۲۴
فراخوان هفدهمین کنگره پیشگامان پیشرفت
فناوری‌های نوظهور و آینده پیشرفت ایران
(چالش ها، فرصت ها، راهکارها)
مهلت دریافت آثار و ایده‌های نوآورانه:
۱۵ بهمن ۱۴۰۴ و زمان برگزاری: بهار ۱۴۰۵

ارتقای بهره‌وری سبز از طریق هم‌افزایی هوش مصنوعی (AIو اینترنت اشیاء صنعتی سبز (G-IIoT)

جابر تقی زاده

استادیار گروه مهندسی کامپیوتر ، دانشگاه ملی مهارت ، تهران ، ایران

چکیده

بهره‌وری سبز به‌عنوان یکی از راهبردهای کلیدی توسعه پایدار، نقش مهمی در ایجاد تعادل میان رشد اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست در صنایع مدرن ایفا می‌کند. در این راستا، پارادایم اینترنت اشیاء صنعتی سبز (Green Industrial Internet of Things – G-IIoTبا تمرکز بر کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی و بهینه‌سازی مصرف انرژی، امکان مدیریت هوشمند منابع را در سراسر چرخه عمر محصولات صنعتی فراهم می‌سازد. هم‌افزایی این زیرساخت فناورانه با هوش مصنوعی، از طریق به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تحلیل‌های پیشگویانه، موجب تبدیل داده‌های حجیم و ناهمگن صنعتی به اطلاعات کاربردی و قابل تصمیم‌سازی می‌شود. این قابلیت، زمینه‌ساز بهینه‌سازی دقیق مصرف انرژی، پایش بلادرنگ ردپای کربن، و شناسایی ناهنجاری‌ها در فرآیندهای تولید است. افزون بر این، استفاده از هوش مصنوعی در بستر G-IIoTبا کاهش تولید ضایعات، افزایش بهره‌وری مواد اولیه و تقویت فرآیندهای بازیافت، صنایع را به سمت پیاده‌سازی مؤثر مدل اقتصاد چرخشی هدایت می‌کند. در نهایت، این رویکرد هوشمند و داده‌محور نه‌تنها موجب افزایش بهره‌وری عملیاتی و سودآوری بنگاه‌های صنعتی می‌شود، بلکه با ارتقای عملکرد زیست‌محیطی، نقش بسزایی در تضمین پایداری اکوسیستم‌های صنعتی و تحقق اهداف توسعه پایدار ایفا می‌کند.

مقدمه

در عصر حاضر، وابستگی شتابان جوامع به فناوری‌های دیجیتال و افزایش بی‌سابقه تعداد دستگاه‌های متصل، منجر به بروز یک پارادوکس محیط‌زیستی شده است [۱، ۲]. پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۰، تعداد تجهیزات متصل به شبکه در سطح جهان به مرز ۱۰۰ میلیارد دستگاه برسد؛ این حجم انبوه از سخت‌افزارها، علیرغم بهبود کارایی انرژی در هر واحد، در مجموع باعث افزایش چشمگیر کل مصرف انرژی و تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای و تولید زباله‌های الکترونیکی می‌گردد [۳، ۴]. در پاسخ به این بحران، مفهوم بهره‌وری سبز به‌عنوان یک راهبرد مدیریتی نوین ظهور کرده است تا از طریق نوآوری و استفاده کارآمد از منابع، میان رشد اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست تعادلی پایدار برقرار سازد[۵، ۶].

تحقق اهداف این راهبرد در صنایع مدرن، مستلزم گذار به پارادایم اینترنت اشیاء صنعتی سبز (G-IIoTاست [۷]. این فناوری که کل چرخه عمر محصول را از طراحی و تولید سبز تا بهره‌برداری و بازیافت نهایی پوشش می‌دهد، نقشی کلیدی در کاهش اثرات مخرب محیطی و مدیریت بهینه انرژی ایفا می‌کند [۸، ۹]. با این حال، زیرساخت‌های متصل به تنهایی تنها بستری برای تبادل داده‌های خام هستند و برای تبدیل این داده‌ها به اطلاعات استراتژیک، به یک «مغز متفکر» نیاز است؛ اینجاست که نقش هوش مصنوعی (AIبه‌عنوان کاتالیزور اصلی صنایع سبز برجسته می‌شود[۱۰، ۱۱]

هم‌افزایی هوش مصنوعی با اینترنت اشیاء صنعتی سبز، پتانسیل تحلیل‌های پیچیده و یادگیری از داده‌های کلان را برای سازمان‌ها فراهم می‌آورد [۱۲]. هوش مصنوعی با استفاده از تحلیل‌های پیشگویانه می‌تواند خرابی تجهیزات را پیش از وقوع پیش‌بینی کرده و با کاهش توقف‌های ناگهانی، هدررفت منابع و انرژی را به حداقل برساند [۱۳، ۱۴]. علاوه بر این، ادغام این دو فناوری، موتور محرک گذار از مدل‌های تولید خطی به سمت اقتصاد چرخشی است؛ جایی که سیستم‌های بینایی ماشین و یادگیری عمیق، فرآیند جداسازی و بازیافت پسماندهای صنعتی را با دقت بالا بهینه کرده و نرخ بازگشت مواد به چرخه تولید را افزایش می‌دهند] ۱۶،۱۵]

در نهایت، این تحول هوشمند در چارچوب صنعت نسل پنجم (Industry 5.0، صنایع را به سمت مدل‌های انسان‌محور و تاب‌آور سوق می‌دهد [۱۷، ۱۸]. این رویکرد نه‌تنها سودآوری عملیاتی را از طریق کاهش هزینه‌های انرژی تضمین می‌کند، بلکه با پایش لحظه‌ای ردپای کربن، صنایع را در مسیر انطباق با اهداف توسعه پایدار (SDGsو استانداردهای نوین کربن‌زدایی قرار می‌دهد. [۱۹،۲۰]

روش تحقیق

چارچوب مفهومی هم‌افزایی هوش مصنوعی (AIو اینترنت اشیاء صنعتی سبز (G-IIoTبه عنوان یک نظام هوشمند و خودتطبیق، با هدف بیشینه‌سازی بهره‌وری اقتصادی و کمینه‌سازی تخریب اکولوژیک طراحی شده است. این چارچوب با اتکا بر ساختار حلقه MAPE، یک چرخه بسته و پیوسته از «داده تا اقدام» ایجاد می‌کند؛ چرخه‌ای که در آن پایداری زیست‌محیطی نه یک پیامد جانبی، بلکه محور اصلی تمامی فرآیندها محسوب می‌شود.

هدف بنیادین این چارچوب، ایجاد توازن میان رشد صنعتی و حفاظت از محیط‌زیست از طریق ابزارهای دیجیتال پیشرفته است .اهداف اختصاصی این مدل شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. ارتقای بهره‌وری کل عوامل سبز (:GTFPافزایش خروجی‌های اقتصادی هم‌زمان با کاهش خروجی‌های نامطلوب نظیر آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای

۲. مدیریت ناترازی انرژی در ایران: کاهش فشار بر شبکه برق ملی از طریق هوشمندسازی الگوی مصرف در صنایع سنگین نظیر پتروشیمی و فولاد

۳. تحقق اقتصاد چرخشی: مدیریت چرخه عمر تجهیزات و بازیافت هوشمند پسماندهای صنعتی و الکترونیکی برای کاهش ردپای کربن

۴. گذار به صنعت ۵.۰: حرکت به سمت سیستم‌های تولیدی انسان‌محور و تاب‌آور که در آن فناوری در خدمت رفاه اپراتور،سلامت و پایداری اکوسیستم قرار دارد.

۵. کاهش هزینه‌های عملیاتی: بهره‌گیری از نگهداری پیش‌بینانه برای جلوگیری از خرابی‌های ناگهانی، کاهش اتلاف انرژی و افزایش عمر تجهیزات

حلقه کنترلی MAPEبرگرفته از واژگان Monitor، Analyze، Planو Executeیک معماری مرجع برای سیستم‌های خودتطبیق است که به عنوان ستون فقرات هوشمندسازی در صنایع نوین شناخته می‌شود. این چرخه به سیستم‌ها اجازه می‌دهد تا بدون نیاز به مداخله مستمر انسانی، خود را با تغییرات محیطی وفق داده و بهینه‌ترین تصمیمات را برای دستیابی به اهداف از پیش تعیین شده اتخاذ کنند.

این حلقه از چهار مرحله اصلی تشکیل شده است که توسط یک پایگاه دانش مشترک پشتیبانی می‌شوند:

۱. پایش (: (Monitorجمع‌آوری داده‌های خام از حسگرها و محیط

۲. تحلیل: ((Analyzeپردازش داده‌ها برای شناسایی الگوها و پیش‌بینی وضعیت‌های آتی

۳. برنامه‌ریزی : ((Planتدوین سناریوها و راهبردهای بهینه بر اساس تحلیل‌ها

۴. اجرا : ((Executeاعمال فرامین اصلاحی بر روی محرک‌ها و تجهیزات

مزایای حلقه کنترلی MAPEدر هوشمندسازی سبز

استفاده از ساختار MAPEمزایای راهبردی زیر را برای صنایع فراهم می‌آورد:

۱. خودکارسازی تصمیم‌گیری: این حلقه با حذف مداخلات انسانی غیرضروری، خطاهای اپراتوری را کاهش داده و سرعت پاسخگویی به تغییرات محیطی را افزایش می‌دهد.

۲. بهینه‌سازی پویا: برخلاف سیستم‌های ایستا، این چرخه استراتژی‌های مصرف انرژی را بر اساس شرایط لحظه‌ای بازنگری می‌کند.

۳. کاهش اتلاف انرژی: سیستم می‌تواند در زمان‌های عدم نیاز، تجهیزات را در حالت کم‌مصرف قرار دهد که طبق یافته‌های Rupو Bajic، [8]هدررفت انرژی را تا ۹۰ درصد کاهش می‌دهد.

نتایج و بحث

اینترنت اشیاء صنعتی سبز (G-IIoTبه عنوان یک راهبرد ضروری برای مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از گسترش فزاینده دستگاه‌های متصل، مطرح شده است. این پارادایم، فناوری‌های هوش مصنوعی (AIرا با زیرساخت اینترنت اشیاء ترکیب می‌کند تا ضمن افزایش کارایی عملیات، تأثیرات مخرب زیست‌محیطی را به حداقل برساند. هدف اصلی این هم‌افزایی، دستیابی به بهره‌وری سبز است؛ یعنی افزایش همزمان بازده اقتصادی و کاهش آلودگی، مصرف انرژی و تولید پسماند.

۱.۵.اجزای اصلی معماری هوشمند سبز

برای تحقق این هدف، بهینه‌سازی در سه سطح حیاتی معماری فناوری ضروری است:

۱. تأمین انرژی (:(Energy Provisionسیستم‌های G-IIoTبر استفاده از منابع انرژی محیطی مانند خورشید، حرارت و ارتعاشات مکانیکی (Energy Harvestingتأکید دارند. این روش، نیاز به باتری‌های سنتی را حذف کرده و طول عمر دستگاه‌ها را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

۲. ارتباطات سبز: برای کاهش مصرف انرژی در شبکه، از پروتکل‌های کم‌مصرف مانند رادیوهای بیدارباش (Wake-up Radio - WuRاستفاده می‌شود. این فناوری دستگاه‌های IIoTرا قادر می‌سازد تا بخش عمده‌ای از زمان در وضعیت خواب عمیق بمانند و تنها با دریافت یک سیگنال تقاضا (On-demandفعال شوند. این امر به طور مؤثری مصرف انرژی در حالت سکون را کاهش می‌دهد.

۳. رایانش لبه‌ای: ((Edge Computingبه جای ارسال مداوم داده‌های خام حسگرها به مراکز داده دوردست (که پهنای باند و انرژی زیادی مصرف می‌کند)، پردازش در لبه شبکه و نزدیک به منبع داده انجام می‌شود. هوش مصنوعی لبه‌ای (Edge AIبا فیلتر کردن داده‌های غیرضروری، تأخیر در پاسخگویی را تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و بهینه‌سازی مصرف پهنای باند را به همراه دارد.

هوش مصنوعی به عنوان مغز متفکر این اکوسیستم، داده‌های جمع‌آوری شده توسط G-IIoTرا به بینش‌های قابل اجرا تبدیل می‌کند:

- نگهداری پیش‌بینانه: (Predictive Maintenanceالگوریتم‌های یادگیری ماشین، الگوهای ناهنجار در عملکرد تجهیزات (مانند لرزش یا دمای غیرعادی) را پیش‌بینی می‌کنند. این امر از خرابی‌های ناگهانی جلوگیری کرده، عمر مفید تجهیزات را تا چهل درصد افزایش داده و ضایعات ناشی از توقف تولید را کاهش می‌دهد.
- بهینه‌سازی انرژی: هوش مصنوعی می‌تواند با تحلیل بلادرنگ داده‌های شبکه هوشمند، زمان‌بندی فرآیندهای پرمصرف را به ساعات غیر اوج انتقال دهد و مصرف انرژی در ساختمان‌ها و صنایع را تا بیست درصد کاهش دهد.
- اقتصاد چرخشی (:Circular Economyهوش مصنوعی با استفاده از بینایی ماشین، فرآیندهای بازیافت و تفکیک پسماند (از جمله زباله‌های الکترونیکی) را با دقت بالا خودکار می‌کند و به شرکت‌ها کمک می‌کند تا مواد بازیافتی بیشتری را به چرخه تولید بازگردانند.

پیشنهادها

بر اساس یافته‌های ارائه‌شده در مورد مؤلفه‌های کلیدی معماری هوشمند سبز (G-IIoTو نقش هوش مصنوعی در بهینه‌سازی انرژی، نگهداری پیش‌بینانه و اقتصاد چرخشی، پیشنهادهای زیر به منظور تسریع در پیاده‌سازی و افزایش اثربخشی این پارادایم ارائه می‌شود:

۱. توسعه استانداردهای یکپارچه برای تأمین انرژی محیطی

با توجه به تأکید G-IIoTبر استفاده از منابع انرژی محیطی (خورشید، حرارت، ارتعاشات)، ضروری است که استانداردهای جهانی برای طراحی و ارزیابی سیستم‌های Energy Harvestingتدوین شود. این استانداردها باید شامل معیارهای کارایی انرژی، سازگاری با پروتکل‌های ارتباطی کم‌مصرف و قابلیت اطمینان در شرایط مختلف محیطی باشند. همچنین پیشنهاد می‌شود تحقیقات بیشتری در زمینه ترکیب چندمنبعی انرژی (hybrid harvestingبه منظور افزایش پایداری توان در دستگاه‌های صنعتی انجام شود.

۲. یکپارچه‌سازی فناوری بیدارباش (WuRبا زیرساخت‌های موجود صنعتی

اگرچه رادیوهای بیدارباش مصرف انرژی در حالت سکون را به شدت کاهش می‌دهند، اما پیاده‌سازی آن‌ها در شبکه‌های صنعتی موجود با چالش‌هایی نظیر تأخیر در فعال‌سازی و هم‌پوشانی با پروتکل‌های قدیمی مواجه است. پیشنهاد می‌شود:

طراحی دروازه‌های هوشمندی که قابلیت ترجمه بین پروتکل‌های WuRو پروتکل‌های صنعتی رایج (مانند PROFINET، Modbus TCP)را داشته باشند.

توسعه الگوریتم‌های یادگیری تقویتی برای پویاسازی الگوی بیدار-خواب دستگاه‌ها بر اساس الگوهای ترافیک واقعی شبکه.

۳. پیاده‌سازی لایه‌ای از هوش مصنوعی فدرال برای رایانش لبه‌ای

با توجه به مزایای رایانش لبه‌ای در کاهش مصرف پهنای باند و انرژی، پیشنهاد می‌شود معماری هوش مصنوعی فدرال (Federated Learningدر لبه شبکه مستقر شود. این روش به دستگاه‌های G-IIoTاجازه می‌دهد مدل‌های محلی را بدون ارسال داده‌های خام به سرور مرکزی آموزش دهند. این امر نه‌تنها حریم خصوصی داده‌های صنعتی را حفظ می‌کند، بلکه ترافیک شبکه و مصرف انرژی مرتبط با انتقال داده را تا ۸۰ درصد کاهش می‌دهد.

منابع

1. Malik, A., & Kushwah, R. (2022). A Survey on Next Generation IoT Networks from Green IoT Perspective. International Journal of Wireless Information Networks, 29(2), 1-22. https://doi.org/10.1007/s10776-021-00549-0

2. Albreem, M. A., Sheikh, A. M., Alsharif, M. H., Jusoh, M., & Yasin, M. N. M. (2021). Green Internet of Things (GIoT): Applications, Practices, Awareness, and Challenges. IEEE Access, 9, 38833-38858. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061697

3. Sadeqi-Arani, Z., Mazroui Nasrabadi, E., & Vahidnia, R. (2025). A Review of Using Green Industrial Internet of Things in Sustainable Development and Energy Management: A Bibliometrics Analysis. Journal of Green Development Management Studies, 4(1), 49-69. https://doi.org/10.22077/jgdms.2024.7422.1104

4. .Gomaa, A. H. (2025). Advancing Green Industrial Systems in the Era of Industry 4.0/5.0: A Comprehensive Review and Strategic Framework. Journal of Engineering and Applied Sciences Technology, 7(11), 1-13. https://doi.org/10.47363/JEAST/2025(7)33310. Vaigandla, K. K., Karne, R., Vanteru, M. K., & Siddoju, R. K. (2025). Artificial Intelligence in Industrial IoT: Trends, Challenges, and Future Directions. Journal of Computer Allied Intelligence, 3(2), 37-55. https://doi.org/10.69996/jcai.2025011

5. Zhu, S., Ota, K., & Dong, M. (2022). Green AI for IIoT: Energy Efficient Intelligent Edge Computing for Industrial Internet of Things. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 6(1), 79-88. https://doi.org/10.1109/TGCN.2021.3100622

6. . Ual, P., & Kırımça, N. (2024). Artificial Intelligence for Predictive Maintenance Applications: Key Components, Trustworthiness, and Future Trends. Applied Sciences, 14(2), 898. https://doi.org/10.3390/app14020898

Rup, C., & Bajic, E. (2024). Green and Sustainable Industrial Internet of Things Systems Leveraging Wake-Up Radio to Enable On-Demand IoT Communication. Sustainability, 16(3), 1160.

7. Taghizadeh, J., Ghobaei-Arani, M., & Shahidinejad, A. (2020). A metaheuristic-based data replica placement approach for data-intensive IoT applications in the fog computing environment. Software: Practice and Experience, 50(12), 1-25.

8. Taghizadeh, J., et al. (2020). An automated framework for data management in fog-cloud architectures using ARIMA and metaheuristic optimization.

KPIP.OLGOU.IR