳]. برای درک جامع نقش هوش مصنوعی در این اکوسیستم نوین، ما یک چهارچوب تحلیلی مبتنی بر چهار رکن اساسی را ارائه می‌دهیم که هر یک جنبه‌ای حیاتی از یک سیستم انرژی هوشمند را پوشش می‌دهد:

- هوشمندی بازار از طریق تجارت الگوریتمی: نخست، به بررسی تجارت الگوریتمی در بازارهای انرژی می‌پردازیم. این رکن بر تحول دیجیتال بازارها تمرکز دارد و نشان می‌دهد چگونه هوش مصنوعی ساختارهای نوین مانند بازارهای همتا به‌همتا، چند ـ انرژی و حتی بازارهای کربن را ایجاد می‌کند و با ادغام فناوری‌هایی مانند بلاک‌چین و محاسبات کوانتومی، به دنبال افزایش کارایی، شفافیت و سودآوری است [۱۴– ۱۶].
- تاب‌آوری فیزیکی از طریق تشخیص خطا و بازیابی شبکه: دوم، روی تشخیص سریع خطا و بازیابی شبکه تمرکز می‌کنیم. این رکن به سلامت و پایداری فیزیکی زیرساخت‌ها می‌پردازد و نشان می‌دهد چگونه مدل‌های هوش مصنوعی، از یادگیری عمیق می‌گیرند تا سیستم‌های چندعاملی، در حال کاهش چشمگیر زمان تشخیص و بازیابی بوده و شبکه را به سمت هدف نهایی یعنی سیستم‌های کاملاً خودترمیم هدایت می‌کنند [۹ و ۱۷].
- عملکرد بهینه از طریق تحلیل خودکار کیفیت توان: سوم، به تحلیل کیفیت توان خودکار به عنوان یک جنبهٔ حیاتی از عملکرد شبکه می‌پردازیم. این رکن فراتر از پایداری صرف، به بررسی و مدیریت اغتشاشات ظریفی می‌پردازد که بر تجهیزات حساس تأثیر می‌گذارند. هوش مصنوعی در این حوزه، امکان تشخیص، طبقه‌بندی، پیش‌بینی و حتی کاهش فعالانه مشکلات کیفیت توان را فراهم می‌آورد [۱۱ و ۱۸].
- پایداری سیستمی از طریق بهینه‌سازی پیوند آب ـ انرژی: در نهایت، چهارمین رکن، با خروج از مرزهای شبکهٔ برق، به بهینه‌سازی پیوند آب ـ انرژی می‌پردازد. این حوزه، کل‌نگرترین سطح تحلیل را ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد چگونه

---

[1] P2P

هوش مصنوعی می‌تواند به مدیریت یکپارچه و پایدار منابع حیاتی آب و انرژی، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، اهداف اقتصادی و حتی ریسک‌های امنیتی کمک کند [۱۲ و ۱۳].

این چهار اصل، در مجموع تصویری از یک هوش مصنوعی چندلایه را ترسیم می‌کنند که از سطح بازارهای دیجیتال تا سلامت فیزیکی تجهیزات و پایداری منابع بین بخشی، در حال ایجاد یک سیستم انرژی کارآمد، تاب‌آور و پایدار برای آینده است.

هدف اصلی این مطالعه، تبیین و تحلیل جامع نقش هوش مصنوعی در توسعهٔ نسل آینده سیستم‌های انرژی هوشمند است. برای دستیابی به این هدف، پژوهش حاضر چهار محور کلیدی را مورد توجه قرار می‌دهد: (۱) تحول بازار انرژی از طریق تجارت الگوریتمی و سازوکارهای غیرمتمرکز با هدف افزایش کارایی و شفافیت اقتصادی؛ (۲) افزایش تاب‌آوری فیزیکی شبکه از طریق پیش‌بینی، تشخیص سریع و بازیابی خودکار خطاها به منظور کاهش ریسک و ارتقای قابلیت اطمینان؛ (۳) بهینه‌سازی عملکرد شبکه و مدیریت کیفیت توان با بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوشمند برای ارتقای پایداری عملیاتی و کاهش اختلالات؛ (۴) ارتقای پایداری زیست‌محیطی سیستم‌ها از طریق بهینه‌سازی پیوند آب ـ انرژی و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی.

نوآوری این پژوهش در آن است که این چهار بعد به صورت یکپارچه و در قالب یک چارچوب تحلیلی چندلایه بررسی می‌شوند؛ چارچوبی که می‌تواند ضمن پر کردن خلأ موجود در ادبیات، راهکارهایی کاربردی برای طراحی، مدیریت و سیاست‌گذاری در حوزهٔ انرژی هوشمند ارائه دهد. در این مقاله توانمندی‌های هوش مصنوعی به صورت سیستماتیک بررسی شده است که شامل توانایی پیش‌بینی و تشخیص خطا، یادگیری الگوهای پیچیده، بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌ها و تصمیم‌گیری خودکار در شرایط نامطمئن می‌شود. این تحلیل نشان می‌دهد هوش مصنوعی می‌تواند چارچوبی یکپارچه برای مدیریت پیچیدگی‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی در سامانه‌های انرژی فراهم کند.

۲. مقایسهٔ روش‌شناسی‌ها و کاربردها

روش‌شناسی این تحقیق مبتنی بر یک چارچوب جامع برای بهبود هوش، تاب‌آوری و پایداری سیستم‌های انرژی است. در این مطالعه، انتخاب منابع بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای دقیق انجام گرفت تا جامعیت و اعتبار مرور تضمین شود. معیارهای ورود شامل ارتباط مستقیم پژوهش با کاربردهای هوش مصنوعی در سامانه‌های انرژی، انتشار در مجلات دارای داوری همتا بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵، و برخورداری از نتایج تحلیلی، تجربی یا مدل‌سازی قابل استناد بود. منابعی که به زبان‌های غیرانگلیسی منتشر شده بودند، یا فاقد دقت روش‌شناسی کافی و داده‌های قابل استفاده بودند، از فرایند تحلیل حذف شدند.

پس از غربالگری اولیه، داده‌ها و یافته‌های منتخب با استفاده از یک رویکرد ترکیبی ادغام شدند. در این فرایند، ابتدا شاخص‌های کمی مانند روند انتشار و حوزه‌های کاربرد تحلیل شدند و سپس، از تحلیل تماتیک برای استخراج الگوها، هم‌پوشانی‌ها و شکاف‌های پژوهشی بهره گرفته شد. نتایج بررسی این مطالعات تحت زیرعنوان‌های مختلف و به صورت متنی یا جدولی ارائه و تحلیل شده است تا ارتباط منطقی بین حوزه‌های کاربرد، فناوری‌های هوش مصنوعی و چالش‌های موجود به صورت شفاف‌تر مشخص شود.

در این مطالعه، تمرکز اصلی بر بررسی ماهیت و نقش کلیدی هوش مصنوعی در سیستم‌های انرژی بوده و هدف، ارائهٔ یک دیدگاه یکپارچه و تحلیلی از کاربردهای تحول‌آفرین AI است، نه لزوماً مقایسهٔ جزئی بین انواع مدل‌ها یا الگوریتم‌های هوش مصنوعی. به همین‌دلیل، تحلیل انتقادی مستقیم بین روش‌های مختلف به صورت گسترده انجام نشده است. تمرکز ما بیشتر بر شناسایی چارچوب‌ها، رویکردهای کلان، تأثیرات عملی و امکان‌سنجی به‌کارگیری AI در سطح سیستم‌های انرژی بوده است، تا خواننده بتواند دیدی جامع از ماهیت و کاربردهای پیشرفتهٔ هوش مصنوعی در این حوزه به دست آورد.

همچنین، در این مطالعه فرض شده است که منابع مورد استفاده اعتبارسنجی‌های عددی و شبیه‌سازی‌های عملی را به‌درستی انجام داده‌اند. از آنجا که تنها مقالات معتبر و منتشرشده در ژورنال‌های علمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، این فرض منطقی و قابل اتکا است. همچنین، هدف این مطالعه ارائهٔ شبیه‌سازی جدید یا نشان دادن کاربرد عملی مستقیم هوش مصنوعی نبوده است، بلکه تمرکز بر شناسایی چارچوب‌ها، روندها و فرصت‌های کاربردی این فناوری در سطح مفهومی و تحلیلی بوده است.

ابتدا، داده‌های بازار انرژی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری تقویتی تجزیه‌وتحلیل می‌شوند و استراتژی‌های بهینهٔ تجارت و مدیریت ریسک توسعه داده می‌شوند، در حالی که از فناوری‌های بلاکچین و قراردادهای هوشمند برای افزایش شفافیت و امنیت تراکنش‌ها استفاده می‌شود. در عین حال، از الگوریتم‌های هوش مصنوعی مانند SVM، جنگل تصادفی و شبکه‌های عصبی عمیق برای تشخیص سریع خطا و بازیابی خودکار شبکه‌های برق استفاده می‌شود و با پیاده‌سازی آن‌ها روی سخت‌افزار با تأخیر کم، سرعت و کارایی سیستم افزایش می‌یابد. علاوه بر این، اختلالات کیفیت توان با مدل‌های ترکیبی CNN-GRU و تجزیه‌وتحلیل سیگنال زمان ـ فرکانس شناسایی و پیش‌بینی می‌شوند و کنترل فعال آن‌ها پایداری ولتاژ را بهبود می‌بخشد و اعوجاج هارمونیکی را کاهش می‌دهد. در نهایت، پیوند آب ـ انرژی با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی مقاوم و ابزارهای تحلیلی پیشرفته مانند GEKKO و پایتون مدیریت می‌شود و از شاخص‌های وابستگی و چارچوب‌های بهینه‌سازی توزیع‌شده برای تضمین عملکرد پایدار در شرایط عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر استفاده می‌شود، به طوری که کل سیستم به صورت یکپارچه، هوشمند و تاب‌آور عمل می‌کند.

تحول دیجیتال، بازارهای انرژی را به سمت پلتفرم‌های پویا، داده‌محور و به طور فزاینده‌ای خودکار سوق داده است. در این چشم‌انداز نوین، تجارت الگوریتمی مبتنی بر هوش مصنوعی به عنوان یک حوزهٔ پیشگام، در حال بازتعریف استراتژی‌های معاملاتی، مدیریت ریسک و ساختارهای بازار است. روجک و همکاران [۱] تأکید می‌کنند که توانایی هوش مصنوعی در پردازش حجم عظیمی از داده‌ها، تحلیل الگوهای پیچیده و انجام پیش‌بینی‌ها، نیروی محرکهٔ اصلی نوآوری در بازارهای انرژی است و به بهینه‌سازی عملیات، بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها کمک شایانی می‌کند. شچپانیک و شچپانیک [۲] نیز با تحلیل الگوریتم‌های مختلف هوش مصنوعی (یادگیری ماشین، فراابتکاری و سیستم‌های فازی)، پتانسیل بالای آن‌ها را در بهبود فرایندهای تولید، توزیع، ذخیره‌سازی و به‌ویژه تجارت انرژی برجسته می‌سازند. در همین راستا، آلخیات و همکاران [۳] در بررسی خود، بر نقش محوری هوش مصنوعی در پلتفرم‌های تجارت انرژی مدرن و بهینه‌سازی عرضه و تقاضا تأکید می‌کند و نشان می‌دهند این تکنیک‌ها در مدیریت داده‌های بزرگ و بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی عملکردی برتر دارند.

مدل‌های پیشرفتهٔ تجارت الگوریتمی و مدیریت ریسک پیچیدگی و نوسانات بازارهای انرژی، نیاز به الگوریتم‌های معاملاتی بسیار پیشرفته را ایجاب می‌کند. در یک پژوهش کاملاً نوآورانه، وو و همکاران [۴] با ترکیب بهینه‌سازی خطمشی پروگزیمال (PPO) و تبرید کوانتومی، مرزهای بهینه‌سازی استراتژی‌های معاملاتی را جابه‌جا کرده‌اند. در این روش، PPO که یک چارچوب یادگیری تقویتی است، برای ایجاد یک استراتژی معاملاتی پویا و انطباقی با شرایط آنی بازار به کار می‌رود. سپس، پارامترهای این استراتژی از طریق تبرید کوانتومی بهینه می‌شوند. این هم‌افزایی قدرتمند بین هوش مصنوعی و محاسبات کوانتومی، نتایج چشمگیری به همراه داشته است: افزایش ۲۵درصدی در بازده کل، بهبود ۱۵درصدی در نسبت شارپ و کاهش ۲۰درصدی در هزینه‌های معاملاتی [۴]. فیموتونگا و همکاران [۵] بر چالش حیاتی نوسانات در بازار کالاهای انرژی تمرکز کرده و مجموعه‌ای از تکنیک‌های پیشرفته برای کاهش آن را بررسی می‌کنند. آن‌ها تجارت الگوریتمی، به‌ویژه تجارت با فرکانس بالا، را به عنوان ابزاری برای بهره‌برداری از نوسانات جزئی قیمت معرفی می‌کنند. علاوه بر این، تحلیل‌های پیش‌بینانه با استفاده از هوش مصنوعی، مدل‌سازی ارزش در معرض خطر و استراتژی‌های پوشش ریسک به عنوان یک چارچوب جامع برای مدیریت فعالانهٔ ریسک مورد تحلیل قرار گرفته‌اند [۵].

۲-۱. ساختارهای بازار غیرمتمرکز و همتابه‌همتا

ظهور منابع انرژی توزیع‌شده[1] به طراحی ساختارهای بازار مصرف‌کننده‌محور منجر شده است. خوراسانی، میشرا و لدویچ [۶] یک طرح تجارت انرژی همتابه‌همتا کاملاً غیرمتمرکز را پیشنهاد می‌کنند که در آن بازیگران بازار می‌توانند مستقیم و بدون نیاز به هیچ نهاد مرکزی با یکدیگر مذاکره کنند. آن‌ها یک الگوریتم جدید مبتنی بر روش گرادیان اولیه ـ دوگان را برای تسویهٔ بازار توسعه داده‌اند که قیود فنی شبکه مانند جریان خطوط را نیز در نظر می‌گیرد و به تبادل داده کمتر و همگرایی سریع‌تری نسبت به

---

[1] DERs

روش‌های مشابه نیاز دارد [۶]. زهراوی و همکاران [۷] نیز روی تجارت انرژی P۲P تمرکز می‌کنند و یک رویکرد غیرمتمرکز برای بازاری با نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه می‌دهند. آن‌ها از یک الگوریتم توزیع‌شده مبتنی بر روش ADMM برای حل مسئلهٔ تسویه بازار و کاهش پیچیدگی محاسباتی استفاده می‌کنند. نوآوری کلیدی آن‌ها معرفی یک مدیر همتابه‌همتا[1] برای حل مشکل همگام‌سازی بین همتایان طی فرایند تسویه بازار است که کارایی آن با استفاده از سخت‌افزار در حلقه تأیید شده است [۷].

۲-۲. فناوری‌های توانمندساز: بلاک‌چین و قراردادهای هوشمند

امنیت، شفافیت و اتوماسیون، پیش‌نیازهای اساسی برای بازارهای غیرمتمرکز هستند. اونکولو و همکاران [۸] همگرایی بلاک‌چین و هوش مصنوعی را به عنوان یک انقلاب در تجارت انرژی معرفی می‌کنند. در این دیدگاه، بلاک‌چین امنیت تراکنش‌ها و تسویه‌های آنی را تضمین می‌کند، در حالی که هوش مصنوعی وظیفهٔ تحلیل‌های پیش‌بینانه را به عهده دارد. قراردادهای هوشمند، با خودکارسازی تسویه معاملات، نیاز به واسطه‌ها را از بین می‌برند و هزینه‌ها و ریسک را کاهش می‌دهند [۸]. عصمت و همکاران [۹] یک پلتفرم تجارت P۲P غیرمتمرکز را با دو لایه بازار و بلاک‌چین توسعه می‌دهند. لایه بازار با استفاده از بهینه‌سازی کلونی مورچگان تسویه می‌شود و لایه بلاک‌چین با پیاده‌سازی قراردادهای هوشمند، سطح بالایی از اتوماسیون و امنیت را فراهم می‌کند. این پلتفرم یکپارچه، راه حلی عملی برای تعادل بین کارایی اقتصادی و حریم خصوصی ارائه می‌دهد [۹].

آیندهٔ بازارهای انرژی در گرو مدیریت یکپارچهٔ انواع مختلف حامل‌های انرژی است. ژانگ و همکاران [۱۰] یک مدل بازار تجارت چند ـ انرژی مبتنی بر تطبیق قیمت را پیشنهاد می‌کنند که هدف آن، تقویت همکاری بین انواع انرژی (مانند برق و گاز) است. برای حل این مدل پیچیده، از یک الگوریتم یادگیری تقویتی سلسله‌مراتبی بهبودیافته استفاده شده است که بر چالش‌های فضای حالت ـ عمل بزرگ غلبه می‌کند [۱۰]. سان و همکاران [۱۱] با در نظر گرفتن اهمیت سیاست‌های کربن‌زدایی، یک بازار هم‌زمان شامل تجارت برق، گاز طبیعی و کربن را برای سیستم‌های انرژی یکپارچه (IESs) پیشنهاد می‌کنند. آن‌ها برای حل این مسئله، از یادگیری تقویتی چندعاملی استفاده می‌کنند تا هر نهاد بتواند استراتژی‌های بهینهٔ خود را برای دستیابی به تجارت منصفانه و حفاظت از حریم خصوصی بیاموزد [۱۱]. لی و همکاران [۱۲] به مسئلهٔ تجارت غیرهمکارانه بین چندین ریزشبکهٔ چند ـ انرژی می‌پردازند. آن‌ها یک رویکرد سه‌لایه (روز آینده، درون روز و آنی) مبتنی بر نظریه بازی‌ها (مدل کورنونش) و برنامه‌ریزی تصادفی را برای مدیریت رقابت بازار و عدم قطعیت‌ها توسعه می‌دهند [۱۲].

با افزایش پیچیدگی شبکه‌های برق مدرن، تضمین پایداری و قابلیت اطمینان به یک چالش بزرگ تبدیل شده است. گویال و همکاران [۱۳] تأکید می‌کنند که روش‌های سنتی تشخیص خطا به دلیل کندی و عدم قابلیت پیش‌بینی، دیگر کارآمد نیستند و تشخیص و عیب‌یابی خطای مبتنی بر هوش مصنوعی (FDD) برای بهبود قابلیت اطمینان ضروری است. اوپادهیای [۱۴] نیز بر اهمیت تکنیک‌های پیشرفته برای افزایش تاب‌آوری شبکه‌های برق تأکید کرده و اشاره می‌کند که هوش مصنوعی با تسهیل ایجاد شبکه‌های خودترمیم (Grids Healing–Self)، می‌تواند شاخص‌های قابلیت اطمینان مانند SAIDI را به طور قابل توجهی کاهش دهد. آلماسودی [۱۵] این تحول را در چارچوب انقلاب صنعتی چهارم قرار داده و بر توسعهٔ مدل‌های ترکیبی پیشرفته مانند RNN–CNN و GRU–CNN برای تشخیص آنی خطاها تأکید می‌کند. در نگاهی بنیادین‌تر، بوز [۱۶] یادآوری می‌کند که استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی مانند سیستم‌های خبره و منطق فازی چندین دهه است که به عنوان ابزارهای قدرتمندی برای عیب‌یابی خطا در سیستم‌های قدرت مطرح بوده‌اند.

شواهد کمی قابل توجهی بر برتری مدل‌های هوش مصنوعی در تشخیص خطا دلالت دارند. رانا [۱۷] در یک بررسی سیستماتیک جامع، گزارش می‌دهد که مدل‌های تشخیص خطا به طور متوسط به دقت ۸۵ درصد تا ۹۵ درصد دست می‌یابند، هشدارهای کاذب را تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهند و زمان بازیابی توان را تا ۶۰ درصد به حداقل می‌رسانند. یرنکی و همکاران [۱۸] نیز در یک چارچوب خاص برای مناطق درحال‌توسعه، با استفاده از طبقه‌بند گرادیان بوستینگ (GBC) به دقت ۹۶/۱ درصد در تشخیص خطا دست یافتند. فزاء و همکاران [۱۹] دریافتند که مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) در تشخیص خطا عملکرد

---

[1] P2PM

بسیار خوبی داشته و به دقت ۹۲ درصد رسیده است. در مقیاسی کوچک‌تر، آرین و همکاران [۲۰] با موفقیت از یک طبقه‌بند مبتنی بر تابع پایه شعاعی (RBF) برای تشخیص خطا در یک ریزشبکهٔ ترکیبی استفاده کردند. کارایی الگوریتم‌های تشخیص خطا به‌شدت به نحوهٔ پیاده‌سازی آن‌ها بستگی دارد. سایوتی و همکاران [۲۱] نوعی چارچوب ترکیبی در Simulink/MATLAB برای نظارت آنی و تشخیص خطا در محیط‌های ولتاژ بالا ارائه می‌دهند. در این چارچوب، سنسورهای مبتنی بر IoT داده‌ها را از طریق پروتکل‌های G۵ منتقل می‌کند و یک الگوریتم SVM وظیفهٔ تشخیص ناهنجاری‌ها را به عهده دارد. نتایج پژوهش یادشده کاهش زمان بازیابی خطا به ۳۵ میلی‌ثانیه را نشان می‌دهد [۲۱]. سان و همکاران [۲۲] به پیاده‌سازی سخت‌افزاری مدل‌های هوش مصنوعی روی شتاب‌دهندهٔ FPGA برای دستیابی به عملکرد با تأخیر کم در لبه شبکه پرداختند. مقایسهٔ آن‌ها نشان داد پیاده‌سازی روی FPGA مصرف انرژی کمتر و تأخیر پایین‌تری نسبت به GPU دارد [۲۲].

هدف نهایی فراتر از تشخیص خطا، بازیابی خودکار و سریع شبکه است. موریا و همکاران [۲۳] یک نمای کلی جامع از تکنیک‌های هوش مصنوعی به‌کاررفته در شبکه‌های خودترمیم ارائه می‌دهند. آن‌ها شرح می‌دهند که چگونه الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تشخیص خاموشی، سیستم‌های مبتنی بر شبکه‌های بیزی برای عیب‌یابی دقیق و الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی بازیابی به کار می‌روند [۲۳]. میائو و همکاران [۲۴] یک راه‌حل پیشرفته برای این منظور ارائه می‌دهند: یک سیستم چندعاملی[1] که برای به حداقل رساندن تلفات شبکه هنگام بازیابی سریع توان طراحی شده است. در این سیستم، شبکه‌ای غیرمتمرکز از عامل‌ها در زمان واقعی با یکدیگر همکاری می‌کنند تا وظایف تشخیص، جداسازی و مدیریت بار را انجام دهند [۲۴].

کیفیت توان (PQ) به یک چالش حیاتی در سیستم‌های انرژی مدرن تبدیل شده است. هو و همکاران [۲۵] توضیح می‌دهند که افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر، چالش نوسانات را به همراه دارد که کیفیت توان را به خطر می‌اندازد. حبیب و همکاران [۲۶] به طور خاص بر مشکلات ناشی از سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی (PV) مانند نوسانات ولتاژ و هارمونیک‌ها تمرکز می‌کنند. اساس مقابله با مشکلات کیفیت توان، تشخیص و طبقه‌بندی دقیق و سریع اغتشاشات (PQD) است. وانگ و چن [۲۷] با اشاره به نقایص روش‌های سنتی، یک رویکرد حلقه کاملاً بسته مبتنی بر یک شبکهٔ عصبی کانولوشنی عمیق (DCNN) را پیشنهاد می‌کنند که به طور خودکار ویژگی‌ها را استخراج می‌کند و نیاز به انتخاب ویژگی دستی را از بین می‌برد. یغیت و همکاران [۲۸] نیز نوعی چارچوب مؤثر مبتنی بر مدل ترکیبی GRU–CNN ارائه می‌دهند. در این فرایند، با استفاده از تبدیل فوریه زمان ـ کوتاه (STFT)، سیگنال‌های PQD به ماتریس‌های زمان ـ فرکانس تبدیل شده، سپس CNN ویژگی‌ها را استخراج و GRU آن‌ها را طبقه‌بندی می‌کند. این چارچوب روی یک مجموعه داده با نویز بالا به دقت ۹۸/۴۴ درصد دست یافته است [۲۸].

فراتر از تشخیص، هدف نهایی استفاده از هوش مصنوعی برای بهبود فعالانه کیفیت توان است. حبیب و همکاران [۲۶] نوعی چارچوب تحلیلی PQ مبتنی بر هوش مصنوعی را برای تشخیص، طبقه‌بندی و کاهش آنی اغتشاشات پیشنهاد می‌کنند. شبیه‌سازی آن‌ها کاهش اعوجاج هارمونیکی کل (THD) از ۷/۵ درصد به ۲/۱ درصد و بهبود پایداری ولتاژ تا ۲۰ درصد را نشان می‌دهد [۲۶]. پاندی و همکاران [۲۹] نیز استراتژی‌های کنترلی مبتنی بر هوش مصنوعی را برای تنظیم ولتاژ و فرکانس و کاهش هارمونیک‌ها در ریزشبکه‌ها بررسی می‌کنند. کومار [۳۰] بر بهبود کیفیت توان در سیستم‌های PV از طریق بهینه‌سازی الگوریتم‌های ردیابی نقطهٔ حداکثر توان (MPPT) با استفاده از یک کنترلر ANN تمرکز می‌کند. در سیستم‌های پیچیده مانند شبکه‌های خارج از شبکه، مدل‌سازی پیشرفته اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. زیاوکا [۳۱ و ۳۲] در پژوهش‌های خود نیاز به پیش‌بینی ۲۴ساعته کیفیت توان را برای برنامه‌ریزی مصرف انرژی ضروری می‌داند و یک رویه توسعهٔ چندسطحی برای بهبود مدل‌های هوش مصنوعی در شرایط داده محدود معرفی می‌کند. لی و همکاران [۳۳] به استفاده از هوش مصنوعی قابل توضیح (XAI) می‌پردازند. آن‌ها یک مدل مبتنی بر XAI را برای ارزیابی و تحلیل تأثیر کیفیت توان قبل از اتصال منابع جدید به شبکه پیشنهاد می‌کنند تا از افت کیفیت توان جلوگیری شود [۳۳].

---

[1] Multi-Agent System – MAS

کیفیت توان تأثیر مستقیمی بر عملکرد تجهیزات مدرن دارد. دواراجان و همکاران [۳۴] بر نظارت بر کیفیت توان برای وسایل نقلیهٔ الکتریکی (EV) در محیط‌های صنعتی تمرکز می‌کنند. آن‌ها به پتانسیل هوش مصنوعی برای نظارت مؤثر بر معیارهای کیفیت توان مانند نوسانات فرکانس و اعوجاج هارمونیکی می‌پردازند که برای عملکرد EV حیاتی هستند. با استفاده از الگوریتم‌هایی مانند SVM و شبکه‌های عصبی، می‌توان مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌ای ساخت که مشکلات بالقوه را پیش‌بینی کند و امکان نگهداری پیشگیرانه را فراهم آورد [۳۴].

سیستم‌های آب و انرژی به شکلی ذاتی و عمیق به یکدیگر وابسته هستند. یین و همکاران [۳۵] تأکید می‌کنند که بررسی این دو منبع حیاتی به عنوان یک پیوند برای دستیابی به توسعهٔ پایدار و کم‌کربن امری بنیادین است. ماماغانی و همکاران [۳۶] نیز این وابستگی متقابل را یک چالش پیچیده برای برنامه‌ریزی امن می‌دانند. پیچیدگی پیوند آب ـ انرژی ـ غذا (WEFN) نیازمند ابزارهای تحلیلی قدرتمند است. منصور و همکاران [۳۷ و ۳۸] نوعی ابزار نرم‌افزاری نوآورانه برای بهینه‌سازی چندهدفه WEFN ارائه می‌دهند که اکسل را با پایتون ترکیب می‌کند تا کاربران بتوانند به‌راحتی سناریوهای مختلف را شبیه‌سازی کنند. دی مارتینو و همکاران [۳۹] به چالش عدم قابلیت حل محاسباتی در مدل‌سازی پیوند در مقیاس بزرگ می‌پردازند و استفاده از مدل‌های جایگزین (Models Surrogate) مبتنی بر تکنیک‌های داده‌محور را برای تقریب زدن مسائل پیچیده پیشنهاد می‌کنند. ماماغانی و همکاران [۳۶] نیز نوعی مدل بهینه‌سازی پایین به بالا برای پیوند آب ـ انرژی ـ انتشارات توسعه می‌دهند و یک شاخص پیوند آب ـ برق را برای ارزیابی وابستگی متقابل این دو بخش معرفی می‌کنند.

عدم قطعیت ناشی از منابع تجدیدپذیر، یک چالش بزرگ در بهینه‌سازی پیوند است. گودرزی و لی [۴۰] روی یک پیوند میکرو انرژی ـ آب ـ هیدروژن (EWH–m) تمرکز کرده و یک چارچوب بهینه‌سازی آنی با شتاب‌دهی یادگیری ماشین (MARO) را برای حل سریع مسائل برنامه‌ریزی محدب عدد صحیح مختلط (MICP) پیشنهاد می‌کنند. ژائو و همکاران [۴۲] نوعی مدل بهره‌برداری توزیعی مقاوم دومرحله‌ای را برای سیستم‌های یکپارچهٔ پیوند آب ـ انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت باد ارائه می‌دهند. آن‌ها با استفاده از معیار ارزش در معرض خطر شرطی (CVaR)، طرح‌های بهره‌برداری ریسک‌گریز را تعیین می‌کنند [۴۲]. تلوکداری [۴۳] بر پیوند انرژی آب ۲CO در یک شبکهٔ توزیع آب (WDN) تمرکز می‌کند و نشان می‌دهد فناوری‌هایی مانند درایوهای سرعت متغیر (VSD) می‌توانند تقاضای انرژی و تلفات آب را به طور قابل توجهی کاهش دهند. هوانگ و همکاران [۴۴] پیوند انرژی ـ آب را در زمینهٔ فناوری‌های کم‌کربن مانند جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCS) بررسی کرده و نشان می‌دهند اگرچه CCS می‌تواند انتشار CO_2 را کاهش دهد، اما به طور هم‌زمان مصرف انرژی و آب را افزایش می‌دهد، که یک بده‌بستان حیاتی را آشکار می‌کند. وابستگی متقابل شدید بین شبکه‌های آب و انرژی، آن‌ها را به یک هدف جذاب برای حملات مخرب تبدیل می‌کند. ابوغالی و همکاران [۴۵] این بعد حیاتی را مورد توجه قرار می‌دهند. آن‌ها استدلال می کنند که حمله به پیوند آب ـ انرژی (WEN) می‌تواند به طور هم‌زمان به هر دو سیستم آسیب برساند و خسارت‌های جبران ناپذیری به بار آورد. برای مقابله با این مشکل، آن‌ها استفاده از مدل‌های مختلف یادگیری عمیق را پیشنهاد کرده و یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی را به یک مدل خطی برای اهداف پیاده‌سازی آنی بازفرمول‌بندی می‌کنند [۴۵].

۳. مرور ادبیات

۳–۱. تجارت الگوریتمی در بازارهای انرژی از طریق هوش مصنوعی

تحول دیجیتال، بازارهای انرژی را به سمت پلتفرم‌های پویا، داده‌محور و به طور فزاینده‌ای خودکار سوق داده است. در این چشم‌انداز نوین، تجارت الگوریتمی مبتنی بر هوش مصنوعی به عنوان یک حوزهٔ پیشگام، در حال بازتعریف استراتژی‌های معاملاتی، مدیریت ریسک و ساختارهای بازار است. روجک و همکاران [۱] تأکید می‌کنند که توانایی هوش مصنوعی در پردازش حجم عظیمی از داده‌ها، تحلیل الگوهای پیچیده و انجام پیش‌بینی‌ها، نیروی محرکهٔ اصلی نوآوری در بازارهای انرژی است و به بهینه‌سازی عملیات، بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها کمک شایانی می‌کند. شچپانیک و شچپانیک [۲] نیز با تحلیل الگوریتم‌های مختلف هوش مصنوعی (یادگیری ماشین، فراابتکاری و سیستم‌های فازی)، پتانسیل بالای آن‌ها را در بهبود فرایندهای تولید،

توزیع، ذخیره‌سازی و به‌ویژه تجارت انرژی برجسته می‌سازند. در همین راستا، آلخیات و همکاران [۳] در بررسی خود، بر نقش محوری هوش مصنوعی در پلتفرم‌های تجارت انرژی مدرن و بهینه‌سازی عرضه و تقاضا تأکید می‌کنند و نشان می‌دهند این تکنیک‌ها در مدیریت داده‌های بزرگ و بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی عملکردی برتر دارند. این بخش به بررسی عمیق آخرین نوآوری‌ها در مدل‌های تجارت، ساختارهای بازار غیرمتمرکز و فناوری‌های کلیدی در این حوزه می‌پردازد. مدل‌های پیشرفته تجارت الگوریتمی و مدیریت ریسک پیچیدگی و نوسانات بازارهای انرژی، نیاز به الگوریتم‌های معاملاتی بسیار پیشرفته را ایجاب می‌کند. در یک پژوهش کاملاً نوآورانه، وو و همکاران [۴] با ترکیب بهینه‌سازی خط‌مشی پروگزیمال (PPO) و تبرید کوانتومی[1]، مرزهای بهینه‌سازی استراتژی‌های معاملاتی را جابه‌جا کرده‌اند. در این روش، PPO که یک چارچوب یادگیری تقویتی است، برای ایجاد یک استراتژی معاملاتی پویا و انطباقی با شرایط آنی بازار به کار می‌رود. سپس، پارامترهای این استراتژی از طریق تبرید کوانتومی و حل مسائل بهینه‌سازی باینری درجهٔ دوم بدون قید (QUBO) بهینه می‌شوند. این هم‌افزایی قدرتمند بین هوش مصنوعی و محاسبات کوانتومی، نتایج چشمگیری به همراه داشته است: افزایش ۲۵درصدی در بازده کل، بهبود ۱۵درصدی در نسبت شارپ و کاهش ۲۰درصدی در هزینه‌های معاملاتی، که پتانسیل بالای این رویکرد را در توسعهٔ استراتژی‌های معاملاتی برتر نشان می‌دهد. فیموتونگا و همکاران [۵] بر چالش حیاتی نوسانات در بازار کالاهای انرژی تمرکز کرده و مجموعه‌ای از تکنیک‌های پیشرفته برای کاهش آن را بررسی می‌کنند. آن‌ها تجارت الگوریتمی، به‌ویژه تجارت با فرکانس بالا (HFT)، را به عنوان ابزاری برای بهره‌برداری از نوسانات جزئی قیمت و بهبود بازده تعدیل‌شده بر اساس ریسک معرفی می‌کنند. علاوه بر این، تحلیل‌های پیش‌بینانه با استفاده از هوش مصنوعی و داده‌های بزرگ، مدل‌سازی ارزش در معرض خطر (VaR)، تست‌های استرس و استراتژی‌های پوشش ریسک با استفاده از ابزارهای مشتق‌شده، به عنوان یک چارچوب جامع برای مدیریت فعالانه ریسک و تصمیم‌گیری داده‌محور در بازارهای پرنوسان انرژی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. ساختارهای بازار غیرمتمرکز و همتابه‌همتا ظهور منابع انرژی توزیع‌شده (DERs) به طراحی ساختارهای بازار مصرف‌کننده‌محور منجر شده است. خوراسانی، میشرا و لدویچ [۶] یک طرح تجارت انرژی همتابه‌همتا کاملاً غیرمتمرکز را پیشنهاد می‌کنند که در آن بازیگران بازار می‌توانند مستقیم و بدون نیاز به هیچ نهاد مرکزی با یکدیگر مذاکره کنند. آن‌ها یک الگوریتم جدید مبتنی بر روش گرادیان اولیه ـ دوگان[2] را برای تسویه بازار توسعه داده‌اند که قیود فنی شبکه مانند جریان خطوط را نیز در نظر می‌گیرد. این رویکرد ضمن احترام به ترجیحات بازیگران، به تبادل داده کمتر و همگرایی سریع‌تری نسبت به روش‌های مشابه نیاز دارد و یک گام مهم به سوی بازارهای کارآمد و کاملاً غیرمتمرکز است. زهراوی و همکاران [۷] نیز روی تجارت انرژی P۲P تمرکز می‌کنند و نوعی رویکرد غیرمتمرکز برای بازاری با نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه می‌دهند. آن‌ها از یک الگوریتم توزیع‌شده مبتنی بر روش مدیریت‌کننده‌های متناوب (ADMM) برای حل مسئلهٔ تسویه بازار و کاهش پیچیدگی محاسباتی استفاده می‌کنند. نوآوری کلیدی آن‌ها معرفی یک مدیر (PM۲P) به عنوان نهادی برای حل مشکل همگام‌سازی بین همتایان طی فرایند تسویه بازار است. کارایی این رویکرد از طریق یک کاربرد آنی با استفاده از سخت‌افزار در حلقه (HIL) تأیید شده است، که اعتبار عملی آن را افزایش می‌دهد. فناوری‌های توانمندساز، بلاک‌چین و قراردادهای هوشمند امنیت، شفافیت و اتوماسیون، پیش‌نیازهای اساسی برای بازارهای غیرمتمرکز هستند. اونکولو و همکاران [۸] همگرایی بلاک‌چین و هوش مصنوعی را به عنوان یک انقلاب در تجارت انرژی معرفی می‌کنند. در این دیدگاه، بلاک‌چین با ارائهٔ یک دفتر کل توزیع‌شده و تغییرناپذیر، امنیت تراکنش‌ها و تسویه‌های آنی را تضمین می‌کند، در حالی که هوش مصنوعی وظیفهٔ تحلیل‌های پیش‌بینانه و بهینه‌سازی استراتژی‌های معاملاتی را به عهده دارد. قراردادهای هوشمند، به عنوان کدهای خود ـ اجرا روی بلاک‌چین، با خودکارسازی تسویه معاملات بر اساس شرایط ازپیش‌تعیین‌شده، نیاز به واسطه‌ها را از بین می‌برند و هزینه‌ها و ریسک طرف مقابل را به‌شدت کاهش می‌دهند. عصمت و همکاران [۹] یک پلتفرم تجارت انرژی P۲P غیرمتمرکز را با دو لایهٔ اصلی توسعه می‌دهند: لایهٔ بازار و لایهٔ بلاک‌چین. لایهٔ بازار آن‌ها دارای یک حراج موازی و کوتاه‌مدت است که با استفاده از یک روش نوآورانه بهینه‌سازی کلونی

---

[1] Quantum Annealing – QA

[2] primal-dual gradient

مورچگان غیرمتمرکز تسویه می‌شود. این ساختار ضمن حفظ حریم خصوصی بازیگران، به یک راه‌حل کارآمد نزدیک به بهینه دست می‌یابد. لایهٔ بلاک‌چین نیز با پیاده‌سازی قراردادهای هوشمند، سطح بالایی از اتوماسیون، امنیت و تسویه‌های آنی سریع را فراهم می‌کند. این پلتفرم یکپارچه، راه حلی عملی برای چالش‌های کلیدی بازارهای P2P، از جمله تعادل بین کارایی اقتصادی و حریم خصوصی، ارائه می‌دهد.

مدل‌های بازار یکپارچه و چند ـ انرژی آیندهٔ بازارهای انرژی در گرو مدیریت یکپارچه انواع مختلف حامل‌های انرژی است. ژانگ و همکاران [۱۰] نوعی مدل بازار تجارت چند ـ انرژی مبتنی بر تطبیق قیمت را پیشنهاد می‌کنند که هدف آن تقویت همکاری بین انواع انرژی (مانند برق و گاز) است. این مدل به اپراتور بازار اجازه می‌دهد تا با استفاده از دستگاه‌های تبدیل، انواع مختلف انرژی را با یکدیگر تطبیق داده و کارایی را افزایش دهد، ضمن اینکه با عدم نیاز به افشای اطلاعات کاربران، حریم خصوصی آن‌ها را حفظ می‌کند. برای حل این مدل پیچیده، از یک الگوریتم یادگیری تقویتی سلسله‌مراتبی بهبودیافته استفاده شده است که بر چالش‌های فضای حالت ـ عمل بزرگ و پاداش‌های پراکنده غلبه می‌کند. سان و همکاران [۱۱] با در نظر گرفتن اهمیت فزاینده سیاست‌های کربن‌زدایی، یک بازار هم‌زمان[1] را پیشنهاد می‌کنند که شامل تجارت برق، گاز طبیعی و تجارت کربن برای سیستم‌های انرژی یکپارچه (IESs) است. این رویکرد پیچیدگی معاملات را به‌شدت افزایش می‌دهد. آن‌ها برای حل این مسئله، از یادگیری تقویتی چندعاملی (MARL) و به طور خاص، یک الگوریتم بهبودیافته MADDPG استفاده می‌کنند. این روش به هر نهاد در بازار امکان می‌دهد تا با تعامل با دیگران، استراتژی‌های بهینهٔ خود را برای دستیابی به تجارت منصفانه و حفاظت از حریم خصوصی بیاموزد، که گامی مهم به سوی بازارهای انرژی پایدار و مسئولانه است. لی و همکاران [۱۲] به مسئلهٔ تجارت غیرهمکارانه بین چندین ریزشبکهٔ چند ـ انرژی (MEMGs) می‌پردازند. آن‌ها یک رویکرد سه‌لایه (بازار روز آینده، درون روز و آنی) مبتنی بر نظریه بازی‌ها (مدل کورنو–نش) و برنامه‌ریزی تصادفی ریسک‌گریز را برای مدیریت رقابت بازار و عدم قطعیت‌های ناشی از منابع تجدیدپذیر و قیمت‌ها توسعه می‌دهند. با استفاده از یک رویه جست‌وجوی متناوب توزیع‌شده برای یافتن تعادل نش، این مدل می‌تواند حریم خصوصی ریزشبکه‌ها را حفظ کند و بار محاسباتی را کاهش دهد. این تحقیق یک چارچوب عملی و اقتصادی برای مدیریت تعاملات پیچیده بین چندین بازیگر مستقل در بازارهای انرژی آینده ارائه می‌دهد. برای ارائهٔ یک نمای کلی و ساختاریافته از پژوهش‌های کلیدی که در این بخش مورد واکاوی قرار گرفتند، جدول ۱ تدوین شده است. این جدول به مقایسهٔ روش‌شناسی‌ها، نوآوری‌های اصلی و حوزهٔ کاربرد هر یک از مقالات مرجع می‌پردازد. هدف از این مقایسه، فراهم آوردن یک نقشهٔ راه مفهومی برای درک سریع روندهای اصلی و پیشرفت‌های فناورانه در حوزهٔ تجارت الگوریتمی انرژی است.

۲-۳. هوش مصنوعی برای تشخیص سریع خطا و بازیابی شبکه

با افزایش پیچیدگی شبکه‌های برق مدرن و یکپارچه‌سازی منابع انرژی نوسان‌پذیر، تضمین پایداری و قابلیت اطمینان شبکه به یک چالش بزرگ تبدیل شده است. خطاهای الکتریکی، در صورت عدم تشخیص و رفع سریع، می‌توانند منجر به خاموشی‌های گسترده و خسارت‌های اقتصادی هنگفت شوند. گویال و همکاران [۱۳] تأکید می‌کنند که روش‌های سنتی تشخیص خطا به دلیل کندی و عدم قابلیت پیش‌بینی، دیگر کارآمد نیستند و تشخیص و عیب‌یابی خطای مبتنی بر هوش مصنوعی (FDD) برای بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های هوشمند ضروری است. آن‌ها با بررسی روش‌های یادگیری ماشین[2] و یادگیری عمیق (RNN ,CNN) نشان می‌دهند چگونه تحلیل داده‌های آنی از سنسورهای هوشمند و واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMUs) می‌تواند به شناسایی دقیق و سریع اختلالات شبکه کمک کند. اوپادهیای [۱۴] نیز این موضوع را از یک منظر گسترده‌تر بررسی کرده و بر اهمیت حیاتی تکنیک‌های پیشرفته حفاظت، تشخیص خطا و بازیابی برای افزایش تاب‌آوری شبکه‌های برق تأکید می‌کند. او اشاره می‌کند که هوش مصنوعی با تسهیل ایجاد شبکه‌های خودترمیم[3]، می‌تواند به طور قابل توجهی شاخص‌های قابلیت اطمینان مانند متوسط زمان خاموشی سیستم (SAIDI) را کاهش دهد.

---

[1] co-trading
[2] SVM ,Random Forest
[3] Self-Healing Grids

جدول ۱. تحلیل مقایسه‌ای روش‌شناسی‌های کلیدی در حوزهٔ تجارت الگوریتم مبتنی بر هوش مصنوعی در بازارهای انرژی

مرجع	نویسندگان (خلاصه)	هدف اصلی پژوهش	روش‌شناسی/الگوریتم اصلی	نوآوری یا یافتهٔ کلیدی	حوزهٔ کاربرد
[۱]	روجک و همکاران	بحث در مورد مدل محاسباتی مبتنی بر هوش مصنوعی در تحول پایدار بازارهای انرژی.	مقالهٔ مروری (Conceptual)	AI با پردازش داده‌های بزرگ، بهینه‌سازی عملیات و تسریع گذار به انرژی پاک کمک می کند.	بازارهای انرژی پایدار
[۲]	شچپانیک و همکاران	تحلیل کاربرد الگوریتم‌های مختلف هوش مصنوعی برای پشتیبانی از تحول دیجیتال بخش انرژی.	مقالهٔ مروری و تحلیلی	AI (ML، فراابتکاری، فازی) می‌تواند فرایندهای تولید، توزیع و تجارت انرژی را بهبود بخشد.	تحول دیجیتال بخش انرژی
[۳]	آلخیات و همکاران	مرور کاربردهای هوش مصنوعی در پلتفرم‌های تجارت انرژی.	مقالهٔ مروری	تأکید بر برتری AI در مدیریت داده بزرگ، امنیت سایبری و بهینه‌سازی بهره‌وری.	پلتفرم‌های تجارت انرژی
[۴]	وو و همکاران	بهینه‌سازی استراتژی‌های معاملاتی آنی با ترکیب یادگیری تقویتی و محاسبات کوانتومی.	PPO و تبرید کوانتومی (QA)	افزایش ۲۵ درصد بازده کل و بهبود ۱۵ درصد نسبت شارپ با ترکیب PPO و QA.	تجارت آنی در بازار انرژی
[۵]	فیموتونگا و همکاران	بررسی تکنیک‌های پیشرفته برای کاهش نوسانات در تجارت کالاهای انرژی.	مقالهٔ مروری (تکنیک‌ها)	استفاده از تجارت الگوریتمی، تحلیل پیش‌بینانه و مدیریت ریسک برای تثبیت سودآوری.	تجارت کالاهای انرژی
[۶]	خراسانی و همکاران	ارائهٔ یک طرح تجارت انرژی همتابه‌همتا (P۲P) کاملاً غیرمتمرکز.	روش گرادیان اولیه–دوگان	تسویه بازار بدون نهاد مرکزی با در نظر گرفتن قیود شبکه و همگرایی سریع.	بازارهای برق P۲P
[۷]	زهراوی و همکاران	ارائهٔ یک رویکرد تجارت P۲P غیرمتمرکز با حل مشکل همگام‌سازی.	ADMM و مدیر P۲P (PM۲P)	معرفی نهاد PM۲P برای همگام‌سازی همتایان هنگام تسویه بازار.	بازارهای انرژی P۲P
[۸]	اونکولو و همکاران	بررسی همگرایی بلاک‌چین و هوش مصنوعی برای تحول در تجارت انرژی.	مقالهٔ مفهومی (Conceptual)	بلاک‌چین امنیت و شفافیت را فراهم می‌کند و AI تحلیل پیش‌بینانه را انجام می‌دهد.	تجارت انرژی در صنعت نفت و گاز
[۹]	عصمت و همکاران	توسعهٔ یک پلتفرم غیرمتمرکز دو لایه (بازار و بلاک‌چین) برای تجارت P۲P.	بهینه‌سازی کلونی مورچگان و بلاک‌چین	طراحی یک بازار کارآمد که حریم خصوصی را حفظ کرده و از قراردادهای هوشمند استفاده می کند.	پلتفرم‌های تجارت P۲P
[۱۰]	ژانگ و همکاران	ارائهٔ یک مدل بازار تجارت چند ـ انرژی مبتنی بر تطبیق قیمت.	یادگیری تقویتی سلسله‌مراتبی	امکان تجارت بین انواع مختلف انرژی بدون افشای اطلاعات کاربر.	بازارهای چند ـ انرژی
[۱۱]	سان و همکاران	هم‌زمان‌سازی تجارت انرژی (برق، گاز) و تجارت کربن در سیستم‌های یکپارچه.	یادگیری تقویتی چندعاملی (MADDPG)	بهینه‌سازی هم‌زمان منافع اقتصادی و کاهش انتشار کربن با حفظ حریم خصوصی.	بازارهای انرژی و کربن
[۱۲]	لی و همکاران	ارائهٔ نوعی رویکرد تجارت غیرهمکارانه سه‌لایه برای چندین ریزشبکه چند ـ انرژی.	نظریه بازی (کورنو–نش) و برنامه‌ریزی تصادفی	مدیریت رقابت بازار و عدم قطعیت در یک محیط چندعاملی و چندلایه.	بازارهای چند ـ انرژی

آلماسودی [۱۵] این تحول را در چارچوب انقلاب صنعتی چهارم (IR۴) قرار می‌دهد و بر تغییر پارادایم از نرم‌افزارهای تجاری سنتی به مدل‌های هوش مصنوعی برای تحلیل سیستم قدرت تأکید می‌کند. پژوهش او بر توسعهٔ مدل‌های ترکیبی پیشرفته مانند RNN-CNN، GRU-CNN و LSTM-CNN برای پیش‌بینی و تشخیص خطا در مکان‌های کاربر نهایی متمرکز است. این مدل‌ها با تحلیل داده‌های واقعی خطاها در یک دورهٔ سه‌ساله، می‌توانند به صورت خودکار و آنی، خطاها را شناسایی و تشخیص دهند که به رفع سریع‌تر آن‌ها با حداقل تلفات منجر می‌شود. در نگاهی بنیادین‌تر، بوز [۱۶] یادآوری می‌کند که استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی مانند سیستم‌های خبره (ES)، منطق فازی (FL) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) چندین دهه است که به عنوان ابزارهای قدرتمندی برای طراحی، شبیه‌سازی، کنترل و به‌ویژه عیب‌یابی خطا[1] در سیستم‌های قدرت و انرژی‌های تجدیدپذیر مطرح بوده‌اند و اساس بسیاری از پیشرفت‌های امروزی را تشکیل می‌دهند. شواهد کمی قابل توجهی بر برتری مدل‌های هوش مصنوعی در تشخیص خطا دلالت دارند. رانا [۱۷] در یک بررسی

---

[1] Fault Diagnostics

سیستماتیک جامع روی ۱۸۰ مقاله با کیفیت با پیروی از دستورالعمل PRISMA، به نتایج کمی قابل توجهی دست یافته است. او گزارش می‌دهد که مدل‌های تشخیص خطای مبتنی بر هوش مصنوعی به طور متوسط به دقت ۸۵ درصد تا ۹۵ درصد دست می‌یابند، هشدارهای کاذب را تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهند و زمان بازیابی توان را تا ۶۰ درصد به حداقل می‌رسانند. این بررسی همچنین نشان می‌دهد یکپارچه‌سازی سنسورهای IoT با تحلیل‌های آنی، نرخ تشخیص ناهنجاری را تا ۲۸ درصد بهبود بخشیده است. این یافته‌ها یک مبنای آماری قوی برای ارزیابی عملکرد و توجیه سرمایه‌گذاری در این فناوری‌ها فراهم می‌کند. یرنکی و همکاران [۱۸] نوعی چارچوب هوش مصنوعی خاص را برای بهبود قابلیت اطمینان شبکه در مناطق درحال‌توسعه (به‌ویژه آفریقای جنوب صحرا) ارائه می‌دهند. آن‌ها از یک طبقه‌بند گرادیان بوستینگ (GBC) برای تشخیص آنی خطا استفاده کردند. مدل آن‌ها که روی یک مجموعه داده متوازن آموزش دیده بود، به عملکرد فوق‌العاده‌ای دست یافت: دقت ۹۶/۱ درصد، صحت[1] ۹۳ درصد و بازیابی[2] ۱۰۰ درصد برای طبقه‌بندی خطا، که به امتیاز F1 معادل ۰/۹۶ منجر شد. این نتایج نه تنها کارایی بالای مدل را تأیید می‌کند، بلکه نشان‌دهندهٔ قابلیت پیاده‌سازی این راه‌حل‌های مقیاس‌پذیر و آگاه از زمینه برای مدرن‌سازی سیستم‌های انرژی در محیط‌های با منابع محدود است.

فزاء و همکاران [۱۹] نیز در پژوهش خود، مدل‌های مختلف هوش مصنوعی را برای سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر یکپارچه با شبکهٔ ارزیابی کردند. آن‌ها به طور خاص دریافتند که مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) در تشخیص خطا عملکرد بسیار خوبی داشته و به دقت ۹۲ درصد دست یافته است. این مطالعه، در کنار ارزیابی LSTM برای پیش‌بینی تقاضا و RL برای مدیریت انرژی، نشان می‌دهد چگونه می‌توان از الگوریتم‌های مختلف هوش مصنوعی به صورت ترکیبی برای پوشش جنبه‌های متفاوت مدیریت شبکه، از جمله تشخیص خطا، استفاده کرد. در مقیاسی کوچک‌تر، آرین و همکاران [۲۰] روی تشخیص خطا در یک ریزشبکه متشکل از دیزل ژنراتور، سیستم فتوولتائیک خورشیدی و ژنراتور بادی تمرکز می‌کنند. آن‌ها یک طبقه‌بند هوش مصنوعی مبتنی بر تابع پایه شعاعی (RBF) را با استفاده از نمونه‌های ولتاژ و جریان شبیه‌سازی‌شده در Simulink آموزش دادند. این پژوهش نشان می‌دهد تکنیک‌های هوش مصنوعی می‌توانند به طور مؤثر برای تشخیص سریع خطاها در سیستم‌های ترکیبی و پیچیده در سطح ریزشبکه نیز به کار روند. کارایی الگوریتم‌های تشخیص خطا به‌شدت به نحوهٔ پیاده‌سازی و یکپارچه‌سازی آن‌ها با زیرساخت‌های فیزیکی و ارتباطی بستگی دارد. سایوتی و همکاران [۲۱] نوعی چارچوب ترکیبی در Simulink/MATLAB برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی توزیع انرژی، نظارت آنی و تشخیص خطا در محیط‌های ولتاژ بالا ارائه می‌دهند. در این چارچوب، سنسورهای مبتنی بر IoT داده‌های ولتاژ و جریان را از طریق پروتکل‌های ارتباطی G۵ و استاندارد پیام‌رسانی MQTT منتقل می‌کنند. سپس، یک الگوریتم SVM آموزش‌دیده، وظیفهٔ تشخیص ناهنجاری‌ها و طبقه‌بندی نوع خطا را به عهده دارد. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان‌دهندهٔ کاهش زمان بازیابی خطا به ۳۵ میلی‌ثانیه و حفظ تأخیر ارتباطی زیر ۱۵ میلی‌ثانیه است، که اهمیت حیاتی یکپارچه‌سازی سیستم‌های قدرت و مخابرات برای دستیابی به تشخیص خطای آنی را برجسته می‌کند. سان و همکاران [۲۲] به یک جنبهٔ فنی بسیار مهم می‌پردازند: پیاده‌سازی سخت‌افزاری مدل‌های هوش مصنوعی برای دستیابی به عملکرد با تأخیر کم در لبهٔ شبکه[3]. آن‌ها فرایند پیاده‌سازی مدل‌های هوش مصنوعی استاندارد روی یک شتاب‌دهندهٔ Alveo (مبتنی بر FPGA) را توصیف می‌کنند. مقایسهٔ آن‌ها با پلتفرم‌های مبتنی بر واحد پردازش گرافیکی (GPU) نشان داد پیاده‌سازی روی FPGA مصرف انرژی کمتر و تأخیر پایین‌تری دارد. معماری سخت‌افزاری آن‌ها قادر است حتی با نرخ نمونه‌برداری بالای داده‌های شبکه (تا ۸۰۰ هزار نمونه در ثانیه)، تا ۷ جریان داده را به طور هم‌زمان پردازش کند. این تحقیق نشان می‌دهد سخت‌افزار مناسب می‌تواند گلوگاه‌های محاسباتی را برطرف کند و تشخیص خطای واقعاً آنی را امکان‌پذیر سازد. هدف نهایی فراتر از تشخیص خطا، بازیابی خودکار و سریع شبکه است. موریا و همکاران [۲۳] یک نمای کلی جامع از تکنیک‌های هوش مصنوعی به‌کاررفته در شبکه‌های خودترمیم برای بازیابی خودکار پس از خاموشی‌ها ارائه می‌دهند. آن‌ها شرح می‌دهند که چگونه الگوریتم‌های یادگیری ماشین (نظارت‌شده و نظارت‌نشده) برای تشخیص خاموشی، سیستم‌های مبتنی بر

---

[1] Precision
[2] Recall
[3] Edge Computing

شبکه‌های بیزی، شبکه‌های عصبی و منطق فازی برای عیب‌یابی دقیق و شناسایی علت اصلی خاموشی، و الگوریتم‌های بهینه‌سازی (مانند الگوریتم‌های تکاملی و یادگیری تقویتی) برای برنامه‌ریزی و هماهنگی تلاش‌های بازیابی به منظور به حداقل رساندن زمان خاموشی به کار می‌روند. این مقاله یک نقشهٔ راه واضح از چگونگی عملکرد یک شبکهٔ خودترمیم از لحظهٔ وقوع خطا تا بازیابی کامل ارائه می‌دهد. میائو و همکاران [۲۴] یک راه‌حل پیشرفته برای این منظور ارائه می‌دهند: یک سیستم چندعاملی که برای به حداقل رساندن تلفات شبکه هنگام بازیابی سریع توان طراحی شده است. در این سیستم، شبکه‌ای غیرمتمرکز از عامل‌ها در زمان واقعی با یکدیگر همکاری می‌کنند تا وظایف تشخیص خطا، جداسازی بخش معیوب (با استفاده از کلیدهای هوشمند) و مدیریت بار را انجام دهند. این سیستم با استفاده از مکانیزم‌های کنترل توزیع‌شده، مسیر توان را به طور کارآمد تغییر می‌دهد و به طور مداوم توپولوژی شبکه را برای کاهش تلفات بهینه می‌کند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها بهبود قابل توجهی در سرعت بازیابی و افزایش بهره‌وری کلی شبکه را نشان می‌دهد و این رویکرد را به عنوان یک راه‌حل امیدوارکننده برای کاربردهای شبکه هوشمند معرفی می‌کند.

جدول ۲، یافته‌های اصلی مطالعات بررسی‌شده در زمینهٔ تشخیص خطا و بازیابی شبکه را به صورت خلاصه ارائه می‌دهد. این جدول با دسته‌بندی پژوهش‌ها بر اساس هدف اصلی، الگوریتم به‌کاررفته و یافته کلیدی، به خواننده امکان می‌دهد تا به‌سرعت مدل‌های مختلف هوش مصنوعی را، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین گرفته تا سیستم‌های چندعاملی و پیاده‌سازی‌های سخت‌افزاری، با یکدیگر مقایسه کند.

جدول ۲. مروری مقایسه‌ای بر مدل‌های هوش مصنوعی برای تشخیص خطا و تاب‌آوری شبکه

مرجع	نویسندگان (خلاصه)	هدف اصلی پژوهش	روش‌شناسی/الگوریتم اصلی	نوآوری یا یافتهٔ کلیدی	حوزهٔ کاربرد
[۱۳]	گویال و همکاران	مرور جامع تشخیص و عیب‌یابی خطای مبتنی بر AI برای شبکه‌های هوشمند.	مقالهٔ مروری (ML, DL)	تأکید بر نقش داده‌های آنی (PMU) و مزایایی همچون بازیابی خودکار.	تشخیص و عیب‌یابی خطا (FDD)
[۱۴]	اوپادهیای	بررسی تکنیک‌های پیشرفته برای حفاظت، تشخیص خطا و بازیابی سیستم قدرت.	مقالهٔ مفهومی	تأکید بر نقش AI در ایجاد شبکه‌های خودترمیم و کاهش شاخص SAIDI.	حفاظت سیستم قدرت
[۱۵]	آلماسودی	یکپارچه‌سازی AI در شبکه‌های مدرن برای پیش‌بینی و تشخیص سریع خطا.	مدل‌های ترکیبی (CNN–RNN, GRU–CNN)	توسعهٔ مدل‌های ترکیبی برای تشخیص آنی خطا در مکان کاربر نهایی.	تشخیص خطای شبکه
[۱۶]	بوز	ارائه دیدگاه بنیادین در مورد کاربردهای کلاسیک AI در مهندسی قدرت.	ES, FL, ANN	تأکید بر سابقهٔ طولانی AI در عیب‌یابی خطا، کنترل و شبیه‌سازی.	مفاهیم بنیادین AI در قدرت
[۱۷]	رانا	بررسی سیستماتیک مقالات حوزهٔ تشخیص خطا و PdM با استفاده از AI.	مرور سیستماتیک (PRISMA)	مدل‌های AI به دقت ۸۵–۹۵٪ رسیده و زمان بازیابی را تا ۶۰٪ کاهش می‌دهند.	تشخیص خطا و PdM
[۱۸]	یرنکی و همکاران	ارائهٔ یک چارچوب AI برای پیش‌بینی و تشخیص خطا در مناطق درحال‌توسعه.	طبقه‌بند گرادیان بوستینگ (GBC)	دستیابی به دقت ۹۶/۱ درصد در تشخیص خطا در یک مطالعهٔ موردی.	شبکه‌های توزیع در آفریقا
[۱۹]	فزاء و همکاران	ارزیابی روش‌های مختلف AI برای سیستم‌های تجدیدپذیر یکپارچه با شبکه.	SVM, LSTM, RL	مدل SVM به دقت ۹۲ درصد در تشخیص خطا دست یافت.	شبکه‌های با نفوذ بالای تجدیدپذیرها
[۲۰]	آرین و همکاران	تشخیص خطا در یک ریزشبکه با استفاده از طبقه‌بند هوش مصنوعی.	طبقه‌بند تابع پایه شعاعی (RBF)	کاربرد موفق RBF برای تشخیص خطا در یک ریزشبکهٔ ترکیبی.	ریزشبکه‌ها
[۲۱]	سایوتی و همکاران	یکپارچه‌سازی سیستم‌های توزیع انرژی و شبکه‌های مخابراتی برای تشخیص خطا.	SVM و شبیه‌سازی با MQTT/G۵	کاهش زمان بازیابی خطا به ۳۵ میلی ثانیه با استفاده از AI و G۵.	یکپارچه‌سازی شبکه و مخابرات
[۲۲]	سان و همکاران	پیاده‌سازی سخت‌افزاری مدل‌های AI برای تشخیص خطای سریع در لبهٔ شبکه.	پیاده‌سازی روی FPGA	پیاده‌سازی روی FPGA مصرف انرژی و تأخیر کمتری نسبت به GPU دارد.	سخت‌افزار برای AI (AI Edge)
[۲۳]	موریا و همکاران	مرور جامع تکنیک‌های AI در شبکه‌های خودترمیم برای بازیابی خودکار.	مقاله مروری (Self–Healing)	تفکیک نقش AI در تشخیص، عیب‌یابی و برنامه‌ریزی بازیابی.	شبکه‌های خودترمیم
[۲۴]	میائو و همکاران	ارائهٔ نوعی سیستم چندعاملی (MAS) برای بازیابی سریع توان و کاهش تلفات.	سیستم چندعاملی (MAS)	استفاده از عامل‌های غیرمتمرکز برای هماهنگی تشخیص، جداسازی و بازیابی.	بازیابی خودکار شبکه

۳-۳. تحلیل خودکار کیفیت توان با استفاده از هوش مصنوعی

کیفیت توان (PQ)، که به مجموعه استانداردهای مربوط به پارامترهای ولتاژ و جریان برای تضمین عملکرد صحیح تجهیزات گفته می‌شود، به یک چالش حیاتی در سیستم‌های انرژی مدرن تبدیل شده است. هو و همکاران [۲۵] در کتاب مرجع خود توضیح می‌دهند که افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر، ضمن ضروری بودن برای مقابله با تغییرات اقلیمی، چالش نوسانات و تناوب را به همراه دارد که کیفیت توان را به خطر می‌اندازد. آن‌ها تأکید می‌کنند که هوش مصنوعی با ارائهٔ کنترل تطبیقی و مدیریت سمت تقاضا، می‌تواند بر این چالش‌ها غلبه کند. حبیب و همکاران [۲۶] به طور خاص بر مشکلات ناشی از سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی (PV) متصل به شبکه، مانند نوسانات ولتاژ، هارمونیک‌ها و ناپایداری فرکانس، تمرکز می‌کنند و استدلال می‌کنند که تکنیک‌های سنتی کاهش مشکلات PQ، با چالش عدم تطابق آنی مواجه هستند. این بخش به بررسی رویکردهای نوین مبتنی بر هوش مصنوعی برای تحلیل، طبقه‌بندی، پیش‌بینی و بهبود خودکار کیفیت توان می‌پردازد.

تشخیص و طبقه‌بندی هوشمند اغتشاشات کیفیت توان اساس مقابله با مشکلات کیفیت توان، تشخیص و طبقه‌بندی دقیق و سریع اغتشاشات (PQD) است. وانگ و چن [۲۷] با اشاره به نقایص ذاتی روش‌های سنتی که نیازمند سه مرحلهٔ مستقل تحلیل سیگنال، انتخاب ویژگی و طبقه‌بندی هستند، یک رویکرد نوین و یکپارچه حلقه کاملاً بسته را مبتنی بر یک شبکهٔ عصبی کانولوشنی عمیق (DCNN) پیشنهاد می‌کنند. در این روش، DCNN به طور خودکار ویژگی‌ها را از نمونه‌های اغتشاش استخراج می‌کند و نیاز به فرایند زمان‌بر و غیردقیق انتخاب ویژگی دستی را از بین می‌برد. این مدل با موفقیت روی داده‌های میدانی یک سیستم چند-ریزشبکه‌ای آزمایش شده و برتری خود را در دقت طبقه‌بندی و ایمنی در برابر نویز به اثبات رسانده است. یغیت و همکاران [۲۸] نیز یک چارچوب هوش مصنوعی مؤثر برای تحلیل اغتشاشات PQ، اعم از تکی یا ترکیبی، ارائه می‌دهند. معماری پیشنهادی آن‌ها یک مدل ترکیبی از شبکهٔ عصبی کانولوشنی (CNN) و واحد بازگشتی گیت‌دار (GRU) است. در این فرایند، ابتدا با استفاده از تبدیل فوریه زمان-کوتاه (STFT)، سیگنال‌های PQD به ماتریس‌های زمان ـ فرکانس تبدیل می‌شوند. سپس، معماری CNN به طور خودکار ویژگی‌ها را از این ماتریس‌ها استخراج کرده و در نهایت، GRU آن‌ها را طبقه‌بندی می‌کند. این چارچوب روی یک مجموعه داده با نویز بالا (۲۰ تا ۵۰ دسی‌بل) آزمایش شده و به عملکرد فوق‌العاده‌ای با دقت ۹۸/۴۴ درصد و امتیاز F1 معادل ۹۸/۴۵ درصد دست یافته که نشان‌دهندهٔ استحکام بالای آن در شرایط واقعی است. کنترل، کاهش و برنامه‌ریزی کیفیت توان فراتر از تشخیص، هدف نهایی استفاده از هوش مصنوعی برای بهبود فعالانه کیفیت توان است. حبیب و همکاران [۲۶] نوعی چارچوب تحلیلی PQ مبتنی بر هوش مصنوعی را برای تشخیص، طبقه‌بندی و کاهش آنی اغتشاشات پیشنهاد می‌کنند. شبیه‌سازی آن‌ها در Simulink/MATLAB نشان می‌دهد چارچوب هوش مصنوعی پیشنهادی، اعوجاج هارمونیکی کل (THD) را از ۷/۵ درصد به ۲/۱ درصد کاهش داده و پایداری ولتاژ را تا ۲۰ درصد بهبود بخشیده است. این نتایج برتری کنترل مبتنی بر هوش مصنوعی بر روش‌های متداول را تأیید می‌کند و یک رویکرد مقیاس‌پذیر و تطبیقی برای شبکه‌های یکپارچه با انرژی خورشیدی ارائه می‌دهد.

پاندی، تیواری و نیشاد [۲۹] یک تحلیل جامع از تکنیک‌های هوش مصنوعی برای مدیریت پیشرفته جریان انرژی و کیفیت توان در ریزشبکه‌های بادی ـ خورشیدی ـ باتری ارائه می‌دهند. آن‌ها استراتژی‌های کنترلی مبتنی بر هوش مصنوعی را برای تنظیم ولتاژ و فرکانس، کاهش هارمونیک‌ها و جبران توان راکتیو بررسی می‌کنند. این پژوهش نتیجه می‌گیرد که هوش مصنوعی امکان عملکرد هوشمند، تطبیقی و خودکار ریزشبکه‌های غنی از منابع تجدیدپذیر را فراهم کرده و به آیندهٔ انرژی پایدارتر و قابل اطمینان‌تر کمک می‌کند.

کومار و همکاران [۳۰] بر بهبود کیفیت توان در سیستم‌های PV متصل به شبکه از طریق بهینه‌سازی الگوریتم‌های ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT) تمرکز می‌کنند. آن‌ها یک کنترلر هوش مصنوعی مبتنی بر شبکهٔ عصبی مصنوعی (ANN) را برای ردیابی MPPT پیشنهاد می‌دهند و عملکرد آن را با روش سنتی هدایت افزایشی مقایسه می‌کنند. این تحقیق نشان می‌دهد با بهینه‌سازی عملکرد منبع تولید در شرایط متغیر جوی، می‌توان به طور مستقیم کیفیت توان تحویلی به شبکه را بهبود بخشید.

مدل‌سازی پیشرفته، پیش‌بینی و توضیح‌پذیری در سیستم‌های پیچیده و داده‌محدود مانند شبکه‌های خارج از شبکه[1]، مدل‌سازی پیشرفته اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. زیاوکا [۳۱] در پژوهشی روی این سیستم‌ها، نیاز به پیش‌بینی ۲۴ ساعته کیفیت توان را برای برنامه‌ریزی مصرف انرژی در خانه‌های هوشمند ضروری می‌داند. او نوعی روش دومرحله‌ای را پیشنهاد می‌دهد که در آن ابتدا یک الگوریتم انتخاب خودکار، گزینه‌های مختلف مصرف انرژی را پیشنهاد می‌دهد و سپس مدل‌های PQ این سناریوها را برای تضمین پایداری سیستم بررسی می‌کنند. در پژوهشی دیگر، زیاوکا [۳۲] یک رویه توسعهٔ چندسطحی جدید را برای بهبود مدل‌های هوش مصنوعی معرفی می‌کند. در این روش، مدل اولیه که تنها با داده‌های باینری بار شروع به کار می‌کند، به صورت تدریجی با افزودن پارامترهای PQ مرتبط که در مراحل قبلی تخمین زده شده‌اند، به عنوان ورودی‌های جدید، بهبود می‌یابد. این فرایند پالایش تکراری، به مدل امکان می‌دهد تا درک بهتری از الگوهای پیچیده داده‌ها پیدا کرده و کیفیت تخمین خروجی را افزایش دهد.

لی، لیم و لی [۳۳] به یک جنبهٔ حیاتی و آینده‌نگرانه می‌پردازند: استفاده از هوش مصنوعی قابل توضیح آن‌ها با تمرکز بر تأثیر منفی منابع توان توزیع‌شده بر کیفیت توان (به‌ویژه تلفات توان)، یک مدل مبتنی بر XAI را برای ارزیابی و تحلیل تأثیر کیفیت توان قبل از اتصال منابع جدید به شبکه پیشنهاد می‌کنند. این رویکرد پیشگیرانه به جای واکنش به مشکلات پس از وقوع، امکان پیش‌بینی و جلوگیری از افت کیفیت توان را فراهم می‌کند و با ایجاد شفافیت در تصمیم‌گیری مدل، اعتماد اپراتورهای شبکه را جلب می‌کند.

کاربردهای خاص: وسایل نقلیهٔ الکتریکی (EV) کیفیت توان تأثیر مستقیمی بر عملکرد و طول عمر تجهیزات مدرن دارد. دواراجان و همکاران [۳۴] روی یک کاربرد خاص و مهم تمرکز می‌کنند: نظارت بر کیفیت توان برای وسایل نقلیه الکتریکی (EV) در محیط‌های صنعتی. آن‌ها به پتانسیل هوش مصنوعی برای نظارت مؤثر بر معیارهای کیفیت توان مانند نوسانات فرکانس، اعوجاج هارمونیکی و پایداری ولتاژ، که برای عملکرد EV حیاتی هستند، می‌پردازند. با استفاده از الگوریتم‌هایی مانند ماشین‌های بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی، می‌توان مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌ای ساخت که مشکلات بالقوه کیفیت توان را پیش‌بینی کنند و امکان نگهداری پیشگیرانه را فراهم آورند. این رویکرد به کاهش زمان از کار افتادگی، افزایش طول عمر باتری و بهبود بهره‌وری انرژی برای وسایل نقلیه الکتریکی منجر می‌شود.

به منظور جمع‌بندی و مقایسهٔ نظام‌مند رویکردهای نوین در حوزهٔ کیفیت توان، جدول ۳ ارائه می‌شود. جدول ۳ پژوهش‌های محوری این بخش را بر اساس روش‌شناسی اصلی و نوآوری کلیدی آن‌ها طبقه‌بندی می‌کند. این ساختار، نمایی روشن از تکامل کاربردهای هوش مصنوعی در این حوزه را، از تشخیص و طبقه‌بندی اغتشاشات گرفته تا راهکارهای پیشگیرانه و مبتنی بر هوش مصنوعی قابل توضیح، به تصویر می‌کشد.

۳-۴. بهینه‌سازی پیوند آب ـ انرژی با استفاده از هوش مصنوعی

به منظور ایجاد یک چارچوب یکپارچه، این مقاله چهار رکن کلیدی را بررسی می‌کند که هر یک نمایانگر یکی از جنبه‌های حیاتی تحول سیستم‌های انرژی هستند: هوشمندسازی بازار انرژی، ارتقای تاب‌آوری شبکه، بهینه‌سازی عملکرد شبکه و پایداری سیستمی. بخش ۴.۳ با تمرکز بر بهینه‌سازی پیوند آب ـ انرژی به عنوان نمونه‌ای از اهمیت منابع بین‌بخشی انتخاب شده است؛ زیرا آب و انرژی دو منبع حیاتی و در هم‌تنیده هستند: تولید انرژی به آب نیاز دارد و مصرف آب نیز نیازمند انرژی است. تصمیمات مربوط به مصرف و تخصیص آب می‌تواند اثر مستقیم بر عملکرد و بازدهی شبکهٔ انرژی داشته باشد و به‌عکس. مرور منابع مرتبط نشان می‌دهد مدیریت هم‌زمان این دو حوزه، نه تنها به افزایش بهره‌وری منابع منجر می‌شود، بلکه به تقویت تاب‌آوری و پایداری سیستم کمک می‌کند. بنابراین، انتخاب زیرموضوعات مرورشده بر اساس همبستگی ذاتی آن‌ها با چهار رکن اصلی و تعامل متقابل اقتصادی، عملیاتی و زیست‌محیطی است تا چارچوب تحلیلی ارائه‌شده یکپارچگی و قابلیت ارتباط منطقی میان موضوعات را حفظ کند.

---

[1] Off-grid

جدول ۳. خلاصه‌ای از کاربردها و روش‌شناسی‌های هوش مصنوعی در تحلیل خودکار کیفیت توان

مرجع	نویسندگان (خلاصه)	هدف اصلی پژوهش	روش‌شناسی/الگوریتم اصلی	نوآوری یا یافته کلیدی	حوزهٔ کاربرد
[۱۳]	گویال و همکاران	مرور جامع تشخیص و عیب‌یابی خطای مبتنی بر AI برای شبکه‌های هوشمند.	مقالهٔ مروری (ML, DL)	تأکید بر نقش داده‌های آنی ((PMU و مزایایی همچون بازیابی خودکار.	تشخیص و عیب‌یابی خطا (FDD)
[۱۴]	اوپادهیای	بررسی تکنیک‌های پیشرفته برای حفاظت، تشخیص خطا و بازیابی سیستم قدرت.	مقاله مفهومی	تأکید بر نقش AI در ایجاد شبکه های خودترمیم و کاهش شاخص SAIDI.	حفاظت سیستم قدرت
[۱۵]	آلماسودی	یکپارچه‌سازی AI در شبکه‌های مدرن برای پیش‌بینی و تشخیص سریع خطا.	مدل‌های ترکیبی (CNN-RNN, (CNN-GRU	توسعهٔ مدل‌های ترکیبی برای تشخیص آنی خطا در مکان کاربر نهایی.	تشخیص خطای شبکه
[۱۶]	بوز	ارائهٔ دیدگاه بنیادین در مورد کاربردهای کلاسیک AI در مهندسی قدرت.	ES, FL, ANN	تأکید بر سابقهٔ طولانی AI در عیب یابی خطا، کنترل و شبیه‌سازی.	مفاهیم بنیادین AI در قدرت
[۱۷]	رانا	بررسی سیستماتیک مقالات حوزهٔ تشخیص خطا و PdM با استفاده از AI.	مرور سیستماتیک (PRISMA)	مدل‌های AI به دقت ۸۵ ـ ۹۵ درصد رسیده و زمان بازیابی را تا ۶۰ درصدکاهش می‌دهند.	تشخیص خطا و PdM
[۱۸]	یرنکی و همکاران	ارائهٔ نوعی چارچوب AI برای پیش بینی و تشخیص خطا در مناطق درحال‌توسعه.	طبقه‌بند گرادیان بوستینگ (GBC)	دستیابی به دقت ۹۶/۱ درصد در تشخیص خطا در یک مطالعه موردی.	شبکه‌های توزیع در آفریقا
[۱۹]	فزاء و همکاران	ارزیابی روش‌های مختلف AI برای سیستم‌های تجدیدپذیر یکپارچه با شبکه.	SVM, LSTM, RL	مدل SVM به دقت ۹۲ درصد در تشخیص خطا دست یافت.	شبکه‌های با نفوذ بالای تجدیدپذیرها
[۲۰]	آرین و همکاران	تشخیص خطا در یک ریزشبکه با استفاده از طبقه‌بند هوش مصنوعی.	طبقه‌بند تابع پایه شعاعی (RBF)	کاربرد موفق RBF برای تشخیص خطا در یک ریزشبکه ترکیبی.	ریزشبکه‌ها
[۲۱]	سایوتی و همکاران	یکپارچه‌سازی سیستم‌های توزیع انرژی و شبکه‌های مخابراتی برای تشخیص خطا.	SVM و شبیه‌سازی با G/MQTT۵	کاهش زمان بازیابی خطا به ۳۵ میلی‌ثانیه با استفاده از AI و G۵.	یکپارچه‌سازی شبکه و مخابرات
[۲۲]	سان و همکاران	پیاده‌سازی سخت‌افزاری مدل‌های AI برای تشخیص خطای سریع در لبه شبکه.	پیاده‌سازی روی FPGA	پیاده‌سازی روی FPGA مصرف انرژی و تأخیر کمتری نسبت به GPU دارد.	سخت‌افزار برای (AI (Edge AI

سیستم‌های آب و انرژی به شکلی ذاتی و عمیق به یکدیگر وابسته هستند؛ تولید انرژی نیازمند مقادیر عظیمی آب است و استخراج، تصفیه و توزیع آب نیز به‌شدت انرژی‌بر است. یین و همکاران [۳۵] تأکید می‌کنند که بررسی این دو منبع حیاتی به عنوان یک پیوند[1] برای دستیابی به توسعه پایدار و کم‌کربن امری بنیادین است. ماماغانی و همکاران [۳۶] نیز این وابستگی متقابل را یک چالش پیچیده برای برنامه‌ریزی امن در مواجهه با رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی می‌دانند. با افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر که با نوسانات بالا مشخص می‌شوند، چالش‌های فنی ـ اقتصادی برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری یکپارچه از پیوند آب ـ انرژی افزایش یافته است. این بخش به بررسی رویکردهای نوین مبتنی بر هوش مصنوعی و بهینه‌سازی برای مدل‌سازی، مدیریت و بهینه‌سازی این پیوند پیچیده می‌پردازد.

چارچوب‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی پیوند به این‌صورت است که، پیچیدگی پیوند آب انرژی غذا (WEFN) نیازمند ابزارهای تحلیلی قدرتمند است. منصور و همکاران [۳۷ و ۳۸] یک ابزار نرم‌افزاری نوآورانه برای بهینه‌سازی چندهدفه WEFN (WEFN–MOO) ارائه می‌دهند. این ابزار که اکسل را با پایتون با استفاده از پکیج بهینه‌سازی (GEKKO) ترکیب می‌کند، به

---

[1] Nexus

دلیل دسترسی آسان، به کاربران امکان می‌دهد تا به‌راحتی سناریوهای مختلف را شبیه‌سازی کنند. مدل زیربنایی این ابزار، تمام سه بخش پیوند و ارتباطات متقابل آن‌ها را در کنار قیود اقتصادی، زیست‌محیطی و تغذیه‌ای در نظر می‌گیرد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد چگونه یک تغییر در یک بخش (مانند تغییر فناوری تصفیهٔ فاضلاب) می‌تواند تأثیرات موجی در کل پیوند داشته باشد. این ابزار با انجام تحلیل پارتو، به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا بده‌بستان‌های[1] بین اهداف متضاد را درک کرده و به راه‌حل‌های بهینه دست یابند. دی مارتینو، لینکه و پیستیکوپولوس [۳۹] به چالش عدم قابلیت حل محاسباتی[2] در مدل‌سازی بهینه‌سازی پیوند در مقیاس بزرگ می‌پردازند. آن‌ها برای غلبه بر این مشکل، استفاده از مدل‌های جایگزین[3] مبتنی بر تکنیک‌های داده‌محور را برای تقریب زدن مسائل بهینه‌سازی پیچیده پیشنهاد می‌کنند. آن‌ها با توسعه یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خطی عدد صحیح مختلط برای WEFN و استفاده از استراتژی‌هایی مانند آزادسازی[4]، پیمانه‌ای‌سازی[5] و بازفرمول‌بندی پوش محدب، موفق به حل مسئله‌ای شدند که در ابتدا از نظر محاسباتی غیرقابل حل بود.

ماماغانی و همکاران [۲] نیز یک مدل بهینه‌سازی پایین به بالا برای پیوند آب ـ انرژی ـ انتشارات توسعه می‌دهند و یک شاخص چندبعدی نوآورانه به نام شاخص پیوند آب ـ برق را برای ارزیابی وابستگی متقابل این دو بخش معرفی می‌کنند. مطالعهٔ موردی آن‌ها نشان می‌دهد این شاخص در سناریوهای معمول به طور قابل توجهی در حال افزایش است که برنامه‌ریزی امن را دشوارتر می‌کند. آن‌ها نتیجه می‌گیرند که افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر، بهبود بهره‌وری فناوری و مدیریت سمت تقاضا از عوامل اصلی کاهش این وابستگی و دستیابی به مسیرهای گذار پایدار هستند. بهینه‌سازی هوشمند و مقاوم در شرایط عدم قطعیت ناشی از منابع تجدیدپذیر، یک چالش بزرگ در بهینه‌سازی پیوند است. گودرزی و لی [۴۰] روی یک پیوند میکرو انرژی ـ آب ـ هیدروژن (EWH-m) تمرکز کرده و یک چارچوب بهینه‌سازی آنی با شتاب‌دهی یادگیری ماشین (MARO) را برای حل سریع مسائل برنامه‌ریزی محدب عدد صحیح مختلط (MICP) در مقیاس بزرگ پیشنهاد می‌کنند. MARO با استفاده از سه ماژول کلیدی (پیش‌بینی قیود فعال، انتخاب استراتژی بهینه و توسعهٔ فضای ویژگی)، قادر است به سرعت و با دقت بالا مسائل بهینه‌سازی را برای این سیستم پیچیده حل کند.

ژائو و همکاران [۴۱] نوعی مدل بهره‌برداری توزیعی مقاوم[6] دومرحله‌ای را برای سیستم‌های یکپارچهٔ پیوند آب ـ انرژی (شامل برق، گاز و آب) با در نظر گرفتن عدم قطعیت باد ارائه می‌دهند. آن‌ها با استفاده از یک معیار ریسک منسجم، یعنی ارزش در معرض خطر شرطی (CVaR)، طرح‌های بهره‌برداری ریسک‌گریز را تعیین می‌کنند. این مدل به جای فرض یک توزیع قطعی برای عدم قطعیت، از یک مجموعه ابهام[7] استفاده می‌کند که خانواده‌ای از توزیع‌ها را پوشش می‌دهد. این رویکرد به اپراتورهای سیستم امکان می‌دهد تا هزینهٔ بهره‌برداری را با در نظر گرفتن ریسک ناشی از عدم قطعیت‌ها به حداقل برسانند. ژو و همکاران [۴۲] نیز پیوند آب ـ غذا ـ انرژی (WFE) را در زمینهٔ تولید برق ترکیبی از نیروگاه آبی و فتوولتائیک شناور (FPV) بررسی می‌کنند. آن‌ها یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ملخ[8] را برای به حداکثر رساندن هم‌زمان تولید برق، ذخیره آب و تأمین آب توسعه دادند. نتایج پژوهش آن‌ها در یک مطالعهٔ موردی در تایوان نشان داد این مدل می‌تواند منافع هم‌افزایی پیوند را به طور قابل توجهی بهبود بخشد (بهبود ۱۳ تا ۱۵ درصدی در شاخص‌های مختلف) و دیدگاه‌های جدیدی برای گسترش تولید انرژی سبز همزمان با تحریک هم‌افزایی‌های پیوند WFE ارائه می‌دهد.

تلوکداری [۴۳] بر پیوند انرژی ـ آب ـ CO_2 در یک شبکهٔ توزیع آب (WDN) تمرکز می‌کند. او یک مدل مبتنی بر فرایند کسب‌وکار برای شبیه‌سازی WDN و پیش‌بینی تأثیر فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم (مانند درایوهای سرعت متغیر – VSD و اینترنت اشیا – IoT) توسعه داده است. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد VSD بیشترین تأثیر مثبت را دارد و تقاضای انرژی و

---

[1] Trade-offs
[2] Computational Intractability
[3] Surrogate Models
[4] Relaxation
[5] Modularization
[6] Distributionally Robust
[7] Ambiguity Set
[8] Grasshopper Optimization Algorithm

انتشار ۲CO را تا ۱۶ درصد و تلفات آب را تا ۲۲ درصد کاهش می‌دهد. این کاهش در تلفات آب، درآمد شرکت آب را افزایش می‌دهد و امکان سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های دیجیتال و گسترش دسترسی به آب آشامیدنی را فراهم می‌کند. هوانگ و همکاران [۴۴] پیوند انرژی ـ آب را در زمینهٔ فناوری‌های کم‌کربن مانند جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCS) بررسی می‌کنند. مدل آن‌ها نشان می‌دهد اگرچه کاربرد CCS می‌تواند انتشار ۲CO را تا ۳۷/۹۳ درصد کاهش دهد، اما به طور هم‌زمان مصرف انرژی و آب را به‌ترتیب تا ۷/۳۵ میلیون تن معادل زغال‌سنگ و ۱۱۲ میلیون متر مکعب افزایش می‌دهد. این یافته یک بده‌بستان حیاتی را آشکار می‌کند که باید در برنامه‌ریزی‌های انرژی کم‌کربن به دقت در نظر گرفته شود.

یین و همکاران [۳۵] نیز یک مطالعهٔ موردی از پیوند آب ـ انرژی شامل نیروگاه‌های برق‌آبی پلکانی، PV و یک مزرعهٔ بادی را بررسی می‌کنند. آن‌ها یک مدل داده‌محور مبتنی بر شبکهٔ عصبی عمیق برای مدل‌سازی سریع و دقیق اثر سایه‌اندازی در مزرعهٔ بادی توسعه داده و یک چارچوب بهینه‌سازی برای شناسایی هم‌افزایی‌ها و بده‌بستان‌های پیوند ارائه می‌دهند که شامل بهینه‌سازی چیدمان مزرعهٔ بادی (WFLO) نیز می‌شود. وابستگی متقابل شدید بین شبکه‌های آب و انرژی، آن‌ها را به یک هدف جذاب برای حملات مخرب تبدیل می‌کند. ابوغالی و همکاران [۴۵] این بعد حیاتی و کمترپرداخته‌شده را مورد توجه قرار می‌دهند. آن‌ها استدلال می‌کنند که حمله به پیوند آب ـ انرژی (WEN) می‌تواند به طور هم‌زمان به هر دو سیستم آسیب برساند و خسارت‌های جبران‌ناپذیری در کل شبکه ایجاد کند. برای مقابله با این مشکل، آن‌ها استفاده از مدل‌های مختلف یادگیری عمیق با توابع زیان متفاوت را پیشنهاد می‌کنند. علاوه بر این، آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) از WEN را به یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای اهداف پیاده‌سازی آنی بازفرمول‌بندی می‌کنند. این پژوهش، اهمیت در نظر گرفتن امنیت سایبری را به عنوان یک جزء جدایی‌ناپذیر از طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های پیوند آب ـ انرژی برجسته می‌سازد.

جدول ۴ یک تحلیل مقایسه‌ای از چارچوب‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی ارائه‌شده در حوزهٔ پیوند آب ـ انرژی را فراهم می‌کند. این جدول با برجسته‌سازی اهداف اصلی، روش‌های به‌کاررفته و یافته‌های نوآورانه هر پژوهش، به درک بهتر چالش‌های چندوجهی این حوزه، از جمله مدیریت عدم قطعیت، بهینه‌سازی چندهدفه و امنیت سایبری، کمک شایانی می‌کند.

مطابق جدول ۵، مهم‌ترین مدل‌های هوش مصنوعی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند، از نظر کاربرد، مزایا و محدودیت‌ها مقایسه شده‌اند. شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به دلیل توانایی یادگیری غیرخطی و تطبیق‌پذیری بالا، برای تشخیص الگو و پیش‌بینی عملکرد سیستم‌ها بسیار کاربردی هستند، هرچند نیاز به داده زیاد و امکان overfitting دارند. ماشین بردار پشتیبان (SVM) با دقت بالای طبقه‌بندی و رگرسیون، به‌خصوص در مسائل با داده محدود، مفید است، اما پردازش داده‌های بزرگ برای آن زمان‌بر است. جنگل تصادفی[1] با مقاومت در برابر overfitting و تفسیرپذیری نسبی، در پیش‌بینی مصرف انرژی و ارزیابی ریسک موثر است، اگرچه برای داده‌های بسیار بزرگ ممکن است کند باشد. شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) و شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN/LSTM) نیز به‌ترتیب برای پردازش تصاویر و داده‌های سری زمانی کاربرد دارند، در حالی که الگوریتم ژنتیک (GA) و یادگیری تقویتی[2] ابزارهایی قدرتمند برای بهینه‌سازی و خودکارسازی تصمیمات پیچیده محسوب می‌شوند. هوش مصنوعی ترکیبی (Hybrid AI) با ادغام چند مدل، دقت و انعطاف‌پذیری بیشتری ارائه می‌دهد و محدودیت‌های تک‌مدل‌ها را کاهش می‌دهد. این مقایسه نشان می‌دهد انتخاب مدل مناسب باید بر اساس نوع داده، نیازمندی‌های پردازشی و اهداف کاربردی صورت گیرد و در اینجا مهم‌ترین مدل‌ها برای کاربردهای کلیدی سیستم‌های انرژی ارائه شده‌اند.

اعداد شاخص‌های عملکردی آورده شده در جدول شامل RMSE، MAE و R^2 نمونه‌ای تقریبی از مقادیر رایج در مطالعات مرجع و مقالات معتبر هستند و به منظور امکان مقایسهٔ تقریبی بین مدل‌ها ارائه شده‌اند، نه اینکه از یک دیتاست واقعی استخراج شده باشند. RMSE یا ریشهٔ میانگین مربعات خطای پیش‌بینی مدل نسبت به داده واقعی را نشان می‌دهد که عدد پایین‌تر

---

[1] Random Forest
[2] Reinforcement Learning

نمایانگر دقت بیشتر است. MAE یا میانگین قدر مطلق خطاها میزان خطای مدل را بدون حساسیت زیاد به خطاهای بزرگ نشان می‌دهد و عدد کمتر بیانگر عملکرد بهتر است. R^2 یا ضریب تعیین درصد واریانس داده را که توسط مدل توضیح داده می‌شود نشان می‌دهد و عدد نزدیک به یک بیانگر تطابق بهتر مدل با داده‌ها است. اعداد جدول بر اساس مقایسه کلی از منابع علمی و مقالات مرجع تعیین شده‌اند تا نشان دهند کدام مدل‌ها به طور معمول در چه کاربردهایی عملکرد بهتری دارند. برای مثال، شبکهٔ عصبی کانولوشنی (CNN) و جنگل تصادفی معمولاً در پیش‌بینی و پردازش تصویر RMSE پایین و R^2 بالاتری دارند، در حالی که الگوریتم ژنتیک و یادگیری تقویتی به دلیل ماهیت بهینه‌سازی و شبیه‌سازی خطای بیشتری دارند و R^2 کمتری گزارش می‌شود. مدل‌های ترکیبی (Hybrid AI) معمولاً عملکرد بهتری نسبت به هر مدل منفرد دارند و باعث کاهش خطا و افزایش دقت می‌شوند. این توضیح نشان می‌دهد جدول ارائه‌شده یک مرجع تقریبی برای مقایسهٔ مدل‌ها است و می‌تواند راهنمایی برای انتخاب مدل مناسب در کاربردهای مختلف باشد.

جدول ٤. تحلیل مقایسه‌ای چارچوب‌های بهینه‌سازی برای مدیریت پیوند آب ـ انرژی

مرجع	نویسندگان (خلاصه)	هدف اصلی پژوهش	روش‌شناسی/الگوریتم اصلی	نوآوری یا یافتهٔ کلیدی	حوزهٔ کاربرد
[۳۵]	یین و همکاران	بررسی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری یکپارچهٔ پیوند آب ـ انرژی.	بهینه‌سازی و DNN برای مدل‌سازی	تأکید بر لزوم بررسی یکپارچه پیوند و بهینه سازی چیدمان مزرعه بادی.	پیوند آب ـ انرژی
[۳۶]	ممقانی و همکاران	توسعهٔ یک مدل بهینه‌سازی برای پیوند آب ـ انرژی ـ انتشارات.	مدل بهینه‌سازی پایین به بالا	معرفی «شاخص پیوند آب ـ برق» برای ارزیابی کمی وابستگی متقابل.	پیوند آب ـ انرژی ـ انتشارات
[۳۸]	منصور و همکاران	ارائهٔ نوعی ابزار نرم‌افزاری برای بهینه‌سازی چندهدفه پیوند آب ـ انرژی–غذا (WEFN).	نرم‌افزار بهینه‌سازی (Python + Excel)	ایجاد یک ابزار در دسترس برای تحلیل سناریو و بده‌بستان‌های پیوند.	پیوند آب ـ انرژی ـ غذا (WEFN)
[۳۷]	منصور و همکاران	ارائه یک مدل کل‌نگر WEFN با در نظر گرفتن قیود متعدد.	بهینه‌سازی چندهدفه با GEKKO	نمایش چگونگی تأثیر قیود و اهداف بر تخصیص بهینه منابع.	مدل‌سازی WEFN
[۳۹]	دی مارتینو و همکاران	حل مشکل عدم قابلیت حل محاسباتی در مدل‌سازی WEFN با استفاده از مدل‌های جایگزین.	مدل‌های جایگزین (Models Surrogate)	غلبه بر پیچیدگی محاسباتی با استفاده از تقریب‌سازی و تکنیک‌های آزادسازی.	مدل‌سازی محاسباتی WEFN
[۴۰]	گودرزی و لی	شتاب‌دهی بهینه‌سازی آنی پیوند میکرو انرژی ـ آب ـ هیدروژن با یادگیری ماشین.	چارچوب MARO	حل سریع مسائل بهینه‌سازی MICP در مقیاس بزرگ برای کنترل آنی.	پیوند انرژی ـ آب ـ هیدروژن
[۴۱]	ژائو و همکاران	بهره‌برداری مقاوم دومرحله‌ای برای پیوند آب ـ انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت.	بهینه‌سازی توزیعی مقاوم	مدیریت ریسک ناشی از عدم قطعیت تجدیدپذیرها با استفاده از CVaR.	پیوند آب ـ انرژی (برق، گاز، آب)
[۴۲]	ژائو و همکاران	هم‌زمان‌سازی بهینه‌سازی پیوند آب ـ انرژی ـ کربن.	بهینه‌سازی توزیعی مقاوم	به حداقل رساندن هم‌زمان هزینه‌ها، انتشار کربن و مصرف آب.	پیوند آب ـ انرژی ـ کربن
[۴۳]	تلوکداری	بررسی تأثیر فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم بر پیوند انرژی ـ آب ـ ۲CO.	مدل‌سازی فرایند کسب وکار	درایوهای سرعت متغیر (VSD) تأثیر مثبت قابل توجهی بر کاهش مصرف انرژی و آب دارند.	شبکهٔ توزیع آب (WDN)
[۴۴]	هوانگ و همکاران	بررسی تأثیر فناوری‌های کم‌کربن (CCS) بر پیوند آب ـ انرژی.	مدل بهینه‌سازی تصادفی	CCS انتشار کربن را کاهش می‌دهد اما مصرف آب و انرژی را افزایش می‌دهد (off–Trade).	پیوند آب ـ انرژی با CCS
[۴۵]	ابوغالی و همکاران	بررسی امنیت سایبری پیوند آب ـ انرژی.	یادگیری عمیق (Deep Learning)	پیوند آب–انرژی یک هدف جذاب برای حملات مخرب است و نیاز به دفاع هوشمند دارد.	امنیت سایبری پیوند آب ـ انرژی

جدول ۵. مقایسهٔ مهم‌ترین مدل‌های هوش مصنوعی در سیستم‌های انرژی

مدل هوش مصنوعی	کاربرد اصلی	مزایا	معایب	مثال‌ها	RMSE	MAE	R²
ANN	تشخیص الگو، پیش‌بینی، طبقه‌بندی	قابلیت یادگیری غیرخطی، تطبیق‌پذیری بالا	نیاز به داده زیاد، ممکن است overfitting شود	Image recognition, Predictive maintenance	0.12	0.09	0.88
SVM	طبقه‌بندی و رگرسیون	دقت بالا در داده‌های با بعد بالا، عملکرد خوب با نمونه کوچک	کند برای داده‌های بزرگ، انتخاب کرنل مناسب مهم است	Text classification, Fault detection	0.15	0.11	0.85
Random Forest	طبقه‌بندی و رگرسیون	مقاوم در برابر overfitting، تفسیرپذیری نسبی	کند بودن برای داده‌های بسیار بزرگ، نیاز به حافظهٔ بالا	Energy consumption prediction, Risk assessment	0.1	0.08	0.9
CNN	پردازش تصویر و ویدئو	استخراج ویژگی خودکار، دقت بالا در تصاویر	نیاز به داده زیاد و قدرت پردازش بالا	Image recognition, Water quality monitoring	0.08	0.06	0.92
RNN/LSTM	داده‌های سری زمانی و توالی	بهترین عملکرد در داده‌های ترتیبی، حافظهٔ کوتاه‌مدت و بلندمدت	آموزش کند، حساس به gradient vanishing/polarization	Energy demand forecasting, Weather prediction	0.11	0.09	0.89
GA	بهینه‌سازی	قابلیت جست‌وجوی گسترده، حل مسائل پیچیدهٔ بهینه‌سازی	کند، نیاز به تنظیم پارامترها	Optimal scheduling, System design	0.2	0.15	0.78
Reinforcement Learning	کنترل و تصمیم‌گیری	یادگیری از تجربه، خودکارسازی تصمیمات پیچیده	نیاز به شبیه‌سازی، آموزش طولانی	Smart grid management, HVAC optimization	0.18	0.14	0.8
Hybrid AI	ترکیب چند مدل برای بهبود عملکرد	بهبود دقت و انعطاف‌پذیری، کاهش محدودیت‌های تک مدل	پیچیدگی پیاده‌سازی، نیاز به داده زیاد	Energy system optimization, Predictive maintenance with multi-source data	0.09	0.07	0.91

۳-۵. ابعاد اجتماعی، اقتصادی و سیاست‌گذاری ارکان چهارگانه

هوش مصنوعی اثرات گسترده‌ای بر جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی و سیاست‌گذاری دارد. از منظر اجتماعی، استفاده از AI می‌تواند برخی مشاغل سنتی در بخش انرژی را کاهش دهد، اما فرصت‌های شغلی جدید در زمینهٔ تحلیل داده، توسعهٔ الگوریتم و نگهداری شبکه‌های هوشمند ایجاد می‌کند و دسترسی عادلانه‌تر به انرژی را ممکن می‌سازد. همچنین، پذیرش عمومی و اعتماد کاربران به تصمیمات خودکار نیازمند شفافیت و توضیح‌پذیری الگوریتم‌ها است. از منظر اقتصادی، هوش مصنوعی با بهینه‌سازی تولید و انتقال انرژی، پیش‌بینی تقاضا و مدیریت خاموشی‌ها می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد، بهره‌وری را افزایش دهد و ریسک اقتصادی ناشی از اختلالات شبکه را کم کند. این فناوری همچنین موجب شکل‌گیری بازارهای نوین و افزایش سرمایه‌گذاری در پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر می‌شود. از بعد سیاست‌گذاری، برای بهره‌برداری موفق از AI نیازمند چارچوب قانونی مناسب، تدوین استانداردهای داده و پروتکل‌های هوشمند، و ایجاد مشوق‌های مالی برای توسعه شبکه‌های هوشمند هستیم.

تحلیل ابعاد اجتماعی، اقتصادی و سیاست‌گذاری چهار رکن بنیادین مطالعه حاضر به صورت زیر است [۴۹- ۴۶]:

۱. هوشمندسازی بازار انرژی از طریق تجارت الگوریتمی و سازوکارهای غیرمتمرکز

بعد اجتماعی: افزایش شفافیت و دسترسی به اطلاعات بازار، ایجاد فرصت‌های شغلی جدید در حوزهٔ تحلیل داده و توسعهٔ نرم‌افزارهای معاملاتی، اما نیازمند آموزش و توانمندسازی کاربران است.

بعد اقتصادی: بهبود کارایی بازار، کاهش هزینه‌های معاملات و نوسانات قیمتی، افزایش رقابت و تشویق سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر.

بعد سیاست‌گذاری: نیازمند تدوین قوانین تجارت الگوریتمی، استانداردهای امنیت سایبری و پروتکل‌های شفافیت در بازارهای غیرمتمرکز.

۲. **ارتقای تاب‌آوری شبکه با تشخیص و بازیابی سریع خطا**

بعد اجتماعی: کاهش اختلال در تامین انرژی و افزایش اعتماد عمومی به سیستم‌های هوشمند، اما نیازمند آموزش اپراتورها و پذیرش فناوری‌های نوین توسط جامعه است.

بعد اقتصادی: کاهش خسارات ناشی از خاموشی و اختلال شبکه، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و افزایش عمر مفید تجهیزات.

بعد سیاست‌گذاری: ایجاد استانداردهای امنیت و مدیریت بحران، تدوین پروتکل‌های واکنش سریع و تشویق به پیاده‌سازی شبکه‌های تاب‌آور.

۳. **بهینه‌سازی عملکرد شبکه از طریق مدیریت خودکار کیفیت توان**

بعد اجتماعی: بهبود کیفیت انرژی مصرفی برای صنایع و خانگی‌ها، کاهش نارضایتی عمومی و افزایش بهره‌وری انرژی در سطح جامعه.

بعد اقتصادی: کاهش تلفات انرژی، بهبود بهره‌وری شبکه و صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی.

بعد سیاست‌گذاری: تدوین مقررات کیفیت توان، استانداردهای تجهیزات هوشمند و ایجاد مشوق‌های سرمایه‌گذاری در تجهیزات کنترل کیفیت توان.

٤. **افزایش پایداری سیستمی با بهینه‌سازی پیوند آب ـ انرژی**

بعد اجتماعی: تأمین پایدار آب و انرژی برای جوامع، کاهش فشار بر منابع محدود و بهبود سلامت و رفاه جامعه.

بعد اقتصادی: کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای آبی، بهینه‌سازی هزینه‌های تولید و توزیع و کاهش ریسک اقتصادی ناشی از کمبود منابع آب و انرژی.

بعد سیاست‌گذاری: تدوین سیاست‌های هماهنگ آب و انرژی، ایجاد چارچوب‌های مدیریت یکپارچه منابع و تشویق به نوآوری در فناوری‌های صرفه‌جویی.

در مجموع، ترکیب این چهار رکن با رویکردی هوشمند و یکپارچه، نه‌تنها عملکرد شبکه‌های انرژی را بهبود می‌بخشد، بلکه موجب توسعهٔ اقتصادی، افزایش عدالت اجتماعی و تقویت سیاست‌گذاری‌های پایدار در بخش انرژی می‌شود.

۴. خلأ تحقیقاتی و راهکارهای ارائه‌شده

۴-۱. تجارت الگوریتمی در بازارهای انرژی

حوزهٔ تجارت الگوریتمی در بازارهای انرژی، با وجود حرکت سریع به سمت مدل‌های پیچیده، همچنان با چالش‌های بنیادینی روبه‌رو است که مسیر تحقیقات آینده را شکل می‌دهد. یکی از این شکاف‌های مهم، شکاف بین شبیه‌سازی و واقعیت[1] است. بسیاری از الگوریتم‌های پیشرفته، به‌ویژه آن‌هایی که مبتنی بر یادگیری تقویتی هستند، در محیط‌های شبیه‌سازی شده و ایده‌آل آموزش می‌بینند. عملکرد این عامل‌ها در مواجهه با نویز، عدم قطعیت‌های پیش‌بینی‌نشده و رفتار غیرمنطقی بازیگران در بازار واقعی، اغلب به‌شدت افت می‌کند. شکاف دیگر، ادغام ناکافی داده‌های چندوجهی[2] است. مدل‌های کنونی عمدتاً بر داده‌های ساختاریافته قیمت و حجم متکی هستند، در حالی که اطلاعات حیاتی در داده‌های بدون ساختار مانند اخبار ژئوپلیتیکی، تحلیل

---

[1] Sim-to-Real Gap
[2] Multi-Modal Data

احساسات در شبکه‌های اجتماعی، تصاویر ماهواره‌ای از ذخایر سوخت و تغییرات در اسناد نظارتی نهفته است. یک چارچوب یکپارچه برای همجوشی آنی این داده‌های متنوع وجود ندارد. علاوه بر این، مسائل اخلاقی و پایداری بازار یک حوزه تقریباً بکر است. این سؤال که چگونه می‌توان از تبانی صریح یا ضمنی گروهی از عامل‌های هوشمند معاملاتی برای دستکاری بازار جلوگیری کرد یا چگونه می‌توان از وقوع سقوط‌های آنی[1] ناشی از واکنش‌های آبشاری و هماهنگ آن‌ها پیشگیری کرد، یک چالش نظارتی و الگوریتمی بزرگ است.

برای عبور از این مرزها، راه‌حل‌ها باید به همان اندازه نوآورانه باشند. برای پر کردن شکاف بین شبیه‌سازی و واقعیت، می‌توان یک دوقلوی دیجیتال از بازار انرژی با اغتشاشات تخاصمی را توسعه داد. در این چارچوب، یک هوش مصنوعی مهاجم به طور مداوم تلاش می‌کند تا با ایجاد سناریوهای غیرمنتظره و شدید، ضعف‌های عامل معاملاتی را پیدا کند. عامل معاملاتی با آموزش دیدن در این محیط تخاصمی، برای مقابله با شرایط غیرمنتظره در دنیای واقعی بسیار مقاوم‌تر می‌شود. برای ادغام داده‌های چندوجهی، طراحی یک اوراکل معاملاتی مبتنی بر ترانسفورمر چندوجهی راهگشا خواهد بود. این معماری می‌تواند داده‌های متنی، عددی و تصویری را به یک فضای مفهومی مشترک ترجمه کرده و درکی جامع و عمیق از وضعیت بازار برای تصمیم‌گیری فراهم کند. برای پرداختن به دغدغه‌های اخلاقی، ایجاد یک جعبهٔ شنی نظارتی با هوش مصنوعی قابل تأیید پیشنهاد می‌شود. در این محیط شبیه‌سازی شده که توسط نهادهای نظارتی اداره می‌شود، عامل‌های هوشمند قبل از دریافت مجوز برای فعالیت در بازار واقعی، باید بتوانند ثابت کنند که منطق تصمیم‌گیری آن‌ها منجر به رفتارهای تبانی‌گرانه یا بی‌ثبات‌کننده نمی‌شود. این امر می‌تواند با استفاده از روش‌های صوری[2] برای تأیید رفتار الگوریتم محقق شود.

۴-۲. تشخیص سریع خطا و بازیابی شبکه

در زمینهٔ تشخیص خطا و بازیابی شبکه، با وجود دقت بالای مدل‌های هوش مصنوعی، چندین چالش ظریف اما حیاتی همچنان باقی است. نخستین شکاف، دشواری در تمایز بین خطاهای واقعی و رویدادهای حدی اما عادی است. یک مدل هوش مصنوعی ممکن است یک افزایش بار ناگهانی و شدید اما مجاز از سوی یک کارخانه بزرگ را با یک خطای اتصال کوتاه اشتباه بگیرد. افزایش ویژگی[3] مدل‌ها برای کاهش هشدارهای کاذب در چنین شرایطی یک چالش کلیدی است. شکاف دوم، یکپارچگی داده‌های سنسورها و حملات سایبر ـ فیزیکی است. مدل‌های تشخیص خطا به شدت به داده‌های دریافتی از PMUها و IEDها وابسته هستند. اگر این داده‌ها توسط یک حملهٔ سایبری دستکاری شوند، مدل نه تنها خطای فیزیکی را به اشتباه تشخیص می‌دهد، بلکه ممکن است اپراتور را به سمت یک اقدام کنترلی مخرب هدایت کند. فقدان مدل‌هایی که بتوانند به طور هم‌زمان وقوع خطا و سلامت داده‌های ورودی را اعتبارسنجی کنند، یک ضعف امنیتی بزرگ است. در نهایت، بهینه‌سازی توالی عملیات بازیابی یک چالش بزرگ است. اگرچه در مقالاتی مانند کارهای موریا و همکاران [۱۱] و میائو و همکاران [۱۲] به بازیابی خودکار پرداخته شده، اما یافتن توالی بهینه کلیدزنی برای بازیابی توان با در نظر گرفتن همزمان عواملی همچون اعزام تیم‌های عملیاتی، سلامت باقی‌مانده تجهیزات و اولویت مشترکین، یک مسئلهٔ بهینه‌سازی NP–hard است که اغلب به صورت ساده‌شده حل می‌شود.

برای پرداختن به این چالش‌ها، نیاز به رویکردهای نوآورانه‌ای است که فراتر از طبقه‌بندی الگوها بروند. برای افزایش دقت تشخیصی، می‌توان یک چارچوب عیب‌یابی خطا مبتنی بر استنتاج علّی[4] را توسعه داد. این رویکرد به جای یافتن صرف همبستگی‌ها، با استفاده از مدل‌های علّی، به دنبال یافتن علت ریشه‌ای یک ناهنجاری است و به این‌ترتیب می‌تواند بین خطاهای واقعی و رویدادهای عملیاتی پیچیده تمایز قائل شود. برای مقابله با تهدیدهای سایبری، پیاده‌سازی یک لایهٔ اعتبارسنجی سنسور مبتنی بر هوش مصنوعی با معماری اعتماد صفر[5] پیشنهاد می‌شود. در این معماری، سنسورهای همسایه به طور مداوم داده‌های یکدیگر را با استفاده از یک مکانیزم اجماع توزیع‌شده اعتبارسنجی می‌کنند و یک مدل هوش مصنوعی به دنبال ناهنجاری‌ها در

---

[1] Flash Crashes
[2] Formal Methods
[3] Specificity
[4] Causal Inference
[5] Zero-Trust

این الگوی اجماع می‌گردد تا هم خطاهای فیزیکی و هم حملات سایبری به سنسورها را شناسایی کند. برای بهینه‌سازی فرایند بازیابی، می‌توان یک برنامه‌ریز بازیابی ترکیبی الهام‌گرفته از کوانتوم را طراحی کرد. در این سیستم، یک عامل یادگیری تقویتی، استراتژی کلان و اعزام تیم‌ها را مدیریت می‌کند، اما مسئله پیچیده و ترکیباتی یافتن توالی بهینه کلیدزنی را برای یک کامپیوتر کوانتومی یا یک الگوریتم بهینه‌سازی الهام‌گرفته از کوانتوم فرموله‌بندی می‌کند تا در زمانی بسیار کوتاه‌تر از روش‌های کلاسیک، به یک راه‌حل نزدیک به بهینه دست یابد.

۴-۳. تحلیل خودکار کیفیت توان

در حوزهٔ تحلیل کیفیت توان (PQ)، پژوهش‌ها عمدتاً روی تشخیص و طبقه‌بندی اغتشاشات پس از وقوع متمرکز شده‌اند، که این امر چندین شکاف مهم را به جا گذاشته است. یک شکاف کلیدی، ضعف در پیش‌بینی پیشگیرانه کیفیت توان است. توانایی پیش‌بینی احتمال وقوع یک رویداد نامطلوب PQ در آینده (مانند افزایش هارمونیک‌ها) بر اساس پیش‌بینی بار و توپولوژی شبکه، به مراتب کمتر از تشخیص واکنشی آن توسعه یافته است. شکاف دوم، چالش در شناسایی دقیق منبع اغتشاش[1] است. زمانی که یک مشکل PQ تشخیص داده می‌شود، تعیین اینکه کدام بار غیرخطی یا کدام منبع تولید توزیع‌شده مسئول اصلی آن است، در یک شبکهٔ پیچیده بسیار دشوار است. این امر مانع از اقدامات اصلاحی هدفمند می‌شود. سومین شکاف، فقدان یک چارچوب کنترل یکپارچه کیفیت توان است. راه‌حل‌ها اغلب به صورت مجزا عمل می‌کنند؛ یک دستگاه هارمونیک‌ها را کاهش می‌دهد و دستگاه دیگری ولتاژ را تنظیم می‌کند. یک سیستم کنترل کل‌نگر که بتواند «پروفایل کیفیت توان» یک بخش از شبکه را به صورت یکپارچه و بهینه مدیریت کند، وجود ندارد.

برای حرکت به سمت مدیریت پیشرفته و پیشگیرانه کیفیت توان، می‌توان راه‌حل‌های نوآورانه‌ای را متصور شد. برای گذار از واکنش به پیشگیری، می‌توان یک موتور پیش‌بینی احتمالی کیفیت توان را طراحی کرد. این سیستم با استفاده از شبکه‌های عصبی بیزی، نه تنها بار را پیش‌بینی می‌کند، بلکه کل شکل موج ولتاژ و جریان در آینده را تخمین زده و یک پیش‌بینی احتمالی از شاخص‌های کلیدی PQ مانند THD ارائه می‌دهد. برای شناسایی دقیق منبع، رویکرد انگشت‌نگاری شکل موج با پردازش سیگنال روی گراف بسیار امیدوارکننده است. هر دستگاه الکتریکی یک «اثر انگشت» هارمونیکی منحصربه‌فرد روی شبکه باقی می‌گذارد. با استخراج این اثر انگشت‌ها از داده‌های فرکانس بالا و استفاده از پردازش سیگنال روی گراف، می‌توان مسیر انتشار این اغتشاشات را در شبکه ردیابی کرد و به منبع اصلی آن رسید. برای دستیابی به کنترل یکپارچه، می‌توان یک بازار توزیع‌شده خدمات کیفیت توان را ایجاد کرد. در این بازار محلی، اینورترهای هوشمند، فیلترهای اکتیو و حتی شارژرهای خودروهای الکتریکی می‌توانند خدمات PQ (مانند جذب توان راکتیو یا تزریق آنتی‌هارمونیک) را پیشنهاد دهند. یک بازارگردان هوشمند، این بازار را به صورت آنی تسویه کرده و کیفیت توان کل شبکه محلی را با کمترین هزینه بهینه می‌کند.

۴-۴. بهینه‌سازی پیوند آب ـ انرژی

حوزهٔ پیوند آب ـ انرژی، علی‌رغم اهمیت استراتژیک آن، با شکاف‌های مفهومی و عملی عمیقی روبه‌رو است. یک شکاف بزرگ، گسست بین مدل‌های سیاست‌گذاری و مدل‌های مهندسی است. مدل‌های سیاست‌گذاری در سطح کلان عمل می‌کنند، در حالی که مدل‌های بهینه‌سازی مهندسی روی بهره‌برداری از زیرساخت‌ها متمرکز هستند. یک چارچوب یکپارچه که بتواند یک تصمیم سیاست‌گذاری (مثلاً افزایش ۲۰ درصدی بازیافت آب) را به دستورات عملیاتی بهینه برای زیرساخت‌های مهندسی ترجمه کند، وجود ندارد. شکاف دیگر، نادیده گرفتن ابعاد اجتماعی و رفتاری در مدل‌های فنی ـ اقتصادی است. عواملی مانند پذیرش عمومی سیاست‌ها، رفتار کشاورزان در پاسخ به تخصیص آب و اولویت‌های سیاسی، که برای موفقیت هر سیاست در دنیای واقعی حیاتی هستند، معمولاً در مدل‌های بهینه‌سازی لحاظ نمی‌شوند. در نهایت، چالش عملی در یکپارچه‌سازی داده‌های آنی از منابع بسیار متنوع (سنسورهای جریان آب، کنتورهای برق، ایستگاه‌های هواشناسی) یک مانع بزرگ برای بهینه‌سازی آنی و دقیق پیوند است.

---

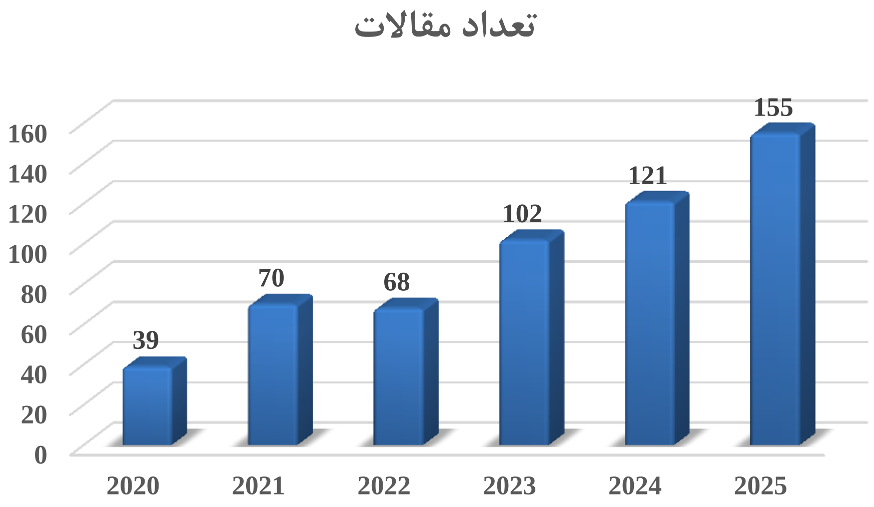
[1] Source Attribution

برای ایجاد یک مدیریت کل‌نگر و مؤثر برای پیوند آب ـ انرژی، راه‌حل‌ها باید این ابعاد مختلف را یکپارچه کنند. برای اتصال سیاست و مهندسی، می‌توان یک دوقلوی دیجیتال سلسله‌مراتبی برای پیوند را پیشنهاد داد. این سیستم دارای یک لایه سیاست‌گذاری برای تصمیم‌گیران و یک لایه عملیاتی مهندسی است و یک ماژول مترجم مبتنی بر هوش مصنوعی، اهداف کلان را به قیود بهینه برای لایه عملیاتی تبدیل می‌کند. برای گنجاندن عوامل انسانی، استفاده از مدل‌سازی مبتنی بر عامل[1] یک پارادایم قدرتمند است. این رویکرد به جای بهینه‌سازی جریان‌ها، تصمیمات فردی هزاران عامل (کشاورزان، خانوارها، صنایع) را شبیه‌سازی می‌کند تا پیامدهای نوظهور و سطح سیستمی سیاست‌ها را ارزیابی کند. برای حل چالش داده‌ها، ایجاد یک بستر داده فدرال برای پیوند با استفاده از IoT و بلاک‌چین می‌تواند راهگشا باشد. این یک فضای داده امن است که در آن نهادهای مختلف (شرکت‌های آب، برق و کشاورزی) می‌توانند داده‌های خود را بدون از دست دادن کنترل بر آن به اشتراک بگذارند (یادگیری فدرال)، و بلاک‌چین یک ردپای قابل حسابرسی و شفاف برای تمام تبادلات داده ایجاد می‌کند.

در این مطالعه، تمرکز بر بررسی توانمندی‌ها و کاربرد مدل‌های هوش مصنوعی در بهینه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد سیستم‌های انرژی بوده است و چارچوب کنترل خودمختار در عملیات حیاتی شبکه‌های قدرت به عنوان زمینه‌ای برای مطالعات آتی در نظر گرفته شده است. به همین دلیل، تعیین سطح مورد نیاز از هوش مصنوعی تبیین‌پذیر (XAI) برای واگذاری اختیارات تصمیم‌گیری به الگوریتم‌ها می‌تواند در ادامه تحقیقات توسعه یابد و مطالعه حاضر پایه‌ای برای چنین بررسی‌هایی فراهم می‌کند.

در زمینهٔ مصالحه‌ها (Trade-offs) بین اهداف متضاد، تمرکز بر تحلیل عملکرد اقتصادی و پیش‌بینی انرژی الگوریتم‌های هوش مصنوعی بوده است و اعمال محدودیت‌ها یا جریمه‌های حفاظتی برای تضمین تاب‌آوری فیزیکی شبکه، به عنوان راهبردهای کاربردی در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود. با بهره‌گیری از توابع هدف چندمعیاره و سیستم‌های جریمه‌ای، امکان تعادل میان بهینه‌سازی اقتصادی و الزامات ایمنی فراهم می‌شود. به این‌ترتیب، مطالعه حاضر بستری برای ارزیابی توانمندی الگوریتم‌ها و شناسایی مسیرهای توسعه در کاربردهای حیاتی فراهم می‌کند.

برای بررسی روند انتشارات در حوزهٔ هوش مصنوعی در سیستم‌های انرژی، یکی از مجلات مهم و مرتبط با این حوزه با نام *Energy and AI* و ضریب تأثیر ۹/۶ انتخاب شده است. تعداد مقالات منتشرشده از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ به‌ترتیب ۳۹، ۷۰، ۶۸، ۱۰۲، ۱۲۱ و ۱۵۵ بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تعداد انتشارات طی این دوره بیش از ۳۹۷ درصد افزایش یافته است و روند صعودی واضحی را نشان می‌دهد (شکل ۱). این تحلیل به درک بهتر روند تحقیقاتی و تمرکز موضوعی در این حوزه کمک می‌کند و زمینه را برای شناسایی شکاف‌ها و مسیرهای پژوهشی آینده فراهم می‌آورد.



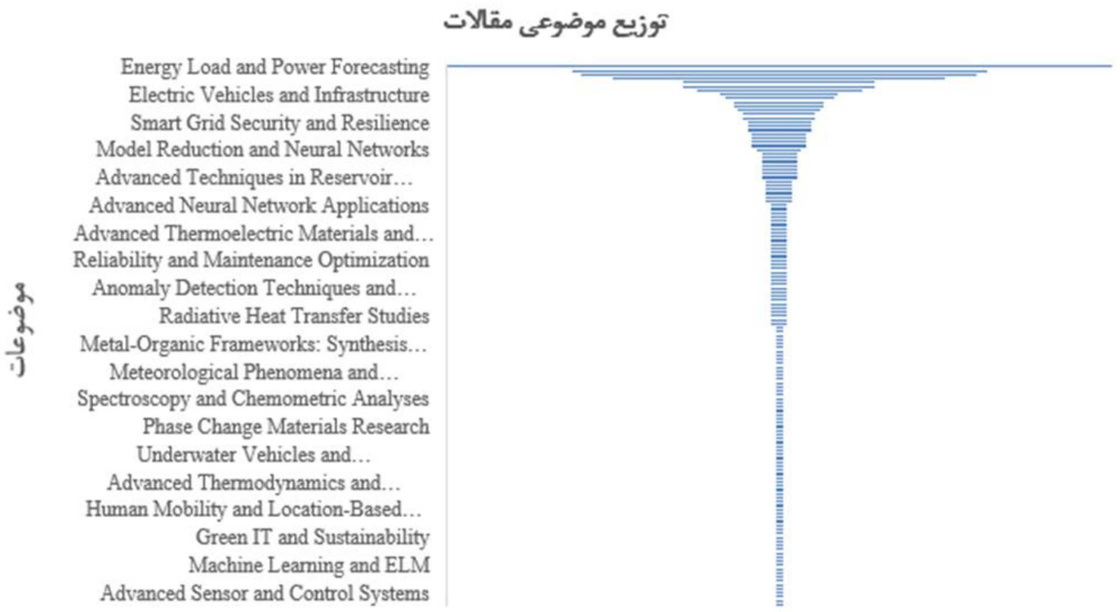
شکل ۱. روند انتشار مقالات مرتبط با هوش مصنوعی در سیستم‌های انرژی در مجلهٔ Energy and AI از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵.

---

[1] Agent-Based Modeling

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بیشترین تعداد مقالات به موضوعات پیش‌بینی بار و توان انرژی (۷۲ مقاله)، تحقیقات مربوط به باتری‌های پیشرفته (۴۵ مقاله) و مدیریت هوشمند شبکه انرژی (۴۳ مقاله) اختصاص دارد. سایر حوزه‌های مهم شامل سلول‌های سوختی و مواد مرتبط (۳۶ مقاله) و بهینه‌سازی ساختمان و راحتی انرژی (۲۱ مقاله) هستند.

توزیع تعداد مقالات نشان می‌دهد پژوهش‌ها عمدتاً روی بهبود کارایی و تاب‌آوری شبکه‌های انرژی، استفاده از منابع تجدیدپذیر، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها و سامانه‌های انرژی ـ آب تمرکز دارند. همچنین، موضوعات جدیدتر مانند هوش مصنوعی در مواد و یادگیری ماشین برای تشخیص خطا[1] و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی یکپارچه[2]، گرایش به تحقیق در جهت هوشمندسازی و خودکارسازی سیستم‌ها را نشان می‌دهد. به طور کلی، این داده‌ها تصویر روشنی از تمرکز جامعهٔ علمی بر حوزه‌های کاربردی و فناوری‌های نوظهور در همگرایی انرژی و هوش مصنوعی ارائه می‌کند و می‌تواند مبنای تحلیل روندهای پژوهشی آینده قرار گیرد.



شکل ۲. توزیع تعداد مقالات منتشرشده بر اساس موضوعات اصلی در مجلهٔ Energy and AI از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵.

۵. نتیجه‌گیری و بحث تحلیلی

این پژوهش مروری، یک تحلیل جامع و چندوجهی از کاربردهای تحول‌آفرین هوش مصنوعی در بازتعریف کامل زنجیرهٔ ارزش انرژی ارائه داد. با کاوش عمیق در چهار حوزهٔ محوری و درهم‌تنیده تجارت الگوریتمی، تشخیص و بازیابی خطا، تحلیل کیفیت توان، و بهینه‌سازی پیوند آب ـ انرژی، این مقاله نشان داد هوش مصنوعی فقط مجموعه‌ای از ابزارهای بهینه‌سازی مجزا نیست، بلکه در حال ایجاد یک پارادایم مدیریتی یکپارچه و هوشمند است که زیربنای شبکه‌های انرژی آینده را تشکیل می‌دهد. یافته‌های کلیدی این تحقیق را می‌توان در چند گزارهٔ اصلی خلاصه کرد:

در حوزهٔ بازارهای انرژی، هوش مصنوعی با معرفی مدل‌های تجارت الگوریتمی پیشرفته، ساختارهای غیرمتمرکز همتابه‌همتا و ادغام با فناوری‌هایی همچون بلاک‌چین و محاسبات کوانتومی، در حال افزایش کارایی، شفافیت و نقدینگی است. هم‌زمان، در لایهٔ فیزیکی، الگوریتم‌های یادگیری عمیق و سیستم‌های چندعاملی، با تشخیص و بازیابی سریع خطا، تاب‌آوری و قابلیت اطمینان شبکه را به سطوح بی‌سابقه‌ای ارتقا می‌دهند و مسیر را به سوی سیستم‌های کاملاً خودترمیم هموار می‌سازند. این دو حوزه در یک هم‌افزایی مستقیم عمل می‌کنند؛ یک بازار کارآمد به یک شبکه قابل اعتماد متکی است و یک شبکهٔ تاب‌آور، بستر

---

[1] Machine Fault Diagnosis
[2] Integrated Energy Systems Optimization

لازم برای اجرای بهینه تصمیمات بازار را فراهم می‌کند. فراتر از پایداری، هوش مصنوعی به بهبود کیفیت توان به عنوان یک شاخص عملکردی حیاتی می‌پردازد. با استفاده از مدل‌های ترکیبی مانند GRU–CNN برای طبقه‌بندی دقیق اغتشاشات و به‌کارگیری کنترلرهای هوشمند برای کاهش فعالانهٔ هارمونیک‌ها، AI تضمین می‌کند که انرژی تحویلی با استانداردهای مورد نیاز تجهیزات حساس مدرن، از جمله وسایل نقلیهٔ الکتریکی، مطابقت دارد. این امر به طور مستقیم به افزایش طول عمر دارایی‌ها و بهره‌وری کلی سیستم منجر می‌شود. در بالاترین سطح تحلیل، این پژوهش نشان داد هوش مصنوعی با ارائهٔ چارچوب‌های بهینه‌سازی مقاوم و چندهدفه، قادر به مدیریت پیچیدگی‌های پیوند آب ـ انرژی است. با در نظر گرفتن هم‌زمان عدم قطعیت‌های ناشی از منابع تجدیدپذیر، اهداف اقتصادی و ریسک‌های امنیتی، AI به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا بده‌بستان‌های بنیادین بین این منابع حیاتی را درک کرده و به سمت یک توسعهٔ پایدار و امن حرکت کنند. با وجود این پیشرفت‌های چشمگیر، یکپارچه‌سازی این سیستم‌های هوشمند، چالش‌های جدید و پیچیده‌ای را به وجود می‌آورد. یافتن تعادل بهینه بین کارایی اقتصادی و تاب‌آوری فیزیکی یک چالش کلیدی است؛ بهینه‌سازی یک بازار برای حداکثر کارایی ممکن است شکنندگی سیستم را افزایش دهد. هم‌زمان، با هوشمندتر شدن سیستم، سطوح حمله برای تهدیدهای سایبری نیز افزایش می‌یابد و امنیت باید به عنوان یک ویژگی ذاتی در تمام لایه‌ها لحاظ شود. چالش‌های دیگری مانند: شکاف بین شبیه‌سازی و واقعیت، مسائل اخلاقی در بازارهای خودکار و عدم تطابق اهداف بین لایه‌های مختلف (اقتصادی، فیزیکی، استراتژیک) نیز موانع کلیدی هستند. در نهایت، نیاز مبرم به هوش مصنوعی قابل توضیح برای جلب اعتماد اپراتورها و رگولاتورها، یک ضرورت بنیادین برای پذیرش عملیاتی این فناوری‌ها است.

در نهایت، این مقاله این چشم‌انداز را ترسیم می‌کند که آیندهٔ صنعت انرژی در گرو توسعهٔ یک سیستم عصبی مرکزی هوشمند، خودگردان و تطبیق‌پذیر برای شبکه‌های قدرت است. این سیستم نه تنها به بهره‌برداری بهینه از زیرساخت‌های موجود کمک می‌کند، بلکه گذار به یک اکوسیستم انرژی کاملاً غیرمتمرکز، کربن‌زدایی‌شده و دموکراتیک را تسهیل می‌کند. تحقق این چشم‌انداز نیازمند تلاش هماهنگ محققان، مهندسان، سیاست‌گذاران و صنعت برای هدایت این فناوری قدرتمند به سوی آینده ای پایدار، امن و عادلانه است.

منابع

[1] Rojek I, Mroziński A, Kotlarz P, Macko M, Mikołajewski D. AI-based computational model in sustainable transformation of energy markets. Energies. 2023 Dec 14;16(24):8059.

[2] Szczepaniuk H, Szczepaniuk EK. Applications of artificial intelligence algorithms in the energy sector. Energies. 2022 Dec 28;16(1):347.

[3] Alkkhayat AH, Jaisudha J, Nazira I, Misra N, Durgadevi G, Kumar RS, Subhash SG. AI-Driven Energy Trading Platforms: Market Dynamics and Challenges. InE3S Web of Conferences 2024 (Vol. 540, p. 07001). EDP Sciences.

[4] Wu J, Zhu W, Xu Y, Shu K, Yang W. Computer-Aided Quantum Algorithms for Real-Time Energy Market Trading. IEEE Access. 2025 Mar 20.

[5] Fiemotongha JE, Igwe AN, Ewim CP, Onukwulu EC. Mitigating market volatility: Advanced techniques for enhancing stability and profitability in energy commodities trading. International Journal of Management and Organizational Research. 2024;3(1):131-48.

[6] Khorasany M, Mishra Y, Ledwich G. A decentralized bilateral energy trading system for peer-to-peer electricity markets. IEEE Transactions on industrial Electronics. 2019 Jul 31;67(6):4646-57.

[7] Zahraoui, Y., Korõtko, T., Rosin, A., Zidane, T. E. K., & Mekhilef, S. (2024). A real-time simulation for P2P energy trading using a distributed algorithm. IEEE Access, 12, 44135-44146.

[8] Onukwulu EC, Fiemotongha JE, Igwe AN, Paul-Mikki C. The role of blockchain and AI in the future of energy trading: A technological perspective on transforming the oil & gas industry by 2025. Methodology. 2023;173:1-5.

[9] Esmat A, de Vos M, Ghiassi-Farrokhfal Y, Palensky P, Epema D. A novel decentralized platform for peer-to-peer energy trading market with blockchain technology. Applied Energy. 2021 Jan 15;282:116123.

[10] Zhang N, Yan J, Hu C, Sun Q, Yang L, Gao DW, Guerrero JM, Li Y. Price-matching-based regional energy market with hierarchical reinforcement learning algorithm. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2024 May 23;20(9):11103-14.

[11] Sun Q, Wang X, Liu Z, Mirsaeidi S, He J, Pei W. Multi-agent energy management optimization for integrated energy systems under the energy and carbon co-trading market. Applied Energy. 2022 Oct 15;324:119646.

[12] Li Z, Wu L, Xu Y, Wang L, Yang N. Distributed tri-layer risk-averse stochastic game approach for energy trading among multi-energy microgrids. Applied Energy. 2023 Feb 1;331:120282.

[13] Goyal G, Salsabil IT, Kumar A, Ukey M. AI-Driven Fault Detection and Diagnosis in Smart Grids for Enhanced Power System Reliability. J Inf Syst Eng Manag. 2025.

[14] A. Upadhyay, “Investigate Advanced Techniques for Power System Protection, Fault Detection, and Restoration to Enhance the Reliability and Resilience of Electrical Grids,” *INTERANTIONAL J. Sci. Res. Eng. Manag.*, 2025, doi: 10.55041/ijsrem41405.

[15] Almasoudi FM. Enhancing power grid resilience through real-time fault detection and remediation using advanced hybrid machine learning models. Sustainability. 2023 May 21;15(10):8348.

[16] Bose BK. Artificial intelligence techniques in smart grid and renewable energy systems—Some example applications. Proceedings of the IEEE. 2017 Oct 19;105(11):2262-73.

[17] Rana S. AI-driven fault detection and predictive maintenance in electrical power systems: A systematic review of data-driven approaches, digital twins, and self-healing grids. American Journal of Advanced Technology and Engineering Solutions. 2025 Feb 3;1(01):258-89.

[18] G. N. A. Yirenkyi, E. Asare, D. N. Amakye, L. A. Tetteh, A. A. Mensah, and A. E. Konglo, “Optimized smart grid fault detection model using gradient boosting machines,” *World J. Adv. Eng. Technol. Sci.*, 2025, doi: 10.30574/wjaets.2025.15.1.0264.

[19] Fezaa LH, Alkhayyat A, Chohan JS, Kumar R, Kumar J, Bhosle N. Advanced AI Techniques for Grid-Connected Renewable Energy Systems. In2024 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT) 2024 Nov 7 (pp. 38-43). IEEE.

[20] Aryan BK, Sobhana O, Prabhakar GC, Reddy NA. Fault detection and classification in micro grid using AI technique. In2022 International Conference on Recent Trends in Microelectronics, Automation, Computing and Communications Systems (ICMACC) 2022 Dec 28 (pp. 1-6). IEEE.

[21] S. Sayuti, H. Pakka, A. Syarifuddin, M. Mappeasse, and W. Wisanty, “Hybrid Systems for Energy Distribution and Telecommunication Reliability in Smart Grids,” *Int. J. Electr. Eng. Intell. Comput.*, 2025, doi: 10.33387/ijeeic.v2i1.9520.

[22] Sun L, Muguira L, Jiménez J, Lázaro J, Yong W. High performance platform to detect faults in the Smart Grid by Artificial Intelligence inference. IEEE Transactions on Smart Grid. 2023 Apr 27;15(1):504-12.

[23] Maurya PK. Self-Healing Grids: AI Techniques for Automatic Restoration after Outages. Power System Technology. 2024;48(1):494-510.

[24] Miao Z, Song W, Sun Y, Zhao J. Rapid power restoration technology for distribution network faults based on minimum network loss. InFourth International Conference on Testing Technology and Automation Engineering (TTAE 2024) 2024 Dec 12 (Vol. 13439, pp. 289-294). SPIE.

[25] W. Hu, G. Zhang, Z. Zhang, S. Abulanwar, and F. Blaabjerg, “AI for Power Electronics and Renewable Energy Systems,” 2024, doi: 10.1049/pbpo242e.

[26] Habib MA, Arik MS, Mostakim MA. AI-Driven Power Quality Analytics and Improvement of Grid Connected Solar Energy Systems. Journal of Artificial Intelligence General science (JAIGS) ISSN: 3006-4023. 2024;7(01):213-28.

[27] Wang S, Chen H. A novel deep learning method for the classification of power quality disturbances using deep convolutional neural network. Applied energy. 2019 Feb 1;235:1126-40.

[28] Yiğit E, Özkaya U, Öztürk Ş, Singh D, Gritli H. Automatic detection of power quality disturbance using convolutional neural network structure with gated recurrent unit. Mobile Information Systems. 2021;2021(1):7917500.

[29] Pandey AK, Tiwari P, Nishad DK. Advanced Energy Flow and Power Quality Management in a Wind-PV-Battery Microgrid: AI-Driven Modelling and Control. In2024 International Conference on Signal Processing and Advance Research in Computing (SPARC) 2024 Sep 12 (Vol. 1, pp. 1-6). IEEE.

[30] L. Kumar, V. Kumar, and V. Kumar, “Analysis of AI Used in Power Quality Improvement of MPPT Grid Connected PV System,” *INTERANTIONAL J. Sci. Res. Eng. Manag.*, 2024, doi: 10.55041/ijsrem36597.

[31] Zjavka L. Power quality approximation for household equipment load combinations using a stepwise growth in input parameters of AI models. Scientific Reports. 2022 Nov 8;12(1):19025.

[32] Zjavka L. Power quality statistical predictions based on differential, deep and probabilistic learning using off-grid and meteo data in 24-hour horizon. International journal of energy research. 2022 Jun 25;46(8):10182-96.

[33] Lee H, Lim H, Lee B. Explainable AI-based approaches for power quality prediction in distribution networks considering the uncertainty of renewable energy. InIET Conference Proceedings CP823 2023 Jun 12 (Vol. 2023, No. 6, pp. 584-588). Stevenage, UK: The Institution of Engineering and Technology.

[34] Devarajan C, Sujatha S, Sumithra J, Kavitha VR, Jeyanthi P, Pandi VS. Improvement of Industrial Applications with AI-Powered Power Quality Monitoring in Electric Vehicles: Maximizing Smart Energy Management and Predictive Analytics. In2024 IEEE 11th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON) 2024 Nov 29 (pp. 1-6). IEEE.

[35] Yin X, Wang F, Zhao Z. Coupled complementary operation and optimal planning of energy-water nexus synergies: Balancing water demand and renewable energy production. Renewable Energy. 2024 Dec 1;237:121836.

[36] Mamaghani FA, Omidvar B, Avami A, Nabi-Bidhendi G. An optimal integrated power and water supply planning model considering Water-Energy-Emission nexus. Energy Conversion and Management. 2023 Feb 1;277:116595.

[37] Mansour F, Al-Hindi M, Abou Najm M, Yassine A. Multi-objective optimization for comprehensive water, energy, food nexus modeling. Sustainable Production and Consumption. 2023 Jun 1;38:295-311.

[38] Mansour F, Al-Hindi M, Abou Najm M, Yassine A. The water energy food nexus: A multi-objective optimization tool. Computers & Chemical Engineering. 2024 Aug 1;187:108718.

[39] Di Martino M, Linke P, Pistikopoulos EN. Overcoming modeling and computational complexity challenges in food–energy–water nexus optimization. Computers & Chemical Engineering. 2025 Jan 1;192:108902.

[40] Goodarzi M, Li Q. Machine Learning-Accelerated Method for Real-Time Optimization of Micro Energy-Water-Hydrogen Nexus. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2024 Nov 13.

[41] Dell’Orto A, Trois C. Double-stage anaerobic digestion for biohydrogen production: A strategy for organic waste diversion and emission reduction in a South African municipality. Sustainability. 2024 Aug 22;16(16):7200.

[42] Zhao P, Gu C, Cao Z, Ai Q, Xiang Y, Ding T, Lu X, Chen X, Li S. Water-energy nexus management for power systems. IEEE Transactions on Power Systems. 2020 Nov 13;36(3):2542-54.

[43] Munsamy M, Telukdarie A. Optimising the energy-water-CO2 nexus of a water distribution network. Cleaner Engineering and Technology. 2022 Dec 1;11:100574.

[44] Huang J, Tan Q, Zhang T, Wang S. Energy-water nexus in low-carbon electric power systems: A simulation-based inexact optimization model. Journal of Environmental Management. 2023 Jul 15;338:117744.

[45] Abughali A, Alansari M, Al-Sumaiti AS. Ai driven approach for detecting false data injection attacks targeting water-energy nexus. In2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT) 2023 Mar 11 (pp. 1-6). IEEE.

[46] Allah Rabbi Shirazi MA. Idea generation and examination of environmental challenges of floating solar photovoltaic power plants on wetlands and its economic advantage for local communities. J Sustain Energy Syst. 2024;3(1):39–51. doi:10.22059/ses.2024.377595.1070.

[47] Ji L, Huang X. Analysis of social governance in energy-oriented cities based on artificial intelligence. Energy Reports. 2022 Nov 1;8:11151-60.

[48] Moaven M, Allahrabbi Shirazi M, Ghodusinejad MH. Systematic Analysis of the Impact of Life Cycle Assessment of Materials on Urban Heat Island Mitigation: A Path Toward Sustainable Urban Policy Using the PRISMA Method. Urban Development Policy Making. 2025 Apr 4;2(1):95-110.

[49] Jin D, Ocone R, Jiao K, Xuan J. Energy and AI. Energy and AI. 2020 Aug;1:100002.