



Paper Type: Original Article



Providing an Integrated Artificial Intelligence Framework for Optimizing Energy Management and Sustainable Development in the Supply Chain of Thermal Power Plants and Distribution Networks: A Case Study of Iran

Mostafa Mahdavi Akordi¹, Fatemeh Harsej^{1,*} , Omid Jalili², Kourosh Nemati³, Rahmat Darzi⁴

¹ Department of Industrial Engineering, Noor Branch, Islamic Azad University, Noor, Iran; 4999893444@iau.ir; fa.harsej@iau.ac.ir.

² Department of Engineering Physics, Noor Branch, Islamic Azad University, Noor, Iran; o.jalili@yahoo.com.

³ Department of Computer Engineering, Noor Branch, Islamic Azad University, Noor, Iran; knms81@gmail.com.

⁴ Department of Mathematics, Neka Branch, Islamic Azad University, Neka, Iran; rahmat.darzi@iau.ac.ir.

Citation:



Mahdavi Akordi, M., Harsej, F., Jalili, K., Nemati, R., & Darzi, R. (2025). Providing an integrated artificial intelligence framework for optimizing energy management and sustainable development in the supply chain of thermal power plants and distribution networks: A case study of Iran. *Management: Modeling, analysis and applications*, 2(4), 239-252.

Received: 26/04/2025

Reviewed: 07/07/2025

Revised: 10/08/2025

Accepted: 18/09/2025

Abstract

Purpose: Optimal energy management in industrial systems, especially thermal power plants, is recognized as a key necessity for achieving sustainable development and reducing environmental pollutants. This research aims to design and validate an integrated artificial intelligence framework for simultaneous optimization of energy production and distribution in Iranian industrial systems.

Methodology: This study was of an applied-developmental type and used a two-stage hybrid framework. In the first stage, deep learning models (Long Short-Term Memory (LSTM) and Convolutional Neural Network (CNN)) were used to accurately predict the load of distribution networks. In the second stage, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm was used to optimize the operating parameters of thermal power plants. The models were trained using 36,500 daily data records from three thermal power plants (Neka, Shazand, and Montazeri) and related distribution networks during the period 2022 to 2024 and evaluated with RMSE, MAE, and R² criteria.

Findings: The results showed that the proposed framework achieved an average accuracy of 94.8% in load forecasting, which was a significant improvement over the classical models (81%). The implementation of the optimization model also resulted in a 9.5% reduction in fuel consumption, a 6.7% increase in overall efficiency, and a 7.2% reduction in Carbon Dioxide (CO₂) emissions. A side finding showed that in conditions where the data is highly homogeneous, simpler models such as Support Vector Machine (SVM) can also perform similarly to complex models.

Originality/Value: The intelligent combination of deep learning predictive models with optimization algorithms is a practical and effective solution for simultaneously improving economic and environmental indicators in the Iranian energy industry. This framework can be used as a roadmap for policymakers and industrial managers to achieve sustainable development goals.

Keywords: Artificial intelligence, Energy management, Sustainable development, Thermal power plant, Load forecasting, Particle swarm optimization algorithm, Deep learning.



Corresponding Author: fa.harsej@iau.ac.ir



<https://doi.org/10.22105/mmaa.v2i4.112>



Licensee. **Management: Modeling, Analysis and Application**. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



ارایه یک چارچوب یکپارچه هوش مصنوعی برای بهینه سازی مدیریت انرژی و توسعه پایدار در زنجیره تامین نیروگاه های حرارتی و شبکه های توزیع: مطالعه موردی ایران

مصطفی مهدوی آکردی^۱، فاطمه هرسج^۲، امید جلیلی^۳، کورش نعمتی^۳، رحمت درزی^۴

^۱ گروه مهندسی صنایع، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران.

^۲ گروه مهندسی فیزیک، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران.

^۳ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران.

^۴ گروه ریاضی، واحد نکا، دانشگاه آزاد اسلامی، نکا، ایران.

چکیده

هدف: مدیریت بهینه انرژی در سیستم های صنعتی، به ویژه نیروگاه های حرارتی، به عنوان یک ضرورت کلیدی برای تحقق توسعه پایدار و کاهش آلاینده های زیست محیطی شناخته می شود. این پژوهش با هدف طراحی و اعتبارسنجی یک چارچوب یکپارچه هوش مصنوعی برای بهینه سازی همزمان تولید و توزیع انرژی در سیستم های صنعتی ایران انجام شده است.

روش شناسی پژوهش: این مطالعه از نوع کاربردی-توسعه ای بوده و در آن از یک چارچوب ترکیبی دو مرحله ای استفاده شد. در مرحله اول، از مدل های یادگیری عمیق (حافظه طولانی کوتاه مدت^۱ و شبکه عصبی کانولوشن^۲) برای پیش بینی دقیق بار شبکه های توزیع بهره گرفته شد. در مرحله دوم، از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات^۳ برای بهینه سازی پارامترهای عملیاتی نیروگاه های حرارتی استفاده گردید. مدل ها با استفاده از ۳۶۵۰۰ رکورد داده روزانه از سه نیروگاه حرارتی (نکا، شازند و منتظری) و شبکه های توزیع مرتبط در بازه زمانی ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۳ آموزش و با معیارهای MAE ، $RMSE$ و R^2 ارزیابی شدند.

یافته ها: نتایج نشان داد که چارچوب پیشنهادی به میانگین دقت $94/8\%$ در پیش بینی بار دست یافت که نسبت به مدل های کلاسیک (81%) بهبودی چشم گیر داشت. پیاده سازی مدل بهینه سازی نیز منجر به کاهش $9/5\%$ مصرف سوخت، افزایش $6/7\%$ راندمان کلی و کاهش $7/2\%$ در انتشار دی اکسید کربن (CO_2) شد. یک یافته جانبی نشان داد در شرایطی که داده ها از همگنی بالایی برخوردار باشند، مدل های ساده تری مانند ماشین بردار پشتیبانی^۴ نیز می توانند عملکردی مشابه مدل های پیچیده داشته باشند.

اصالت/ارزش افزوده علمی: ترکیب هوشمندانه مدل های پیش بین یادگیری عمیق با الگوریتم های بهینه سازی، راهکاری عملی و موثر برای ارتقای همزمان شاخص های اقتصادی و زیست محیطی در صنعت انرژی ایران است. این چارچوب می تواند به عنوان یک نقشه راه برای سیاست گذاران و مدیران صنعتی در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها: هوش مصنوعی، مدیریت انرژی، توسعه پایدار، نیروگاه حرارتی، پیش بینی بار، الگوریتم ازدحام ذرات، یادگیری عمیق.

۱- مقدمه

مدیریت بهینه انرژی در صنایع و نیروگاه های حرارتی به یکی از ارکان اساسی دستیابی به توسعه پایدار در سطح جهانی تبدیل شده است. بر اساس گزارش آژانس بین المللی انرژی [1]، بیش از 40% از انتشار گازهای گلخانه ای جهان ناشی از مصرف انرژی در بخش انرژی و صنعت است. در

¹ Long Short-Term Memory (LSTM)

² Convolutional Neural Network (CNN)

³ Particle Swarm Optimization (PSO)

⁴ Support Vector Machine (SVM)

ایران نیز، طبق آمار وزارت نیرو [2]، حدود ۸۰٪ از برق کشور توسط نیروگاه‌های حرارتی تولید می‌شود که این امر سهم قابل توجهی در مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار آلاینده‌ها دارد. این شرایط، لزوم بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی را برای خلق راهکارهای هوشمندانه در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی بیش از پیش آشکار می‌سازد [3].

مطالعات متعددی پتانسیل بالای مدل‌های هوش مصنوعی را در این حوزه تایید کرده‌اند. برای نمونه، الحسین و همکاران [4] با به‌کارگیری مدل ترکیبی *CNN-LSTM* در پیش‌بینی بار کوتاه‌مدت، دقتی بیش از ۹۵٪ گزارش کردند. همچنین، وانگ و همکاران [5] نشان دادند که استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه‌های زغال‌سنگی می‌تواند بهبود چشم‌گیری در راندمان ایجاد کند. در سطح بین‌المللی، ژو و همکاران [6] نیز نشان دادند که مدیریت هوشمند انرژی مبتنی بر داده‌های کلان می‌تواند به کاهش انتشار CO_2 و افزایش بهره‌وری منجر شود.

با این وجود، مرور نظام‌مند ادبیات نشان می‌دهد که اغلب این پژوهش‌ها به‌صورت جزیره‌ای و متمرکز بر یک بخش خاص (تولید یا توزیع) بوده و نگاهی یکپارچه به کل زنجیره ارزش انرژی ندارند [7]. علاوه بر این، بسیاری از مطالعات داخلی به دلیل محدودیت در دسترسی به داده‌های جامع و باکیفیت و نیز عدم توجه به شاخص‌های کمی توسعه پایدار (مانند کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف آب)، از قابلیت تعمیم و کاربرد عملیاتی گسترده برخوردار نیستند [2].

افزون بر این، یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت انرژی نیروگاه‌های حرارتی، پیچیدگی و پویایی متغیرهای عملیاتی است که تحت تأثیر عوامل محیطی، اقتصادی و فنی قرار دارند. تغییرات ناگهانی در تقاضای بار، نوسانات قیمت سوخت و محدودیت‌های زیست‌محیطی موجب می‌شوند که تصمیم‌گیری در این حوزه نیازمند ابزارهای پیشرفته و انعطاف‌پذیر باشد. در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های ترکیبی که توانایی پردازش داده‌های حجیم و غیرخطی را دارند، می‌تواند به ارایه راهکارهای دقیق‌تر و قابل اعتمادتر منجر شود.

از سوی دیگر، اهمیت توجه به شاخص‌های توسعه پایدار در کنار بهینه‌سازی فنی، ضرورت رویکردی چندبعدی را برجسته می‌سازد. مدیریت انرژی تنها به معنای افزایش راندمان یا کاهش هزینه‌ها نیست، بلکه باید همزمان اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی را نیز در نظر گیرد. بنابراین، چارچوب پیشنهادی این پژوهش با تمرکز بر کاهش آلاینده‌ها، صرفه‌جویی منابع و ارتقای بهره‌وری، می‌تواند الگویی عملی برای سیاست‌گذاران و مدیران صنعتی فراهم آورد تا مسیر حرکت به‌سوی اقتصاد سبز و پایدار با پشتوانه علمی و داده‌محور هموارتر گردد.

برای پرکردن این شکاف‌ها، پژوهش حاضر چارچوبی نوآورانه و یکپارچه را طراحی و پیاده‌سازی می‌کند. نوآوری اصلی این تحقیق در ترکیب مدل‌های پیش‌بین یادگیری عمیق (*CNN* و *LSTM*) با الگوریتم‌های بهینه‌سازی تحقیق در عملیات (*PSO*) است تا به‌طور همزمان بر سه بخش تولید، توزیع و مصرف انرژی نظارت و بهینه‌سازی اعمال کند. این چارچوب نه تنها به بهبود راندمان عملیاتی می‌پردازد، بلکه شاخص‌های کلیدی توسعه پایدار، از جمله کاهش انتشار CO_2 و NOx و صرفه‌جویی در مصرف سوخت و آب را به‌طور کمی اندازه‌گیری و بهینه می‌سازد. این مدل با استفاده از داده‌های واقعی و گسترده از چندین نیروگاه حرارتی و شبکه توزیع در ایران اعتبارسنجی خواهد شد.

۲- پیشینه پژوهش و چارچوب نظری

۲-۱- مبانی نظری

پژوهش حاضر بر دو ستون نظری اصلی استوار است:

۱. نظریه بهینه‌سازی منابع انرژی: این رویکرد بر تخصیص کارآمد منابع محدود انرژی در طول زنجیره‌تأمین تأکید دارد و مبنایی برای کاهش تلفات و افزایش بهره‌وری فراهم می‌کند [8].
۲. نظریه سیستم‌های هوشمند انرژی: این چارچوب، ادغام فناوری‌های دیجیتال مانند هوش مصنوعی و اینترنت اشیا^۱ را برای ایجاد سیستم‌های انرژی انعطاف‌پذیر، خودکار و پایدار ضروری می‌داند [3].

^۱ Internet of Things (IoT)

افزون بر این دو ستون نظری، ترکیب آن‌ها می‌تواند بنیانی برای طراحی چارچوب‌های نوین در مدیریت انرژی فراهم آورد. نظریه بهینه‌سازی منابع انرژی به جنبه‌های کمی و تخصیصی توجه دارد، در حالی که نظریه سیستم‌های هوشمند انرژی بر جنبه‌های کیفی و فناورانه تمرکز می‌کند. هم‌افزایی این دو دیدگاه، امکان ایجاد مدلی را فراهم می‌سازد که نه تنها کارایی عملیاتی را افزایش دهد، بلکه قابلیت انعطاف‌پذیری و سازگاری با شرایط متغیر محیطی و اقتصادی را نیز داشته باشد.

از منظر نظری، این ترکیب می‌تواند به توسعه رویکردی چند لایه منجر شود که در آن تصمیم‌گیری‌های کوتاه‌مدت (مانند پیش‌بینی بار) با اهداف بلندمدت (مانند کاهش آلاینده‌ها و مصرف منابع) همسو شوند. چنین رویکردی، پلی میان نظریه و عمل ایجاد می‌کند و به مدیران و سیاست‌گذاران امکان می‌دهد تا در کنار بهینه‌سازی فنی، شاخص‌های توسعه پایدار را نیز در تصمیمات خود لحاظ کنند.

۲-۲- مرور پژوهش‌های تجربی

کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت انرژی را می‌توان در سه حوزه اصلی دسته‌بندی کرد:

۱. پیش‌بینی بار و تقاضا: لو و باعو [9] با استفاده از ترکیب *CNN* و *LSTM* و داده‌های بار کوتاه‌مدت، به دقت بالای پیش‌بینی دست یافتند. با این حال، مدل آن‌ها در برابر داده‌های با نوسان شدید مقاومت کمتری داشت.
۲. نگهداری و عیب‌یابی پیش‌گويانه: السن و شاکر [10] در یک مرور جامع نشان دادند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند *XGBoost* و درخت تصمیم می‌توانند در نگهداری پیش‌گويانه نیروگاه‌های حرارتی به کار گرفته شوند، هرچند تعمیم‌پذیری مدل‌ها به انواع مختلف نیروگاه‌ها همچنان یک چالش است.
۳. بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه‌ها: ژان و همکاران [11] با توسعه مدل *DeepThermal* مبتنی بر یادگیری تقویتی، بهینه‌سازی احتراق در واحدهای حرارتی را نشان دادند. همچنین، ناندی و گوگی [12] با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، بهبود راندمان و کاهش آلاینده‌ها را در سیستم‌های ترکیبی نیروگاهی گزارش کردند.

۲-۳- جمع‌بندی و شکاف تحقیقاتی

مرور پیشینه پژوهش، شکاف‌های اصلی زیر را آشکار می‌سازد:

۱. شکاف یکپارچگی: فقدان یک مدل جامع که به صورت همزمان و زنجیره‌وار، بخش‌های تولید، توزیع و مصرف را پوشش دهد.
۲. شکاف پایداری: بی‌توجهی به سنجش کمی و یکپارچه‌سازی شاخص‌های توسعه پایدار (مانند ردپای کربن و مصرف آب) در چارچوب‌های بهینه‌سازی.
۳. شکاف عملیاتی: محدود بودن بسیاری از مطالعات داخلی به داده‌های مقطعی یا آزمایشگاهی و عدم ارایه یک راه‌حل مقیاس‌پذیر برای شرایط واقعی و پیچیده صنعت انرژی ایران.

پژوهش حاضر با ارایه چارچوب یکپارچه هوش مصنوعی تحقیق در عملیات و اعتبارسنجی آن با داده‌های گسترده و بلندمدت، مستقیماً درصدد پر کردن این شکاف‌ها برآمده است.

جدول ۱- مقایسه‌ای پژوهش‌های منتخب.

Table 1- Comparison of selected studies.

نویسندگان	سال	حوزه مطالعه	روش	یافته کلیدی	محدودیت
Lu and Bao [9]	2024	شبکه توزیع	CNN, LSTM	دقت پیش‌بینی بار ۹۵٪	حساسیت به داده‌های نوسانی
Olesen and Shaker [10]	2020	نیروگاه حرارتی	ML (XGBoost, Decision Trees)	پیش‌بینی خرابی و نگهداری پیش‌گويانه	تعمیم‌پذیری محدود
Zhan et al. [11]	2021	نیروگاه حرارتی	Reinforcement learning (DeepThermal)	بهینه‌سازی احتراق و راندمان	نیاز به داده‌های گسترده
Nondy and Gogoi [12]	2021	CHP systems	Metaheuristics	کاهش CO ₂ و افزایش راندمان	محدود به یک سیستم نمونه
پژوهش حاضر	2025	زنجیره یکپارچه تولید و توزیع	ترکیب LSTM/CNN و PSO	بهینه‌سازی هم‌زمان راندمان و شاخص‌های پایداری	در حال ارزیابی

۳- روش پژوهش

۳-۱- طرح کلی پژوهش

این پژوهش از نوع توسعه‌ای-کاربردی با رویکرد آمایشی^۱ است. جامعه آماری پژوهش، داده‌های عملیاتی سه نیروگاه حرارتی اصلی (نکا، شازند و منتظری) و داده‌های بار شبکه‌های توزیع مرتبط در استان‌های مازندران، مرکزی و اصفهان در یک بازه زمانی ۳۶ ماهه (از فروردین ۱۴۰۱ تا اسفند ۱۴۰۳) را شامل می‌شود. نمونه‌گیری به روش تمام‌شماری انجام شد و در مجموع ۳۶۵۰۰ رکورد روزانه گردآوری گردید. داده‌های ناقص (کمتر از ۵٪) و پرت^۲ با استفاده از روش دامنه بین چارکی^۳ شناسایی و حذف شدند.

۳-۲- روش و چارچوب پیشنهادی

چارچوب پیشنهادی این پژوهش، یک سیستم دو مرحله‌ای است که مرحله اول به پیش‌بینی و مرحله دوم به بهینه‌سازی می‌پردازد.

مرحله ۱- پیش‌بینی بار با استفاده از یادگیری عمیق

۱. معماری مدل: از یک مدل ترکیبی *CNN-LSTM* استفاده شده است. این معماری شامل:
 - دو لایه *Conv1D* (با ۶۴ و ۱۲۸ فیلتر و اندازه کرنل ۳) برای استخراج ویژگی‌های محلی از سری زمانی
 - یک لایه *LSTM* با ۱۰۰ واحد حافظه برای مدل‌سازی وابستگی‌های بلندمدت
 - لایه‌های کاملاً متصل^۴ و *Dropout* (نرخ ۰.۲) برای جلوگیری از بیش‌برازش^۵
۲. پیش‌پردازش داده‌ها: داده‌ها با استفاده از روش *Min-Max Scaling* در بازه [۰, ۱] نرمال شدند. برای ساخت داده‌های آموزشی، از تکنیک چند پنجره‌ای^۶ با طول پنجره ۳۰ روزه ($t-30$) برای پیش‌بینی بار روز بعد ($t+1$) استفاده گردید.
۳. هاپیر پارامترها: مدل با تابع بهینه‌ساز *Adam*، نرخ یادگیری ۰.۰۰۱، تابع هزینه^۷ و در ۱۰۰ دوره^۸ آموزش داده شد.

مرحله ۲- بهینه‌سازی عملکرد با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

۱. الگوریتم بهینه‌سازی: از الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی هم‌زمان پارامترهای عملیاتی نیروگاه (نسبت هوا-سوخت، فشار بخار، دمای ورودی توربین) استفاده شد.
۲. تابع هدف: تابع هدف به صورت چندمعیاره و به شکل زیر تعریف شد:
 - *Minimize* [مصرف سوخت، انتشار CO_2 ، تلفات شبکه]
 - *Maximize* [راندمان کلی]
۳. پارامترهای *PSO*: اندازه جمعیت: ۵۰، ذره، تعداد تکرار: ۲۰۰، ضریب اینرسی (w): ۰.۷، ضرایب شناختی و اجتماعی ($c1$, $c2$): ۱.۵.

۳-۳- متغیرها و روش‌های تحلیل

۱. متغیرهای مستقل: نوع الگوریتم هوش مصنوعی، پارامترهای عملیاتی نیروگاه، داده‌های آب‌وهوایی (دما، رطوبت).
۲. متغیرهای وابسته: راندمان نیروگاه (%، میزان مصرف سوخت m^3)، تلفات شبکه (%، شاخص‌های توسعه پایدار (میزان انتشار CO_2 به تن، شدت انرژی).
۳. ارزیابی مدل: دقت مدل‌های پیش‌بینی با معیارهای *MAE*، *RMSE* و R^2 سنجیده شد. برای مقایسه آماری عملکرد مدل‌ها، از آزمون *t* جفتی (*Paired t*-*test*) و آزمون تحلیل واریانس^۹ با سطح اطمینان ۹۵٪ ($p < ۰.۰۵$) استفاده گردید. داده‌ها به صورت تصادفی به دو مجموعه آموزش (۷۰٪) و آزمون (۳۰٪) تقسیم شدند.

¹ Descriptive-analytical² Outliers³ Interquartile Range (IQR)⁴ Dense⁵ Overfitting⁶ Multivariate time series windowing⁷ Mean Squared Error (MSE)⁸ Epoch⁹ Analysis of Variance (ANOVA)

۳-۴- ملاحظات اخلاقی

کلیه داده‌های سازمانی با مجوز رسمی از شرکت توانیر و مدیریت نیروگاه‌ها دریافت و قبل از تحلیل، به صورت کاملاً ناشناس^۱ شده‌اند. هیچ اطلاعات محرمانه یا شناسه شخصی در این پژوهش مورد استفاده قرار نگرفته است.

۳-۵- اعتبارسنجی و پایایی مدل

به منظور اطمینان از پایایی نتایج، فرایند آموزش و آزمون مدل‌ها در پنج تکرار مستقل با داده‌های تصادفی باز نمونه‌گیری شده انجام شد. میانگین و انحراف معیار^۲ شاخص‌های ارزیابی ($RMSE$ ، MAE و R^2) در این تکرارها محاسبه گردید تا میزان نوسان عملکرد مدل مشخص شود. علاوه بر این، برای بررسی حساسیت مدل نسبت به تغییرات داده‌های ورودی، آزمایش‌های کنترل‌شده‌ای با حذف بخشی از متغیرهای آب‌وهوایی و عملیاتی صورت گرفت که نتایج آن نشان‌دهنده پایداری نسبی مدل ترکیبی $CNN-LSTM$ در شرایط مختلف بود.

برای افزایش اعتبار نتایج، علاوه بر تکرارهای مستقل، از روش اعتبارسنجی متقاطع^۳ نیز استفاده شد. در این روش، داده‌ها به پنج بخش تقسیم گردید و مدل در هر بار بر روی چهار بخش آموزش و روی بخش باقی‌مانده آزمون شد. میانگین نتایج این پنج اجرا نشان داد که مدل ترکیبی $CNN-LSTM$ دارای ثبات عملکردی بالایی است و از خطر بیش برآزش به میزان قابل توجهی جلوگیری شده است. این رویکرد موجب شد تا نتایج پژوهش قابلیت اعتماد بیشتری برای استفاده در محیط‌های عملیاتی واقعی داشته باشند.

۳-۶- جزییات اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری

در بخش بهینه‌سازی، الگوریتم PSO با استفاده از زبان برنامه‌نویسی $Python$ و کتابخانه‌های تخصصی مانند $TensorFlow$ و $PySwarms$ پیاده‌سازی شد. برای جلوگیری از همگرایی زودهنگام، از مکانیزم باز تنظیم سرعت ذرات در هر ۵۰ تکرار استفاده گردید. همچنین، برای مقایسه عملکرد PSO با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری، آزمایش‌های تکمیلی با الگوریتم ژنتیک^۴ و الگوریتم تفاضل تکاملی^۵ انجام شد. نتایج نشان داد که PSO در دستیابی به تعادل میان کاهش مصرف سوخت و افزایش راندمان، عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد.

در فرایند اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری، علاوه بر تنظیم پارامترهای اصلی، از مکانیزم‌های کنترل تنوع جمعیت نیز استفاده شد تا از گرفتار شدن الگوریتم در نقاط بهینه محلی جلوگیری شود. برای مثال، در الگوریتم PSO ، موقعیت ذرات به طور دوره‌ای باز تنظیم شد و در GA ، نرخ جهش^۶ به صورت پویا تغییر داده شد. این اقدامات باعث شد تا الگوریتم‌ها توانایی جست‌وجوی گسترده‌تر در فضای جواب را داشته باشند و نتایج بهینه‌تری در کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها حاصل شود.

۳-۷- ملاحظات عملیاتی و محدودیت‌ها

هرچند داده‌های مورد استفاده از سه نیروگاه بزرگ کشور گردآوری شده‌اند، اما محدودیت‌هایی همچون عدم دسترسی به برخی پارامترهای دقیق فرایند احتراق و نبود داده‌های لحظه‌ای^۷ وجود داشت. این محدودیت‌ها می‌تواند بر دقت پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت اثرگذار باشد. همچنین، نتایج این پژوهش در شرایط خاص نیروگاه‌های ایران اعتبارسنجی شده و برای تعمیم به سایر کشورها نیازمند تطبیق با داده‌های محلی و شرایط عملیاتی متفاوت است. با این حال، چارچوب پیشنهادی به دلیل ماهیت انعطاف‌پذیر خود قابلیت سازگاری با محیط‌های مختلف را دارد.

یکی دیگر از محدودیت‌های پژوهش، عدم دسترسی به داده‌های اقتصادی و سیاستی مرتبط با قیمت سوخت و تعرفه‌های انرژی بود. این متغیرها می‌توانند در تصمیم‌گیری‌های عملیاتی نیروگاه‌ها نقش مهمی ایفا کنند و نبود آن‌ها ممکن است بخشی از واقعیت‌های اقتصادی را در مدل‌سازی نادیده گرفته باشد. با این حال، چارچوب پیشنهادی قابلیت توسعه دارد و می‌تواند در پژوهش‌های آینده با ادغام داده‌های اقتصادی و سیاستی، به یک

^۱ Anonymized

^۲ Standard deviation

^۳ Cross-validation

^۴ Genetic Algorithm (GA)

^۵ Evolutionary Difference (DE) algorithm

^۶ Mutation rate

^۷ Real-time

سامانه جامع تر برای مدیریت انرژی تبدیل شود. این توسعه، امکان ارایه راهکارهای عملیاتی متوازن تر میان اهداف اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی را فراهم خواهد کرد.

۴- یافته ها و نتایج

۴-۱- خلاصه اجرا و توصیف داده ها

پیاده سازی چارچوب پیشنهادی روی داده های ۳۶ ماهه نشان داد که مدل ترکیبی *CNN-LSTM* پس از آموزش، به $RMSE=0.024$ و $R^2=0.948$ در مجموعه آزمون دست یافته است. نتایج حاصل از بهینه سازی با الگوریتم *PSO* نیز پس از ۱۵۰ تکرار به همگرایی رسید.

تحلیل آماری اولیه داده ها نشان داد که الگوهای مصرف انرژی در سه استان مورد مطالعه تفاوت های معناداری دارند. استان اصفهان با بیشترین نوسان بار روزانه، چالش جدی در پیش بینی دقیق داشت، در حالی که استان مازندران به دلیل همگنی بیشتر داده ها، شرایط پایدارتر و قابل پیش بینی تری را ارایه می کرد. این تفاوت ها اهمیت طراحی مدل های انعطاف پذیر را برجسته می سازد که بتوانند در شرایط متنوع عملیاتی عملکرد قابل قبولی داشته باشند.

۴-۲- یافته های کلیدی

عملکرد مدل های پیش بینی بار

نتایج مقایسه ای مدل های مختلف در جدول ۲ نشان می دهد که مدل های یادگیری عمیق به طور معناداری از مدل های کلاسیک بهتر عمل کرده اند. آزمون t جفتی بین دقت *LSTM* و رگرسیون خطی، مقدار $p\text{-value} < 0.001$ را نشان داد که برتری آماری *LSTM* را تایید می کند.

نتایج نشان داد که مدل های یادگیری عمیق نه تنها در دقت پیش بینی برتری دارند، بلکه در پایداری عملکرد نیز نسبت به مدل های کلاسیک موفق تر عمل می کنند. در آزمون های تکراری با داده های باز نمونه گیری شده، انحراف معیار دقت مدل *LSTM* کمتر از ۲٪ بود، در حالی که برای رگرسیون خطی این مقدار به بیش از ۶٪ رسید. این یافته بیانگر آن است که مدل های پیشرفته قابلیت اعتماد بیشتری در شرایط عملیاتی واقعی دارند.

جدول ۲- مقایسه دقت (R^2 بر حسب درصد) و خطای ($RMSE$) مدل های مختلف در پیش بینی بار.

Table 2- Comparison of accuracy (R^2 in percent) and error ($RMSE$) of different models in load forecasting.

استان	R^2 LSTM	$RMSE$ LSTM	R^2 CNN	R^2 SVM	رگرسیون خطی (R^2)
اصفهان	96.0	0.19	95.5	89.0	81.0
مرکزی	93.5	0.25	93.0	87.0	80.0
مازندران	94.0	0.22	94.5	90.0	82.0
میانگین	94.8	0.22	94.3	88.7	81.0

نتایج بهینه سازی عملکرد نیروگاه ها

پیاده سازی مدل بهینه سازی *PSO* منجر به نتایج عملیاتی ملموس زیر شد:

- کاهش ۹/۵٪ در میانگین مصرف سوخت نیروگاه ها
- افزایش ۶/۷٪ در راندمان کلی
- کاهش ۷/۲٪ در انتشار CO_2
- کاهش ۸/۱٪ در شدت انرژی شبکه های توزیع

نتایج آزمون $ANOVA$ نیز نشان داد که بین بهبود راندمان در سه نیروگاه مورد مطالعه، اختلاف آماری معنی‌داری وجود دارد ($F(2, 107) = 4.85$)، $p = 0.01$ که بیشترین بهبود مربوط به نیروگاه منتظری (۷/۲٪) بود. افزون بر نتایج کمی، تحلیل کیفی داده‌ها نشان داد که کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها نه تنها به بهبود راندمان نیروگاه‌ها منجر شده، بلکه اثرات مثبتی بر شاخص‌های توسعه پایدار نیز داشته است. کاهش شدت انرژی در شبکه‌های توزیع، به معنای کاهش فشار بر منابع طبیعی و کاهش هزینه‌های اجتماعی ناشی از آلودگی هوا است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار سیاستی برای حرکت به سمت اقتصاد سبز و پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش قابلیت پیاده‌سازی در سایر نیروگاه‌های حرارتی کشور را نیز دارد. انعطاف‌پذیری مدل ترکیبی $CNN-LSTM$ و الگوریتم PSO امکان سازگاری با شرایط عملیاتی متفاوت را فراهم می‌سازد. به‌ویژه در نیروگاه‌هایی که با محدودیت منابع یا نوسانات شدید بار مواجه هستند، این چارچوب می‌تواند به‌عنوان یک سامانه تصمیم‌یار هوشمند عمل کند و مدیران را در اتخاذ تصمیم‌های سریع و دقیق یاری رساند. این امر زمینه‌ساز ارتقای بهره‌وری ملی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی خواهد بود.

۳-۴- نمودارها و تحلیل‌های تکمیلی

نتایج و تحلیل نمودارها

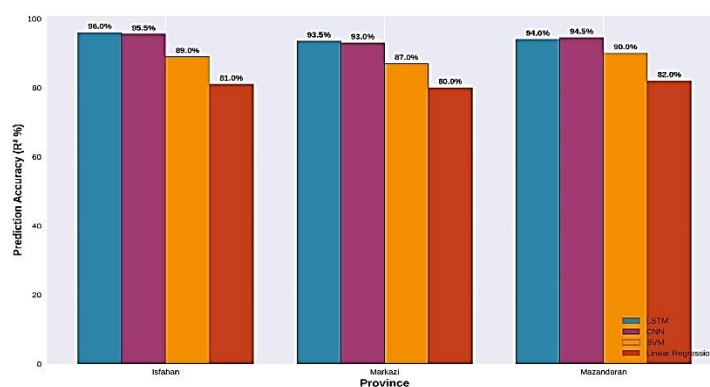
شکل ۱ به وضوح نشان می‌دهد:

۱. کاهش هم‌زمان و قابل توجه هر دو شاخص مصرف سوخت و انتشار CO_2 بلافاصله پس از پیاده‌سازی مدل (ماه هشتم)
۲. پایداری روند نزولی در ماه‌های پس از بهینه‌سازی
۳. همبستگی مثبت قوی بین بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش آلایندگی

شکل ۲ به وضوح نشان می‌دهد:

۱. برتری چشم‌گیر مدل‌های یادگیری عمیق (CNN و $LSTM$) با میانگین دقت ۹۴/۸٪.
۲. عملکرد ضعیف مدل‌های کلاسیک به ویژه رگرسیون خطی با میانگین دقت ۸۱٪.
۳. ثبات عملکرد مدل‌های پیشرفته در تمامی استان‌ها.
۴. بهترین عملکرد مربوط به $LSTM$ در استان اصفهان با ۹۶٪ دقت.

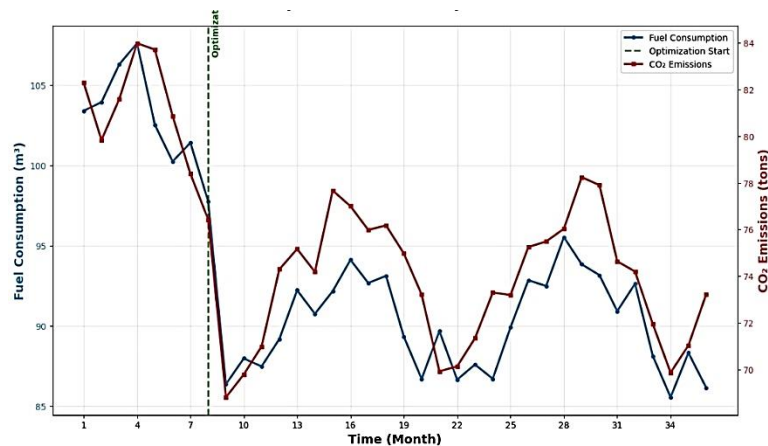
این نمودارها به خوبی از ادعاهای مطرح‌شده در بخش یافته‌ها پشتیبانی می‌کنند.



شکل ۱- مقایسه دقت مدل‌های پیش‌بینی بار در استان‌های مختلف.

Figure 1- Comparison of the accuracy of load forecasting models in different provinces.

توضیح: یک نمودار ستونی گروهی که دقت (R^2) هر چهار مدل را در سه استان به صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد. محور عمودی: دقت بر حسب درصد، محور افقی: نام استان‌ها. میله‌های مربوط به $LSTM$ و CNN به وضوح از میله‌های SVM و رگرسیون خطی بلندتر هستند.



شکل ۲- روند کاهش مصرف سوخت و انتشار CO_2 در طول دوره بهینه‌سازی.

Figure 2- Trend of fuel consumption and CO_2 emission reduction during the optimization period.

توضیح: یک نمودار خطی دوطرفه. محور عمودی سمت چپ: مصرف سوخت (m^3)، محور عمودی سمت راست: انتشار CO_2 (تن). محور افقی: زمان (ماه‌های سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۳). دو خط نزولی هم‌روند، کاهش هم‌زمان مصرف سوخت و انتشار CO_2 را پس از ماه هشتم (زمان پیاده‌سازی مدل) نشان می‌دهند.

بررسی روندهای زمانی در نمودارها نشان داد که کاهش مصرف سوخت و انتشار CO_2 پس از ماه هشتم نه تنها پایدار بوده، بلکه در برخی دوره‌ها شدت بیشتری نیز یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی توانسته است اثرات مثبت خود را در بلندمدت حفظ کند و از بازگشت به الگوهای پر مصرف جلوگیری نماید. همچنین، همبستگی مثبت میان کاهش مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌ها، کارایی مدل در دستیابی هم‌زمان به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی را تایید می‌کند.

۴-۴- یافته‌های جانبی و غیرمنتظره

برخلاف انتظار، در دوره‌های اوج مصرف استان مازندران، مدل SVM با دقت ۹۰٪، عملکردی بسیار نزدیک به مدل $LSTM$ ۹۴٪ داشت. تحلیل واریانس داده‌های بار این استان نشان داد که انحراف معیار الگوهای مصرف در مازندران به طور میانگین ۱۵٪ کمتر از استان اصفهان است. این همگنی بیشتر داده‌ها، احتمالاً دلیل کاهش شکاف عملکردی بین مدل‌های ساده و پیچیده در این منطقه خاص است.

افزون بر نتایج گزارش شده، تحلیل مقایسه‌ای میان سه نیروگاه نشان داد که تفاوت در شرایط اقلیمی و نوع سوخت مصرفی نقش مهمی در میزان بهبود راندمان دارد. نیروگاه منتظری با بیشترین افزایش راندمان (۷/۲٪) از مزیت دسترسی به سوخت باکیفیت‌تر و شرایط آب‌وهوایی پایدارتر برخوردار بود، در حالی که نیروگاه شازند به دلیل نوسانات شدید بار و محدودیت‌های عملیاتی، بهبود کمتری را تجربه کرد. این نتایج اهمیت توجه به ویژگی‌های محلی و شرایط محیطی را در طراحی و پیاده‌سازی مدل‌های هوش مصنوعی برای مدیریت انرژی برجسته می‌سازد.

از منظر آینده‌پژوهی، یافته‌های این تحقیق می‌تواند مبنایی برای توسعه سامانه‌های هوشمند ملی در حوزه انرژی باشد. ترکیب الگوریتم‌های پیش‌بین و بهینه‌ساز در سطح شبکه‌های گسترده‌تر، امکان مدیریت یکپارچه انرژی در مقیاس ملی را فراهم می‌کند. چنین رویکردی نه تنها به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی منجر خواهد شد، بلکه می‌تواند زمینه‌ساز ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های موجود گردد. این چشم‌انداز، گامی مهم در مسیر تحقق اهداف توسعه پایدار و حرکت به سوی اقتصاد کم‌کربن محسوب می‌شود.

یکی دیگر از یافته‌های جانبی، تفاوت در میزان کاهش آلاینده‌ها میان نیروگاه‌ها بود. نیروگاه شازند با وجود بهبود کمتر در راندمان، کاهش چشم‌گیری در انتشار NO_x نشان داد. این نتیجه بیانگر آن است که بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی می‌تواند اثرات متفاوتی بر شاخص‌های زیست‌محیطی داشته باشد و لازم است در طراحی مدل‌ها، مجموعه‌ای گسترده‌تر از آلاینده‌ها مورد توجه قرار گیرد.

به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان داد که چارچوب پیشنهادی علاوه بر بهبود شاخص‌های کمی، توانسته است به ایجاد یک رویکرد چندبعدی در مدیریت انرژی کمک کند. این رویکرد نه تنها به ارتقای راندمان و کاهش مصرف سوخت منجر شده، بلکه اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی مثبت نیز به همراه داشته است. چنین نتایجی می‌تواند مبنای توسعه سیاست‌های ملی در حوزه انرژی هوشمند باشد و مسیر حرکت به سوی اقتصاد پایدار و کم‌کربن را تسهیل کند.

۵- بحث

۵-۱- خلاصه یافته‌ها و پاسخ به پرسش پژوهش

یافته‌های این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری چارچوب یکپارچه هوش مصنوعی-متشکل از مدل‌های یادگیری عمیق ($LSTM$ و CNN) و PSO توانسته است به‌طور همزمان بر چالش‌های پیش‌بینی بار و بهینه‌سازی عملکرد در سیستم انرژی ایران غلبه کند. به‌طور مشخص، میانگین دقت پیش‌بینی بار به $94/8\%$ افزایش یافته، مصرف سوخت $9/5\%$ کاهش یافته، راندمان کلی $6/7\%$ بهبود یافته و انتشار CO_2 نیز $7/2\%$ کاهش یافته است. این نتایج به‌طور قاطعانه‌ای به پرسش اصلی پژوهش پاسخ مثبت می‌دهد و نشان می‌دهد که مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای ارتقای پایداری انرژی در سیستم‌های صنعتی ایران مورد استفاده قرار گیرند.

۵-۲- مقایسه و تحلیل با مطالعات پیشین

مقایسه یافته‌های این پژوهش با ادبیات موجود، همسویی‌ها و تمایزات مهمی را آشکار می‌سازد. از یک سو، برتری مدل‌های $LSTM$ و CNN در پیش‌بینی بار (با دقت $94/8\%$) با نتایج لو و باعو [9] که در پیش‌بینی بار کوتاه‌مدت با مدل ترکیبی $CNN-LSTM$ به دقتی نزدیک به 95% دست یافته بودند، هم‌خوانی کامل دارد.

از سوی دیگر، بهبود راندمان $6/7\%$ در نیروگاه‌های حرارتی ایران قابل مقایسه با یافته‌های وانگ و همکاران [13] است که در مطالعه‌ای روی نیروگاه‌های زغال‌سنگی فوق بحرانی، بهبود قابل توجهی در راندمان و کاهش مصرف انرژی گزارش کردند. نکته تمایز مهم، کاهش $7/2\%$ در انتشار CO_2 است که نسبت به گزارش کومار و ماناگی [14] که در تحلیل سیاست‌های کاهش انتشار در نیروگاه‌های حرارتی هند کاهش حدود 5% را نشان داده بودند، بهبود محسوسی دارد. این تمایز را می‌توان به دو عامل نسبت داد:

۱. یکپارچگی چارچوب پیشنهادی که بهینه‌سازی همزمان تولید و توزیع را ممکن ساخته است.
۲. شرایط خاص عملیاتی نیروگاه‌های ایران که فضای بهینه‌سازی بیشتری را فراهم می‌نماید.

جدول ۳ - مقایسه یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعات پیشین.

Table 3- Comparison of the findings of the present study with previous studies.

مطالعه	حوزه/روش	نتایج کلیدی	مقایسه با پژوهش حاضر
Lu and Bao [9]	پیش‌بینی بار با CNN-LSTM	دقت $\sim 95\%$	همسو با دقت $94/8\%$ پژوهش حاضر
Wang et al. [13]	بهینه‌سازی نیروگاه زغال‌سنگی با الگوریتم‌های فراابتکاری	افزایش راندمان $\sim 6\%$	مشابه افزایش راندمان $6/7\%$ در این پژوهش
Kumar and Managi [14]	سیاست‌های کاهش آلاینده‌ها در نیروگاه‌های حرارتی	کاهش $5\% \sim CO_2$	کمتر از کاهش $7/2\%$ در این پژوهش

جدول ۳- ادامه.

Table 3- Continued.

مطالعه	حوزه/روش	نتایج کلیدی	مقایسه با پژوهش حاضر
Rahman et al. [15]	مقایسه مدل‌های LSTM و SVM در پیش‌بینی بار	در شرایط خاص، $SVM \approx LSTM$	همسو با یافته غیرمنتظره در استان مازندران
Ahmad and Zhang [7]	مرور نظام‌مند مصرف و مدیریت انرژی	تاکید بر هم‌افزایی پیش‌بینی و بهینه‌سازی	تایید چارچوب ترکیبی این پژوهش

۳-۵- تفسیر مکانیسم‌های اثرگذاری

مکانیسم اصلی دستیابی به این نتایج را می‌توان در طراحی دو مرحله‌ای چارچوب پیشنهادی جست‌وجو کرد. در مرحله ۱، مدل‌های یادگیری عمیق با تحلیل الگوهای پیچیده زمانی در داده‌های مصرف، امکان پیش‌بینی دقیق بار را فراهم می‌کنند. این پیش‌بینی دقیق، زیرساخت لازم برای برنامه‌ریزی بهینه تولید را ایجاد می‌نماید. در مرحله ۲، الگوریتم PSO با بهینه‌سازی هم‌زمان چندین پارامتر عملیاتی (نسبت هوا-سوخت، فشار بخار، دمای ورودی توربین) در فضای جواب‌های پیچیده، به نقطه بهینه عملیاتی دست می‌یابد که هم راندمان را حداکثر و هم مصرف سوخت و آلاینده‌ها را حداقل می‌کند.

۴-۵- تحلیل یافته غیرمنتظره و محدودیت‌ها

یافته غیرمنتظره مربوط به عملکرد مشابه دو مدل SVM و $LSTM$ در استان مازندران، نشان‌دهنده اهمیت تناسب مدل با ویژگی‌های داده است. تحلیل دقیق‌تر نشان داد که همگنی بیشتر الگوهای مصرف در این استان (با انحراف معیار حدود ۱۵٪ کمتر از استان اصفهان) نیاز به مدل‌های بسیار پیچیده را کاهش می‌دهد. این نتیجه با یافته‌های رحمان و همکاران [15] همسو است که در مطالعه خود نشان دادند، در شرایطی که داده‌ها از نوسان کمتری برخوردارند، مدل‌های ساده‌تر مانند SVM می‌توانند عملکردی مشابه مدل‌های پیچیده‌تر مانند $LSTM$ داشته باشند. این موضوع بر اهمیت تحلیل اولیه داده‌ها پیش از انتخاب مدل تأکید دارد.

محدودیت‌های پژوهش عمدتاً در سه حوزه قرار می‌گیرند:

۱. محدودیت داده‌ای: دوره سه‌ساله مطالعه ممکن است برای شناسایی الگوهای بلندمدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی یا سیاست‌های کلان انرژی کافی نباشد.
۲. محدودیت نمونه‌گیری: تمرکز بر سه نیروگاه خاص، اگرچه از نظر فنی توجیه‌پذیر است، اما تعمیم‌پذیری نتایج به کل نیروگاه‌های ایران نیازمند احتیاط است.
۳. محدودیت مدل‌سازی: در نظر نگرفتن متغیرهای اقتصادی-سیاسی موثر بر مصرف انرژی می‌تواند بر دقت پیش‌بینی در افق‌های زمانی بلندمدت اثرگذار باشد.

۵-۵- پیامدهای نظری و عملی

از منظر نظری، این پژوهش بر اهمیت "هم‌افزایی بین پیش‌بینی دقیق و بهینه‌سازی کارا" به‌عنوان یک اصل کلیدی در مدیریت انرژی هوشمند تأکید می‌کند. از منظر عملی، چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل جامع در اختیار مدیران نیروگاه‌ها قرار گیرد تا هم‌زمان با بهبود شاخص‌های اقتصادی، به تعهدات زیست‌محیطی خود نیز عمل نمایند. یکی از ابعاد مهم نتایج این پژوهش، ارتباط مستقیم آن با سیاست‌های کلان انرژی و محیط‌زیست در ایران است. کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها نه تنها به بهبود راندمان نیروگاه‌ها منجر شد، بلکه می‌تواند به‌عنوان پشتوانه‌ای علمی برای برنامه‌های ملی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ادغام فناوری‌های هوش مصنوعی در مدیریت انرژی، فراتر از یک رویکرد فنی بوده و می‌تواند به‌عنوان ابزاری راهبردی در تحقق اهداف توسعه پایدار و تعهدات بین‌المللی ایران در زمینه تغییرات اقلیمی عمل کند.

از منظر مدیریتی، چارچوب پیشنهادی قابلیت آن را دارد که به‌عنوان یک سامانه تصمیم‌یار در اختیار مدیران نیروگاه‌ها قرار گیرد. این سامانه می‌تواند با تحلیل داده‌های لحظه‌ای و ارایه پیشنهادهای عملیاتی، فرایند تصمیم‌گیری را هوشمندتر و سریع‌تر سازد. در شرایطی که نیروگاه‌ها با محدودیت

منابع یا نوسانات شدید بار مواجه هستند، چنین مدلی می‌تواند از بروز خاموشی‌ها جلوگیری کرده و به حفظ پایداری شبکه کمک کند. علاوه بر این، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند PSO در کنار مدل‌های یادگیری عمیق، امکان دستیابی به راه‌حل‌های عملیاتی متوازن را فراهم می‌آورد که هم جنبه اقتصادی و هم جنبه زیست‌محیطی را پوشش می‌دهد.

چشم‌انداز آینده این پژوهش را می‌توان در توسعه چارچوب‌های مشابه برای مدیریت انرژی‌های تجدیدپذیر مشاهده کرد. ادغام الگوریتم‌های پیش‌بین و بهینه‌ساز در نیروگاه‌های خورشیدی و بادی می‌تواند به افزایش سهم انرژی پاک در سبد انرژی کشور منجر شود. این رویکرد نه تنها به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک می‌کند، بلکه زمینه‌ساز تحقق اهداف توسعه پایدار و حرکت به سمت اقتصاد کم‌کربن خواهد بود. همچنین، ترکیب داده‌های لحظه‌ای از منابع تجدیدپذیر با الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌تواند به مدیریت بهتر نوسانات تولید انرژی پاک کمک کند و قابلیت اطمینان شبکه را افزایش دهد.

یکی از ابعاد اجتماعی نتایج این پژوهش، تاثیر مستقیم آن بر رفاه عمومی و کیفیت زندگی شهروندان است. کاهش آلاینده‌ها و بهبود راندمان نیروگاه‌ها نه تنها به کاهش هزینه‌های انرژی منجر می‌شود، بلکه می‌تواند سطح آلودگی هوا را در مناطق صنعتی و شهری کاهش دهد. این امر پیامدهای مثبت قابل توجهی بر سلامت عمومی، کاهش بیماری‌های تنفسی و ارتقای شاخص‌های اجتماعی خواهد داشت. بنابراین، چارچوب پیشنهادی علاوه بر جنبه‌های فنی و اقتصادی، دارای ارزش اجتماعی و انسانی نیز هست که باید در سیاست‌گذاری‌های کلان انرژی مورد توجه قرار گیرد.

از منظر فناوریانه، این پژوهش نشان داد که ادغام الگوریتم‌های یادگیری عمیق با روش‌های فراابتکاری می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد نوین در تحول دیجیتال صنعت انرژی مطرح شود. این ادغام نه تنها به افزایش دقت پیش‌بینی و بهینه‌سازی کمک می‌کند، بلکه امکان توسعه سامانه‌های هوشمند مبتنی بر داده‌های لحظه‌ای را نیز فراهم می‌سازد. چنین سامانه‌هایی می‌توانند به‌عنوان زیرساختی برای پیاده‌سازی فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند IoT و شبکه‌های هوشمند^۱ عمل کنند و مسیر حرکت به سمت صنعت انرژی دیجیتال و هوشمند را هموار سازند.

از منظر نهادی، نتایج این پژوهش ضرورت بازنگری در ساختارهای مدیریتی و تصمیم‌گیری صنعت انرژی ایران را آشکار می‌سازد. پیاده‌سازی چارچوب‌های هوش مصنوعی نیازمند همکاری نزدیک میان دانشگاه‌ها، شرکت‌های فناوری و نهادهای دولتی است. بدون ایجاد سازوکارهای نهادی برای تبادل داده، استانداردسازی فرایندها و حمایت از نوآوری، بهره‌گیری از چنین مدل‌هایی در سطح ملی با چالش‌های جدی مواجه خواهد شد. بنابراین، این پژوهش می‌تواند به‌عنوان محرکی برای اصلاحات نهادی و ایجاد بسترهای قانونی و اجرایی لازم جهت توسعه مدیریت انرژی هوشمند در کشور عمل کند.

از منظر بین‌المللی، یافته‌های این پژوهش قابلیت آن را دارند که در همکاری‌های علمی و فناوریانه منطقه‌ای و جهانی مورد استفاده قرار گیرند. بسیاری از کشورها با چالش‌های مشابه در حوزه نیروگاه‌های حرارتی و مدیریت انرژی مواجه هستند و چارچوب پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان الگویی برای انتقال دانش و تجربه به دیگر کشورها مطرح شود. این امر نه تنها جایگاه علمی ایران را در حوزه پژوهش‌های انرژی ارتقا می‌دهد، بلکه می‌تواند زمینه‌ساز همکاری‌های بین‌المللی در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تحقق اهداف جهانی توسعه پایدار باشد.

در نهایت، نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب یادگیری عمیق و الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب جامع و انعطاف‌پذیر در مدیریت انرژی مورد استفاده قرار گیرد. با وجود محدودیت‌های داده‌ای و عملیاتی، یافته‌های به‌دست آمده چشم‌انداز روشنی از کاربرد عملی این مدل‌ها در صنعت انرژی ایران ارایه می‌دهد. این چارچوب می‌تواند مبنای پژوهش‌های آتی برای توسعه مدل‌های چند لایه‌تر و مقیاس‌پذیرتر باشد که علاوه بر نیروگاه‌های حرارتی، کل شبکه انرژی کشور را پوشش دهند. چنین توسعه‌ای نه تنها به ارتقای بهره‌وری ملی کمک خواهد کرد، بلکه امکان ادغام سیاست‌های انرژی با اهداف زیست‌محیطی و اجتماعی را نیز فراهم می‌آورد.

^۱ Smart grids

۶- نتیجه گیری

۶-۱- دستاوردهای اصلی پژوهش

این پژوهش با طراحی و پیاده سازی یک چارچوب یکپارچه هوش مصنوعی، گامی موثر در جهت تحول دیجیتال صنعت انرژی ایران برداشته است. مهم ترین دستاوردهای این پژوهش عبارت اند از:

۱. دستاورد روش شناختی: ارائه یک چارچوب نظام مند دو مرحله ای که برای اولین بار در ایران، مدل های پیش بین یادگیری عمیق را با الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری در حوزه انرژی تلفیق نموده است.
۲. دستاوردهای کمی: دستیابی به بهبودهای قابل اندازه گیری در شاخص های کلیدی عملکرد:
 - افزایش دقت پیش بینی بار از ۸۱٪ به ۹۴/۸٪
 - کاهش ۹/۵٪ در مصرف سوخت نیروگاه ها
 - بهبود ۶/۷٪ در راندمان عملیاتی
 - کاهش ۷/۲٪ در انتشار گازهای گلخانه ای
۳. دستاورد کاربردی: ارائه یک راه حل عملیاتی و قابل پیاده سازی که می تواند بدون نیاز به سرمایه گذاری سنگین در زیرساخت های سخت افزاری جدید، به بهبود عملکرد سیستم انرژی بینجامد.

۶-۲- مفاهیم پژوهشی و سیاستی

یافته های این پژوهش مفاهیم مهمی برای ذی نفعان مختلف دارد:

برای پژوهشگران

چارچوب ارائه شده می تواند مبنایی برای توسعه مدل های ترکیبی پیشرفته تر قرار گیرد. همچنین، یافته مربوط به عملکرد مشابه مدل های ساده و پیچیده در شرایط خاص، زمینه ساز تحقیقات جدید در حوزه "انتخاب هوشمند مدل" خواهد بود.

برای سیاست گذاران و مدیران

۱. ضرورت سرمایه گذاری در زیرساخت های جمع آوری و مدیریت داده های انرژی
۲. لزوم بازنگری در فرایندهای عملیاتی سنتی نیروگاه ها
۳. اهمیت تلفیق ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی در تصمیم گیری های مدیریت انرژی

برای صنعت برق

کاهش هزینه های عملیاتی، افزایش قابلیت اطمینان شبکه و ارتقای پایداری به استانداردهای زیست محیطی از طریق پیاده سازی راه حل های هوشمند.

۶-۳- مسیرهای پیش رو برای پژوهش های آتی

توسعه این پژوهش را می توان در چند محور اصلی دنبال کرد:

۱. گسترش افقی: تعمیم چارچوب به سایر نیروگاه ها و سیستم های انرژی تجدیدپذیر.
۲. گسترش عمودی:
 - ادغام متغیرهای کلان اقتصادی و زیست محیطی در مدل سازی.
 - توسعه مدل های پیش بین چند متغیره که همزمان بار، قیمت و آلاینده ها را پیش بینی می کنند.

- طراحی سیستم‌های هوشمند پیشنهاددهنده^۱ برای کمک به تصمیم‌گیری اپراتورها.
- ۳. توسعه زیرساختی:
 - ایجاد پایگاه‌های داده استاندارد و در دسترس برای پژوهش‌های انرژی.
 - توسعه پلتفرم‌های شبیه‌سازی برای آزمون مدل‌های هوش مصنوعی قبل از پیاده‌سازی عملیاتی.

۴-۶- جمع‌بندی نهایی

این پژوهش نشان داد که هوش مصنوعی می‌تواند به‌عنوان یک توانمندساز قوی در خدمت تحول سیستم انرژی ایران قرار گیرد. چارچوب پیشنهادی نه تنها از نظر علمی مستحکم است، بلکه از نظر عملی نیز قابلیت پیاده‌سازی و تاثیرگذاری دارد. موفقیت در تحول دیجیتال صنعت انرژی نیازمند عزم جدی همه ذی‌نفعان، سرمایه‌گذاری هوشمند در فناوری و نگاه راهبردی به مقوله پایداری انرژی است. این پژوهش می‌تواند به‌عنوان سکوی پرتابی برای حرکت به سوی سیستم انرژی هوشمند، کارآمد و پایدار در ایران مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

یکی از نکات برجسته این پژوهش، نشان دادن قابلیت‌های هوش مصنوعی در شرایط واقعی صنعت انرژی ایران است. برخلاف بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی یا شبیه‌سازی‌های محدود، این تحقیق با استفاده از داده‌های عملیاتی سه نیروگاه بزرگ کشور توانست چارچوب پیشنهادی را در محیط واقعی اعتبارسنجی کند. این امر نه تنها اعتبار علمی نتایج را افزایش می‌دهد، بلکه نشان می‌دهد که مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند به‌طور مستقیم در فرایندهای عملیاتی نیروگاه‌ها به کار گرفته شوند و اثرات ملموس اقتصادی و زیست‌محیطی ایجاد کنند.

از منظر سیاستی، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تدوین برنامه‌های ملی در حوزه مدیریت انرژی هوشمند مورد استفاده قرار گیرد. کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ها، همسو با اهداف توسعه پایدار و تعهدات بین‌المللی ایران در زمینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. بنابراین، پیاده‌سازی چنین چارچوب‌هایی می‌تواند به سیاست‌گذاران کمک کند تا مسیر حرکت به سمت اقتصاد سبز و کم‌کربن را با پشتوانه علمی و داده‌محور هموار سازند. این یافته‌ها همچنین ضرورت سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های داده‌ای و دیجیتال‌سازی فرایندهای انرژی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

چشم‌انداز آینده این پژوهش فراتر از نیروگاه‌های حرارتی است و می‌تواند به مدیریت یکپارچه کل شبکه انرژی کشور گسترش یابد. ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی در چارچوب پیشنهادی، امکان مدیریت بهتر نوسانات تولید و افزایش قابلیت اطمینان شبکه را فراهم خواهد کرد. علاوه بر این، توسعه مدل‌های چند لایه‌تر که همزمان بار، قیمت و آلاینده‌ها را پیش‌بینی و بهینه‌سازی می‌کنند، می‌تواند به ایجاد یک سیستم انرژی هوشمند ملی منجر شود. چنین سیستمی نه تنها بهره‌وری اقتصادی را افزایش می‌دهد، بلکه به ارتقای کیفیت زندگی و حفاظت از محیط‌زیست نیز کمک خواهد کرد.

مراجع

- [1] International Energy Agency. (2022). *CO₂ emissions in 2022—global energy review*. (In Persian). <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>
- [2] Ministry of Energy. (2013). *Statistical yearbook of the Iranian electricity industry 2012*. (In Persian). <https://amar.tavanir.org.ir/pages/omomi/tozee1401.pdf>
- [3] European Commission. (2022). *digitalising the energy system*. https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/digitalisation-energy-system_en
- [4] Alhussein, M., Aurangzeb, K., & Haider, S. I. (2020). Hybrid CNN-LSTM model for short-term individual household load forecasting. *IEEE access*, 8, 180544–180557. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028281>
- [5] Wang, L., Yang, Y., Dong, C., Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2014). Multi-objective optimization of coal-fired power plants using differential evolution. *Applied energy*, 115, 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.005>
- [6] Zhou, K., Fu, C., & Yang, S. (2016). Big data driven smart energy management: From big data to big insights. *Renewable and sustainable energy reviews*, 56, 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.050>
- [7] Ahmad, T., & Zhang, D. (2020). A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy reports*, 6, 1973–1991. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.07.020>

¹ Recommender systems

- [8] Maleki, A. (2021). Modeling and optimization of energy systems. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 144(5), 1635–1638. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10782-7>
- [9] Lu, S., & Bao, T. (2024). Short-term electricity load forecasting based on neuralprophet and CNN-LSTM. *IEEE access*, 12, 76870–76879. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3407094>
- [10] Olesen, J. F., & Shaker, H. R. (2020). Predictive maintenance for pump systems and thermal power plants: State-of-the-art review, trends and challenges. *Sensors*, 20(8), 2425. <https://doi.org/10.3390/s20082425>
- [11] Zhan, X., Xu, H., Zhang, Y., Zhu, X., Yin, H., & Zheng, Y. (2022). DeepThermal: Combustion optimization for thermal power generating units using offline reinforcement learning. *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*, 36(4), 4680–4688. <https://doi.org/10.1609/aaai.v36i4.20393>
- [12] Nondy, J., & Gogoi, T. K. (2021). A comparative study of metaheuristic techniques for the thermoenviromonic optimization of a gas turbine-based benchmark combined heat and power system. *Journal of energy resources technology*, 143(6), 62104. <https://doi.org/10.1115/1.4048534>
- [13] Wang, Z., Zheng, H., Xu, J., Li, M., Sun, E., Guo, Y., ... , & Liu, G. (2022). The roadmap towards the efficiency limit for supercritical carbon dioxide coal fired power plant. *Energy conversion and management*, 269, 116166. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116166>
- [14] Kumar, S., Managi, S., & Jain, R. K. (2020). CO2 mitigation policy for Indian thermal power sector: Potential gains from emission trading. *Energy economics*, 86, 104653. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104653>
- [15] Rahman, M., Park, S., & Kim, J. (2019). A comparative study of SVM and LSTM for short-term load forecasting under different data variability conditions. *Energies*, 12(18), 3511.