The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems

Online ISSN: 2980-8693

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

An Innovative Hybrid Model for Determining Grid Stability and Electrical Energy Alignment in the Industrial Sector Using a Data-Driven Machine Learning Approach

Ali Alam[1] | Mahsa Pishdar[2*] | Mohamad Reza Fathi[3]

1. PhD Candidate in Systems Management, Faculty of Management, College of Farabi, University of Tehran, Qom, Iran. Email: alialam61@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Industrial Management and Technology, Faculty of Management, College of Farabi, University of Tehran, Qom, Iran. Email: mahsa.pishdar@ut.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Industrial Management and Technology, Faculty of Management, Colleg of Farabi, University of Tehran, Qom, Iran. Email: reza.fathi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received: 22 April 2026
Revised: 23 June 2026
Accepted: 24 August 2026
Published Online: 01 January 2027

Keywords:
Data-driven machine learning,
Sustainability,
Energy balance,
Renewable electric energy.

ABSTRACT

Given the necessity of transitioning to renewable energies and the importance of the stability of the national power grid, this study was conducted with the aim of analyzing the quantitative indicators affecting the alignment of electrical energy generation and consumption in the industrial sector. The main innovation of the paper is the presentation of a data-driven analytical platform based on intelligent models, which bridges the gap between the theoretical foundations of sustainable energy and the analysis of real data. In this study, a combination of classification and clustering algorithms, including Random Forest, Support Vector Machine, and K-Means clustering, was used. Furthermore, to improve validation, two hybrid models, including Random Forest–Support Vector Machine and Clustering–Support Vector Machine, were developed using the Python software environment and hyperparameter tuning. The quantitative data examined include electrical energy consumption in the industrial sector, renewable energy generation, electricity price, and total electricity consumption in the country. The results show that renewable energy generation has followed an increasing trend, and that rising energy prices have encouraged industries to move toward on-site electricity generation at factories. The results of clustering into five clusters also indicate proportional growth in renewable energy generation, such that its daily generation accounts for at least ten percent of the country's electricity consumption. Based on the electrical energy alignment equation, solutions such as time-based pricing, smart energy management, investment in electricity storage, and the implementation of a carbon tax are proposed. By increasing the accuracy of big energy data analysis, this paper provides an operational roadmap for power grid sustainability and the direct participation of industries in clean energy generation.

Cite this article: Alam, A.; Pishdar, M. & Fathi, M. R. (2027). An Innovative Hybrid Model for Determining Grid Stability and Electrical Energy Alignment in the Industrial Sector Using a Data-Driven Machine Learning Approach. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 6 (1), 65-86. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.415044.1247

© Authors retain the copyright and full publishing rights.
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.415044.1247

1. Introduction

The Islamic Republic of Iran faces significant challenges in its transition toward more sustainable energy sources, particularly in the field of electricity generation. The imbalance between the generation and consumption of electrical energy in the industrial sector stands as one of the most critical contemporary challenges in the country. The lack of timely target-setting and strategic

planning in deploying renewable energies has deprived the nation of utilizing these boundless divine resources. Grid balancing plays a pivotal role in ensuring industrial business continuity, sustaining the digital economy, and integrating diverse renewable energy sources into the national power grid, thereby making electrical energy alignment a strategic priority for the country. The primary consequence of this issue is the worsening of the electrical energy imbalance in the coming years. Indeed, failing to provide appropriate and optimal solutions will lead to disruptions in the supply and distribution of electricity to industries. A prolonged electricity imbalance diminishes the production capacity of industrial units; in the short term, this imbalance reduces factory performance and capacity, in the medium term, it decreases profitability and revenue generation, and in the long term, it culminates in bankruptcy and the closure of manufacturing plants.

2. Research Methodology

Based on Saunders' research onion, the methodology of the present study is grounded in the positivist paradigm. Given the applied nature of this research, an inductive approach is adopted as the strategy of this paper. Specifically, in the quantitative analysis section, machine learning algorithms and methods are utilized to inductively derive granular rules and results from the analysis of aggregate data. The scope of the study encompasses literature reviews and empirical data. Machine learning is a vital component of the growing field of data mining, wherein uncovering relationships, patterns, or anomalies in large datasets can lead to accurate predictions. The empirical quantitative data has been extracted from the official website of Iran Grid Management Company (IGMC) across four consecutive 1.5-year periods. The methodologies employed include classification and clustering algorithms, specifically utilizing Random Forest, Support Vector Machine (SVM), and K-Means clustering. Furthermore, to improve model validation metrics, two hybrid models were proposed for quantitative data—such as industrial electricity consumption, renewable energy generation capacity, electricity pricing, and total national electricity consumption: the first hybrid model combines Random Forest and Support Vector Machine, while the second hybrid model integrates Clustering and Support Vector Machine. Numerical analysis was subsequently performed based on these hybrid models.

3. Results and Findings

The analysis of the energy consumption model was conducted using Random Forest classification, taking into account the characteristics of industrial consumption data, labeled by the percentage of renewable energy generation and the respective fiscal years. In this classification, a state where renewable energy accounts for more than 10% of total electrical energy consumption is labeled as "desirable," whereas any value below this threshold is labeled as "undesirable."

- **A.** The classification of electrical energy consumption in the industrial sector spans from low-consumption to ultra-high-consumption levels. The empirical results indicate that the actual consumption of industrial units currently falls within the first and second categories, representing low and moderate consumption.
- **B.** According to the classification of renewable energy in the industrial sector, the share of renewable electricity generated by industries for their own consumption remains at a low-to-moderate level. Consequently, structured programs must be developed by both the industrial sector and relevant government bodies to enable industries to generate renewable electricity for their own operational needs. The data analysis reveals that industrial units currently do not independently generate renewable electricity on a large or significant scale, with only a few industrial units and manufacturing plants having established renewable energy farms in the country.
- **C.** Given the country's economic structure and the necessity of supporting businesses through the continuation of energy subsidy packages, electrical energy pricing could vary based on the generation source. Furthermore, with the ongoing participation of large industrial units in renewable electricity generation, time-of-use (TOU) pricing or discounted tariff schemes could be effectively implemented in the industrial sector.

4. Discussion and Conclusion

The primary challenge of the global—and indeed Iranian—energy transition toward renewable sources is identifying the correct path to meet the growing demand for energy at an affordable cost and

through low-carbon options. Nonetheless, balancing and aligning the electrical energy used in industrial units is of paramount importance, as it is closely tied to the survival and continuity of businesses. The stability of the electrical energy grid is a fundamental prerequisite for the development and industrial circulation of the country. Therefore, according to the electrical energy alignment equation, industrial units have taken steps toward generating renewable electricity. This investment increases renewable energy production, allowing the industrial sector to utilize this electricity and feed the surplus back into the national grid.

This paper proposes time-of-use pricing, investing in the practical application of renewable energy generation and storage, determining methods to reduce fossil fuel consumption for electricity generation, and adopting carbon footprint reduction strategies, environmental protection, and smart conservation. New solutions based on economic principles, industrial energy management, data pattern analysis, and the electrical energy alignment equation are presented. Accordingly, a sustainable economic model for managing the electrical energy consumption of industries through a renewable and clean energy approach in the country can be structured as follows:

Time-of-Use (TOU) Pricing: This is an effective economic method for market management and regulating consumer behavior. As a result of dynamic or TOU pricing, industrial units can reduce their energy costs by shifting their consumption to off-peak hours, which ultimately relieves pressure on the power grid during peak hours. Moreover, the alignment and stability of renewable energy generation can be established through the installation of solar panels.

Demand Response (DR) Agreements: These contracts assist in managing consumption patterns. Under this model, the industrial sector agrees with the distribution grid management to reduce its consumption during critical peak hours in exchange for electricity discounts, cash incentives (such as lottery prizes), or electricity purchase credits. Demand-side management focuses heavily on consumption optimization; flexibility in production scheduling and adhering to consumption principles—such as mitigating the "duck curve"—will prove effective in demand management.

Direct Industrial Application: This serves as a critical solution. Heavy and key industries such as steel, cement, and petrochemicals can establish dedicated solar power plants, private wind farms, or hybrid solar-gas power plants. The economic advantage of these methods lies in the fact that the cost of renewable electricity in Iran is highly competitive, reducing dependence on the national grid, eliminating blackouts in industrial and manufacturing sectors, and ensuring the long-term cost-effectiveness and predictability of electricity expenses. Hybrid solar-thermal systems, as well as integrated complexes combining various renewable energies and small-scale power plants, can serve as effective solutions for sustainable industrial electricity and resolving the electricity generation imbalance. This investment can be facilitated through non-governmental organizations (NGOs) as well as domestic or foreign investment companies.

Smart Energy Management Systems (SEMS): These systems analyze the total energy consumption of a factory and automatically drive operations toward higher efficiency. In this regard, utilizing optimization models in the design of new factories and making them smart through the Internet of Things (IoT), digital twins, and cloud computing can contribute to reducing electricity consumption. Such systems automatically shut down non-essential equipment during high-tariff hours and coordinate battery storage charging with renewable energy consumption.

Green Energy Supply Chain: Industrial and manufacturing units are moving toward clean energy with a greater focus on emission reduction. Taxation on fossil fuel consumption serves as an incentive for industries to adopt renewable energy. These tax revenues can be legally allocated within the national budget to offset environmental damages, which necessarily requires the active participation of employers and state-owned industrial sectors in this movement.

Ultimately, the development of renewable energy power plants is considered the primary and fundamental step in balancing electricity generation and consumption. Regulatory and policy-making organizations in the country, such as the organization responsible for electrical energy efficiency and renewable energy, play a key and decisive role in defining core strategies and providing the national roadmap in this domain.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

مدل ترکیبی نوآورانهٔ تعیین پایداری شبکه و همترازی انرژی الکتریکی در بخش صنعتی با رویکرد یادگیری ماشین داده‌محور

علی عالم[۱] | مهسا پیشدار[۲*] | محمدرضا فتحی[۳]

۱. دانشجوی دکتری مدیریت سیستم‌ها، دانشکدهٔ مدیریت و حسابداری، دانشکدگان فارابی، دانشگاه تهران، قم، ایران. رایانامه: alialam61@gmail.com

۲. نویسندهٔ مسئول، استادیار گروه مدیریت صنعتی و فناوری، دانشکدهٔ مدیریت و حسابداری دانشکدگان فارابی، دانشگاه تهران، قم، ایران. رایانامه: mahsa.pishdar@ut.ac.ir

۳. دانشیار گروه مدیریت صنعتی و فناوری، دانشکدهٔ مدیریت و حسابداری دانشکدگان فارابی، دانشگاه تهران، قم، ایران. رایانامه: reza.fathi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۱۱

کلیدواژه:
انرژی الکتریکی تجدیدپذیر،
پایداری،
همترازی انرژی،
یادگیری ماشین داده‌محور.

چکیده

با توجه به ضرورت گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر و اهمیت پایداری شبکهٔ برق سراسری، این پژوهش با هدف تحلیل شاخص‌های کمّی مؤثر بر همترازی تولید و مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعت انجام شده است. نوآوری اصلی مقاله، ارائهٔ نوعی پلتفرم تحلیل داده‌محور مبتنی بر مدل‌های هوشمند است که شکاف میان مبانی نظری انرژی پایدار و تحلیل داده‌های واقعی را پوشش می‌دهد. در این مطالعه، از ترکیب الگوریتم‌های طبقه‌بندی و خوشه‌بندی شامل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و خوشه‌بندی K-Means استفاده شد. همچنین برای بهبود اعتبارسنجی، دو مدل ترکیبی شامل جنگل تصادفی ـ ماشین بردار پشتیبان و خوشه‌بندی ـ ماشین بردار پشتیبان با استفاده از محیط پایتون و تنظیم فراپارامترها توسعه یافت. داده‌های کمّی مورد بررسی شامل مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعتی، تولید انرژی تجدیدپذیر، قیمت انرژی الکتریکی و مصرف کل برق کشور است. نتایج نشان می‌دهد تولید انرژی تجدیدپذیر روندی افزایشی داشته و افزایش قیمت انرژی، صنایع را به سمت تولید برق در محل کارخانه سوق داده است. نتایج خوشه‌بندی در پنج خوشه نیز بیانگر رشد متناسب تولید انرژی تجدیدپذیر است؛ به گونه‌ای که تولید روزانه آن حداقل ۱۰ درصد مصرف برق کشور را تشکیل می‌دهد. بر اساس معادلهٔ همترازی انرژی الکتریکی، راهکارهایی مانند قیمت‌گذاری زمان‌محور، مدیریت هوشمند انرژی، سرمایه‌گذاری در ذخیره‌سازی برق و اعمال مالیات کربن پیشنهاد شده است. این مقاله با افزایش دقت تحلیل داده‌های کلان انرژی، نقشهٔ راهی عملیاتی برای پایداری شبکهٔ برق و مشارکت مستقیم صنایع در تولید انرژی پاک ارائه می‌کند.

استناد: عالم، علی؛ پیشدار، مهسا و فتحی، محمدرضا (۱۴۰۵). مدل ترکیبی نوآورانهٔ تعیین پایداری شبکه و همترازی انرژی الکتریکی در بخش صنعتی با رویکرد یادگیری ماشین داده‌محور. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۶ (۱) ۶۵-۸۶.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.415044.1247

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.415044.1247

۱. مقدمه

بخش صنعتی در اقتصاد ایران نقش محوری دارد و انرژی پایدار در این بخش می‌تواند نتایج قابل توجهی به همراه داشته باشد. به خلاف بخش خانگی که مصرف انرژی در آن پراکنده و به الگوهای رفتاری افراد محدود است، بخش صنعتی فرصت‌هایی را برای مداخلات در مقیاس کلان ارائه می‌دهد. انرژی برق نقش محوری در عملیات صنعتی مدرن، تحولات دیجیتال و ادغام منابع تجدیدپذیر در شبکهٔ انرژی ایفا می‌کند و آن را به اولویتی راهبردی برای کشور تبدیل کرده است. همچنین، به دلیل قابلیت صادرات انرژی الکتریکی و امکان ارسال و توزیع آن در همهٔ مناطق کشور، مقبولیت این انرژی بیش از پیش افزایش یافته و تمرکز بر حوزهٔ انرژی الکتریکی پایدار با در نظر گرفتن ابعاد اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی در کانون توجه قرار گرفته است.

حسینی‌نژاد و همکاران طی پژوهشی بیان داشتند که پایداری انرژی در بخش صنعتی به رقابت‌پذیری اقتصادی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش امنیت انرژی، به‌ویژه در مواجهه با تحریم‌های بین‌المللی و فشارهای بازار جهانی، کمک می‌کند [۱]. احمدی و همکاران طی پژوهشی بیان کردند که طبق برنامه‌های پنج‌ساله به عنوان یک کشور درحال‌توسعه، باید رشد اقتصادی با حفاظت از منابع متعادل شود. درخور یادآوری است طبق مطالعات صورت‌گرفته اقدامات مؤثر در پایداری انرژی می‌تواند در فرایندهای انرژی‌بر و زیرساخت‌های قدیمی اعمال شود و به صرفه‌جویی قابل توجه در انرژی و هزینه‌ها بینجامد [۲]. افزایش ناترازی انرژی الکتریکی در سال‌های آینده سبب اختلال در زنجیرهٔ تأمین و توزیع انرژی الکتریکی در بخش صنعت می‌شود، به طوری که عدم ارائهٔ راهکارهای مناسب و جایگزین، سرمنشأ کاهش ظرفیت تولیدی واحدهای صنعتی می‌شود، چنان که پیامد این ناترازی در کوتاه‌مدت کاهش توان تولیدی و در میان‌مدت کاهش سودآوری و درآمدزایی و در بلندمدت تعطیلی کارخانه‌ها است.

۲. مرور پیشینهٔ تاریخی مقالات

در ده سال گذشته انرژی‌های تجدیدپذیر تغییرات قابل توجهی داشته است. توسعهٔ این انرژی‌ها که در ابتدا یک روند در حال ظهور بود، در حال حاضر به ضرورتی جهانی تبدیل شده است، به طوری که حرکت گذار از انرژی‌های فسیلی به انرژی الکتریکی تجدیدپذیر یک انتخاب نیست، بلکه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. آیندهٔ انرژی پایدار در برق تجدیدپذیر نهفته است. انرژی خورشیدی و بادی که از منابع تجدیدپذیر امیدبخش برای کشور هستند، عمدتاً به تولید برق کمک می‌کنند. تمرکز بر انرژی برق این امکان را فراهم می‌کند که منابع انرژی تجدیدپذیر به صورت مؤثر در شبکهٔ انرژی ادغام شوند و به کاهش وابستگی ایران به سوخت‌های فسیلی کمک کنند. قاسمی و همکاران طی پژوهشی اذعان داشتند که تولید انرژی الکتریکی با روش فسیلی با چالش‌های زیادی از جمله فناوری‌های قدیمی، حمایت‌های ناکافی سیاستی، نبود مشوق‌های مالی برای سرمایه‌گذاری در سیستم‌های انرژی نو مواجه است [۳].

رنجبر و همکاران در مقالهٔ خود بیان کردند که بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند یادگیری ماشین می‌تواند به شناسایی اقدامات مؤثر به منظور پایداری انرژی کمک کرده، مصرف انرژی را بهینه‌سازی کند و بینش‌های پیش‌بینی‌کننده‌ای برای غلبه بر موانع سنتی ارائه دهد [۴]. حیرانی و همکاران طی پژوهشی بیان کردند که تمرکز بر تعیین و اولویت‌بندی مؤلفه‌های پایداری انرژی برق به‌ویژه در بخش صنعت، برای رفع چالش‌های انرژی ایران و بهبود امنیت انرژی در بلندمدت حیاتی است. انرژی الکتریکی به عنوان یکی از حامل‌های مهم انرژی، نقش کلیدی در توسعهٔ اقتصادی و به‌ویژه در بخش صنعت ایفا می‌کند [۵]. سو و همکاران[1] طی پژوهشی بیان کردند که یکی دیگر از پیشرفت‌های مهم، کاربرد مدل‌های تبدیل انرژی مبتنی بر هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در انرژی‌های تجدیدپذیر است. مدیریت مؤثر برای بهبود راندمان تبدیل انرژی حرارتی خورشیدی و زمین‌گرمایی ضروری است [۶]. معتضدیان و دودابی‌نژاد در مقالهٔ خود نشان دادند امروزه انرژی الکتریکی نقش بسیار مهمی در کیفیت زندگی جوامع بشری ایفا می‌کند و نیاز به برق همواره در حال افزایش است [۷]. سوهان کار و همکاران بیان داشتند که اگرچه بهره‌وری در مصرف انرژی صنعتی فرصت‌های قابل توجهی برای کاهش هزینه‌ها و انتشار

1. Su

گازهای گلخانه‌ای ارائه می‌دهد، ایران با چالش‌های متعددی از جمله موانع فناوری، زیرساخت‌های قدیمی و حمایت ناکافی سیاستی مواجه است [۸]. احمدی و همکاران طی تحقیقی بیان کردند که در محیط‌های صنعتی، کارایی انرژی از طریق بهینه‌سازی ماشین‌آلات، کاهش تلفات انرژی و اجرای فناوری‌های بهره‌وری انرژی حاصل می‌شود که هدف آن، کاهش مصرف انرژی در عین حفظ یا بهبود خروجی تولید است [۲]. گولیاموا و کایداروا[1] در پژوهش خود نشان دادند یادگیری ماشین، بهینه‌سازی پاسخ به تقاضا و مدیریت تطبیقی در ریزشبکه‌ها را تسهیل می‌کند و به ادغام پایدار انرژی تجدیدپذیر کمک می‌کند [۹]. چن[2] (۲۰۲۲)، فنگ[3] و همکاران (۲۰۲۲) و فرگاهی[4] و همکاران در تحقیقات خود بیان داشتند که دسترسی به استانداردهای بالای تولید و مصرف انرژی، شاخص کلیدی موفقیت یک کشور در دستیابی به توسعه است [۱۰–۱۲].

ژو[5] و همکاران، ژوو[6] و همکاران، نیکاسا[7]، اِما[8] و کویتزو[9] به طور جداگانه در مطالعات خود اذعان داشتند که درک این رابطه برای توسعهٔ سیاست‌ها و استراتژی‌های مؤثر برای دستیابی به توسعهٔ اقتصادی پایدار و عادلانه و در عین حال پرداختن به چالش‌های زیست‌محیطی و اجتماعی مرتبط با تولید و مصرف انرژی الکتریکی ضروری است [۱۷–۱۳]. لی[10] و همکاران در تحقیقی بیان داشتند که استفاده از ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی به دلیل عملکرد کلیدی آن در مدیریت شبکه، گسترش جهانی قابل توجهی داشته است. این سیستم مزیت قدرت پشتیبان، انعطاف‌پذیری بیشتر را ارائه می‌دهد و به کاهش انتشار کربن کمک می‌کند [۱۸]. دس[11] و همکاران برای پاسخگویی به تقاضای رو به رشد انرژی به روشی پایدار، افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر یکی از گزینه‌های اولویت است. تصمیم‌گیری استراتژی‌های درست در همهٔ سطوح یک نیاز حیاتی برای انتقال انرژی جهانی به سمت پایداری است [۱۹].

عبد کریم در مطالعهٔ خود بیان داشت که انرژی در کارهای روزمرهٔ خانه و فعالیت‌های صنعتی مصرف می‌شود، نیروی محرکه کلیدی است که موتور توسعهٔ اقتصادی در سراسر جهان را تأمین می‌کند. بنابراین، مصرف انرژی الکتریکی و رشد اقتصادی به‌شدت به هم مرتبط هستند [۲۰]. علوی و همکاران در مقالهٔ خود ادغام داده‌ها و یادگیری ماشین را برای به دست آوردن اطلاعات تأمین‌کنندگان و معیارها پیشنهاد می‌کنند. با این‌حال، نویسندگان وابستگی متقابل را در میان انتخاب معیارها در نظر نمی‌گیرند [۲۱]. خوزه[12] و همکاران طی تحقیقاتی که سیستم‌های مدیریت شبکه مبتنی بر یادگیری ماشین را تجزیه‌وتحلیل داشتند، نشان داده‌اند یادگیری ماشین می‌تواند منابع انرژی توزیع‌شده [13]را بهینه کند و در عین حال حریم خصوصی داده‌ها را حفظ کند [۲۲]. اسکندری[14]، طی مقاله‌ای اعلام داشت که به خلاف مصرف خانگی که پراکنده و تحت تأثیر الگوهای رفتاری است، مصرف انرژی در صنعت متمرکز بوده و مستقیم بر عملکرد اقتصادی ملی و پایداری زیست‌محیطی تأثیر می‌گذارد [۲۳]. درک روندهای الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای انرژی زمین‌گرمایی برای شناسایی روش‌های نوظهور، بهینه‌سازی اکتشاف منابع و بهبود دقت پیش‌بینی در سیستم‌های زمین‌گرمایی بسیار مهم است. با افزایش پیچیدگی و در دسترس بودن مجموعه داده‌های زمین‌گرمایی، تجزیه‌وتحلیل روندهای الگوریتمی، بینش‌هایی را در مورد مؤثرترین رویکردهای هوش مصنوعی ارائه می‌دهد و تحقیقات آینده و کاربردهای صنعتی را هدایت می‌کند. ادغام هوش مصنوعی در تحقیقات انرژی زمین‌گرمایی دستخوش تحول قابل توجهی شده و از مدل‌های اولیه یادگیری ماشینی به معماری‌های پیچیده‌تر یادگیری ماشینی تکامل یافته است [۲۴].

1. Gulyamova and Khaydarova
2. Chien
3. Fang
4. Farghali
5. Zhou
6. Zhu
7. Neacsa
8. Emna
9. Quitzow
10. Lee
11. Das
12. Jose
13. DER
14. Eskandari

جدول ۱. خلاصهٔ پیشینهٔ پژوهشی

نام پژوهشگران	سال مطالعه	روش‌شناسی	ابزارهای اصلی	نتایج
Galarza-Chavez, A.A., et al[۲۵]	۲۰۲۵	تحلیلی و پیش بینی	یادگیری ماشین، یادگیری عمیق	فناوری‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، تحقیقات و نوآوری را در حوزه‌های مختلف انرژی پایدار تسریع کرده‌اند.
A. Bressane and et al[۲۶]	۲۰۲۴	مطالعهٔ تحلیلی	یادگیری ماشین داده محور	نوآوری‌هایی در ادغام داده‌ها و فرایندهای تطبیق با استفاده از سیستم‌های استنتاج فازی (FIS) و یادگیری ماشین فازی.
Rao, B., Praveen, M., Babu, D.R[۲۷]	۲۰۲۴	مطالعهٔ مروری	یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی	تکنیک‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم‌های ژنتیک و هوش ازدحامی به طور قابل توجهی دقت مدل‌سازی را بهبود می‌بخشند.
Amiri, M.M., et al [۲۸]	۲۰۲۴	مطالعهٔ تحلیلی	هوش مصنوعی، یادگیری ماشین	کاربردهای هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی، مانند تجزیه‌وتحلیل پیش‌بینی‌کننده، پیش‌بینی تقاضا و مدیریت شبکهٔ هوشمند، باعث کاهش ضایعات، تثبیت تغییرپذیری انرژی تجدیدپذیر و افزایش بهره‌وری انرژی.
Lin، Ruiyue et al.[۲۹]	۲۰۲۴	مطالعهٔ موردی	تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای	تعیین کارایی معیارها در سیستم انرژی الکتریکی چین
Ghasemi, Soroush and Hosseini [۳]	۲۰۲۳	مطالعهٔ مقایسه‌ای	هوش مصنوعی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین	کارآمدتر بودن روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نسبت به روش‌های سنتی در بهینه‌سازی مصرف انرژی صنعتی.
Ranjbar, Rafiei and Khorshidi[۴]	۲۰۲۲	مطالعهٔ توصیفی	نقشه‌های شناختی فازی، هوش مصنوعی	پیشنهاد چارچوب با استفاده از هوش مصنوعی و نقشه‌برداری شناختی فازی برای اولویت‌بندی دقت تصمیم‌گیری.
Yang, Zhao and Liu [۳۰]	۲۰۲۲	توسعهٔ مدل یادگیری ماشین	شبکه‌های عصبی، ماشین بردار پشتیبانی[1]	توسعهٔ مدل یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خروجی برق خورشیدی در شرایط آب‌وهوایی متغیر؛ بهبود دقت پیش‌بینی انرژی.
Singh, Kumar and Agrawal [۳۱]	۲۰۲۱	آزمایش مدل ترکیبی یادگیری ماشین	جنگل تصادفی، خوشه‌بندی K-means[2]	استفاده از مدل ترکیبی یادگیری ماشین برای پیش‌بینی انرژی بادی؛ دقت بالا در پیش‌بینی الگوهای باد و بهبود ادغام انرژی در شبکه.

با توجه به گستردگی مطالعات و تحقیقات انجام‌شده در تدوین روش‌های داده‌محور مرتبط با انرژی تجدیدپذیر و انرژی الکتریکی پایدار، به منظور شفاف شدن شکاف تحقیقات انجام‌شده با مقالهٔ حاضر ویژگی‌ها و نتایج پژوهش‌های پیشین براساس نظرات پژوهشگران در جدول ۲ گنجانده شده است. برخی از این پژوهش‌ها به مقایسهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر براساس منشأ پرداخته‌اند و سهم هریک را در سبد انرژی تجدیدپذیر مشخص کرده‌اند و اکثراً خوشه‌بندی را با روش‌های متداول انجام داده‌اند. همچنین، برخی تحقیقات به جنبه‌های بهینه‌سازی تولید یا مصرف انرژی الکتریکی پرداخته است. برخی مقالات ابعاد اقتصادی، اجتماعی و محیط زیست توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر را به دلیل اینکه به‌صرفه هستند و مقبولیت عمومی دارند و با وجود در دسترس بودن، پیامدهای مخرب محیط زیست ندارند، مورد توجه قرار داده و در نتیجه، انرژی الکتریکی تجدیدپذیر پایدار معرفی شده است. توجه به موضوع داده‌محوری و انجام مطالعات مرتبط با داده‌کاوی نیز از جمله مطالعاتی است که در سال‌های اخیر مورد توجه محققان بوده است. طی مقالهٔ حاضر، مدل‌های ترکیبی نوآورانه با رویکردهای یادگیری ماشین داه‌محور براساس داده‌های موجود در بخش مصرفی صنعت و مقدار تولید انرژی الکتریکی با منشأ تجدیدپذیر تحلیل و ارائه شده است.

1. Neural networks, Support Vector Machines
2. Random Forest, K-means Clustering

جدول ۲. شکاف پژوهشی چارچوب‌های داده‌محوری موجود

نام پژوهشگران	سال مطالعه	نوع چارچوب/ ابزار مورد استفاده	نتایج پژوهش
هویکا[1] و همکاران [۳۲]	۲۰۲۵	نظری/ خوشه‌بندی با یادگیری ماشین	ارائهٔ چارچوب تحلیلی برای مشخص کردن ظهور خوشه‌های انرژی تجدیدپذیر است.
الوماری[2] و همکاران [۳۳]	۲۰۲۴	داده‌محور/ شبیه‌سازی، یادگیری ماشین، تصمیم گیری چندمعیاره	چارچوب داده‌محور برای بهینه‌سازی طراحی جامع انرژی تجدیدپذیر ـ پایداری عملکرد است.
سوجانتو[3] و همکاران [۳۴]	۲۰۲۴	تحلیلی/ دلفی فازی، تصمیم‌گیری فازی	یک مدل سلسله‌مراتبی با پایداری محیط زیست است.
ویلیامسون[4] و پراییوتک [۳۵]	۲۰۲۴	داده‌محور پایدار/ محاسبات نورومورفیک یادگیری پویا بر اساس ریسک	چارچوب داده‌محور و پایداری تأمین انرژی در تحول صنعتی پنج است.
فتحی و همکاران [۳۶]	۱۴۰۲	نظری/ فراترکیب و مؤلفه‌های اصلی	تدوین چارچوب مدیریت ریسک
محتشمی معالی و همکاران [۳۷]	۱۴۰۱	داده‌محور/ یادگیری ماشین، نقشه‌های شناختی	ارائهٔ الگوی داده‌محور با روش‌های یادگیری ماشین
ارجمندی و همکاران [۳۸]	۱۴۰۱	تحلیلی / تحلیل همبستگی و سلسله‌مراتبی	تحلیل مؤلفه‌های انقلاب صنعتی چهار در صنعت
سونگ[5] و همکاران [۳۹]	۲۰۱۸	تحلیلی/ تحلیل همبستگی، رگرسیون خطی، برنامه‌ریزی خطی	چارچوب فرایندمحور، ارزیابی اثرات محیط زیستی انرژی‌های تجدیدپذیر

۳. روش‌شناسی تحقیق

براساس لایه‌های پژوهشی ساندرز، روش انجام تحقیق در مقالهٔ حاضر براساس پارادایم اثبات‌گرایی است. با توجه به کاربردی بودن تحقیقات انجام‌گرفته، راهبرد این مقاله روش استقرایی است، به طوری که در بخش تحلیل کمّی با در نظر گرفتن روش‌ها و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، نتایج و قوانین جزئی به صورت استقرایی از تحلیل داده‌های کلی حاصل شده است. محدودهٔ اجرای تحقیق مطالعات کتابخانه‌ای و داده‌های واقعی است. تحقیق کّمی از نوع پیش‌بینی ـ توصیفی است که یافته‌ها به صورت نتایج مصور است که با مقادیر عددی و محاسباتی همراه خواهد بود [۴۰].

طبق نظر آبایموف[6] و مارتلینی پرواضح است تبدیل اندیشه‌های ذهنی به مضامین و مصنوعات عینی از کارکردهای هوش‌مصنوعی است، پس با در نظر گرفتن پارادایم تفسیری با لنز الهام‌بخش[7] و مکاشفه‌آمیز که باور اصلی و هدایتگر هر دو پارادایم مطرح‌شده در هوش مصنوعی است [۴۱]. به عقیدهٔ صاحب‌نظرانی مانند جیسون برونلی[8]، ماشین‌های بردار پشتیبان شاید از محبوب‌ترین و بحث‌برانگیزترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین باشند [۴۲]، همچنین، ماشین بردار پشتیبان یک الگوریتم یادگیری ماشین تحت نظارت است که می‌تواند برای چالش‌های طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده شود. الگوریتم ماشین بردار پشتیبان یکی از الگوریتم‌های مفید برای دسته‌بندی و پیش‌بینی وظایف است؛ حتی زمانی که با حجم کمی از داده‌ها روبه‌رو هستیم.

۳–۱. روش اعتبارسنجی ماشین بردار پشتیبان

طبق مقالهٔ لی[9] ماشین بردار پشتیبان خطی برای داده‌های قابل جداسازی استفاده می‌شود. اگر داده‌های آموزشی جدایی‌پذیر خطی خطی باشند، می‌توان دو ابرصفحه در حاشیهٔ نقاط به طوری که هیچ نقطهٔ مشترکی نداشته باشند، در نظر گرفت. سپس، سعی

1. Hoicka
2. Elomari
3. Sujanto
4. Steven M. Williamson
5. Song
6. Abaimov & Martellini
7. Inspirational
8. Jason Brownlee
9. Xiaoou Li

می‌شود فاصلهٔ آن‌ها ماکسیمم شود. با استفاده از هندسه، فاصلهٔ این دو صفحه $\frac{2}{\|w\|}$ است [۴۳]. بنابراین، باید $\|w\|$ مینیمم شود که به صورت مسئلهٔ بهینه‌سازی با یک تابع هدف و محدودیت و مقدار تابع جریمه ذیل بیان می‌شود:

$$Minimize \frac{\|w\|^2}{2} + c\sum_{i=1}^{n}\xi_i \qquad (۱)$$
$$y_i\left(\boldsymbol{w}.\boldsymbol{x_i} - w_0\right) \geq 1-\xi_i \qquad 1 \leq i \leq n \ , \ \xi_i \geq 0$$

می‌توان این عبارت را با استفاده از ضرایب نا منفی لاگرانژ به صورت رابطهٔ ۲ نوشت که در آن α_i ضرایب لاگرانژ هستند:

$$min_{w,b}max_{\alpha}\left(\frac{\|w\|^2}{2} - \sum_{i=1}^{n}\alpha_i[y_i\left(\boldsymbol{w}.\boldsymbol{x_i} - w_0\right)-1]\right) \qquad (۲)$$
$$\boldsymbol{s.t} \qquad \boldsymbol{w} = \sum_{i=1}^{n}\alpha_i\left(y_i.\boldsymbol{x_i}\right) \quad , \quad \sum_{i=1}^{n}\xi_i = 1, \ \xi_i \geq 0$$

بردارهای پشتیبان بیشتر مناسب طبقه‌بندی‌هایی است که از یکدیگر به‌راحتی با یک ابرصفحه از هم جدا می‌شوند. در این حالت، از متغیر کمکی ξ_i، ضریب تعیین جریمه و تابع هسته (کرنل) استفاده می‌شود. بردارهای پشتیبان حاشیهٔ ابرصفحه[1]را تعریف می‌کند و بردارهای پشتیبانی پس از یک مرحله بهینه‌سازی منظم می‌شوند که شامل حاشیهٔ نرم و حاشیهٔ سخت است، بنابراین با پذیرفتن مقداری خطا در تصمیم‌گیری می‌توان حاشیه‌های نرم‌تری برای طبقه‌بندی ایجاد کرد.

$$\begin{cases} w^T x + w_0 \geq 1-\xi_i & for \quad y_i = 1 \\ w^T x + w_0 \leq -1+\xi_i & for \ y_i = -1 \end{cases} \qquad (۳)$$

به منظور تعیین اعتبار مدل‌های کمّی از شاخص‌های مشخصی استفاده می‌شود، این شاخص‌ها نشان‌دهندهٔ درستی، دقّت، بازخوانی (فراخوانی)، مدل کمّی هستند، همچنین شاخص ترکیبی مانند مقدار امتیاز $F1$ نیز معرفی شده است، فرمول محاسبهٔ این شاخص‌ها براساس ماتریس به‌هم‌ریختگی[2] به صورت جدول ۳ است.

جدول ۳. معرفی معیارهای اعتبارسنجی یادگیری ماشین

نام معیار اعتبارسنجی	توضیح	فرمول محاسبه
درستی $(Accuracy)$	نسبت پیش‌بینی صحیح به کل نمونه‌ها	$\frac{TP+TN}{\sum Total\ Population}$
دقت $(Precision)$	نسبت پیش‌بینی‌های درست یک کلاس به کل نمونه‌های پیش‌بینی‌شدهٔ آن کلاس	$\frac{\sum True\ Positive(TP)}{\sum Predicted\ condition\ Positive}$
بازخوانی $(Recall)$	نسبت پیش‌بینی‌های درست یک کلاس به کل نمونه‌های واقعی آن کلاس	$\frac{\sum True\ Positive(TP)}{\sum condition\ Positive}$
$F1\ Score$	میانگین هارمونیک دو معیار دقت و بازخوانی نشان‌دهندهٔ تعادل بین آن‌ها	$2\times\frac{(Precision\times Recall)}{(Precision+Recal)}$

۴. نتایج و یافته‌های مدل ترکیبی رویکرد یادگیری ماشین

طی این مقاله تحلیل مدل مصرف انرژی الکتریکی بر اساس طبقه‌بندی با جنگل تصادفی ارائه شده است که با در نظر گرفتن ویژگی‌های داده‌های مصرف در بخش صنعتی و با برچسب‌های مربوط به درصد تولید انرژی تجدیدپذیر و سال‌های مورد بررسی است. به لحاظ تنوع‌بخشی به سبد انرژی و رفع ناترازی طبق بند مادهٔ ۸ مصوبهٔ شورای عالی انرژی و مادهٔ ۱۶ جهش تولید دانش بنیان در تأمین برق بخش صنعت، به طور سالیانه باید ۵ درصد به سهم تولید انرژی تجدیدپذیر افزوده شود، لذا مقدار انرژی

1. Hyperplanes
2. Confusion Matrix

تجدیدپذیر باید حداقل ۱۰ درصد مصرف کل انرژی الکتریکی باشد. بر اساس فلوچارت تأمین برق در صنعت می‌توان متغیرهای مربوط به تأمین برق صنعتی از شبکهٔ سراسری و تأمین براساس تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر و فروش مازاد آن به شبکهٔ توزیع سراسری توسط بخش صنعتی را در نظر گرفت که معادلهٔ همترازی به صورت معادلهٔ ۴ بیان می‌شود.

$$\begin{cases}\sum E_{i,t}^{ind} = \sum E_{i,t}^{self} + E_t^{grid,In} \\ \sum E_{i,t}^{ren} = \sum E_{i,t}^{self} + \sum E_{i,t}^{sell}\end{cases} \rightarrow \sum E_{i,t}^{ind} + \sum E_{i,t}^{sell} = E_t^{grid,In} + \sum E_{i,t}^{ren} \quad (۴)$$

$$D_t^{grid} = \sum E_{i,t}^{ren,grid} + E_t^{fossil} + \sum E_{i,t}^{sell} - E_t^{grid,In} \rightarrow$$

$$D_t^{grid} = \sum E_{i,t}^{ren,grid} + E_t^{fossil} + \sum E_{i,t}^{sell} + \sum E_{i,t}^{self} - \sum E_{i,t}^{ind}$$

$$D_t^{grid} + \sum E_{i,t}^{ind} = E_t^{ren,grid} + E_t^{fossil} + \sum E_{i,t}^{ren}$$

جدول ٤. معرفی متغیرها در معادلهٔ همترازی انرژی الکتریکی

$E_{i,t}^{ind}$	$E_{i,t}^{sell}$	$E_{i,t}^{self}$	E_t^{fossil}	$E_t^{grid,In}$	$E_{i,t}^{ren}$	$E_t^{ren,grid}$	D_t^{grid}
انرژی الکتریکی مصرفی کارخانهٔ i در زمان t	انرژی الکتریکی تجدیدپذیر مازاد کارخانهٔ i در زمان t	انرژی الکتریکی تجدیدپذیر مصرفی کارخانهٔ i در زمان t	انرژی الکتریکی فسیلی شبکه در زمان t	انرژی الکتریکی ورودی به شبکه در زمان t	کل انرژی الکتریکی تجدیدپذیر کارخانهٔ i در زمان t	انرژی الکتریکی تجدیدپذیر شبکه در زمان t	کل تقاضای انرژی الکتریکی شبکه در زمان t

۴-۱. جمع‌آوری داده و پیش‌پردازش

جمع‌آوری داده‌های واقعی مصرف و تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر دورهٔ زمانی پیوسته از تاریخ ۱۳۹۸/۰۴/۱ تا ۱۴۰۴/۰۶/۳۱ را شامل می‌شود که پایش و ثبت روزانهٔ مصرف انرژی الکتریکی مصرفی و تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر به طور مستمر دو بار در روز انجام شده است و داده‌ها همپوشانی ندارند. این داده‌های واقعی در سایت رسمی مدیریت شبکهٔ برق ایران[1] قابل دسترسی است. متغیرها هم رزولوشن هستند. روندنمای پژوهش در شکل ۱ قابل ملاحظه است. همچنین، می‌توان از نرمال‌سازی Min-Max به عنوان یک مرحلهٔ پیش‌پردازش برای مقیاس‌بندی ویژگی‌های عددی در یک محدودهٔ خاص استفاده کرد. این تکنیک نرمال‌سازی تضمین می‌کند که همهٔ ویژگی‌ها مقیاس مشابهی دارند و از غلبهٔ ویژگی‌هایی با بزرگی بزرگ‌تر بر فرایند آموزش مدل جلوگیری می‌کند. معادلهٔ نرمال‌سازی به شرح زیر است:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (۵)$$

نرمال‌سازی به عنوان بخشی از فرایند پیش‌پردازش داده‌ها پیاده‌سازی شد تا از ثبات در مقیاس‌های ویژگی اطمینان حاصل شود و در نتیجه، همگرایی و عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین افزایش یافت. طی پیش‌پردازش، مدیریت مقادیر گمشده و اطمینان از یکپارچگی داده‌ها، گام‌های مهمی برای حفظ کیفیت و قابلیت اطمینان داده‌های ورودی برای مدل‌سازی بودند. دادهٔ مورد استفاده فاقد دادهٔ گمشده بوده است.

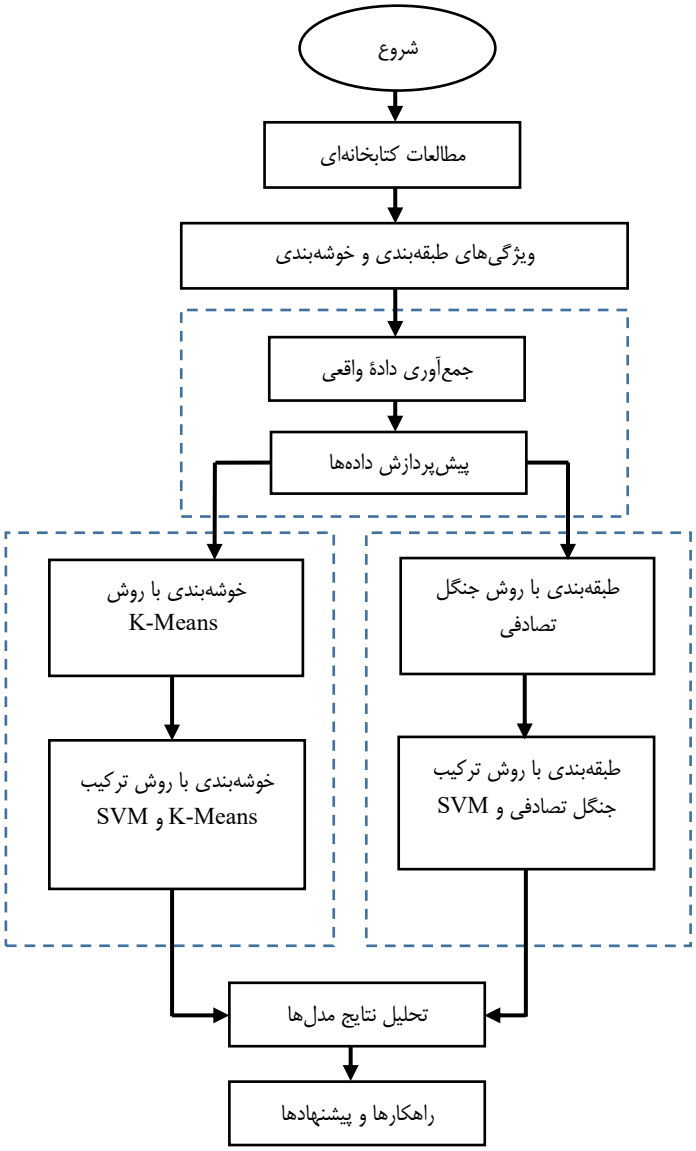
۴-۲. مدل طبقه‌بندی همترازی انرژی الکتریکی

ناترازی انرژی الکتریکی به معنای عدم تعادل بین میزان انرژی الکتریکی تولیدشده و میزان انرژی الکتریکی مصرف‌شده در یک زمان خاص است. وقتی مصرف‌کنندگان بیش از آنچه نیروگاه‌ها تولید می‌کنند، انرژی الکتریکی تقاضا کنند، ناترازی رخ می‌دهد. درمقابل اقداماتی که به منظور حذف این ناترازی باشد به عنوان همترازکنندهٔ انرژی الکتریکی در نظر گرفته می‌شوند. این متغیرها با واحد سنجش مگاوات ساعت به صورت روزانه سنجش می‌شوند، تا تعادل بین انرژی الکتریکی مصرف‌شده در بخش‌های صنعتی، انرژی تجدیدپذیر تحویل داده‌شده به شبکهٔ سراسری و انرژی تجدیدپذیر تولیدشده توسط واحدهای صنعتی

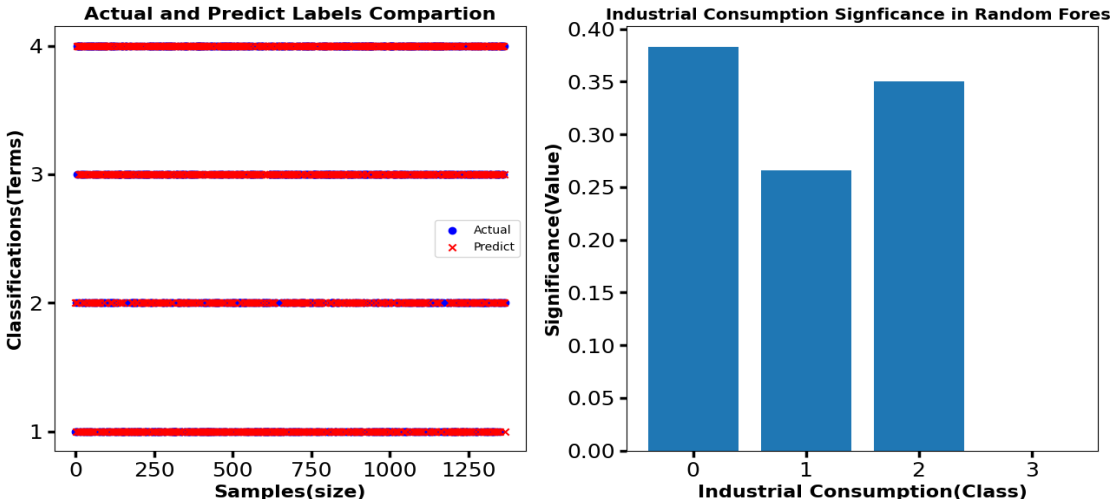
1. https://www.igmc.ir/

مطابق معادلهٔ همترازی انرژی الکتریکی تعیین شود. روش جنگل تصادفی با هدف طبقه‌بندی پایداری انرژی الکتریکی در بخش صنعت و انرژی الکتریکی تجدیدپذیر تعریف شده است.

الف) طبقه‌بندی میزان مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعتی براساس میزان مصرف در سطح کم مصرف تا فوق پرمصرف قرار می‌گیرند که مطابق شکل ۲ نشان‌دهندهٔ این است که در حالت واقعی مصرف واحدهای صنعتی در گروه‌بندی اول و دوم که مصرف کم و متوسط هستند قرار دارند. در واقع، صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در بخش صنعتی در حال حاضر وجود دارد و به سبب اهمیت کاهش هزینه‌های تولید و سربار در صنایع، تهیهٔ دستورالعمل‌های صرفه‌جویی و رعایت الگوی مصرف جایگاه ویژه‌ای در بخش صنعتی کشور دارد. قسمتی از این کاهش مصرف می‌تواند به دلیل افزایش هزینه‌های سربار ناشی از قیمت انرژی الکتریکی باشد که به سبب اهمیت قیمت تمام‌شده محصولات این کاهش مصرف محسوس شده است.



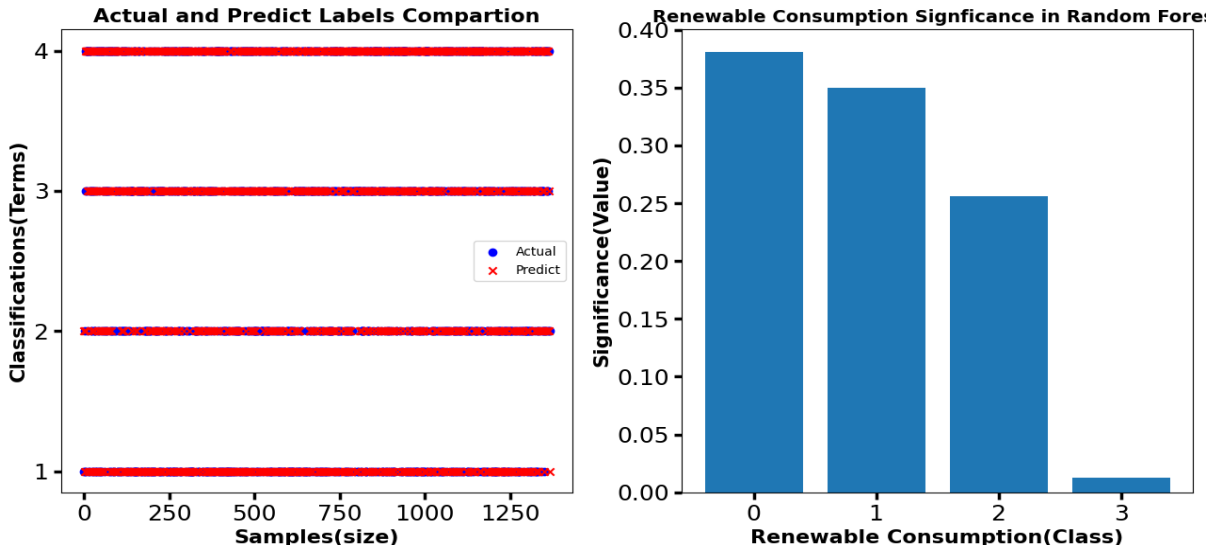
شکل ۱. روندنمای روش پژوهش



شکل ۲. طبقه‌بندی مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعتی با روش جنگل تصادفی

ب) میزان انرژی الکتریکی تجدیدپذیر در مصارف بخش صنعتی

با توجه به طبقه‌بندی انرژی تجدیدپذیر در بخش صنعتی مطابق شکل ۳، سهم تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر توسط بخش صنعتی جهت مصارف در وضعیت کم و متوسط قرار دارد. بنابراین، لازم است برنامه‌های مدونی توسط بخش صنعتی و بخش دولتی مرتبط تهیه شود تا امکان تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر توسط بخش صنعتی جهت مصارف خود ایجاد شود. تحلیل داده‌های انجام‌شده نشان می‌دهد در حال حاضر واحدهای صنعتی به طور مستقل اقدام به تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر در سطح کلان و قابل توجهی نداشته‌اند و فقط موارد اندکی از واحدهای صنعتی و کارخانه‌های تولیدی مزارع تولید انرژی تجدیدپذیر[1] در کشور ایجاد کرده‌اند. این در حالی است که برخی واحدهای صنعتی کوچک و متوسط می‌توانند بخشی از انرژی مورد نیاز خود را با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برآورده سازند. همچنین، واحدهای صنعتی بزرگ نیز می‌توانند با ایجاد واحدهای تولید انرژی تجدیدپذیر در مناطق مستعد، اقدام به تولید و تحویل انرژی الکتریکی به شبکهٔ مدیریت برق ایران کنند و به همان اندازهٔ انرژی الکتریکی را در محل کارخانهٔ خود تحویل بگیرند که این چرخهٔ تولید و انتقال انرژی الکتریکی می‌تواند به افزایش سهم استفاده از انرژی الکتریکی تجدیدپذیر در بخش صنعتی کشور کمک قابل توجهی کند.

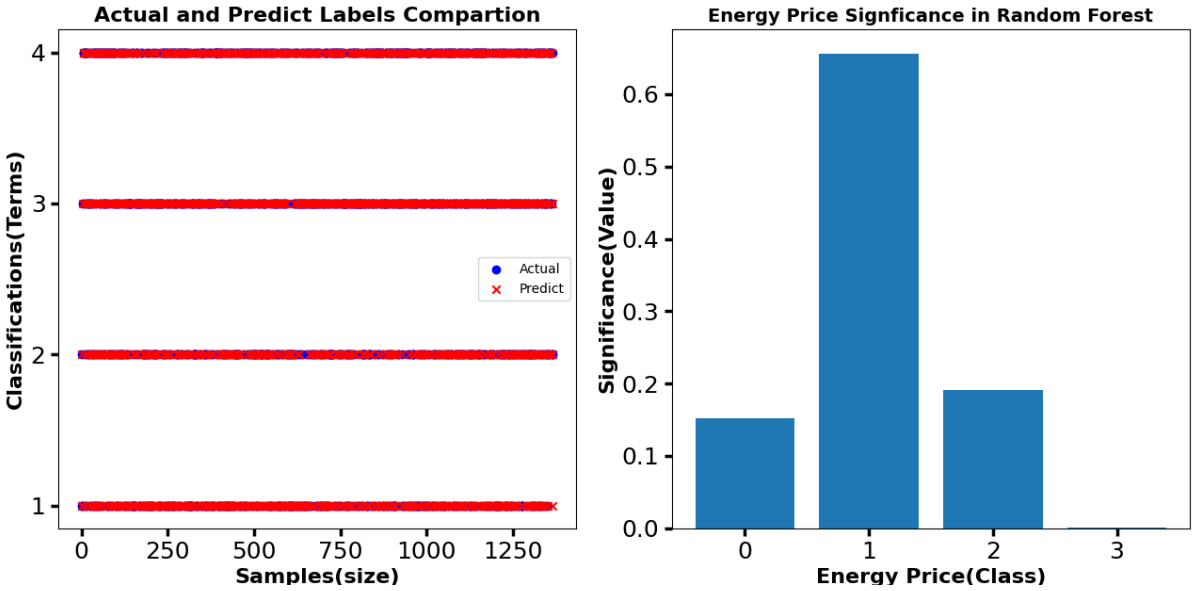


شکل ۳. طبقه‌بندی انرژی الکتریکی تجدیدپذیر در بخش صنعتی با روش جنگل تصادفی

1. On-Site

ج) میزان قیمت انرژی الکتریکی در بخش صنعتی

با در نظر گرفتن طبقه‌بندی انجام‌شده طبق شکل ۴ وضعیت قیمت انرژی نیز در محدودهٔ پایین قرار دارد. این وضعیت نشان‌دهندهٔ وجود یارانه‌های دولتی در بخش انرژی الکتریکی است که قیمت‌گذاری انرژی الکتریکی را در حالت حمایت‌های دولتی نشان می‌دهد. با توجه به ساختار اقتصادی کشور و لزوم حمایت از کسب‌وکارها و تداوم ارائهٔ بسته‌های حمایتی در حوزهٔ انرژی، قیمت گذاری انرژی الکتریکی می‌تواند بر اساس منشأ تولید انرژی متفاوت در نظر گرفته شود. همچنین، با ادامهٔ مشارکت واحدهای صنعتی بزرگ در تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر از روش قیمتی زمان‌محور یا قیمت‌گذاری با تخفیف در بخش صنعتی قابل استفاده هستند. وجود روش‌های قیمت‌گذاری پویا به مدیریت تقاضا نیز کمک شایانی خواهد داشت و روند مصرف در زمان‌های اوج بار را کاهش خواهد داد که این روش قیمت‌گذاری انرژی الکتریکی، انعطاف‌پذیری در تولید را به همراه خواهد داشت.



شکل ٤. طبقه‌بندی قیمت انرژی الکتریکی در بخش صنعتی با روش جنگل تصادفی

مقادیر اعتبارسنجی هریک از مدل‌های طبقه‌بندی با روش جنگل تصادفی با استفاده از محیط برنامه‌نویسی پایتون محاسبه شده است. نتایج مربوط به مدل‌های جنگل تصادفی در محدودهٔ مورد پذیرش قرار دارند و مقادیر مدل طبقه‌بندی مصرف بخش صنعتی براساس مشخصهٔ قیمت از دقت، صحت، فراخوانی و امتیاز F1 بالاتری برخوردار است.

جدول ۵. مقادیر معیارهای اعتبارسنجی مدل‌های طبقه‌بندی با روش جنگل تصادفی

نام مدل	دقت Accuracy	صحت Precision	فراخوانی Recall	نمرهٔ F1 Score
مدل طبقه‌بندی مصرف کل به تجدیدپذیر با جنگل تصادفی	۰/۵۵۴	۰/۵۵۴	۰/۵۵۴	۰/۵۵۴
مدل طبقه‌بندی مصرف بخش صنعتی به تجدیدپذیر با جنگل تصادفی	۰/۵۴۹	۰/۵۴۹	۰/۵۴۹	۰/۵۴۹
مدل طبقه‌بندی مصرف بخش صنعتی به قیمت با جنگل تصادفی	۰/۸۹۹	۰/۸۹۹	۰/۸۹۹	۰/۸۹۹

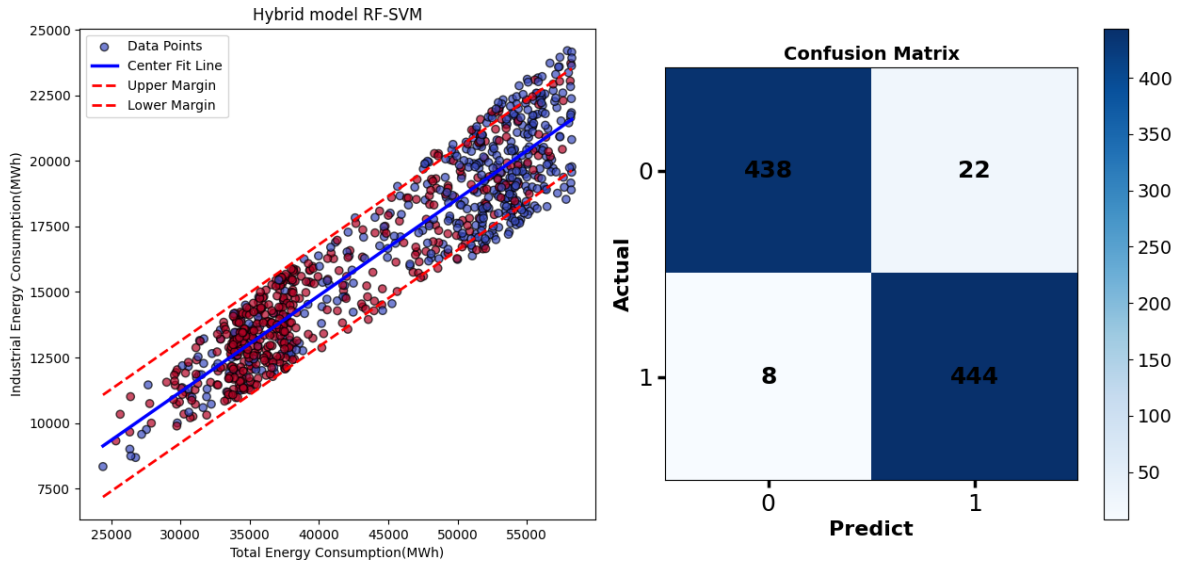
۴-۳. تحلیل مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی

به منظور استفاده از توانایی جنگل تصادفی در مدل‌سازی روابط غیرخطی و افزایش دقت مدل طبقه‌بندی، مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی مورد استفاده قرار گرفته است، به طوری که این مدل نوآورانه موجب می‌شود نقاط نزدیک به مرز تصمیم اهمیت بیشتری داشته باشند. همچنین، پس از آموزش مدل با این روش، به درصد کمتری از داده‌ها جهت تصمیم‌گیری نیاز است. فراپارامترهای مربوط به مدل طبقه‌بندی طوری تنظیم شده است که با روش تقسیم حجم داده مورد استفاده، سهم آموزش ۷۰ درصد داده‌ها و آزمون به صورت ۳۰ درصد کل داده‌ها است پارامتر تعادل وزن با استفاده از روش جست‌وجو مقدار

یک در مقیاس لگاریتمی انتخاب شده است. همچنین، در الگوریتم جنگل تصادفی تعداد تخمینی درختان در الگوریتم یادشده به تعداد ۱۰۰ درخت تنظیم شده است.

الف) میزان مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعتی

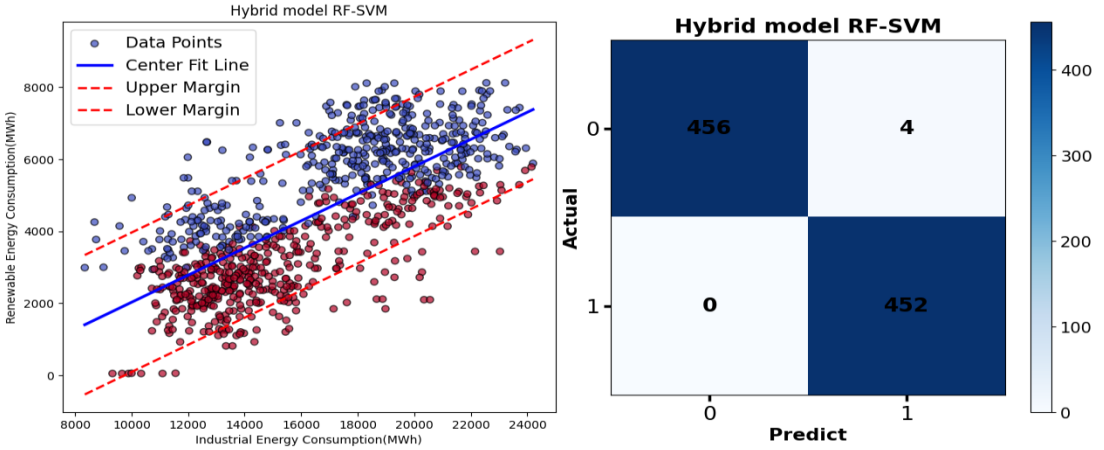
یک مدل ترکیبی براساس ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی ایجاد شده است که قابلیت بهتری در انجام طبقه‌بندی مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعت را نمایش دهد. در این مدل ارتباط مصرف انرژی الکتریک بخش صنعتی با کل مصرف در چهار دورهٔ تقریباً یک‌ونیم‌ساله بررسی و تحلیل شده است. یک مدل ترکیبی براساس ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی ایجاد شده است که قابلیت بهتری در انجام طبقه‌بندی مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعت را مطابق شکل ۵ نمایش می‌دهد. این نمودار پراکندگی مصرف در بخش صنعتی را با رشد مصرف کل روزانه بر اساس مدل ترکیبی طبقه‌بندی نشان می‌دهد. افزایش مصرف در بخش صنعتی با توجه به مصرف کل روند افزایشی داشته و پس از یک گسستگی در مصرف کل ۴۰ تا ۵۰ گیگاوات ساعت در روز، بافتمان همگنی پیدا کرده است. نقاط بر اساس میزان تولید انرژی تجدیدپذیر در زمان مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعتی طبقه‌بندی شده‌اند. نقاط آبی‌رنگ، بیانگر تولید انرژی تجدیدپذیر به میزان حداقل ۱۰ درصد مصرف کل است که در سال‌های اخیر رشد چشمگیر دارد. نقاط قرمزرنگ نشان‌دهندهٔ میزان تولید انرژی تجدیدپذیر به مقدار کمتر از ۱۰ درصد میزان مصرف انرژی الکتریکی است که در محدودهٔ مصرف ۳۵ گیگاوات ساعت در روز متمرکز بوده است.



شکل ۵. طبقه‌بندی مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعتی با روش ترکیبی جنگل تصادفی ـ ماشین بردار پشتیبان

ب) میزان انرژی الکتریکی تجدیدپذیر در مصرف بخش صنعتی

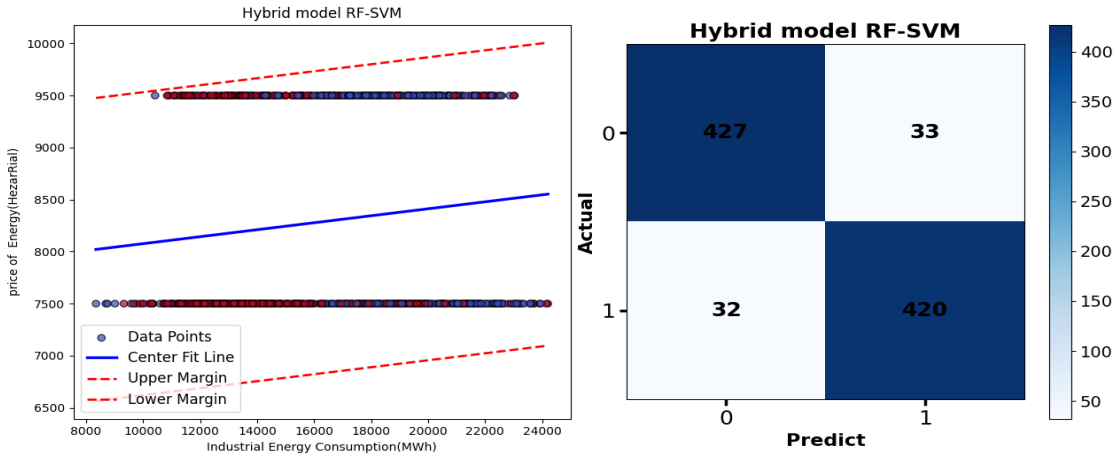
این مدل ترکیبی براساس ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی طبقه‌بندی کل مصرف انرژی الکتریکی کشور را با میزان تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر در دورهٔ زمانی حدود ۶ سال را مطابق شکل ۶ نمایش می‌دهد. رشد تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر در مقایسه با رشد مصرف انرژی الکتریک در بخش صنعتی، کمتر بوده و در دوره‌های زمانی دارای توسعه یکنواخت نبوده است، به طوری که در بازه مصرف روزانه ۱۸ تا ۲۰ هزار مگاوات ساعت در روز، نقش تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر به‌وضوح دیده می‌شود. همچنین، با رسیدن مصرف به مرز ۲۲ هزار مگاوات ساعت همچنان میزان تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر بیشتر از ۱۰ درصد مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعتی است که رشد تولید انرژی تجدیدپذیر را در سال‌های اخیر نشان می‌دهد.



شکل ٦. طبقه‌بندی انرژی الکتریکی تجدیدپذیر در بخش صنعتی با روش ترکیبی جنگل تصادفی ـ ماشین بردار پشتیبان

ج) میزان قیمت انرژی الکتریکی در بخش صنعتی

مدل ترکیبی به منظور طبقه‌بندی جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان برای بررسی قیمت انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت. قیمت مصرف انرژی الکتریکی در بازه قیمتی ۶۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ ریال بر هر کیلووات ساعت قرار داشته و طبقه‌بندی با روش ترکیبی جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. طبقه‌بندی قیمت انرژی الکتریکی در بخش صنعتی با روش ترکیبی جنگل تصادفی ـ ماشین بردار پشتیبان

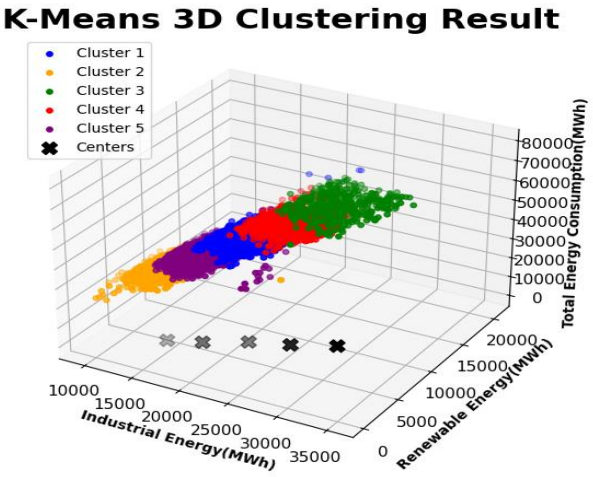
اعتبارسنجی یا ارزیابی یک مدل از بخش‌های مهم تحلیل مدل‌ها است. به این‌منظور و با توجه به توضیحات مبسوط در خصوص معیارهای ارزیابی و اعتبارسنجی طبق جدول ۵، معیارهای مورد نظر و مهم مدل‌های مربوط به طبقه‌بندی با استفاده از محیط برنامه‌نویسی پایتون محاسبه شده که در جدول ۶ گنجانده شده است.

جدول ٦. مقادیر معیارهای اعتبارسنجی مدل‌های ترکیبی طبقه‌بندی جنگل تصادفی ـ ماشین بردار پشتیبان

نام مدل	درستی Accuracy	دقت Precision	فراخوانی Recall	نمرهٔ F1 Score
مدل ترکیبی جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان (مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعتی)	۰/۹۶۷	۰/۹۵۳	۰/۹۸۲	۰/۹۶۷
مدل ترکیبی جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان (مصرف انرژی الکتریکی تجدیدپذیر در بخش صنعتی)	۰/۹۹۶	۰/۹۹۶	۱	۰/۹۹۶
مدل ترکیبی جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان (قیمت)	۰/۹۲۹	۰/۹۲۷	۰/۹۲۹	۰/۹۲۸

۴-۴. مدل خوشه‌بندی K-means

خوشه‌بندی مصرف انرژی الکتریکی براساس تولید انرژی تجدیدپذیر انجام شده است، با در نظر گرفتن پنج خوشه مطابق شکل ۸ براساس سه مشخصه (ویژگی) مقدار مصرف کل انرژی الکتریکی، مقدار مصرف انرژی در بخش صنعتی و همچنین، مقدار تولید انرژی تجدیدپذیر، خوشه‌بندی سه‌بعدی انجام شده است. مراکز خوشه‌بندی نیز در این شکل نشان داده شده است. روند افزایشی و همچنین رابطهٔ خطی مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعتی و مقدار کل مصرف انرژی الکتریکی نیز نشان‌دهندهٔ ارتباط مستقیم این دو مشخصه هستند که در تصدیق افزایش تدریجی مصرف بخش صنعتی در سال‌های اخیر است.



شکل ۸. خوشه‌بندی انرژی الکتریکی تجدیدپذیر با روش K-Means

یکی از چالش‌های اصلی در خوشه‌بندی، تعیین تعداد مناسب خوشه‌ها است. این تعداد بسته به داده‌ها و هدف خوشه‌بندی متفاوت است و می‌تواند تأثیر زیادی بر کیفیت نهایی خوشه‌بندی داشته باشد. تعیین تعداد نادرست خوشه‌ها می‌تواند به نتایج نامناسب منجر شود، به طوری که خوشه‌های بیش از حد بزرگ یا کوچک ایجاد شوند که باعث از دست رفتن اطلاعات مهم یا بی‌ثمر شدن تجزیه‌وتحلیل می‌شود. به همین‌دلیل، برای حل چالش تعیین تعداد مناسب خوشه‌ها، می‌توان از روش آرنج[1] استفاده کرد. در این روش تغییرات مجموع مربعات درون‌خوشه‌ای[2] بررسی می‌شود تا نقطه‌ای که افزایش خوشه‌ها دیگر باعث بهبود معناداری در مدل نمی‌شود، شناسایی شود. بر اساس همین روش مقادیر در جدول ۷ ثبت شده است که تعداد پنج خوشه به عنوان تعداد خوشه‌بندی مناسب در مدل تعیین شد.

جدول ۷. تعیین تعداد خوشهٔ مناسب با معیارهای اعتبارسنجی خوشه‌بندی

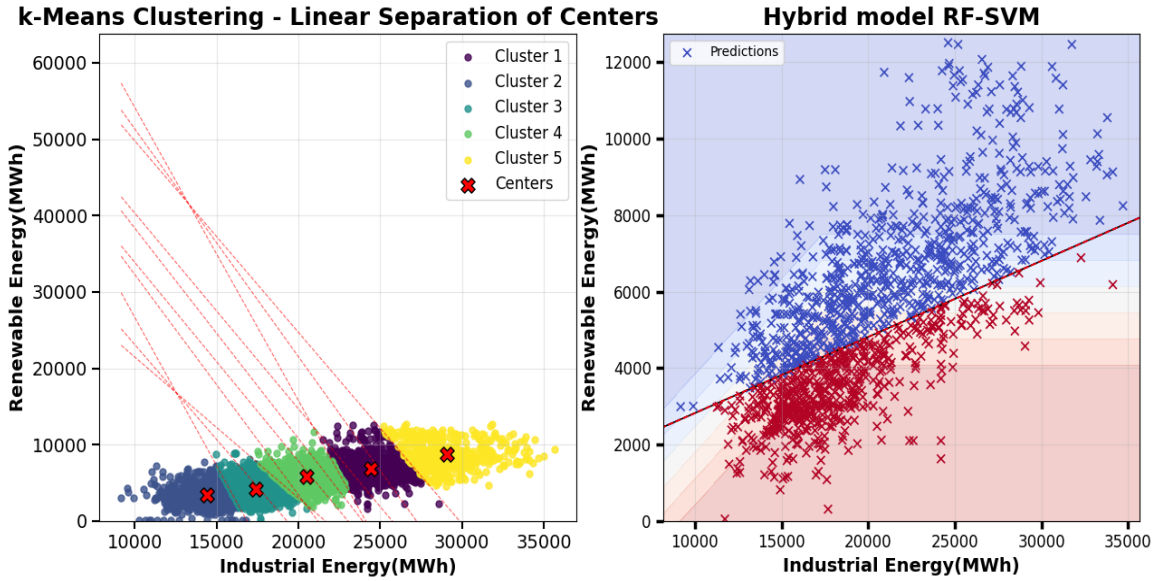
	تعداد خوشه (k)	Inertia (WCSS)	Davies-Bouldin Index (DBI)	Silhouette Score (S)	Calinski-Harabasz Index (CH)
مدل خوشه بندی	۳	۱۰۹۹۴۲۴۴۱۹۲۹/۵۱	۰/۶۱۲	۰/۵۲۸۹	۱۲۲۵۶/۹۸
	۴	۷۴۱۸۰۲۲۸۶۶۲/۷۵	۰/۷۶۰۱	۰/۵۸۹۸	۱۲۸۳۹/۷۱
	۵	۵۵۴۹۸۹۹۹۳۶۹/۴۳	۰/۶۶۸۷	۰/۷۴۰۳	۱۳۲۲۷/۴۰
	۶	۶۵۸۰۶۰۴۹۳۱۵/۳۶	۰/۶۷۵۱	۰/۵۴۷۶	۱۳۳۳۴/۰۱

۴-۵. مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان و خوشه‌بندی K-means

مدل ترکیبی خوشه‌بندی و بردارپشتیبان ماشین به منظور ایجاد یک طبقه‌بندی با نظارت براساس نتایج خوشه‌بندی تدوین می‌شود. در اجرای این مدل ترکیبی، دو گام وجود دارد: در گام اول که بخشی از داده‌ها به عنوان بخش آموزش انتخاب شد که

1. Elbow Method
2. WCSS

۳۰ درصد داده‌ها را شامل می‌شود. در گام دوم، لیبل مربوط به خوشه به عنوان برچسب مورد استفاده در ماشین بردار پشتیبان مورد استفاده قرار گرفته و با ایجاد بخش آزمون، مقادیر پیش‌بینی توسط الگوریتم محاسبه شده است. مطابق شکل ۹ خوشه‌بندی مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعت و انرژی الکتریکی تجدیدپذیر با تعداد k=5 خوشه نشان داده شده است. این روش به منظور جلوگیری از نشت اطلاعات از خوشه‌ها و همچنین، جلوگیری از بیش‌برازش این مدل انجام شده، به طوری که مقادیر معیارهای اعتبارسنجی مدل ترکیبی بهتر از مدل‌های ساده طبقه‌بندی هستند که نشان‌دهندهٔ تطبیق بیشتر این مدل با واقعیت‌ها است. در این مدل ترکیبی نتیجهٔ خوشه‌بندی به عنوان ویژگی جدید به صورت یک برچسب جدید به مجموعه داده‌ها اضافه شد. سپس، طبقه‌بندی مجموعه داده با آموزش و آزمون براساس روش ماشین بردار پشتیبان با هستهٔ خطی انجام شد.



شکل ۹. خوشه‌بندی انرژی الکتریکی تجدیدپذیر با روش ترکیبی ماشین بردار پشتیبان و K-Means

آن طور که نتایج نشان می‌دهد ترکیب ماشین بردار پشتیبان و خوشه‌بندی باعث بهبود نتایج و افزایش معیارهای مؤثر در اعتبارسنجی مدل مطابق جدول ۸ می‌شود. این نمودار نشان می‌دهد هر دو مشخصه دارای همبستگی مستقیم با هم هستند.

جدول ۸. معیارهای اعتبارسنجی مدل ترکیبی خوشه‌بندی ـ ماشین بردار پشتیبان

نام مدل	درستی Accuracy	دقت Precision	فراخوانی Recall	نمرهٔ F1 Score
مدل ترکیبی خوشه‌بندی و ماشین بردار پشتیبان	۰/۹۲۱۷	۰/۹۱۷۵	۰/۸۹۷۰	۰/۹۰۷۱

۵. بحث و نتیجه‌گیری

می‌توان گفت که چالش اصلی کنونی گذار انرژی جهانی و البته ایران، به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر، پیروی از مسیر درست برای برآورده کردن تقاضای روزافزون انرژی با هزینهٔ به‌صرفه و با گزینه‌های کربن کم است. با این‌حال، براساس تحلیل‌های انجام‌شده، قیمت خرید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر که توسط واحدهای صنعتی در اختیار شبکهٔ سراسری گذاشته می‌شود و همچنین قیمت انرژی الکتریکی دریافت‌شده از شبکهٔ سراسری برمبنای زمان مصرف می‌تواند متغیر باشد. افزون بر این، با در نظر گرفتن معادلهٔ همترازی، از لحاظ اقتصادی نیز سرمایه‌گذاری واحدهای صنعتی در خرید تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی تجدیدپذیر توجیه‌پذیر می‌شود. از طرف دیگر با توجه به معادلهٔ همترازی، کاهش تولید انرژی الکتریکی با سوخت فسیلی نیز مقدمهٔ افزایش تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر به عنوان یک جایگزین فعال و به‌صرفه مطرح می‌شود که این انرژی پاک است و اثرات کاهش انتشار کربن و محافظت از محیط زیست را به همراه دارد. ناگفته نماند که توسعهٔ انرژی تجدیدپذیر در

کشور، در ابعادی اقتصادی با چالش‌های متعددی از جمله محدودیت در سرمایه‌گذاری خارجی، مشکلات سرمایه‌گذاری بخش خصوصی و محدودیت‌های فناوری روبه‌رو است که رشد آن را آهسته کرده است. این مسئله لزوم توجه به فرایند خودکفایی را بیشتر نمایان می‌سازد تا ظرفیت‌های فناوری بومی مورد توجه قرار گیرد و سازمان‌های مردم‌نهاد یا شرکت‌های سهامی عمومی به سرمایه‌گذاری در این حوزه متمایل شوند. مجموع این راه‌کارها بر مبنای اصول علم اقتصاد، مدیریت صنعت برق، تحلیل الگوها و معادلهٔ همترازی ارائه شده است، به طوری که راهکارهای اقتصادی انرژی پایدار برای مدیریت مصرف برق صنایع با رویکرد انرژی تجدیدپذیر در کشور به شرح ذیل می‌تواند باشد.

اول- قیمت‌گذاری زمان‌محور[1]

قیمت‌گذاری براساس زمان مصرف نوعی روش اقتصادی مؤثر در مدیریت بازار و هیجانات مصرف‌کنندگان است. در این مدل قیمت برق متناسب با بار شبکه و براساس نوع اقلیم متفاوت تنظیم می‌شود. در این راستا امکان بخش‌بندی قیمتی و مدل‌های تخفیفی نیز وجود دارد. در نتیجه، اقدامات مربوط به قیمت‌گذاری زمان‌محور یا پویا، واحدهای صنعتی هزینهٔ انرژی الکتریکی را با جابه‌جایی مصرف به زمان کم‌بار شبکه کاهش می‌دهند که در نهایت فشار بر شبکهٔ برق در ساعت‌های اوج کمتر می‌شود و در نتیجه، امکان هماهنگی کامل‌تر واحدهای صنعتی با تولید انرژی تجدیدپذیر به روش نصب پنل خورشیدی ایجاد می‌شود.

دوم- قراردادهای مدیریت تقاضا[2]

در این مدل، بخش صنعتی با مدیریت شبکهٔ انرژی توزیع الکتریکی توافق می‌کند که در ساعت‌های بحرانی بار، مصرف خود را کاهش دهد و در مقابل از تخفیف قیمت انرژی الکتریکی، پاداش نقدی یا جوایزقرعه‌کشی واحدهای صنعتی کم‌مصرف، اعتبار خرید برق دریافت می‌کند. مدیریت تقاضا بر بهینه‌سازی مصرف تمرکز بیشتری دارد. انعطاف در زمان‌های تولید و رعایت اصول مصرف مانند نمودار اردک[3] در بهبود تقاضا مؤثر خواهد بود.

سوم- استفادهٔ مستقیم صنایع از برق تجدیدپذیر[4]

صنایع بزرگ و اصلی مانند صنایع فولاد، سیمان، پتروشیمی می‌توانند نیروگاه خورشیدی اختصاصی، نیروگاه بادی خصوصی و نیروگاه‌های ترکیبی از خورشیدی و گازی ایجاد کنند. هزینهٔ همترازشده[5] برای انرژی خورشیدی ۵ تا۷ سنت بر کیلووات ساعت و انرژی بادی ۴ تا ۶ سنت است، در حالی که انرژی فسیلی بدون یارانه ۱۰ تا ۱۵ سنت است. لذا مزیت اقتصادی این روش‌ها به دلیل اینکه هزینهٔ برق تجدیدپذیر در ایران بسیار پایین است و همچنین، باعث کاهش وابستگی به شبکه و حذف خاموشی در بخش‌های صنعتی و تولیدی می‌شود، کنترل‌پذیری هزینهٔ انرژی در بلندمدت به‌صرفه است.

چهارم- سرمایه‌گذاری در ایجاد سیستم‌های ترکیبی انرژی تجدیدپذیر

اهمیت ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی و تنوع بخشی به نیروگاه‌های تولید انرژی تجدیدپذیر (پاک) کاملاً مشهود است. سیستم‌های ترکیبی خورشیدی و برق حرارتی و همین‌طور مجتمع‌های ترکیبی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر (بادی، زمین گرمایی و زیستی) و نیروگاه‌های مقیاس کوچک می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر انرژی الکتریکی پایدار بخش صنعتی و رفع ناترازی در تولید انرژی الکتریکی باشند. توجه به این نکته حائز اهمیت است که سرمایه‌گذاری با کمک سازمان‌های مردم‌نهاد و شرکت‌های سرمایه‌گذاری داخلی یا خارجی امکان‌پذیر است.

پنجم- نصب و راه‌اندازی سیستم‌های مدیریت هوشمند انرژی[6]

سیستم مدیریت هوشمند انرژی مصرف کل کارخانه را تحلیل می‌کند و به صورت خودکار در مسیر افزایش بهره‌وری در بخش صنعتی حرکت می‌کنند. در این راستا استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی در طراحی کارخانه‌های جدید و هوشمندسازی آن‌ها با

1. Time-of-Use Pricing
2. Demand Response Contracts
3. Duck Curve
4. Self-Generation
5. LCOE
6. EMS

استفاده از اینترنت اشیا و دوقلوهای دیجیتال و پردازش ابری می‌تواند بخشی از کاهش مصرف انرژی الکتریکی باشد، به طوری که تجهیزات غیرضروری را در ساعت‌های گران خاموش می‌کند و شارژ باتری‌های ذخیره‌سازی و مصرف انرژی تجدیدپذیر را هماهنگ می‌کند.

ششم- مالیات کربن بر بخش صنعتی در اقتصاد چرخشی

توجه به جنبهٔ سیاست‌گذاری اقتصادی با ملاحظات زیست‌محیطی موجب کاهش انتشار گازهای آلاینده محیط می‌شود، واحدهای صنعتی و تولیدی با تمرکز بیشتر بر کاهش آلودگی در مسیر نیل به استفاده از انرژی پاک حرکت می‌کنند و زنجیرهٔ انرژی سبز به واقعیت می‌پیوندد، چرا که مالیات بر استفاده از سوخت‌های فسیلی، مشوقی برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش صنعتی است که بر اساس قوانین مالیاتی براساس نظر آن‌ها در بودجهٔ کشور هزینه می‌شود و بخشی از آسیب‌های آلودگی را جبران می‌کند که لزوماً پیوستن کارفرمایان و بخش های صنعتی دولتی به این پویش را می‌طلبد.

در نهایت توسعهٔ نیروگاه‌های تولید انرژی تجدیدپذیر گام اصلی و اساسی در ایجاد تعادل تولید و مصرف انرژی الکتریکی می تواند قلمداد شود، سازمان‌های متولی این نوع انرژی‌ها مانند سازمان بهینه‌سازی انرژی در کشور نقش مهم و کلیدی در تعیین راهبردهای اصلی در این حوزه و ارائهٔ نقشهٔ راه را به عهده دارد. همچنین، پیشنهاد می‌شود در ادامهٔ تحقیقات آتی استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی مصارف منابع تجدیدشونده، کمینه‌سازی مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنعت و اولویت‌بندی راهبردها بر اساس برنامه‌های بلندمدت در بخش انرژی الکتریکی طبق برنامه‌های توسعهٔ کشور صورت گیرد. در این مسیر استفاده از پتانسیل سازمان‌های موجود جهت افزایش بهره‌وری و اجرای راهبردهای ارائه‌شده در مرحلهٔ اجرا پیشنهاد می‌شود، تعامل سازندهٔ خبرگان دانشگاهی و متخصصان صنعت و انرژی تجدیدپذیر می‌تواند نویدبخش شکوفایی، پایداری و توسعه در این بخش از سیستم‌های اقتصادی باشد.

منابع

[1]. Hosseini Nezhad, A., Moradi, M., and Tavakoli, R., "Impact of economic sanctions on energy management and sustainability in Iran", *Sustainability*, 12(14), 5709, 2020. https://doi.org/10.3390/su12145709

[2]. Ahmadi, M., Sadeghi, M., and Heidari, A., "Industrial energy efficiency in Iran: Challenges and solutions", *Energy Efficiency Journal*, 12(3), 215-230, 2022, https://doi.org/10.1007/s12053-022-0997-1

[3]. Ghasemi, A., Soroush, A., and Hosseini, Z., Application of artificial intelligence in energy management of Iran's industrial sector. *International Journal of Energy Research*, 47(2), 982-995, 2023, https://doi.org/10.1002/er.8001

[4]. Ranjbar, F., Rafiei, A., and Khorshidi, M., Leveraging artificial intelligence for optimizing energy efficiency strategies in Iranian industries. *Journal of Cleaner Production*, 324, 129123, 2022, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.129123

[5]. Hirani ,H., Dudabinejad ,A., Shabiri ,S.M., "Planning the development of thermal power plants in Iran in the Seventh Development Plan, based on gas fuel limitations", *Journal of Planning and Development Research*, Year 4, No. 1 (13th issue, Spring 2023) ، 179-217, 2023 (In Persian)

[6]. Su, S., Ahn, T., and Yang, Y., Enhancing durability of organic–inorganic hybrid perovskite solar cells in high-temperature environments: exploring thermal stability, molecular structures, and AI applications. Adv. Funct. Mater. 35 (1), 2408480, 2025.

[7]. Moatazadian, R., Dodabinejad, A., "Identifying the challenges of implementing the private sector investment policy in the field of thermal power generation", *Comparative Public Administration Quarterly*, Year 2, Volume 2, Issue 4, pp. 1-17, 2024 (In Persian).

[8]. Souhankar, A., Mortezaee, A., and Hafezi, R., "Potentials for energy-saving and efficiency capacities in Iran: An interpretive structural model to prioritize future national policies", *Energy*, 262, 125500, 2023, https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125500

[9]. Gulyamova1, D., and Khaydarova, M., "Sustainable Energy Management Using Machine Learning", *International Journal for Multidisciplinary Research*, Volume 6, Issue 1, January-February 2024.

[10]. Chien, F. "How renewable energy and non-renewable energy affect environmental excellence in N-11 economies?" *Renew. Energy* 196, 526–534, 2022. https://doi:10.1016/j.renene.2022.07.013

[11]. Fang, J., Gozgor, G., Mahalik, M. K., Mallick, H., and Padhan, H., "Does urbanisation induce renewable energy consumption in emerging economies? , The role of education in energy switching policies", *Energy Econ*. 111, 106081, 2022, https://doi:10.1016/j.eneco.2022.106081

[12]. Farghali, M., Osman, A. I., Mohamed, I. M., Chen, Z., Chen, L., Ihara, I., et al., "Strategies to save energy in the context of the energy crisis: A review", Environ. Chem.Lett. 21, 2003–2039, 2023, https://doi:10.1007/s10311-023-01591-5

[13]. Zhou, X., Jia, M., Altuntaş, M., Kirikkaleli, D., and Hussain, M., "Transition to renewable energy and environmental technologies: the role of economic policy uncertainty in top five polluted economies", J. *Environ. Manag*. 313, 115019, 2022, https://doi:10.1016/j.jenvman.2022.115019.

[14]. Zhao, J., Lin, N., Zhu, H., and Liu, X., "Role of sharing economy in energy transition and sustainable economic development in China", J. *Innovation Knowl*. 8, 2023, https://100314.doi:10.1016/j.jik.2023.100314.

[15]. Neacsa, A., Rehman Khan, S. A., Panait, M., and Apostu, S. A. (2022). "The transition to renewable energy—a sustainability issue?," in Energy transition: Economic, social and environmental dimensions (Springer), 29–72

[16]. Emna, O., Chtourou, N., and Bazin, D., "Technological, economic, institutional,and psychosocial aspects of the transition to renewable energies: A critical literature review of a multidimensional process", *Renew. Energy Focus* 43, 37–49, 2022, https://doi:10.1016/j.ref.2022.08.004

[17]. Quitzow, R., Thielges, S., Goldthau, A., Helgenberger, S., and Mbungu, G., "Advancing a global transition to clean energy–the role of international cooperation", *Economics* 13, 20190048, 2019, https://doi:10.5018/economics-ejournal.ja.2019-48

[18]. Lee, J.Y., Ramasamy, A.K., Ong, K.H., Verayiah, R., Mokhlis, H., and Marsadek, M., "Energy storage systems: a review of its progress and outlook, potential benefits, barriers and solutions within the Malaysian distribution network", *J Energy Storage* 72:108360., 2023, https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.108360

[19]. Das, S., Ray, A., and De, S., "Techno-economic optimization of desalination process powered by renewable energy: A case study for a coastal village of southern India", *Sustain Energy Technol Assessments*, 51:101966, 2022, https://doi.org/10.1016/j.

[20]. Abd Karim, M.Z., Chan, S.G., Ismail, N.H., and Sharif, A., "Does energy productivity lead to economic efficiency and lower CO2 emission in Malaysia? Evidence from bootstrapped ARDL approach", Journal of Sustainability Science and Management, 17(3), 32–50, 2022, https://doi.org/10.46754/jssm.2022.03.004.

[21]. Alavi, B., Tavana, M. and Mina, H. (2021). A Dynamic Decision Support System for Sustainable Supplier Selection in Circular Economy, Sustainable Production and Consumption, 27, 905–920

[22]. Jose, B.J., Jain, P., Rani, T.R., 2024. Enhancing crude oil pipeline design efficiency through explainable AI: a COMSOL simulation approach. In: Al Mubarak, M ,.Hamdan, A. (Eds.), Innovative and Intelligent Digital Technologies; Towards an Increased Efficiency, 2. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 461–474

[23]. Eskandari, B., Almasi, M., and Azami, S., "The effect of industrial concentration on the energy efficiency of the industry sector in the Iranian provinces". Journal of Economic Policy, 12(24), 2021, https://doi.org/10.22034/epj.2021.14007.2084.

[24]. Sheini, D.D., Giustiniani, M., Busetti, M., Cherubini, C., Giulia A., Guillermo, A.N., "Artificial Intelligence in Deep Geothermal Energy: Trends, Insights, and Future Perspectives", *Renewable Energy Focus*, 56, 100781, 2026, https://doi.org/10.1016/j.ref.2025.100781

[25]. Galarza-Chavez, A.A., et al., "Multi-step wind energy forecasting in the Mexican Isthmus using machine and deep learning, Energy Rep, 13, 1–15, 2025.

[26]. Bressane, A., Garcia, A.J., Castro, M., Xerfan, S.G., and Ruas, R.N., "Fuzzy machine learning applications in environmental engineering: Does the ability to deal with uncertainty really matter?", *Sustainability* ,16 (11), 4525, 2024, http://dx.doi.org/10.3390/su16114525.

[27]. Rao, B., Praveen, M., and Babu, D.R., "A review on the role of ai in optimizing renewable energy grid management", *Int. J. Sci. Res. Eng. Manag*. 8, 1–13, 2024.

[28]. Amiri, M.M., et al., "New trends for machine learning applications in future power systems, in artificial intelligence in the operation and control of digitalized power systems". In: Azad, S., Nazari-Heris, M. (Eds.), *Springer Nature Switzerland*: *Cham*, pp. 89–114, 2024.

[29]. Lin, R., Ding, L. Li, Z.,"Efficiency evaluation and productivity analysis of complex electric power systems in China: A directional slacks-based network data envelopment analysis approach", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 156, 2024, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109751

[30]. Yang, H., Zhao, L., and Liu, Q., "Solar power prediction using neural networks and SVM", Renewable Energy Forecasting Journal, 14(5), 330-345, 2022, https://doi.org/10.1016/j.renfor.2022.330

[31]. Singh, A., Kumar, P., and Agrawal, D., "Wind energy forecasting using hybrid machine learning models", *Journal of Renewable Energy Science*, 29(3), 215-228, 2021 https://doi.org/10.1016/j.jres.2021.21505

[32]. Christina, E., Hoicka, M.G., Maya, W., and Yuxu, Z., "Insights to accelerate place-based at scale renewable energy landscapes: An analytical framework to typify the emergence of renewable energy clusters along the energy value chain", *Applied Energy*, 377, 124559, 2025, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124559

[33]. Elomari, Y., Mateu, C.M. Marín-Genesc`a , and Dieter, B., "A data-driven framework for designing a renewable energy community based on the integration of machine learning model with life cycle assessment and life cycle cost parameters", *Applied Energy* 358, 122619, 2024, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122619

[34]. Raditia, Y.S., Sarah, G.M.H., and Yeneneh, T.N., "Enhancing environmental sustainability in a Circular Waste Bioeconomy: A hierarchical framework driven by operational efficiency and agro-

energy management", *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 9, 100115, 2024, https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100115

[35]. Steven, M., and Williamson, V.P., "Integrating human-centric automation and sustainability through the NAToRM framework: A neuromorphic computing approach for resilient industry 5.0 supply chains", I*nternational Journal of Information Management Data Insights*, 4, 100278, 2024, https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2024.100278

[36]. Fathi, M.R., Mozamez, H., Shahbazi, M., and Ahmadzadeh, M., "Identifying the dimensions, characteristics and requirements of the risk management system using the meta-tracking method (case study: agricultural processing industries)", *Quarterly Scientific Research Journal of Investment Knowledge*, Volume 12, Issue 4, Issue 48, Winter 1402, pages 489-510, 2021 (In Persian)

[37]. Mohatsami Moali, M., Hosseinzadeh Kashan, A., and Heydari Dehoi, J., "Explaining the data-driven decision-making model to identify factors affecting the satisfaction of online exchange traders using fuzzy cognitive mapping (case study: Google Play and Apple Store)", *Iranian Journal of Management Sciences*, 17th year, issue 80, Winter 1401, pages 101-147, 2022 (In Persian).

[38]. Arjomandi, R., Fathi, M.R., Mantagi, M. and Shahbazi, M., "Analytical study of the components of the fourth industrial revolution in the Iranian automotive industry", Quarterly Journal of Industrial Technology Development, No. 53, Fall 1402, 2023 (In Persian).

[39]. Bin, S., Yintai, A., Li, X., and Lionel, K.Y., "Data-driven Approach for Discovery of Energy Saving Potentials in manufacturing Factory", *Procedia CIRP*, 69,330 – 335, 2018.

[40]. Saunders, M., Lewis, P. and Thornhill, A., "Research Methods for Business Students". (8 ed.) Pearson, 2019.

[41]. Abaimov, S., "Machine learning for Cyber agents: attack and defence, Advanced Sciences and Technologies for Security Applications", Springer Nature , 2022, https://doi.org/10.1007/978-3-030-91585-8

[42]. Brownle, J., "Master Machine Learning Algorithms Discover How They Work and Implement Them from Scratch"**,** *Jason Brownlee*. All Rights Reserved.Edition, v1.1, 2016.

[44]. Xiaoou, L., Jair, C., and Wen ,Y., "Two-Stage SVM Classification for Large Data Sets via Randomly Reducing and Recovering Training Data", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2007, DOI: 10.1109/ICSMC.2007.4413814