Original Article

Journal of Green Development Management Studies

Application of Artificial Intelligence in Urban Environmental Management: A Structured Review in Three Areas of Air Quality, Waste, and Energy Consumption

Raheleh Valizadeh Ardalan [1] , Javad Sotoudeh [2], Elham Yousefi [3*]

[1] Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran.
[2] Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran.
[3] Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran
Corresponding author, Email: e_yusefi_31@birjand.ac.ir

مقاله در نوبت انتشار

Keywords:
Smart city; Environmental pollution; Random forest; Smart pollution management; Internet of Things.

Introduction

The rapid expansion of urbanization, increasing air pollution, growing waste production, and high energy demand have become some of the most pressing environmental challenges of our time. Addressing these issues has made urban environmental management an essential priority in the drive for sustainable development. In this context, Artificial Intelligence (AI) has emerged as a powerful tool for environmental governance and smart city management, offering the capability to process vast amounts of data, uncover intricate patterns, and support dynamic decision-making processes. Despite its immense potential, a review of current studies shows that most research has concentrated on individual environmental aspects such as air pollution, waste generation, or energy use, with limited efforts to approach these areas from a comprehensive and integrated perspective. This study aims to bridge that gap by systematically analyzing AI applications across three critical domains — air quality management, waste management, and urban energy optimization — to highlight how this technology can contribute to building resilient and sustainable urban environments.

Methodology

This study utilized a Structured Review methodology to gather and analyze data from reputable academic databases, including Web of Science, Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, and Google Scholar. By employing focused keywords such as artificial intelligence, urban environmental management, air quality prediction, waste management, and energy optimization, a total of 356 articles published within the period of 2017 to 2025 were identified. After rigorous screening for relevance, along with the elimination of duplicates and incomplete records, a set of 69 studies was selected for comprehensive evaluation. Key information extracted from each paper encompassed aspects such as the algorithm type, data sources, application areas, major findings, and challenges outlined by the authors. This data was systematically organized into three primary thematic categories: air quality management, waste management, and urban energy optimization, following a comparative qualitative and thematic analysis approach.

Received:

Revised:

Accepted:

Findings

Findings reveal that most studies target air pollution monitoring and prediction. Machine learning and deep learning models, including LightGBM, LSTM, CNN, and Random Forest, outperform traditional methods in forecasting pollutant levels like $PM_{2.5}$, PM_{10}, and NO_2. The hybrid LightGBM–LSTM model showed top performance with an R^2 of 0.91 and 97.5% accuracy. Using satellite data and urban sensor networks has enabled spatiotemporal pollution predictions and virtual air monitoring stations. In waste management, AI combined with IoT and Vision AI has enhanced processes like collection, segregation, and recycling. Techniques such as CNNs, Dijkstra's algorithm, regression, and reinforcement learning have optimized fleet routing and waste generation predictions. Smart systems featuring NB-IoT and LoRaWAN sensors cut fuel use by 30% and increased recycling efficiency.Urban energy studies focus on optimizing efficiency. Machine learning, adaptive controls, and predictive analytics in smart buildings and energy networks have achieved 15–30% reductions in energy use and emissions. AI-driven real-time data analysis and load forecasting allow self-regulating energy management across urban systems.

Discussion and Conclusion

A comparative analysis across three domains reveals that while significant advancements have been achieved in each sector, the distribution of research remains uneven. The primary focus has been placed on air quality, whereas the fields of energy and waste management are yet to reach a practical level of maturity. From an interdisciplinary perspective, the shared feature across all areas is their reliance on real-time data, explainable algorithms, and intelligent urban infrastructure. Artificial intelligence has effectively optimized management processes, spanning from monitoring to decision-making, by integrating environmental, social, and infrastructural data. Overall findings suggest that AI, through predictive analytics and decision-support capabilities, can serve as a foundational pillar for urban environmental governance. However, several challenges persist, including the lack of standardized datasets, high implementation costs, computational complexities, and

limitations in model interpretability. To address these obstacles, policymakers and urban planners are advised to focus on three key strategies: Enhancing data infrastructure and smart sensing networks; Developing explainable and hybrid models tailored for environmental applications; Promoting interinstitutional and cross-disciplinary collaborations to facilitate technology and knowledge transfer. Ultimately, this study highlights the central role of artificial intelligence in advancing smart, resilient, and low-carbon cities. It underscores how integrating modern technologies with urban policymaking can pave the way towards achieving Sustainable Development Goal 11 (SDG 11).

مقاله در نوبت انتشار

How to cite this article:

Green Development Management Studies,

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee Journal of Green Development Management Studies. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مقاله پژوهشی

مجله مطالعات مدیریت توسعه سبز

https://doi.org/

کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت محیط زیست شهری: مرور ساختاریافته در سه حوزه کیفیت هوا، پسماند و مصرف انرژی

راحله والیزاده اردلان [۱]، جواد ستوده [۲]، الهام یوسفی روبیات [۳*]

[۱] دانشجوی دکترای علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

[۲] دانشجوی دکترای علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

[۳]. دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

ایمیل نویسنده مسئول: e_yusefi_31@birjand.ac.ir

واژگان کلیدی:

شهر هوشمند؛ آلودگی محیط زیست؛ جنگل تصادفی؛ مدیریت هوشمند آلودگی؛ اینترنت اشیاء.

تاریخ دریافت:

تاریخ بازنگری:

تاریخ پذیرش:

چکیده

با گسترش شتابان شهرنشینی و پیچیده‌تر شدن چالش‌های زیست‌محیطی، بهره‌گیری از هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری تحول‌آفرین در مدیریت محیط‌زیست شهری اهمیت فزاینده‌ای یافته است. این مقاله با رویکرد مرور ساختاریافته، به بررسی نظام‌مند مطالعات انجام‌شده طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵ در سه حوزه‌ی کلیدی پایش و پیش‌بینی کیفیت هوا، مدیریت هوشمند پسماند و بهینه‌سازی مصرف انرژی پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق همچون LSTM، CNN و Random Forest توانسته‌اند در پیش‌بینی دقیق غلظت آلاینده‌ها، بهینه‌سازی مسیر جمع‌آوری زباله و کاهش تلفات انرژی در زیرساخت‌های شهری عملکردی قابل توجه از خود نشان دهند. یافته‌ها حاکی از آن است که ادغام فناوری‌های هوش مصنوعی با زیرساخت‌های داده‌محور و اینترنت اشیاء، به بهبود تصمیم‌گیری بلادرنگ، کاهش هزینه‌های عملیاتی و ارتقای تاب‌آوری اقلیمی شهرها منجر شده است. با وجود این، چالش‌هایی نظیر وابستگی به داده‌های باکیفیت، ضعف تفسیرپذیری مدل‌ها و محدودیت‌های فنی در یکپارچه‌سازی سیستم‌ها همچنان پابرجاست. در نهایت، مقاله با تأکید بر نقش محوری هوش مصنوعی در تحقق شهرهای پایدار و کم‌کربن، پیشنهادهایی برای توسعه زیرساخت‌های داده‌ای، بهبود همکاری‌های بین‌نهادی و طراحی مدل‌های تبیین‌پذیر ارائه می‌کند.

مقاله در نوبت انتشار

مقدمه

مدیریت محیط زیست شهری در عصر شهرنشینی سریع و تخریب محیط زیست به یک حوزه حیاتی تبدیل شده است. این حوزه به فرآیندها، سیاست‌ها و روش‌هایی اشاره دارد که هدف آن اطمینان از رشد شهری به گونه‌ای است که آسیب‌های زیست‌محیطی را به حداقل برساند، استفاده پایدار از منابع را ترویج نموده و کیفیت کلی زندگی ساکنان شهری را بهبود ببخشد (سازمان ملل متحد، ۲۰۲۰، ۲۰). از آنجایی که بیش از نیمی از جمعیت جهان اکنون در مناطق شهری زندگی می‌کنند و این رقم در دهه‌های آینده به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت، لذا مدیریت مؤثر محیط زیست در شهرها تاکنون به این اندازه اهمیت نداشته است (سازمان ملل متحد، ۲۰۱۸، ۱۴).

با این حال، محیط‌های شهری با مجموعه‌ای از مشکلات پیچیده و به هم پیوسته مواجه هستند. شهرها از بزرگ‌ترین منابع آلودگی به شمار می‌روند و مقادیر زیادی گازهای گلخانه‌ای منتشر کرده و زباله‌های جامد و خطرناک قابل توجهی تولید می‌کنند (بانک جهانی، ۲۰۲۱، ۲۲). مدیریت منابع با افزایش کمبود آب، تقاضای انرژی و فشارهای استفاده از زمین پیچیده‌تر می‌شود (گریم و همکاران[1] ۲۰۱۸، ۲۵۷). همزمان، حرکت جهانی به سمت پایداری نیازمند ادغام ملاحظات زیست‌محیطی در برنامه‌ریزی و حکمرانی شهری است تا آینده‌ای مقاوم، عادلانه و پایدار برای شهرها تضمین شود (المکویست و همکاران[2]، ۲۰۱۹، ۲۶۸). در این زمینه، هوش مصنوعی[3] (AI) به عنوان ابزاری تحول‌آفرین و نویدبخش مطرح شده است. هوش مصنوعی شامل مجموعه‌ای گسترده از تکنیک‌های محاسباتی است که قادر به انجام وظایفی مانند شناسایی الگو، تصمیم‌گیری و تحلیل پیش‌بینی بوده و معمولاً به هوش انسانی نیاز دارند (راسل و نورویج[4]، ۲۰۲۱، ۶۸). از میان تکنیک‌های هوش مصنوعی معمولاً استفاده شده، یادگیری ماشین[5] (ML) به سیستم‌ها امکان می‌دهد تا از الگوهای داده بیاموزند و عملکرد خود را بدون برنامه‌نویسی صریح بهبود بخشند (گود فلو و همکاران[6]، ۲۰۱۶، ۲۱). یادگیری عمیق[7] (DL) زیرشاخه‌ای از یادگیری ماشین است که برای تحلیل داده‌های با ابعاد بالا مانند تصاویر سنجش از دور و خروجی‌های حسگرهای محیطی بسیار قدرتمند می‌باشد (لکون و همکارن[8]، ۲۰۱۵، 440). سنجش از دور همراه با هوش مصنوعی، امکان پایش بلادرنگ و با وضوح بالا از اکوسیستم‌های شهری، تغییرات کاربری زمین، کیفیت هوا و آب و تأثیرات بلایای طبیعی را فراهم می‌کند (ژو و همکاران[9]، ۲۰۱۷، 15) ادغام هوش مصنوعی در سیستم‌های مدیریت محیط زیست شهری مزایای قابل توجهی دارد. رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی دقت، کارایی و به موقع بودن پایش و پاسخ به مسائل محیط زیستی را افزایش می‌دهند، به بهینه‌سازی منابع کمک می‌کنند و برنامه‌ریزی استراتژیک برای تاب‌آوری اقلیمی و پایداری را بهبود می‌بخشند (اولاواده و همکاران[10]، ۲۰۲۴، 5).

علاوه بر این، هوش مصنوعی می‌تواند تصمیم‌گیرندگان را قادر سازد تا خطرات محیط زیستی را پیش‌بینی کنند، مداخلات را اولویت‌بندی کنند و در فرآیندهای حکمرانی شهری مشارکتی و شفاف‌تر شرکت کنند (بتی[11]، ۲۰۱۸، 5). در خصوص کاربرد فناوری‌های هوش مصنوعی در مدیریت محیط زیست شهری مطالعات زیادی انجام گرفته است. به عنوان مثال آندرآ[12] ۲۰۲۴، ۳)، با کاربرد هوش

1, Grimm & etal
22, Elmqvist & etal
3, Artificial intelligence
4, Russell & Norvig
5, Machine learning
6, Goodfellow & etal
7, Deep learning
8, LeCun & etal
9, Zhu & etal
10, Olawade & etal
11, Batty
12, Andrea

مصنوعی در پایش محیط زیست شهری، با بهره‌گیری از الگوریتم‌هایی نظیر CNN، RNN و یادگیری تقویتی، مدل‌هایی برای پیش‌بینی کیفیت هوا، پایش آلودگی صوتی، و بهینه‌سازی واکنش سیستم‌های شهری ارائه داده است. همچنین اورتگا فرناندز و همکاران[1] (۲۰۲۰، ۳) به بررسی نقش هوش مصنوعی در شکل‌گیری شهرهای هوشمند به‌عنوان بسترهایی برای توسعه نوآوری و پایداری پرداخته‌اند و با تحلیل مدل‌های شهری در اسپانیا (مانند مادرید، بارسلونا و گرانادا)، به این نتیجه رسیده‌اند که فناوری‌های هوش مصنوعی با تسهیل تصمیم‌گیری مبتنی بر داده، می‌توانند کیفیت زندگی، بهره‌وری زیست‌محیطی و نوآوری اجتماعی را به‌طور هم‌زمان ارتقا دهند. در مطالعه ای دیگری دوس سانتوس[2] و همکاران (۲۰۲۴، 653) در یک مطالعه مروری به تحلیل چهار محور کلیدی کاربردها، مزایا، چالش‌ها و راه‌حل‌ها در کاربرد هوش مصنوعی در شهرها پرداخته اند. هادیانا و جی هون[3] (۲۰۲۴، ۳۳) نیز با هدف تحلیل ظرفیت الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تحلیل داده‌های مکانی برای ارتقاء کارایی، کاهش ترافیک، بهینه‌سازی مصرف انرژی و طراحی فضای شهری به بررسی نقش هوش مصنوعی در بهینه‌سازی فرآیندهای برنامه‌ریزی شهری در بستر شهرهای هوشمند پرداختند. در این مقاله، از مدل‌هایی مانند شبکه‌های عصبی، خوشه‌بندی فضایی و یادگیری تقویتی برای پشتیبانی تصمیم‌گیری استفاده شده است. نویسندگان نشان دادند که ادغام هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی شهری می‌تواند به توسعه پایدار، انعطاف‌پذیری سیستم‌های شهری و بهبود کیفیت زندگی منجر شود. همچنین طلایی و همکاران (۲۰۲۳، ۱۸) در مروری کوتاه بر نقش فزاینده هوش مصنوعی در مهندسی محیطزیست، نشان دادند که فناوری‌هایی مانند یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی در زمینه‌هایی چون پایش آلودگی هوا، مدیریت منابع آبی، مدیریت پسماند، کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و حفاظت زیست‌محیطی نقش مؤثری ایفا می‌کند. حسینی و یوسفی روبیات (۲۰۲۵، ۲) در مقاله‌ای مروری به بررسی نقش حیاتی فناوری‌های هوش مصنوعی (AI) و سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری (DSS) در بهبود مدیریت محیطزیست شهری پرداخته‌اند. این مطالعه، کاربرد این ابزارها را به طور خاص در زمینه‌هایی نظیر پایش آلودگی هوا، مدیریت پسماند و بهینه‌سازی مصرف انرژی شهری بسیار مؤثر ارزیابی کرده و بر اهمیت آن‌ها در شکل‌گیری برنامه‌ریزی شهری پایدار و مبتنی بر داده‌ها تأکید می‌کند.

در مقاله‌ای که خسروانی و همکاران (۲۰۲۵، ۳)، نیز در مطالعه خود با عنوان «رشد هوشمند و پایدار شهرها با استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری» بر نقش محوری فناوری‌های هوش مصنوعی در دستیابی به توسعه‌ای هوشمندانه و پایدار برای شهرها تاکید کردند. این پژوهشگران با بررسی و تحلیل مطالعات نوین در حوزه‌های یادگیری ماشین، بینایی ماشین و سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری شهری، نشان دادند که به‌کارگیری هوش مصنوعی چگونه می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف انرژی، مدیریت آلودگی و ارتقای کیفیت زندگی در محیطهای شهری کمک کند. یافته‌های این مطالعه حاکی از آن است که استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر داده در فرآیندهای تصمیم‌گیری شهری، به طور چشمگیری دقت پیش‌بینی‌ها و سرعت واکنش به تغییرات محیطی را افزایش می‌دهد.

بررسی ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های متعددی در زمینه‌ی کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت محیطزیست شهری انجام شده‌اند، اما اغلب این مطالعات ماهیتی تک‌محوری دارند و صرفاً بر یکی از جنبه‌های زیست‌محیطی تمرکز کرده‌اند .با این حال، تاکنون پژوهشی نظام‌مند و میان‌رشته‌ای که این سه حوزه‌ی کلیدی را در قالب یک چارچوب یکپارچه و تطبیقی تحلیل کند و روابط متقابل آن‌ها را در مدیریت محیطزیست شهری مورد ارزیابی قرار دهد، انجام نشده است. این فقدان رویکرد جامع، سبب شده است که ارتباط میان فناوری‌های هوشمند، سیاست‌گذاری شهری و شاخص‌های پایداری به‌درستی تبیین نشود. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف پرکردن این شکاف علمی و روش‌شناختی، به مرور ساختاریافته و تحلیلی از مطالعات منتشرشده در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵ پرداخته است. این مطالعه با تلفیق سه حوزه‌ی اصلی کیفیت هوا، پسماند و انرژی شهری، می‌کوشد تصویری جامع از چگونگی تحول مدیریت محیطزیست شهری به‌واسطه‌ی فناوری‌های هوش مصنوعی ارائه دهد. چنین تحلیلی، در راستای تحقق هدف توسعه پایدار شماره ۱۱ (SDG 11) مبنی

1, Ortega-Fernández & etal
2, Dos Santos & etal
3, Hadiyana & etal

بر ایجاد شهرها و جوامع پایدار، ایمن و مقاوم قرار دارد و می‌تواند به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری در جهت تصمیم‌سازی مبتنی بر داده و فناوری کمک کند.

مواد و روش‌ها

این مقاله مروری از رویکرد مرور روایی ادبیات برای تحلیل تحقیقات فعلی در مورد کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت محیط زیست شهری استفاده می‌کند. پایگاه‌های علمی داده مرتبط از جمله Web of Science، Scopus، IEEE Xplore، ScienceDirect، و Google Scholar با استفاده از کلیدواژه‌هایی مانند «هوش مصنوعی»، «آلودگی محیط زیست»، «مدیریت محیط زیست شهری»، «شهرهای هوشمند»، «پیش بینی کیفیت هوا»، «مدیریت پسماند» و «بهینه سازی انرژی» مورد جستجو قرار گرفتند. همچنین از اپراتورهای بولی (AND, OR) و برش‌های کلمات (مانند "urban" برای urban, urbanization) به منظور گسترش جستجو استفاده شدند. جستجو به مقالات ژورنالی دارای داوری همتا منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵ محدود شد تا پیشرفت‌های اخیر در این حوزه پوشش داده شود.

معیارهای پذیرش مطالعات، به گونه‌ای تنظیم شدند که صرفاً پژوهش‌هایی مورد بررسی قرار گیرند که به طور خاص به کاربرد تکنیک‌های هوش مصنوعی در حل مسائل زیست‌محیطی شهرهای مدرن، به ویژه در سه حوزه کلیدی آلودگی هوا، مدیریت پسماند و بهینه‌سازی مصرف انرژی، پرداخته باشند. هم مطالعات تجربی و هم مقالات مروری در نظر گرفته شدند تا درک جامعی از روش‌ها، کاربردها و نتایج روزآمد این حوزه فراهم شود. مقالاتی که صرفاً بر محیط‌های روستایی یا غیرشهری تمرکز داشتند، حذف شدند. همچنین صرفا مقالات معتبر ژورنالی به زبان انگلیسی انتخاب و از انتخاب مقالات همایشی صرف نظر شد. برای هر مقاله انتخاب شده، اطلاعات کلیدی شامل اهداف مطالعه، تکنیک‌های هوش مصنوعی به کار رفته، نوع کاربرد محیط زیست شهری، یافته‌ها، چالش‌ها و محدودیت‌ها استخراج شد. داده‌های استخراج شده به صورت کیفی ترکیب و در حوزه‌های موضوعی مانند (مانند کیفیت هوا، مدیریت پسماند، انرژی) دسته‌بندی شدند.

در جستجوی اولیه و با استفاده از کلید واژه‌ها، ۳۵۶ چکیده مقاله در دسترس قرار گرفت. پس از بررسی مجدد، مقالات با زبان‌های انگلیسی انتخاب و تمام مقالات تکراری، مقالات همایشی و کنفرانسی و مقالاتی که امکان دسترسی به متن کامل آن‌ها وجود نداشت حذف و در نهایت ۱۰۰ مقاله جهت مرور مورد بررسی قرار گرفت. مقالات منتخب پس از در نظر گرفتن ارتباط چکیده با هدف، ارزیابی و در مرحله بعد ۶۹ مقاله بطور کامل مطالعه، خلاصه برداری و دسته بندی شدند. روش شناسی انجام تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است این رویکرد روایی، تحلیلی دقیق و بیطرفانه از ادبیات موضوعی را تضمین می‌کند و بینش‌های ارزشمندی در مورد چگونگی تأثیر هوش مصنوعی بر مدیریت محیط زیست شهری ارائه میدهد، همچنین حوزه‌های نیازمند پژوهش‌های آتی را شناسایی می‌کند.

مقاله در حال انتشار

شکل ۱: شماتیک روش شناسی انجام تحقیق

یافته‌های تحقیق

در این بخش، نتاج مرور نظام‌مند مقالات منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵ در حوزه کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت محیط‌زیست شهری با تاکید بر سه حوزه مدیریت کیفیت هوا، انرژی و پسماند ارائه می‌شود.

پایش و پیش‌بینی کیفیت هوا:

مدل‌های یادگیری ماشین به دلیل توانایی‌شان در درک پیچیدگی‌های غیرخطی بین غلظت آلاینده‌های هوا و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مانند داده‌های ماهواره‌ای، شرایط هواشناسی و نوع کاربری زمین، عملکرد پیش‌بینی برتری در مدل‌سازی آلودگی هوا از خود نشان داده اند (تانگ و همکاران[1]، ۲۰۲۴، ۱). مطالعات زیادی در خصوص نقش هوش مصنوعی در پایش و پیش بینی کیفیت هوا در چند سال اخیر انجام گرفته است. به عنوان مثال چاکرابورتی و همکاران[2] (۲۰۲۴، ۱۵۸۸) در مطالعه خود با عنوان «سیستم تشخیص آلودگی هوا مبتنی بر هوش مصنوعی» به تحلیل پیشرفت‌های اخیر در به‌کارگیری هوش مصنوعی برای پایش و شناسایی آلودگی هوا پرداخته‌اند. پژوهشگران در این مطالعه ضمن مرور سیستماتیک مطالعات قبلی و ارزیابی مدل‌های مختلف ML و DL مانند ماشین بردار پشتیبان[3] (SVM)، شبکه عصبی

1, Tang & etal
2, Chakraborty & etal
3, Support Vector Machine

مصنوعی[۱] (ANN)، شبکه عصبی پیچشی یا کانولوشنی[۲] (CNN) و جنگل تصادفی[۳] در پیش‌بینی و طبقه‌بندی شاخص‌های آلودگی نظیر $PM_{2.5}$، PM_{10} و NO_2 ، مزایایی همچون دقت بالا، قابلیت پردازش بلادرنگ و امکان تلفیق با اینترنت اشیاء را بررسی کرده و چالش‌هایی چون نیاز به داده‌های حجیم، پیچیدگی محاسباتی، و ضعف در تفسیرپذیری را مد نظر قرار داده اند. در پژوهشی دیگر که باز هم به روش مروری سیستماتیک توسط وو و همکاران[۴] (۲۰۲۴، ۱۷) انجام شد، پژوهشگران به بررسی روندهای پژوهشی در استفاده از هوش مصنوعی جغرافیایی[۵] برای پیش‌بینی آلودگی هوا پرداخته‌اند. مقاله ضمن مرور کاربرد مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، شبکه‌های عصبی بازگشتی[۶] (RNN) و مدل‌های ترکیبی در پیش‌بینی $PM_{2.5}$، بر اهمیت ادغام داده‌های ماهواره‌ای با وضوح زمانی و مکانی بالا، به‌ویژه داده‌های ماهواره‌های ژئواستیشنری مانند GEMS، با مدل‌های یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی تاکید دارد. یکی از دستاوردهای کلیدی این مقاله، معرفی مدل GeoNet است که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای NO2 و داده‌های هواشناسی، پیش‌بینی‌های دقیق و جامع آلودگی هوا را با پوشش کامل مکانی و بازه‌های زمانی ۴ ساعته برای منطقه شرق چین ارائه می‌دهد. ژانگ و همکاران[۷] (۲۰۲۴، ۱۱) با استفاده از ابزارهای برنامه‌ریزی شهری مبتنی بر هوش مصنوعی، نحوه‌ی کاربرد آن‌ها در ایجاد محیط‌های شهری پایدارتر، کارآمدتر و عملکردی‌تر را تحلیل کرده و با تحلیل داده‌های زمانی آلاینده‌ها مانند $PM_{2.5}$ و PM_{10}، بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ روندهای زمانی، هم‌همواری‌ها و علیت‌های متقابل بین آلاینده‌ها را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند استراتژی‌های مؤثری برای کاهش آلودگی شناسایی کرده و به ساخت محیط‌های شهری پایدارتر و عملکردی‌تر در چین کمک کند. مطالعه لیو و همکاران[۸] (۲۰۲۴، ۲۰) با هدف پیش‌بینی کلاس کیفیت هوا با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین، روشی نوآورانه برای پیش‌بینی کلاس کیفیت هوا معرفی می‌کند که با بهره‌گیری از داده‌های هواشناسی اولیه و ثانویه و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، محدودیت‌های مدل‌های سنتی AQI[9] را برطرف می‌سازد. در این پژوهش نویسندگان با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند الگوریتم تقویتی گرادیانی سبک[۱۰] (LightGBM) و حافظه بلند و کوتاه مدت[۱۱] (LSTM)، مدل‌هایی برای طبقه‌بندی و پیش‌بینی کیفیت هوا توسعه دادند. نتایج نشان داد که مدل LightGBM در طبقه‌بندی آلاینده‌های اولیه با دقت ۹۷/۵ درصد و امتیاز F1 برابر با ۹۳/۳ درصد عملکرد بالایی دارد. همچنین، مدل LSTM در پیش‌بینی AQI با ضریب تعیین (R^2) برابر با ۹۱/۳۷ درصد و در پیش‌بینی غلظت O_3 با R^2 برابر با ۹۰/۴۶ درصد عملکرد مطلوبی از خود نشان داد. این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های ثانویه و مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند به طور مؤثری دقت پیش‌بینی کیفیت هوا را افزایش دهد و ابزار مفیدی برای تصمیم‌گیری‌های زیست‌محیطی فراهم آورد. از طرفی رائوتلا و گویال[۱۲] (۲۰۲۴، ۱۵) در پژوهشی دیگر به بررسی کاربرد هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در پیش‌بینی و مدیریت آلودگی هوا در هند پرداختند. نویسندگان با استفاده از مدل‌های پیشرفته‌ای مانند کدگذاری خودکار کانولوشنی[۱۳] ، توانسته‌اند دقت پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها مانند $PM_{2.5}$ را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند. نتایج نشان داد که این مدل‌ها می‌توانند به‌عنوان ابزاری مؤثر در سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با

1, Artificial Neural Network
2, Convolutional neural network
3, Random Forest
4, Wu & etal
5, Geospatial AI
6, Recurrent neural networks
7, Zheng & etal
8, Liu & etal
9, Air quality index
10, Light Gradient Boosting Machine
11, Long Short-Term Memory
12, Rautela & Goyal
13 , Convolutional Autoencoder

مقاله در حال انتشار

آلودگی هوا در هند استفاده شوند. در مطالعه دیگری با عنوان «هوش مصنوعی برای کنترل کیفیت هوای محیطی»، کولیکووا و همکاران[1] (۲۰۲۳، ۷) به بررسی جامع نقش هوش مصنوعی در کنترل کیفیت هوای محیطی پرداخته و نشان دادند که الگوریتم‌هایی مانند جنگل تصادفی، SVM، LSTM و CNN می‌توانند دقت پیش‌بینی و قابلیت تحلیل لحظه‌ای آلودگی هوا را نسبت به روش‌های سنتی به طور قابل‌توجهی افزایش دهند. در این مطالعه، از مدل‌های ML و DL برای پیش‌بینی آلاینده‌هایی نظیر $PM_{2.5}$ و شاخص کیفیت هوا با استفاده از داده‌های هواشناسی، فعالیت‌های انسانی و تصاویر ماهواره‌ای بهره گرفته شده است. همچنین فو و همکاران[2] (۲۰۲۳، ۱۱) در پژوهشی دیگر به ارائه یک روش نوآورانه برای بهبود فرآیند پایش و مدیریت کیفیت هوا پرداختند که ترکیبی از فناوری داده‌های بزرگ[3] و تکنیک‌های پیشرفته هوش مصنوعی و الگوریتمی توسعه یافته است که می‌تواند حجم عظیمی از داده‌های محیطی، هواشناسی و آلودگی را به صورت کارآمد تحلیل کند و تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تری برای کنترل آلودگی هوا ارائه دهد. پژوهش سامد و همکاران[4] (۲۰۲۳، ۸) که به بررسی استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی آلودگی هوا در شهر اشتوتگارت آلمان پرداخته است، نشان داد که می‌توان ایستگاه‌های پایش فیزیکی را با ایستگاه‌های مجازی مبتنی بر داده‌های هواشناسی و ترافیکی جایگزین کرد و این روش را در شهر کارلسروهه نیز با موفقیت آزمایش کردند. در این تحقیق، مدل‌هایی مانند رگرسیون ریج، رگرسیون بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و تقویت گرادیانی پیشرفته[5] (XGBoost)، برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌هایی چون $PM_{2.5}$، PM_{10} و NO_2 استفاده شدند. گُوو و همکاران[6] (۲۰۲۲، ۱۰) با انجام یک تحلیل کتاب‌سنجی جامع، روند تحولات و موضوعات کلیدی پژوهش در زمینه کاربرد هوش مصنوعی در مطالعات آلودگی هوا را از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۱ بررسی کردند. داده‌های این مطالعه از پایگاه Web of Science استخراج و با ابزار تحلیلی CiteSpace تحلیل شدند. نتایج نشان داد که کشورهایی چون چین و ایالات متحده پیشتاز تولید علمی در این حوزه بوده و موضوعاتی مانند یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، پیش‌بینی $PM_{2.5}$، حسگرهای کم‌هزینه و پایش هوای داخلی به‌عنوان محورهای داغ پژوهشی مطرح‌اند. این مطالعه ضمن تأکید بر رشد سریع و میان‌رشته‌ای این حوزه، بر شکاف در همکاری‌های علمی بین‌المللی و ضرورت توسعه چارچوب‌های تلفیقی و بین‌بخشی نیز اشاره دارد. سونگ و همکاران[7] (۲۰۲۱، ۵۳۴۱) نیز در مقاله‌ای با عنوان شبکه عصبی عمیق خودسازگار و قابل تفسیر برای برآورد روزانه غلظت فضایی–پیوسته $PM_{2.5}$ در سراسر چین به معرفی مدل یادگیری ماشین هیبریدی خطی برای برآورد غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ در چین پرداختند. این مدل ترکیبی از سه مدل یادگیری ماشین درخت رگرسیون با تقویت گرادیانی، جنگل تصادفی و شبکه عمیق عصبی است که به‌طور مؤثر داده‌های AOD[8] ماهواره‌ای، اطلاعات هواشناسی و جغرافیایی را برای پیش‌بینی $PM_{2.5}$ به‌کار می‌برد. نتایج نشان داد که مدل هیبریدی پیشنهادی با دقت بالای R^2 برابر ۰/۸۴ و RMSE برابر ۱۲/۹۲ میکرو گرم بر متر مکعب عملکرد قابل توجهی داشته و در پیش‌بینی توزیع فضایی–زمانی آلودگی هوا کاربرد مؤثری دارد. لی[9] (۲۰۲۰، ۱) نیز در پژوهشی در منطقه‌ی جینگ–جین–جی چین، یک چارچوب یادگیری عمیق مقاوم مبتنی بر شبکه‌های خودرمزگذار با اتصال باقیمانده و روش تجمیع مدل‌ها[10] را معرفی کرد که به طور مؤثری داده‌های گمشده ماهواره‌ای AOD را بازیابی نموده و برآورد فضا زمانه دقیق‌تری از غلظت ذرات معلق ریز $PM_{2.5}$ ارائه می‌دهد. این مدل عملکرد قابل توجهی با ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۹ در تخمین $PM_{2.5}$ از خود نشان داد و نسبت به سایر روش‌های یادگیری ماشین مانند XGBoost، توانایی بهتری در باز تولید تغییرات فضایی واقعی داشت. قابلیت این رویکرد در پوشش کامل فضایی و دقت بالا، آن را به ابزاری کارآمد و قابل اتکا برای مطالعات ارزیابی مواجهه و تحلیل اثرات بهداشتی آلودگی هوا تبدیل کرده است.

1, Kulikova & etal
2, Fu & etal
3, Big Data
4, Samad & etal
5, Extreme Gradient Boosting
6, Guo & etal
7, Song & etal
8, Aerosol Optical Depth
9, Li
10, bagging

علاوه بر پژوهش‌های بین‌المللی، مطالعات متعددی در داخل کشور نیز با هدف پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوا از طریق الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌های آماری مبتنی بر داده‌ها انجام شده است. به عنوان مثال در پژوهشی که توسط مخدومی و همکاران (۲۰۲۴، ۳۴) با عنوان «تحلیل آماری و مدل‌سازی پیش‌بینی غلظت $PM_{2.5}$ با استفاده از هوش مصنوعی مبتنی بر یادگیری ماشین در مشهد (۲۰۱۶–۲۰۲۲)» انجام شد، چهار الگوریتم یادگیری ماشین شامل LGBM، XGBR، RF و GBR مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصله حاکی از دقت بالای مدل‌ها در پیش‌بینی بود و مدل‌های GBR و RF با ضریب تعیین تقریبی ۰/۹۸، عملکردی ممتاز ارائه دادند.

همچنین مالکی و همکاران (۲۰۲۳، ۳۱۰) در مطالعه خود به پیش‌بینی آلودگی هوا بر اساس تکنیک‌های یادگیری ماشین از جمله درخت تصمیم، جنگل تصادفی، شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان پرداختند. در این مطالعه داده‌های مربوط به ۵ آلاینده اصلی هوا در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد که مدل‌های درخت تصمیم و جنگل تصادفی از بالاترین دقت در پیش‌بینی برخوردار بودند. این پژوهش بر نقش مؤثر مدل‌های هوش مصنوعی در تحلیل و پیش‌بینی آلاینده‌های هوا تأکید می‌کند و پتانسیل بالای این روش‌ها را در این زمینه نشان می‌دهد.

در مطالعه ای دیگر زارعی و همکاران (۲۰۲۳، ۱۰۸)، به منظور پیش‌بینی غلظت روزانه ذرات معلق $PM_{2.5}$ در شهر تهران، از رویکردی ترکیبی متشکل از ماشین بردار پشتیبان و تحلیل مولفه اصلی استفاده کردند. در این تحقیق، داده‌های هواشناسی و آلودگی هوا مربوط به یک سال مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مدل ترکیبی مذکور با هدف کاهش همبستگی بین متغیرها و بهبود دقت پیش‌بینی، به کار گرفته شد. یافته‌ها حاکی از آن است که مدل PCA-SVM در مقایسه با مدل پایه، عملکرد بهتری را از خود نشان داد؛ به طوری که ضریب تعیین (R^2) از ۰/۶۱ به حدود ۰/۶۵ ارتقا یافت. این مطالعه نیز، اثربخشی بالای مدل‌های ترکیبی در پیش‌بینی کوتاه‌مدت آلودگی هوا در مناطق شهری را به اثبات می‌رساند. در پژوهشی که فرجی و همکاران (۲۰۲۱، ۱۳) نیز برای پیش‌بینی تغییرات غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ در شهر تهران در طول زمان و در نقاط مختلف شهر، از شبکه‌های عصبی بازگشتی با رویکردی فضایی–زمانی بهره بردند. نتایج تحلیل‌ها حاکی از آن بود که مدل‌های ترکیبی با لحاظ کردن الگوهای مکانی و زمانی، عملکرد بهتری در پیش‌بینی غلظت $PM_{2.5}$ نسبت به روش‌های سنتی داشتند. این یافته‌ها نشان‌دهنده کارایی بالای روش‌های یادگیری عمیق در تحلیل و مدل‌سازی آلودگی هوا در کلان‌شهرها است.

به طور کلی مقالات ذکر شده در این بخش نشان می‌دهند که هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌تواند به عنوان ابزاری موثر در پیش بینی و پایش کیفیت هوا به کار گرفته شود. پژوهش‌های ذکر شده نشان داد که مدل‌ها و الگوریتم‌های متعددی در این زمینه مطالعه شده و کار گرفته شده اند. جدول ۱ به ارائه خلاصه الگوریتم‌ها و مدل‌های ذکر شده در پژوهش‌های این بخش پرداخته است.

جدول ۱: روش‌ها و الگوریتم‌های به کارگیری در مطالعات بررسی شده پیش‌بینی کیفیت هوا با استفاده از هوش مصنوعی

ردیف	منابع داده	مدل‌ها/ الگوریتم‌های به کار رفته
۱	ماهواره، هواشناسی، کاربری زمین	یادگیری ماشین (ML)، RF، SVM، ANN، CNN، LSTM، Decision Tree، RNN فضایی–زمانی
۲	مطالعات مروری سیستماتیک	RF ،CNN ،ANN ،SVM
۳	NO2، ماهوارهGEMS ، هواشناسی	RNN ،ANN ،GeoNet
۴	داده‌های تاریخی PM	تحلیل AI روندها
۵	داده‌های هواشناسی اولیه و ثانویه	LightGBM, LSTM
۶	هندPM$_{2.5}$	Convolutional Autoencoder
۷	ماهواره، هواشناسی، فعالیت انسانی	RF, SVM, LSTM, CNN
۸	داده‌های محیطی،Big Data	AI & Big Data

۹	هواشناسی، ترافیک آلمان	Ridge, SVM, RF, XGBoost
۱۰	Web of Science	CiteSpace
۱۱	AOD، هواشناسی، جغرافیایی	Hybrid (RF, GBRT, DNN)
۱۲	AODماهواره‌ای	Autoencoder + Bagging

مدیریت پسماند شهری

با افزایش جمعیت شهری و رشد تولید زباله، چالش‌های بزرگی در زمینه پایداری زیست‌محیطی و بهداشت عمومی شکل گرفته‌اند. لخویت[1] (۲۰۲۵، ۹) با بررسی نقش هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء در بهبود فرآیندهای جمع‌آوری، تفکیک و بازیافت پسماند در شهرها و با تأکید بر کارکرد سیستم‌های داده‌محور، نشان داد که ادغام فناوری‌های هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء می‌تواند بهره‌وری عملیاتی در مدیریت زباله را افزایش و هزینه‌ها را کاهش داده و نرخ بازیافت را با استفاده از رباتیک پیشرفته بهبود بخشد. فقها[2] (۲۰۲۵، ۳۸) نیز در پژوهشی دیگر به بررسی ظرفیت‌های هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء در مدیریت هوشمند پسماند پرداخته و ضمن مرور فناوری‌های نوظهور، تأکید می‌کند که ترکیب هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء می‌تواند کارایی عملیاتی، دقت در تفکیک زباله و پاسخ‌گویی محیطزیستی را افزایش دهد. در یک مطالعه مروری سیستماتیک که توسط نسماکنو و همکاران[3] (۲۰۲۵، ۴۳)، انجام گرفت مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها، مدل‌های بهینه‌سازی، روش‌های یادگیری ماشین، و چارچوب‌های داده محورکه با هدف بهبود بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها، و ارتقاء پایداری محیطزیستی در سیستم‌های مدیریت زباله توسعه یافته‌اند، شناسایی شد. در این پژوهش نویسندگان نشان دادند که استفاده از ابزارهای محاسباتی پیشرفته نه تنها مسیر جمع‌آوری زباله را بهینه می‌کند، بلکه می‌تواند در تخصیص منابع، پیش‌بینی الگوهای تولید زباله، و تصمیم‌گیری هوشمند در سطوح مختلف مدیریت شهری نیز کاربرد داشته باشد. دیوای و همکاران[4] (۲۰۲۵، ۹) ، با معرفی مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی همچون سطل‌های هوشمند مجهز به حسگرهای IoT، الگوریتم‌های پیش‌بینی مبتنی بر بینایی ماشین، فناوری بلاک‌چین و پروتکل‌های ارتباطی اینترنت اشیاء مانند پروتکل‌های ارتباطی بی سیم کم مصرف[5] و اینترنت اشیای باند باریک[6] (NB-IoT)، جهت پیش‌بینی حجم زباله، مسیرهای بهینه جمع‌آوری و اتوماسیون فرآیندهای تفکیک، نشان دادند که چنین سامانه‌هایی می‌توانند هزینه‌ها را کاهش و نرخ بازیافت را افزایش دهند. این چارچوب نوآورانه با هدف ایجاد یک اکوسیستم مدیریت پسماند شهری مبتنی بر داده و اصول اقتصاد چرخشی طراحی شده‌اند، که به باز استفاده از منابع و بازیابی انرژی کمک می‌کند. پاتیل و همکاران[7] (۲۰۲۵، ۱)، نیز در پژوهشی با معرفی سیستم‌هایی مبتنی بر بینایی ماشین از قبیل شبکه‌های عصبی پیچشی، الگوریتم‌های قیمت‌گذاری پویا، ادغام اینترنت اشیا برای پایش بلادرنگ، فناوری بلاک‌چین برای شفافیت و ردیابی و رابط کاربری برای ذینفعان، نشان دادند که هوش مصنوعی می‌تواند نقش کلیدی در کاهش دفن زباله، افزایش بهره‌وری منابع و ارتقاء پایداری شهری ایفا کند. آن‌ها همچنین بر اهمیت ایجاد زیرساخت‌های دیجیتال برای حمایت از این فناوری‌ها در مقیاس شهری تأکید نموده‌اند. از سوی دیگر در یک مطالعه نظام‌مند که نویسندگان به بررسی ساختارمند کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت پسماند جامد شهری پرداخته اند، الگوریتم‌های یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم‌های خبره و منطق فازی و بینایی ماشین، مدل‌ها و تکنیک‌های کلیدی هستند که به عنوان فناوری‌هایی در بهبود مدیریت پسماند به آن‌ها پرداخته شده است (ایدروو هورنل و همکاران[8]، ۲۰۲۵، ۳۳۶۰). واردان و ویجایا[9] (۲۰۲۴، ۲۰۶۳) نیز در مطالعه خود به بررسی

1, Lakhouit
2, Fuqaha
3, Nesmachnow & etal
4, Devi & etal
5, LoRaWAN
6, Narrowband Internet of Things
7, Patil & etal
8, Idrovo-Hurel & etal
9, Vardhan & Vijaya

کاربرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی در بهینه‌سازی جمع‌آوری زباله، کاهش هزینه‌های عملیاتی، پیش‌بینی تولید زباله، و ارتقاء سیستم‌های بازیافت هوشمند پرداخته و تأکید می‌کنند که استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی در زیرساخت‌های شهری نه‌تنها موجب بهبود بهره‌وری زیست‌محیطی می‌شود، بلکه مسیر را برای توسعه شهرهای پاک‌تر، هوشمندتر و تاب‌آورتر هموار می‌سازد. گورجار و گور[1] (۲۰۲۴، ۱) نیز در بررسی نقش هوش مصنوعی در بهبود مدیریت پسماند جامد شهری تأکید می‌کنند که استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای تعیین مسیرهای بهینه جمع‌آوری زباله، منجر به کاهش مصرف سوخت و هزینه‌های عملیاتی می‌گردد. همچنین استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی الگوهای تولید زباله، می‌توانند به بهبود تخصیص منابع و برنامه‌ریزی خدمات کمک کنند. ساه[2] (۲۰۲۴، ۲۶) در پژوهش خود به معرفی چند مدل و تکنولوژی کلیدی به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی، و ارتقاء عملکرد سیستم‌های جمع‌آوری و تفکیک زباله پرداخته است. مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر جنگل تصادفی و (SVM) برای پیش‌بینی حجم تولید زباله در نواحی مختلف شهری، که در برنامه‌ریزی عملیات و تخصیص منابع بسیار مؤثرند؛ سیستم‌های بینایی ماشین مبتنی بر (CNN) برای شناسایی خودکار انواع زباله (قابل بازیافت، تر، خشک) و هدایت فرآیند تفکیک هوشمند؛ الگوریتم‌های مسیریابی بهینه مانند الگوریتم دیکسترا برای کوتاهترین مسیر[3] یا الگوریتم‌های تکاملی برای طراحی مسیرهای کم‌مصرف جمع‌آوری زباله، با هدف کاهش مصرف سوخت و زمان عملیات و پلتفرم‌های اینترنت اشیاء برای نظارت بلادرنگ سطل‌های زباله مجهز به حسگر سطح، دما و مکان، که داده‌های محیطی را به سرور مرکزی ارسال می‌کنند تا پردازش توسط الگوریتم‌های هوش مصنوعی انجام شود، از جمله مدل‌های معرفی شده در این پژوهش می باشند. سینگاگردا و همکاران[4] (۲۰۲۴، ۲۹) در مطالعه ای نشان دادند که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند مسیر تبدیل زباله به منبع را تسهیل کرده و وابستگی به دفن زباله را کاهش دهد. در این مطالعه مدل‌های پیش‌بینی حجم پسماند شهری مبتنی بر الگوریتم‌های رگرسیون و جنگل تصادفی برای برنامه‌ریزی دقیق‌تر جمع‌آوری و تخصیص منابع، و استفاده از شبکه‌های عصبی در طبقه‌بندی زباله‌ها به ویژه در فرآیند تفکیک در مبدأ و خودکارسازی خطوط بازیافت و در بهبود فرایند بسیار مفید ذکر گردیده است. سیستم‌های تصمیم‌یار و چارچوب مدیریت داده بر اساس اینترنت اشیاء نیز از دیگر مدل‌های پیشنهادی محققان این پژوهش در راستای کمک به بهبود سیاست گذاری و مدیریت پسماند است.

همچنین فانگ و همکاران[5] (۲۰۲۳، ۲۳)، در پژوهشی به بررسی جامع کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت پسماند در شهرهای هوشمند پرداخته‌اند. آن‌ها با مرور تکنیک‌هایی چون یادگیری ماشین، بینایی ماشین و سیستم‌های خبره، نشان داده‌اند که هوش مصنوعی می‌تواند جمع‌آوری، تفکیک، پیش‌بینی تولید و تصمیم‌گیری بهینه در زمینه پسماند را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا دهد. در مطالعه منیر، لی و نقوی[6] (۲۰۲۳، ۱)، یادگیری ماشین به‌عنوان یک منبع پاک برای پیش‌بینی تولید زباله، بهینه‌سازی مسیر جمع‌آوری، و بهبود تصمیم‌گیری در فرآیندهای بازیافت معرفی شده است. در پژوهشی دیگر که توسط سابالکشمی و همکاران[7] (۲۰۲۳، ۵۴۰۰) انجام گرفت، نویسندگان ترکیب فناوری‌های سخت‌افزاری و الگوریتم‌های هوش مصنوعی با سیستم‌های نظارت بلادرنگ را بررسی کرده و مدلی توسعه یافته که قادر است به‌طور خودکار پر بودن سطل‌ها، نوع زباله و زمان تخلیه را تشخیص دهد ارائه کردند. سطل زباله هوشمند مبتنی بر حسگرهای التراسونیک و آردوینو[8] برای سنجش سطح زباله در زمان واقعی و ارسال اطلاعات به واحد مرکزی از طریق شبکه بی‌سیم؛ شبکه‌های موبایل و اینترنت اشیاء (GSM/IoT) برای ارسال هشدار جهت اطلاع‌رسانی وضعیت پر شدن سطل‌ها به واحد مدیریت شهری؛ الگوریتم

1, Gurjar & Gaur
2, Sah
3, Dijkstra
4, Singagerda & etal
5, Fang & etal
6, Munir, Li & Naqvi
7, SubaLakshmi & etal
8, Arduino

اولویت‌بندی جمع‌آوری، برای تخصیص بهینه منابع (ماشین‌ها و نیروها) بر اساس سطح پر شدن و مکان سطل‌ها و الگوریتم تشخیص نوع زباله (بر پایه بینایی ماشین) جهت تفکیک اولیه زباله‌ها در مبدا از مدل‌ها و تکنیک‌های کلیدی معرفی‌شده در این پژوهش می باشند. بوزیچ[1] (۲۰۲۳، ۱)، در مطالعه خود با مرور نمونه‌های موفق جهانی، نشان می‌دهد هوش مصنوعی قادر است تمامی مراحل زنجیره مدیریت زباله از تولید تا بازیافت را به صورت هوشمند تحلیل و مدیریت کند. تمرکز اصلی پژوهش وی بر بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای بهبود کارایی، کاهش هزینه‌ها و افزایش نرخ بازیافت در محیط‌های شهری است. رضا و حسن[2] (۲۰۲۳، ۱۲) نیز به بررسی فناوری‌هایی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تحلیل داده‌های شهری و پیش‌بینی دقیق تولید زباله در سطوح محلی، منطقه‌ای و کلان‌شهری؛ سیستم‌های طبقه‌بندی مبتنی بر بینایی ماشین جهت شناسایی خودکار و دقیق انواع زباله در مراکز بازیافت؛ الگوریتم‌های بهینه‌سازی مسیر مانند الگوریتم کلونی مورچگان برای کاهش مصرف سوخت و زمان در جمع‌آوری زباله؛ مدل‌های تصمیم‌یار برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری شهری در برنامه‌ریزی منابع و سیاست‌گذاری بلندمدت در مدیریت پسماند پرداخته اند.

مطالعات انجام شده در داخل کشور در بازه زمانی مدنظر پژوهش حاضر نیز قابل توجه می باشند. به عنوان مثال در پژوهشی که توسط عباسی و همکاران (۲۰۲۰، ۱۶۸) با هدف پیش‌بینی دقیق میزان تولید پسماند شهری با بهره‌گیری از مدل‌های هوش مصنوعی انجام گرفت، به مقایسه کارایی چند مدل یادگیری ماشین شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و مدل ترکیبی پرداخته شد. یافته‌ها حاکی از آن است که مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی با ضریب تعیین (R^2) برابر ۰/۹۷و خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) کمتر از ۰/۰۵، از بالاترین دقت در پیش‌بینی حجم ماهانه پسماند برخوردار است. این پژوهش، به عنوان یکی از معدود مطالعات انجام شده در داخل کشور، به شکلی کمی به ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های هوشمند در حوزه مدیریت پسماند شهری پرداخته است. عباسی و کریمی درمیان (۲۰۲۵، ۲۸۶) در مقاله‌ای با عنوان «مدل‌سازی تولید پسماند شهری با استفاده از ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی مصنوعی و یادگیری عمیق»، به منظور مدل‌سازی میزان تولید پسماند شهری در تهران، به بررسی و مقایسه‌ی کارایی روش‌های هوش مصنوعی نظیر ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی مصنوعی و یادگیری عمیق پرداختند. در این پژوهش، داده‌های مربوط به عوامل جغرافیایی، اجتماعی–اقتصادی و اقلیمی به عنوان ورودی مدل‌ها در نظر گرفته شدند و عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های R^2، RMSE و MAE مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که مدل یادگیری عمیق، در مقایسه با سایر روش‌ها، از دقت بالاتری در پیش‌بینی میزان تولید پسماند برخوردار بوده و در شناسایی الگوهای پیچیده‌ی حاکم بر تولید پسماند شهری، عملکرد بهتری از خود نشان داده است. همچنین بهروندی و همکاران (۲۰۲۵، ۲۳۷) نیز در مطالعه ای با عنوان «مروری بر مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سیستم‌های مدیریت پسماند شهری» به بررسی جامع مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مورد استفاده در این حوزه پرداخته‌اند. این پژوهش با هدف ارزیابی کاربرد مدل‌های پیشرفته، از جمله هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و روش‌های بهینه‌سازی، در راستای ارتقای کارایی فرآیندهای جمع‌آوری، تفکیک و بازیافت پسماند صورت گرفته است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که تلفیق تکنیک‌های شبیه‌سازی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، ضمن بهبود عملکرد کلی سیستم مدیریت پسماند، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر و کاهش هزینه‌ها را نیز فراهم می‌آورد.

در مطالعه حسینی بقانام (۲۰۲۳، ۱۳۶)، مدل‌سازی دقیق تولید پسماند شهری در تبریز مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، با بهره‌گیری از داده‌های آماری ماهانه چند ساله (شامل متغیرهای اقتصادی، اجتماعی و اقلیمی)، از روش پیش‌پردازش موجک و الگوریتم‌های هوش مصنوعی شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان کمترین مربعات برای تحلیل داده‌ها استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل ترکیبی (موجک–شبکه عصبی مصنوعی) با ارائه بالاترین سطح دقت و عملکرد، قادر است الگوهای پیچیده فصلی تولید پسماند را به نحو مطلوبی شبیه‌سازی کند و بر مدل‌های تکی ANN، LSSVM و رگرسیون خطی برتری داشته باشد. خالمی و حسن‌زاده (۲۰۲۲، ۵۲) در پژوهشی با هدف بهبود عملکرد مدیریت پسماند شهری، یک سامانه مبتنی بر اینترنت اشیا و تحلیل داده‌های

1, Božić
2, Reza & Hassan

لحظه‌ای طراحی کردند. این سامانه با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی سبک‌وزن، امکان نظارت مستمر بر وضعیت مخازن، بهینه‌سازی مسیرهای جمع‌آوری و زمان‌بندی دقیق عملیات را فراهم می‌کند. نتایج حاصل از اجرای این سامانه نشان داد که مصرف سوخت تا حدود ۳۰ درصد و زمان انجام عملیات جمع‌آوری پسماند تا ۲۵ درصد کاهش یافته است. این دستاوردها نمایانگر اهمیت به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند در راستای دستیابی به مدیریت پایدار شهری و توسعه شهرهای دانش‌بنیان در ایران است.

در مجموع بررسی ۲۰ مطالعه منتخب نشان می‌دهد، استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء در مدیریت پسماند شهری، می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی موجب بهبود فرآیند جمع‌آوری، تفکیک، پیش‌بینی، و تصمیم‌گیری در این حوزه گردد.

جدول ۲ مروری ساختاریافته بر مطالعات اخیر در حوزه مدیریت هوشمند پسماند شهری با تمرکز بر کاربرد فناوری‌های نوین را ارائه می‌دهد. این مطالعات با هدف ارتقاء کارایی، پایداری و خودکارسازی فرآیندهای جمع‌آوری، تفکیک و بازیافت پسماند، رویکردهای نوآورانه‌ای را به کار گرفته‌اند که هر یک نقاط قوت و ویژگی‌های برجسته خاص خود را دارند.

جدول ۲: خلاصه پژوهش‌های بررسی شده در بخش مدیریت پسماند با کاربرد هوش مصنوعی

ردیف	منابع داده	مدل‌ها/الگوریتم‌های به کار رفته
۱	سیستم‌های داده‌محور شهری	AI & IoT، رباتیک پیشرفته
۲	فناوری‌های نوظهور، IoT	AI & IoT
۳	چارچوب‌های داده‌محور وML	الگوریتم‌های ML ، بهینه‌سازی، DSS
۴	IoT، بلاک‌چین، بینایی ماشین	NB-IoT، LoRaWAN،Vision AI
۵	بلادرنگIoT & CNN	Dynamic Pricing، IoT، بلاک‌چین،CNN
۶	مروری ساختاریافته	ANN،ML ، سیستم خبره، منطق فازی
۷	زیرساخت شهری	AIبرای بازیافت و پیش‌بینی
۸	مدیریت پسماند شهری	ML، پیش‌بینی مسیر و حجم
۹	IoT، تصاویر، متغیرهای محیطی	RF, SVM, CNN, Dijkstra, IoT
۱۰	IoT & DSS	Regression, RF, ANN, DSS
۱۱	مطالعات مروری، شهرهای هوشمند	ML، بینایی ماشین، سیستم خبره
۱۲	داده‌های تولید زباله و بازیافت	یادگیری ماشین
۱۳	حسگر التراسونیک، آردوینو،GSM	بینایی ماشین، اولویت‌بندی،IoT
۱۴	نمونه‌های جهانی	AIچندمرحله‌ای
۱۵	شهری، محلی، منطقه‌ای	DSS، ACO، CNN،ANN

بهینه سازی مصرف انرژی

جیانگ و یو[1] (۲۰۲۵، ۱) در مقاله خود با عنوان نقش هوش مصنوعی در افزایش تاب‌آوری سیستم‌های انرژی شهری از مدل‌هایی مانند یادگیری ماشین، تحلیل پیش‌بینانه، و کنترل تطبیقی برای ارتقاء انعطاف‌پذیری زیرساخت‌های انرژی استفاده کرده است. هدف از انجام این مطالعه تحلیل قابلیت الگوریتم‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی، سازگاری، و پاسخ سریع به اختلالات انرژی (مانند قطعی برق یا نوسانات بار) بود. نتایج نشان داد که ادغام هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی انرژی شهری می‌تواند پاسخ‌گویی، پایداری و امنیت سیستم‌های

1, Jiang & Yu

انرژی را در برابر شوک‌ها و ناپایداری‌ها بهبود بخشد. مطالعه منایی و همکاران[1] (۲۰۲۴، ۵۶۲)، راهکارهای هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی برای ارتقای بهره‌وری انرژی در محیط‌های شهری را به‌عنوان ضرورتی برای پایداری و تاب‌آوری اقلیمی شهرها تحلیل می‌کند. نویسندگان با تمرکز بر الگوریتم‌های پیش‌بینی، سیستم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، و سامانه‌های توصیه‌گر انرژی، نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند ابزار قدرتمندی برای مدیریت داده‌محور انرژی در زیرساخت‌های شهری باشد. نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهد که به‌کارگیری هوش مصنوعی می‌تواند بین ۱۵ تا ۳۰ درصد در کاهش مصرف انرژی مؤثر باشد و به تبع آن، کاهش قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای ایجاد کند. علاوه بر این، هوش مصنوعی با نظارت و کنترل به موقع، منابع اتلاف انرژی را شناسایی و اصلاح می‌کند که این امر به افزایش پایداری و طول عمر تجهیزات کمک می‌کند. لی، وانگ و تانگ[2] (۲۰۲۴، ۲۱) خود به بررسی تأثیر توسعه هوش مصنوعی بر بهره‌وری انرژی شهری از منظر سیاست‌گذاری شهر هوشمند پرداختند. هدف آن‌ها تحلیل رابطه میان سیاست‌های هوشمندسازی شهری و به‌کارگیری مدل‌های هوش مصنوعی در بهینه‌سازی مصرف انرژی بود. در این مطالعه، از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی مصرف انرژی و ارزیابی کارایی سیاست‌ها استفاده شده است. نویسندگان نشان دادند که شهرهایی که چارچوب‌های سیاست‌گذاری شفاف و دیجیتالی دارند، در پیاده‌سازی راهکارهای هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی انرژی موفق‌تر عمل می‌کنند. همچنین، ادغام هوش مصنوعی با سیاست‌های شهر هوشمند نه‌تنها موجب کاهش مصرف انرژی می‌شود، بلکه بهره‌وری مدیریتی، انعطاف‌پذیری سیستم‌ها و پایداری زیست‌محیطی را نیز تقویت می‌کند. در پژوهشی دیگر جاکانی[3] (۲۰۲۴، ۱۰)، با هدف طراحی مدل‌هایی برای پایش و بهینه‌سازی مصرف انرژی از طریق زیرساخت‌های ابری و یادگیری ماشین، راهبردهای هوش مصنوعی در بهبود بهره‌وری انرژی در شهرهای هوشمند مبتنی بر فضای ابری را مورد بررسی قرار دادند. نویسنده نتیجه‌گیری می‌کند که ترکیب هوش مصنوعی با رایانش ابری می‌تواند پایداری انرژی را در مقیاس شهری به‌طور مؤثری ارتقاء دهد. مطالعه تونده و همکاران[4] (۲۰۲۴، ۱۴۹) نیز با هدف تحلیل فناوری‌های دیجیتال مانند یادگیری ماشین، پردازش بلادرنگ داده‌ها، و سیستم‌های کنترل خودکار در بهینه‌سازی مصرف انرژی، به بررسی نقش نوآوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در بهبود بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های هوشمند و مناطق شهری پرداخته است. این مطالعه نشان می‌دهد تحول دیجیتال مبتنی بر هوش مصنوعی موجب افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه انرژی و تسهیل در مدیریت هوشمند زیرساخت‌های شهری می‌شود. بررسی کاربرد سیستم‌های هوشمند شبکه انرژی مبتنی بر هوش مصنوعی برای ارتقاء بهره‌وری و کاهش ردپای کربنی در زیرساخت‌های شهری با هدف طراحی چارچوبی مبتنی بر یادگیری ماشین برای مدیریت بار، پیش‌بینی تقاضا و بهینه‌سازی توزیع انرژی در شبکه‌های شهری مطالعه دیگری است که توسط اوجادی و همکاران[5] (۲۰۲۴، ۱۵۵۸) انجام گرفت. نتایج همچنان حاکی از کاهش تلفات انرژی در صورت ادغام هوش مصنوعی با شبکه هوشمند بود. در این پژوهش از الگوریتم‌های پیش‌بینی، تحلیل کلان‌داده و کنترل بلادرنگ استفاده شده است. روژک و همکاران[6] (۲۰۲۴، ۲۵)، در مطالعه خود به بررسی نقش یادگیری ماشین در فرآیند گذار به شهرهای هوشمند پایدار پرداختند. هدف مقاله توسعه یک سیستم داده‌محور برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، مدیریت منابع شهری و پیش‌بینی تقاضا در زیرساخت‌های شهری است. از الگوریتم‌هایی نظیر SVM، جنگل تصادفی و ANN برای تحلیل رفتارهای شهری و پشتیبانی تصمیم‌گیری استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که یلدگیری ماشین می‌تواند شفافیت، دقت و پایداری تصمیم‌گیری شهری را به‌طور چشمگیری ارتقاء دهد. همچنین در مطالعه ای مروری که توسط استکولا و همکاران[7] (۲۰۲۳، ۲۶) انجام گرفت، به بررسی راهکارهای انرژی‌محور مبتنی بر هوش مصنوعی در سطوح مختلف از کاربر تا زیرساخت پرداخته شد. هدف از انجام این مطالعه تحلیل

1, Menai & etal
2, Li, Wang & Tang
3, Jakkani
4, Tunde & etal
5, Ojadi & etal
6, Rojek & etal
7, Stecuła & etal

نقش هوش مصنوعی در بهینه‌سازی مصرف انرژی شهری، از سطح فردی (رفتار مصرف‌کننده) تا سیاست‌های کلان شهری بود. نویسندگان از مدل‌های یادگیری ماشین، سیستم‌های توصیه‌گر انرژی و تحلیل کلان‌داده برای ارزیابی پتانسیل هوش مصنوعی در ارتقای بهره‌وری انرژی استفاده کردند. نتیجه‌گیری نشان داد که ادغام فناوری‌های هوش مصنوعی با سیاست‌های شهری نه‌تنها موجب صرفه‌جویی در انرژی می‌شود، بلکه آگاهی زیست‌محیطی را نیز در سطح جامعه افزایش می‌دهد. جیلیو و همکاران[1] (۲۰۲۳، ۱۸۶۷۳) در مطالعه خود به طراحی یک سیستم هوشمند مدیریت انرژی برای ساختمان‌های شهری پرداختند که بر مبنای هوش مصنوعی و با ادغام منابع خورشیدی و ذخیره‌سازی انرژی عمل می‌کند. هدف آن‌ها توسعه یک الگوریتم کنترل تطبیقی مبتنی بر یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی مصرف، تولید و ذخیره انرژی بود. مدل پیشنهادی از داده‌های تولیدی پنل‌های فتوولتائیک و باتری‌ها برای پیش‌بینی رفتار مصرفی و تنظیم عملکرد سیستم استفاده می‌کند. نتایج نشان داد که این رویکرد می‌تواند وابستگی به شبکه را کاهش و پایداری انرژی در ساختمان‌های شهری را افزایش دهد. آنتوپولوس و کازانتزی[2] (۲۰۲۲، ۱)، در پژوهش خود با عنوان "مدل‌های ارزیابی بهره‌وری انرژی شهری از دیدگاه هوش مصنوعی و کلان‌داده: ابزارهایی برای سیاست‌گذاران"با تحلیل مطالعات موردی و مدل‌های تحلیلی، نشان داد که تکنیک‌هایی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، تحلیل رگرسیون، و خوشه‌بندی داده‌ها می‌توانند برای پایش مصرف انرژی، شناسایی نواحی پرمصرف و پیش‌بینی سناریوهای آینده مورد استفاده قرار گیرند. ماریناکیس[3] (۲۰۲۰، ۱۴)، در مقاله‌ای با عنوان "کلان‌داده برای مدیریت انرژی و ساختمان‌های با بهره‌وری بالای انرژی" به بررسی نقش کلان‌داده در بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارتقاء بهره‌وری ساختمان‌ها پرداخته است. هدف اصلی، استفاده از داده‌های محیطی و رفتاری برای تحلیل مصرف انرژی و طراحی سیستم‌های تصمیم‌یار مبتنی بر داده است. در این مطالعه از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، خوشه‌بندی، و مدل‌سازی پیش‌بینانه برای پایش عملکرد انرژی و بهینه‌سازی مصرف در ساختمان‌های شهری استفاده شده است. نویسنده تأکید می‌کند که تلفیق Big Data و هوش مصنوعی می‌تواند اساس سیاست‌گذاری انرژی‌محور در شهرهای هوشمند آینده باشد. چوی و همکاران[4] (۲۰۱۸، ۱۵) نیز با هدف ارزیابی کاربرد هوش مصنوعی در بهینه سازی پایش هوشمند مصرف انرژی و پیش‌بینی تقاضا در شهرهای هوشمند از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، سیستم‌های بلادرنگ نظارت انرژی، و مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده استفاده کرده و نشان داده است که این ابزارها می‌توانند منجر به کاهش مصرف، افزایش بازده و تحقق اهداف پایداری در مقیاس شهری شوند. بر اساس مطالعه‌ای که عنابستانی و همکاران (۲۰۲۴، ۱۹) تحت عنوان "نقش هوش مصنوعی در ارتقای کیفیت زندگی شهروندان با رویکرد مطالعات آینده (مطالعه موردی: کلانشهر مشهد)" انجام داده‌اند، هوش مصنوعی نقش محوری در بهینه‌سازی مصرف انرژی در شهرها ایفا می‌کند. این فناوری، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان پیش‌بینی دقیق الگوهای مصرف انرژی، کنترل هوشمند سامانه‌های گرمایشی، سرمایشی و روشنایی، و مدیریت بهینه بار را فراهم می‌سازد. در نتیجه، استفاده از هوش مصنوعی به کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری کمک کرده و مسیر را برای توسعه شهرهای هوشمند و پایدار هموار می‌کند. با این حال، تحقق کامل این پتانسیل مستلزم توسعه زیرساخت‌های داده‌ای قوی و اتخاذ سیاست‌های حمایتی مؤثر است. همچنین طبق مطالعه زینالی عظیم (۲۰۲۵، ۱) تحت عنوان «ارزیابی تأثیر بکارگیری هوش مصنوعی در پایداری شهر تبریز»، استفاده از هوش مصنوعی با اتکا به الگوریتم‌های پیشرفته‌ی یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، نقش بسزایی در ارتقاء بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف در بخش‌های گوناگون شهری ایفا می‌کند. این فناوری با تحلیل کلان‌داده‌ها و پیش‌بینی دقیق الگوهای مصرف انرژی، امکان مدیریت بهینه بار شبکه، کاهش اتلاف انرژی و در نتیجه، بهینه‌سازی عملکرد زیرساخت‌های شهری را فراهم آورده است. افزون بر این، هوش مصنوعی در

1, Giglio & etal
2, Anthopoulos & Kazantzi
3, Marinakis

4, Chui & etal

یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر و بهینه‌سازی مصرف انرژی در شهر تبریز نقشی محوری ایفا نموده و به دستاوردهای چشمگیر اقتصادی و زیست‌محیطی منجر شده است.

به طور کلی با نگاهی به پژوهش‌های بررسی شده در این بخش می‌توان گفت هریک از این پژوهش‌ها با بهره‌گیری از رویکردها و فناوری‌های نوین، به دنبال افزایش کارایی، پایداری و تاب‌آوری سیستم‌های انرژی شهری بوده‌اند. بررسی نقاط قوت و ویژگی‌های برجسته این پژوهش‌ها، مسیر آینده تحقیقات و توسعه راهکارهای عملی را روشن می‌سازد. جدول ۳ مروری جامع بر مطالعات بررسی شده در این بخش را ارائه نموده است.

جدول ۳: مقایسه پژوهش‌های بررسی شده در بخش مدیریت مصرف انرژی در کاربرد هوش مصنوعی

ردیف	منابع داده	مدل‌ها/الگوریتم‌ها
۱	مدل‌های پاسخ به اختلالات انرژی	ML، تحلیل پیش‌بینانه، کنترل تطبیقی
۲	داده مصرف انرژی شهری	پیش‌بینی، بهینه‌سازی چندهدفه، توصیه‌گر
۳	سیاست‌های شهری و مصرف انرژی	یادگیری ماشین برای ارزیابی سیاست
۴	زیرساخت‌های ابری انرژی	یادگیری ماشین و رایانش ابری
۵	ساختمان‌های هوشمند، پردازش بلادرنگ	ML، کنترل خودکار، تحلیل لحظه‌ای
۶	شبکه هوشمند انرژی شهری	پیش‌بینی، کنترل بلادرنگ، کلان‌داده
۷	داده‌های شهری برای گذار هوشمند	ANN، RF،SVM
۸	مصرف فردی تا کلان‌شهری	ML، سیستم توصیه‌گر، کلان‌داده
۹	پنل خورشیدی و باتری	کنترل تطبیقی،ML
۱۰	مدل‌های موردی و تحلیلی	ANN، رگرسیون، خوشه‌بندی
۱۱	Big Dataمحیطی و رفتاری	AI، خوشه‌بندی، پیش‌بینی
۱۲	نظارت بلادرنگ انرژی شهری	ML، مدل پیش‌بینی، سامانه پایش

جمع‌بندی یافته‌ها نشان می‌دهد که اگرچه در هر سه حوزه پیشرفت‌های چشمگیری حاصل شده، اما توزیع پژوهش‌ها نامتوازن بوده و بیشترین تمرکز بر حوزه‌ی کیفیت هوا قرار دارد، در حالی که بخش انرژی شهری کمتر مورد مطالعه کاربردی قرار گرفته است. در حوزه‌ی پایش و پیش‌بینی کیفیت هوا، اغلب پژوهش‌ها از مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی بازگشتی، شبکه‌های پیچشی و الگوریتم‌های جنگل تصادفی برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌هایی چون $PM_{2.5}$ ، NO_2 و CO استفاده کرده‌اند. نتایج این مطالعات عموماً نشان داده‌اند که دقت مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نسبت به روش‌های آماری سنتی به‌طور چشمگیری بیشتر است و می‌توان از آن‌ها برای هشدار زودهنگام آلودگی و بهینه‌سازی سیاست‌های ترافیکی بهره گرفت.

در حوزه‌ی مدیریت پسماند شهری، بخش عمده‌ای از پژوهش‌ها بر طراحی سامانه‌های هوشمند جمع‌آوری، طبقه‌بندی و بازیافت متمرکز بوده‌اند. کاربرد ترکیبی بینایی ماشین، حسگرهای اینترنت اشیاء و الگوریتم‌های یادگیری تقویتی در این مطالعات به بهبود مسیرهای جمع‌آوری زباله، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و افزایش نرخ تفکیک منجر شده است.

در زمینه‌ی مدیریت مصرف انرژی شهری، تحقیقات منتخب نشان می‌دهند که مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی، مانند شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، در کنترل بار مصرفی، پیش‌بینی تقاضای انرژی و ارتقای کارایی ساختمان‌ها نقش مؤثری دارند. تمرکز مطالعات اخیر بر استفاده از داده‌های بلادرنگ و یکپارچه‌سازی AI با سیستم‌های هوشمند شهری بوده است.

بحث

در این بخش، یافته‌های به‌دست‌آمده از مرور ساختاریافته‌ی مقالات در سه حوزه‌ی کیفیت هوا، مدیریت پسماند و مدیریت مصرف انرژی مورد تحلیل و تفسیر قرار می‌گیرند. هدف از این بخش، صرفاً ارائه‌ی نتایج توصیفی نیست، بلکه تمرکز بر درک عمیق‌تر از روندها، هم‌پوشانی‌ها، چالش‌ها و شکاف‌های پژوهشی است که در مطالعات گذشته مشاهده شده‌اند. بدین منظور، تحلیل‌ها به تفکیک حوزه‌ها ارائه می‌شوند تا مشخص شود هوش مصنوعی در هر زمینه تا چه حد توانسته است به بهبود کارایی زیست‌محیطی شهرها و تحقق اهداف توسعه‌ی پایدار شهری (به‌ویژه هدف یازدهم، یعنی ایجاد شهرها و جوامع پایدار و مقاوم) کمک کند. سپس با مقایسه‌ی نتایج سه حوزه، نقاط اشتراک، تفاوت و مسیرهای آینده‌ی تحقیق و سیاست‌گذاری شهری استخراج می‌گردد.

پایش و پیش‌بینی کیفیت هوا:

در راستای تحلیل انتقادی مطالعات مرورشده در حوزه‌ی پایش و پیش‌بینی کیفیت هوا با استفاده از هوش مصنوعی، مقایسه‌ی روش‌ها و مدل‌های به‌کاررفته نشان می‌دهد که انتخاب نوع الگوریتم و منبع داده تأثیر مستقیم بر دقت، کارایی و قابلیت تعمیم مدل‌ها دارد. مطالعات اخیر از رویکردهای متنوعی شامل یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و مدل‌های هیبریدی بهره گرفته‌اند که هرکدام نقاط قوت و ضعف خاص خود را در تبیین روابط پیچیده‌ی میان آلاینده‌ها و متغیرهای محیطی دارند. به‌منظور ارزیابی نظام‌مند این رویکردها، جدول ۴ خلاصه‌ای تحلیلی از مهم‌ترین مطالعات بررسی‌شده را ارائه می‌دهد. در این جدول، ویژگی‌های برجسته، مزایا و محدودیت‌ها، عملکرد مدل‌ها و الگوریتم‌های مورد استفاده به‌صورت تطبیقی مقایسه شده‌اند تا تصویری روشن از مسیر تحول روش‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی کیفیت هوا به‌دست آید.

جدول ۴: مقایسه روش‌ها و الگوریتم‌های به کارگیری در مطالعات بررسی شده پیش‌بینی کیفیت هوا با استفاده از هوش مصنوعی

ردیف	مدل‌ها / الگوریتم‌های به کار رفته	دقت و عملکرد	نقاط ضعف	نقاط قوت	ویژگی برجسته
۱	یادگیری ماشین	مدل‌سازی روابط غیرخطی	فاقد ارزیابی کمی	درک پیچیدگی‌های غیرخطی	ادغام داده‌های متنوع محیطی
۲	SVM, ANN, CNN, RF	دقت بالا در طبقه‌بندی	نیاز به داده‌های حجیم، پیچیدگی	پردازش بلادرنگ، قابلیت ترکیب با IoT	مرور تطبیقی مدل‌های یادگیری عمیق
۳	GeoNet, ANN, RNN	پوشش مکانی کامل، بازه ۴ ساعته	هزینه پردازش بالا	وضوح بالا، جامعیت مکانی-زمانی	پیش‌بینی لحظه‌ای منطقه‌ای
۴	تحلیل AI روندها	تحلیل علیت بین آلاینده‌ها	فاقد مدل‌سازی پیش‌بینی‌پذیر	کاربرد در سیاست‌گذاری	تحلیل سیاستی داده‌محور
۵	LightGBM, LSTM	R^2 بالای ۹۱ درصد، F1: ۹۳/۳ درصد	نیاز به داده‌های ترکیبی و آماده‌سازی	دقت بالا در طبقه‌بندی و پیش‌بینی	دقیق‌ترین مدل ترکیبی موجود
۶	شبکه‌های کانولوشنی	افزایش دقت پیش‌بینی	فاقد دقت عددی مقایسه‌ای	کاربرد سیاست‌گذاری در هند	مدل خودرمزگذار شهری
۷	RF, SVM, LSTM, CNN	پیش‌بینی دقیق لحظه‌ای	نیاز به داده‌های سنگین	تحلیل ترکیبی چندمنبعه	لحظه‌ای و قابل اعتماد
۸	AI & Big Data	تحلیل کلان و دقیق	نیاز به زیرساخت قوی	تحلیل گسترده و تصمیم‌یار	مقیاس‌پذیری بالا
۹	Ridge, SVM, RF, XGBoost	دقیق برای جایگزینی ایستگاه فیزیکی	محدود به منطقه خاص	قابل اجرا و واقعی	کاربرد عملیاتی در شهرها

مقاله در حال انتشار

۱۰	CiteSpace	تحلیل روندهای 1994–2021	فاقد مدل‌سازی	تحلیل سیاستی حوزه	تحلیل کتاب‌سنجی عمیق
۱۱	Hybrid (RF, GBRT, DNN)	R^2=0.84، RMSE=12.92	پیچیدگی و پردازش بالا	دقت بالا و ساختار ترکیبی	پیش‌بینی فضازمانه PM2.5
۱۲	Autoencoder & Bagging	$R^2 = 0.90$	پردازش پیچیده	بازیابی داده‌های ناقص	بازسازی داده و دقت فضایی

تحلیل داده‌های ارائه‌شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که دقت و کارایی مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی کیفیت هوا به‌طور قابل‌توجهی به نوع الگوریتم، ساختار مدل و میزان تنوع داده‌های ورودی وابسته است. در میان پژوهش‌های بررسی‌شده، مطالعه‌ی لیو و همکاران (۲۰۲۴، ۲۳) با به‌کارگیری الگوریتم‌های ترکیبی LightGBM و LSTM ، بالاترین دقت را در میان مدل‌ها نشان داده است (دقت ۹۷/۵ درصد و ضریب تعیین R^2 برابر با ۰/۹۱) . این ترکیب، به دلیل توانایی LightGBM در استخراج ویژگی‌های غیرزمانی و قدرت LSTM در مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی در داده‌های آلاینده‌ها، از پایداری و تعمیم‌پذیری بالایی برخوردار بوده است .همچنین از منظر کاربرد عملی در مقیاس شهری، مدل‌های ارائه‌شده توسط وو و همکاران (۲۰۲۴) و سامد و همکاران (۲۰۲۳) بیشترین قابلیت پیاده‌سازی واقعی را داشته‌اند؛ زیرا هر دو پژوهش با استفاده از داده‌های چندمنبعه و الگوریتم‌های یادگیری ترکیبی توانسته‌اند پیش‌بینی لحظه‌ای و منطقه‌ای آلودگی را با دقت بالا انجام دهند. این مطالعات به‌ویژه در توسعه‌ی ایستگاه‌های مجازی سنجش آلودگی و کاهش وابستگی به شبکه‌های سنجش فیزیکی موفق بوده‌اند.

به طور کلی یافته‌ها نشان می‌دهد که جهت‌گیری جدید پژوهش‌ها از تحلیل صرف داده‌ها به سمت کاربرد در سیاست‌گذاری شهری و تصمیم‌سازی مبتنی بر داده در حال حرکت است. برای نمونه، برخی مطالعات اخیر مانند لی، وانگ و تانگ، (۲۰۲۴) به جای تمرکز صرف بر پیش‌بینی مقادیر آلاینده، از تحلیل‌های علیت و مدل‌سازی سناریویی برای پشتیبانی از سیاست‌های کاهش آلودگی استفاده کرده‌اند.

جدول ۵: گزینش مناسب‌ترین پژوهش‌های مرورشده در حوزه‌ی پایش کیفیت هوا بر اساس اهداف مطالعه حاضر و معیارهای کلیدی عملکرد

معیار ارزیابی	مناسبترین مطالعه پیشنهادی	دلیل پیشنهاد
پوشش مکانی و زمانی	وو و همکاران(۲۰۲۴)	پیش‌بینی منطقه‌ای با وضوح زمانی چهار ساعته و گستره مکانی بالا
کاربرد در سیاست‌گذاری	گوو و همکاران (۲۰۲۲)	تحلیل روندهای آلودگی و ارائه‌ی چارچوب داده‌محور برای تصمیم‌سازی شهری
دقت پیش‌بینی و طبقه‌بندی	لیو و همکارلن (۲۰۲۴)	دقت ۹۷.۵٪، $R^2 = 0.91$ با مدل ترکیبی LightGBM–LSTM
کاربرد عملیاتی شهری	سامد و همکاران (۲۰۲۳)	توسعه‌ی ایستگاه مجازی برای جایگزینی ایستگاه‌های فیزیکی سنجش
تحلیل فضایی با داده ناقص	ژنگ و همکاران (۲۰۲۴)	بازسازی داده‌های ماهواره‌ای ناقص با استفاده از Autoencoder و Bagging

تحلیل تطبیقی پنج مطالعه‌ی منتخب نشان می‌دهد که مدل‌های کارآمد در حوزه‌ی پایش کیفیت هوا، معمولاً دارای سه ویژگی مشترک‌اند: نخست، تنوع داده‌های ورودی شامل ترکیب داده‌های ماهواره‌ای، حسگرهای زمینی و اطلاعات هواشناسی که امکان مدل‌سازی چندبعدی و افزایش دقت پیش‌بینی را فراهم می‌سازد؛ دوم، به‌کارگیری الگوریتم‌های ترکیبی[1] که توانایی مدل‌سازی روابط غیرخطی و وابستگی‌های زمانی را تقویت می‌کنند؛ و سوم، کاربردپذیری در مقیاس شهری از طریق طراحی سامانه‌های بلادرنگ و قابل پیاده‌سازی در زیرساخت‌های شهری .در میان این مطالعات، مدل ترکیبی LightGBM–LSTM در پژوهش لیو و همکاران (۲۰۲۴) از نظر دقت کمی و تعمیم‌پذیری، برترین عملکرد را داشته است، در حالی که مطالعات وو و

[1]- Hybrid AI Models

همکاران (۲۰۲۴) و سامد و همکاران (۲۰۲۳) با تمرکز بر مقیاس‌پذیری و پیاده‌سازی عملی در شهرها، کاربردی‌ترین رویکردها را ارائه کرده‌اند.

در مجموع، یافته‌ها حاکی از آن است که روند پژوهش‌های اخیر به سمت ترکیب روش‌های یادگیری عمیق با تحلیل داده‌های بلادرنگ و یکپارچه‌سازی سامانه‌های هوشمند شهری پیش می‌رود. این جهت‌گیری، ضمن ارتقای دقت پیش‌بینی و کاهش نیاز به ایستگاه‌های فیزیکی، گامی مؤثر در راستای توسعه‌ی مدیریت هوشمند آلودگی هوا و تحقق هدف یازدهم توسعه‌ی پایدار (SDG11) یعنی «شهرهای پایدار و مقاوم» به‌شمار می‌آید.

مدیریت پسماند شهری

در بخش مدیریت پسماند شهری، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های اخیر با هدف ارتقای کارایی جمع‌آوری، تفکیک و بازیافت مواد پسماند از فناوری‌های هوش مصنوعی در ترکیب با اینترنت اشیاء، یادگیری ماشین و سیستم‌های تصمیم‌یار بهره گرفته‌اند. تحلیل کیفی این مطالعات نشان می‌دهد که نوآوری اصلی در این حوزه بیشتر در سطح ادغام داده‌های بلادرنگ، بهینه‌سازی مسیر جمع‌آوری، و طراحی سیستم‌های خودکار تصمیم‌گیری رخ داده است. با این حال، چالش‌هایی نظیر وابستگی به زیرساخت دیجیتال قوی، کمبود داده‌های محلی و دشواری ارزیابی کمی عملکرد، همچنان مانع تعمیم‌پذیری نتایج به مقیاس شهری شده‌اند. برای ارزیابی تطبیقی این مطالعات، جدول ۶ به مقایسه مهم‌ترین پژوهش‌های مرورشده در این حوزه از نظر مدل‌ها، نقاط قوت و ضعف، و شاخص‌های عملکرد پرداخته است.

جدول ۶: مقایسه پژوهش‌های بررسی شده در بخش مدیریت پسماند با کاربرد هوش مصنوعی

ردیف	مدل‌ها/الگوریتم‌های به کار رفته	دقت و عملکرد	نقاط ضعف	نقاط قوت	ویژگی برجسته
۱	ترکیب هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء، رباتیک پیشرفته	افزایش نرخ بازیافت و کاهش هزینه	نیاز به زیرساخت پیچیده	ادغام هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء برای کارایی عملیاتی	ترکیب هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء برای تفکیک هوشمند
۲	الگوریتم‌هایML ، بهینه‌سازی، DSS	پیش‌بینی، تخصیص منابع و تصمیم‌گیری هوشمند	پیچیدگی عملیاتی	جامعیت در مدل‌سازی چندسطحی	کاربرد چندمنظوره الگوریتمی
۳	LoRaWAN،Vision AI ، NB-IoT	اتوماسیون و پیش‌بینی حجم زباله	نیاز به پلتفرم داده قوی	پوشش کامل زنجیره جمع‌آوری	چارچوب اقتصاد چرخشی مبتنی بر داده
۴	CNN، بلاک‌چین، IoT	کاهش دفن زباله و افزایش شفافیت	وابستگی به دیجیتالی‌سازی کامل	پلتفرم تعاملی با ذینفعان	سیستم کامل هوشمند با ردیابی بلادرنگ
۵	ANN،ML ، سیستم خبره، منطق فازی	شناسایی فناوری‌های کلیدی	فاقد داده عملیاتی	چندمدلی و انعطاف‌پذیر	طبقه‌بندی روشمند فناوری‌ها
۶	هوش مصنوعی برای بازیافت و پیش‌بینی	کاهش هزینه و ارتقاء تاب‌آوری	فاقد عدد دقیق ارزیابی	رویکرد جامع شهری	برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری
۷	ML، پیش‌بینی مسیر و حجم	کاهش سوخت و هزینه عملیاتی	نیاز به داده جامع و محلی	برنامه‌ریزی خدمات شهری دقیق	مدیریت منابع و تخصیص بهینه
۸	RF, SVM, CNN, Dijkstra, IoT	پیش‌بینی و طراحی مسیر کم‌مصرف	نیاز به ادغام زیرساخت‌ها	تلفیق انرژی و مسیریابی هوشمند	هوشمندسازی عملیاتی چندبعدی
۹	, RF, ANN, DSS	خودکارسازی خطوط بازیافت	پیچیدگی اجرای سیستمی	طبقه‌بندی زباله و مدیریت تصمیم‌یار	مدیریت تصمیم‌یار در مبدأ

مقاله در حال انتشار

۱۰	ML، بینایی ماشین، سیستم خبره	افزایش تصمیم‌گیری بهینه در جمع‌آوری و تفکیک	فاقد داده کمی عملیاتی	جامعیت در کاربرد شهری	قابلیت تعمیم به شهرهای هوشمند
۱۱	یادگیری ماشین	پیش‌بینی تولید، بهینه‌سازی مسیر	مقیاس‌پذیری محدود گزارش نشده	برنامه‌ریزی بازیافت و جمع‌آوری	AIبه‌عنوان ابزار پاک محیطی
۱۲	بینایی ماشین، اولویت‌بندی، IoT	تشخیص پر شدن، نوع زباله، تخصیص منابع	وابستگی به سخت‌افزار	سیستم هوشمند بلادرنگ	سطل هوشمند و خودکارسازی مدیریت
۱۳	AIچندمرحله‌ای	تحلیل زنجیره کامل پسماند	فاقد مدل‌های بومی‌سازی‌شده	پوشش کل چرخه پسماند	تحلیل هوشمند زنجیره پسماند
۱۴	DSS، ACO، CNN،ANN	پیش‌بینی و بهینه‌سازی تصمیمات شهری	نیاز به داده سطح بالا	پشتیبانی از برنامه‌ریزی کلان‌شهری	مدل‌های ترکیبی برای تصمیم‌گیری شهری

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که بیشترین موفقیت در حوزه‌ی مدیریت پسماند مربوط به مدل‌های ترکیبی AI–IoT است که از حسگرهای هوشمند برای شناسایی سطح پرشدگی سطل‌ها، نوع زباله و برنامه‌ریزی مسیرهای جمع‌آوری استفاده کرده‌اند. این ترکیب به‌ویژه در پژوهش‌هایی نظیر چارچوب هوش مصنوعی بینایی[1] مبتنی بر LoRaWAN و NB-IoT توانسته است اتوماسیون فرآیند جمع‌آوری را با دقت و صرفه‌جویی قابل توجه در انرژی همراه کند. همچنین مطالعاتی که از سیستم‌های تصمیم‌یار چندسطحی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی ترکیبی بهره گرفته‌اند، در زمینه تخصیص منابع و کاهش هزینه‌های سوخت کارایی بالاتری نشان داده‌اند.

در عین حال، محدودیت‌های اصلی این حوزه به عدم یکپارچگی داده‌ها، نبود مدل‌های بومی‌سازی‌شده برای شهرهای درحال‌توسعه، و هزینه بالای استقرار زیرساخت‌های اینترنت اشیاء مربوط می‌شود. با وجود این چالش‌ها، روند کلی تحقیقات به سمت طراحی زنجیره‌های هوشمند پسماند با قابلیت ردیابی بلادرنگ و تصمیم‌سازی خودکار در حال حرکت است. این تحول می‌تواند در آینده نزدیک زمینه‌ساز تحقق اهداف اقتصاد چرخشی و کاهش دفن پسماند در راستای اهداف توسعه پایدار (به‌ویژه SDG11 و SDG12) باشد.

جدول ۷: پژوهش‌های منتخب و پیشنهادی در حوزه مدیریت هوشمند پسماند بر اساس معیارهای عملکرد و اهداف مطالعه حاضر

مطالعه پیشنهادی	معیار ارزیابی و اهداف بررسی‌شده	دلایل انتخاب	ارتباط با اهداف مطالعه حاضر
منیر، لی و نقوی (۲۰۲۳)	بیشترین دقت و کارایی سیستم	ترکیب فناوری‌های رباتیک، اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی برای افزایش نرخ بازیافت و کاهش هزینه‌ها	نمونه موفق ادغام سخت‌افزار و هوش مصنوعی در سامانه‌های جمع‌آوری هوشمند
فانگ و همکاران (۲۰۲۳)	پلتفرم‌های مبتنی بر داده و تصمیم‌یار(DSS)	استفاده از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین با تمرکز بر تخصیص منابع و بهینه‌سازی تصمیمات شهری	مبنای طراحی چارچوب تصمیم‌یار پیشنهادی در این مطالعه
سینگاگردا و همکارلن (۲۰۲۴)	تحلیل بلادرنگ و تعامل با ذینفعان	به‌کارگیری بلاک‌چین، IoT و الگوریتم قیمت‌گذاری پویا برای شفافیت زنجیره پسماند	مبنای توسعه چارچوب جامع مدیریت بلادرنگ پسماند شهری
ایدروو هورنل و همکاران (۲۰۲۵)	طبقه‌بندی فناوری‌ها و مرور جامع	مرور نظام‌مند فناوری‌های هوش مصنوعی در پسماند و تحلیل روند آینده	پشتوانه مفهومی برای بخش آینده‌پژوهی مقاله

[1]- Vision AI

پاتیل و همکاران (۲۰۲۵، ۳۹)؛ نسماکنو و همکاران (۲۰۲۵)	کاربرد سیاست‌گذاری شهری و تاب‌آوری	مدل DSS و ACO برای طراحی سیاست‌های توسعه شهرهای پاک و مقاوم	هم‌راستا با هدف مطالعه حاضر در پیوند فناوری و تاب‌آوری شهری

تحلیل پژوهش‌های منتخب در جدول ۷ نشان می‌دهد که کارآمدترین رویکردها در مدیریت هوشمند پسماند، آن‌هایی هستند که با تلفیق فناوری‌های داده‌محور، زیرساخت‌های اینترنت اشیاء و الگوریتم‌های بهینه‌سازی تصمیم‌یار توسعه یافته‌اند. مطالعه سینگاگردا و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از بلاک‌چین و DSS ، زمینه‌ی شفافیت زنجیره‌ی پسماند و مشارکت ذینفعان شهری را فراهم کرده‌اند. یافته‌ها بیانگر آن است که جهت‌گیری فعلی پژوهش‌ها از تمرکز صرف بر اتوماسیون فنی به سوی مدیریت داده‌محور، اقتصاد چرخشی و سیاست‌گذاری پایدار شهری در حال حرکت است. این تحول، با هدف هم‌افزایی میان فناوری و تاب‌آوری شهری، در راستای دستیابی به اهداف توسعه پایدار ۱۱ و ۱۲ تفسیر می‌شود و می‌تواند مبنایی برای طراحی چارچوب‌های تصمیم‌یار در مدیریت یکپارچه‌ی پسماند شهری باشد.

مدیریت مصرف انرژی

در حوزه‌ی مدیریت مصرف انرژی شهری، کاربرد هوش مصنوعی به‌سرعت در حال گسترش است و پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که این فناوری می‌تواند نقش کلیدی در بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش آلاینده‌ها و ارتقای تاب‌آوری شبکه‌های شهری ایفا کند. مطالعات مرورشده در این بخش، از مدل‌های یادگیری ماشین و کنترل تطبیقی تا تحلیل کلان‌داده و سامانه‌های توصیه‌گر را دربر می‌گیرند و هر یک بر جنبه‌ای از بهینه‌سازی انرژی در سطح ساختمان، شبکه یا شهر تمرکز دارند. به‌منظور مقایسه‌ی نظام‌مند این مطالعات از منظر رویکرد، دقت، نقاط قوت و چالش‌ها، جدول ۸ چکیده‌ای تحلیلی از پژوهش‌های بررسی‌شده در این زمینه را ارائه می‌دهد.

جدول ۸: مقایسه پژوهش‌های بررسی شده در بخش مدیریت مصرف انرژی در کاربرد هوش مصنوعی

ردیف	مدل‌ها/الگوریتم‌ها	دقت و عملکرد	ویژگی برجسته	نقاط ضعف	نقاط قوت
۱	ML، تحلیل پیش‌بینانه، کنترل تطبیقی	افزایش تاب‌آوری، پاسخ سریع به شوک‌ها	تاب‌آوری در برابر ناپایداری انرژی	نیاز به سیستم‌های بلادرنگ دقیق	تقویت امنیت و پایداری سیستم انرژی
۲	پیش‌بینی، بهینه‌سازی چندهدفه، توصیه‌گر	کاهش مصرف ۱۵تا۳۰ درصد کاهش گازهای گلخانه‌ای	مدیریت داده‌محور انرژی شهری	نیاز به داده رفتاری دقیق	کنترل اتلاف انرژی، افزایش عمر تجهیزات
۳	یادگیری ماشین برای ارزیابی سیاست	افزایش موفقیت شهرهای دیجیتالی	تحلیل سیاستی مبتنی بر AI	وابستگی به چارچوب حکمرانی دیجیتال	پیوند AI و سیاست‌گذاری شهری
۴	ترکیب یادگیری ماشین و رایانش ابری	پایداری انرژی با رایانش ابری	بهینه‌سازی ابری انرژی شهری	نیاز به زیرساخت ابری	ادغام با رایانش ابری، مقیاس‌پذیری
۵	ML، کنترل خودکار، تحلیل لحظه‌ای	افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه انرژی	هوشمندسازی زیرساخت انرژی شهری	نیاز به پیاده‌سازی فنی گسترده	تحول دیجیتال زیرساختی
۶	پیش‌بینی، کنترل بلادرنگ، کلان‌داده	کاهش تلفات انرژی و ردپای کربنی	پیش‌بینی و کنترل توزیع انرژی	وابسته به فناوری شبکه هوشمند	مدیریت بار و توزیع هوشمند

مقاله در حال انتشار

۷	ANN، RF،SVM	ارتقاء شفافیت و تصمیم‌گیری پایدار	تحلیل داده‌محور شهری	نیاز به تنظیم مدل برای مناطق مختلف	تحلیل رفتار مصرف انرژی
۸	ML، سیستم توصیه‌گر، کلان‌داده	افزایش آگاهی و صرفه‌جویی انرژی	ادغام سطحی-ساختاری سیاست انرژی	نیاز به یکپارچه‌سازی بین سطوح	پوشش سطوح مختلف مصرف
۹	کنترل تطبیقی،ML	کاهش وابستگی به شبکه	مدیریت انرژی ساختمان با منابع ترکیبی	نیاز به منابع تجدیدپذیر	ادغام تولید و ذخیره‌سازی انرژی
۱۰	ANN، رگرسیون، خوشه‌بندی	پایش و شناسایی نواحی پرمصرف	تحلیل برای سیاست‌گذاران شهری	تأکید بر تحلیل توصیفی	سنجش‌پذیری ناحیه‌ای مصرف
۱۱	AI، خوشه‌بندی، پیش‌بینی	بهینه‌سازی مصرف در ساختمان‌های شهری	تصمیم‌یار هوشمند ساختمان‌ها	نیاز به دیتاست‌های حجیم	تلفیق کلان داده با هوش مصنوعی
۱۲	ML، مدل پیش‌بینی، سامانه پایش	کاهش مصرف و افزایش بازده	پایش بلادرنگ مصرف انرژی	قدیمی‌تر از سایر مطالعات	تحقق اهداف پایداری شهری

نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که الگوهای موفق در مدیریت انرژی شهری عمدتاً مبتنی بر ترکیب الگوریتم‌های یادگیری ماشین، سامانه‌های بلادرنگ و کلان‌داده‌های رفتاری و محیطی هستند. این مدل‌ها توانسته‌اند با پیش‌بینی دقیق تقاضا، کنترل هوشمند بار مصرفی و یکپارچه‌سازی داده‌های چندمنبعه، بین ۱۵ تا ۳۰ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی ایجاد کنند. در این میان، پژوهش منایی و همکاران (۲۰۲۴) به‌عنوان یکی از مطالعات شاخص، توانسته است با بهره‌گیری از الگوریتم‌های توصیه‌گر و بهینه‌سازی چندهدفه، کاهش چشمگیری در مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای گزارش کند. همچنین پژوهش جیانگ و همکاران (۲۰۲۵) با تمرکز بر تاب‌آوری سیستم‌های انرژی در برابر شوک‌های ناگهانی، به توسعه‌ی چارچوب‌های کنترلی تطبیقی در سطح شبکه‌های شهری پرداخته است.

برای شناسایی مطالعات کلیدی و هم‌راستا با اهداف مقاله‌ی حاضر، جدول ۹ به معرفی پژوهش‌های منتخب و تحلیل ساختاری آن‌ها بر اساس معیارهای فنی، سیاستی و عملیاتی می‌پردازد.

جدول ۹: پژوهش‌های پیشنهادی بر اساس تحلیل ساختاری و برنامه های عملیاتی نویسندگان و اهداف پژوهش حاضر

مطالعه پیشنهادی	معیارها و اهداف پژوهش منتخب	دلایل انتخاب	ارتباط با اهداف مطالعه‌ی حاضر
جیانگ و همکارن، (۲۰۲۵)	تاب‌آوری در برابر اختلالات انرژی	تمرکز بر پیش‌بینی شوک‌های انرژی و افزایش امنیت شبکه از طریق مدل کنترل تطبیقی مبتنی بر ML	ارائه‌ی چارچوب تاب‌آوری انرژی در سیستم‌های هوشمند شهری
منایی و همکاران (۲۰۲۴)	دقت عملکردی بالا و کاهش انتشار آلاینده‌ها	کاهش ۱۵ تا ۳۰ درصد مصرف انرژی و کاهش گازهای گلخانه‌ای با استفاده از سیستم‌های توصیه‌گر و بهینه‌سازی چندهدفه	بهینه‌سازی چندهدفه‌ی مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی
لی و همکاران (۲۰۲۴)	مدیریت هوشمند بار و شبکه انرژی شهری	طراحی چارچوب مدیریت بار و پیش‌بینی تقاضا با الگوریتم‌های ML و کنترل بلادرنگ	توسعه‌ی شبکه‌های هوشمند انرژی شهری و کاهش تلفات
استکولا و همکاران (۲۰۲۳)	تصمیم‌یار مبتنی بر کلان‌داده	ادغام داده‌های رفتاری و محیطی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها	طراحی سامانه‌های تصمیم‌یار داده‌محور برای مصرف بهینه‌ی انرژی

تحلیل مطالعات منتخب در جدول ۹ نشان می‌دهد که روند پژوهش‌های نوین در حوزه‌ی انرژی شهری از تمرکز صرف بر کنترل فنی و بهینه‌سازی عددی، به سمت مدیریت هوشمند و یکپارچه‌ی شبکه‌های انرژی در مقیاس شهری تغییر جهت داده

است. مطالعه‌ی جیانگ و همکاران (۲۰۲۵) با تأکید بر تاب‌آوری و پاسخ سریع سیستم انرژی در برابر اختلالات، و پژوهش منایی و همکاران (۲۰۲۴) با تمرکز بر بهینه‌سازی چند هدفه و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، دو نمونه برجسته از این تحول هستند. افزون بر این، تحقیقات لی، وانگ و تانگ (۲۰۲۴) و ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) با رویکرد داده‌محور و استفاده از الگوریتم‌های توصیه‌گر در سطح کلان‌شهری، امکان تحلیل هم‌زمان الگوهای رفتاری مصرف و تصمیم‌گیری در سطوح مختلف زیرساخت را فراهم کرده‌اند.

در مجموع، مرور نظام‌مند این مطالعات نشان می‌دهد که ترکیب هوش مصنوعی با فناوری‌های کلان‌داده، رایانش ابری و اینترنت اشیاء می‌تواند مسیر دستیابی به شبکه‌های هوشمند انرژی و کاهش پایدار مصرف را هموار کند. این جهت‌گیری، علاوه بر ارتقای بهره‌وری، مستقیماً با اهداف توسعه‌ی پایدار به‌ویژه SDG 7 (انرژی پاک و مقرون‌به‌صرفه) و SDG 11 (شهرهای پایدار و مقاوم) هم‌راستا است و می‌تواند بنیانی برای طراحی مدل‌های هوش مصنوعی بومی در مدیریت انرژی شهری ایران فراهم آورد.

چالش‌ها و محدودیت‌ها

کاربرد فناوری‌های هوش مصنوعی در مدیریت محیط زیست شهری، یکی از شاخص‌ترین تحولات سال‌های اخیر در حوزه مدیریت شهری و توسعه پایدار محسوب می‌شود. مطالعات مروری این مقاله و سایر پژوهش‌های انجام گرفته نشان می‌دهند که هوش مصنوعی توانایی قابل توجهی در تحلیل داده های پیچیده، پیش‌بینی روندهای محیطی، و پشتیبانی از تصمیم‌گیری بلادرنگ در حوزه های مختلف محیط زیست شهری دارد. با این حال، کاربردهای کنونی این فناوری‌ها در سه حوزه کلیدی آلودگی هوا، مدیریت پسماند و بهره‌وری انرژی نشان‌دهنده وجود چالش‌ها و کمبودهایی در بعد اجرا می‌باشد که نمی‌توان از آنها چشم پوشی کرد.

چالش‌های اساسی همچون نیاز به داده‌های باکیفیت و وابستگی شدید به داده های ساختاریافته، محدودیت منابع محاسباتی، ناکارآمدی در مناطق کم داده، و تفسیرناپذیری مدل‌های پیچیده همچنان در این سه حوزه مطرح می باشد. به عنوان مثال مدل‌های پیچیده یادگیری عمیق اغلب به عنوان "جعبه سیاه" عمل کرده و تبیین‌پذیری محدودی دارند که می‌تواند مانع پذیرش آن‌ها در سیاست‌گذاری و مدیریت محیط زیست شود (طلایی و همکاران، ۲۰۲۴؛ چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۴).

همچنین مشکلاتی چون هزینه بالای اولیه، هزینه بالای پیاده سازی زیرساخت‌های لازم (مثلاً سطل‌های هوشمند)، پیچیدگی مدل‌ها و نیاز به زیرساخت دیجیتال مناسب، نبود استانداردهای تبادل داده بین نهادهای مختلف، و ضعف آموزش نیروی انسانی متخصص، بهره گیری گسترده از این راهکارها را در شهرهای در حال توسعه دشوار ساخته است (فقها و نورستیوان، ۲۰۲۵؛ منیر، لی و نقوی، ۲۰۲۳). از طرفی ادغام هوش مصنوعی با زیرساخت‌های هوشمند شهری مانند شبکه‌های برق هوشمند و ساختمان‌های هوشمند، اگرچه امکان مدیریت بلادرنگ و تطبیقی انرژی را فراهم می‌کند، اما اغلب در لایه فنی باقی مانده و به دلیل نبود تعامل میان ذینفعان (شهرداری، تأمین کننده انرژی، کاربران)، ضعف در استانداردسازی داده ها، و نگرانی‌های امنیت اطلاعات، هنوز به طور کامل در شبکه های انرژی شهری ادغام نشده‌اند. همچنین،چالش‌هایی همچون نیاز به داده‌های دقیق و به‌روز، پیچیدگی مدل‌ها، و مسائل مربوط به امنیت داده و حریم خصوصی، همچنان پابرجاست.

به طور کلی چالش‌ها و محدودیت‌های اجرایی کاربرد فناوری‌های هوش مصنوعی در سه حوزه کلیدی مورد مطالعه را می‌توان خلاصه وار به شرح ذیل بیان کرد:

- وابستگی به داده‌های باکیفیت، حجیم و ساختاریافته
- پیچیدگی محاسباتی و نیاز به زیرساخت فناورانه پیشرفته
- ضعف در تفسیرپذیری و شفافیت مدل‌ها

- چالش‌های ادغام داده‌ها و فناوری‌های چندمنبعی
- هزینه‌های بالای توسعه، استقرار و نگهداری
- محدودیت‌های حقوقی، اخلاقی و حریم خصوصی
- تعمیم‌پذیری محدود نتایج و مطالعات موردی
- ضعف همکاری‌های بین‌المللی و بین‌نهادی

پیشنهادات

مرور نظام‌مند انجام‌شده در سه حوزه‌ی کیفیت هوا، مدیریت پسماند و مدیریت مصرف انرژی نشان داد که اگرچه کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت محیط‌زیست شهری به‌سرعت در حال گسترش است، اما محدودیت‌هایی در زمینه‌ی داده، مدل‌سازی، و پیوند با سیاست‌گذاری شهری همچنان باقی است. بر این اساس، پیشنهادهای پژوهشی آتی بر پایه یافته‌های تحلیلی این مطالعه در ادامه ارائه شده است.

پیشنهادهای فوق مستقیماً از یافته‌های سه حوزه‌ی تحلیلی استخراج شده‌اند و بر اساس شکاف‌های شناسایی‌شده در داده، مدل‌سازی و سیاست‌گذاری تنظیم گردیده‌اند. تمرکز بر یکپارچگی داده‌ها، ترکیب الگوریتم‌ها و پیوند هوش مصنوعی با تصمیم‌سازی شهری می‌تواند مسیر توسعه‌ی آینده‌ی پژوهش در حوزه‌ی مدیریت محیط‌زیست شهری را ترسیم کند. این جهت‌گیری‌ها با اهداف توسعه‌ی پایدار SDG 7 (انرژی پاک)، SDG 11 (شهرهای پایدار) و SDG 12 (تولید و مصرف مسئولانه) هم‌راستا بوده و چارچوبی عملی برای طراحی سامانه‌های هوشمند شهری در ایران فراهم می‌آورند.

ارتقای کیفیت و تنوع داده‌ها. توسعه‌ی زیرساخت‌های داده‌ای، به‌ویژه از طریق ایجاد و گسترش شبکه‌های حسگر و سامانه‌های جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ، نقش کلیدی در بهبود دقت مدل‌های هوش مصنوعی دارد. ترکیب داده‌های ماهواره‌ای، ایستگاه‌های زمینی، داده‌های هواشناسی و اطلاعات ترافیکی می‌تواند فرآیند پیش‌بینی و پایش آلودگی هوا و مدیریت پسماند را به‌صورت معناداری بهبود بخشد. این یافته با نتایج در بخش بحث هم‌راستا است که کمبود داده‌های مکانی–زمانی دقیق را یکی از چالش‌های اصلی مدل‌های هوش مصنوعی معرفی کرده بود. علاوه بر این، تدوین استانداردهای ملی و منطقه‌ای برای جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و به اشتراک‌گذاری داده‌های محیطی، بستر لازم را برای همکاری‌های بین‌نهادی و بین‌المللی فراهم می‌سازد.

یکپارچه‌سازی الگوریتم‌ها و توسعه‌ی مدل‌های ترکیبی. یافته‌های مقاله نشان داد که مدل‌های ترکیبی مانند LightGBM–LSTM در حوزه‌ی آلودگی هوا و AI–IoT در مدیریت پسماند، نسبت به مدل‌های تکی عملکرد بهتری دارند. پژوهش‌های آینده باید بر طراحی چارچوب‌های ترکیبی میان الگوریتم‌های یادگیری عمیق، شبکه‌های عصبی بازگشتی و مدل‌های تصمیم‌یار تمرکز کنند تا قابلیت تعمیم مدل‌ها افزایش یابد و در عین حال هزینه‌ی محاسباتی آن‌ها کاهش یابد. چنین مدلی می‌تواند برای هم‌زمان‌سازی پیش‌بینی کیفیت هوا، تولید پسماند و مصرف انرژی شهری به‌کار رود.

توسعه‌ی سامانه‌های تصمیم‌یار داده‌محور. همان‌گونه که در یافته‌های بخش پسماند و انرژی مشاهده شد، مطالعات موفق معمولاً از سامانه‌های تصمیم‌یار چندسطحی برای بهینه‌سازی تخصیص منابع و کنترل مصرف استفاده کرده‌اند. پژوهش‌های آینده می‌توانند با طراحیDSS های مبتنی بر هوش مصنوعی و کلان‌داده، امکان تحلیل برخط داده‌ها، پیش‌بینی رفتار مصرف‌کنندگان، و شبیه‌سازی سیاست‌های زیست‌محیطی را فراهم کنند. این مسیر تحقیقاتی مستقیماً با اهداف مطالعه‌ی حاضر در زمینه‌ی هوشمندسازی مدیریت شهری هم‌راستا است.

مدل‌سازی تاب‌آوری شهری در برابر اختلالات انرژی و زیست‌محیطی. یکی از شکاف‌های شناسایی‌شده در یافته‌ها، کمبود مطالعاتی است که تاب‌آوری سیستم‌های شهری را در برابر شوک‌های انرژی، آلودگی شدید یا بحران‌های زیست‌محیطی مدل‌سازی

کنند. مطالعات آینده باید با استفاده از الگوریتم‌های کنترل تطبیقی و یادگیری تقویتی[1] به‌دنبال طراحی مدل‌هایی باشند که بتوانند واکنش بهینه‌ی سیستم شهری را در شرایط ناپایدار پیش‌بینی و اصلاح کنند. این پیشنهاد بر پایه‌ی نتایج جدول ۶ و پژوهش جیانگ و همکاران(۲۰۲۵) تنظیم شده است.

پیوند هوش مصنوعی با سیاست‌گذاری و حکمرانی شهری. تحلیل مقالات مرورشده نشان داد که اگرچه کاربردهای فنی هوش مصنوعی در زمینه‌ی انرژی و پسماند رشد چشمگیری داشته، اما ارتباط آن با سیاست‌گذاری و مدیریت شهری هنوز محدود است. بنابراین پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با محوریت «هوش مصنوعی در حکمرانی داده‌محور شهری» انجام شوند تا چارچوب‌هایی برای تحلیل سناریوها، ارزیابی سیاست‌های کاهش آلودگی، و مدیریت انرژی و پسماند در سطح کلان فراهم شود. این مسیر به‌ویژه با یافته‌های بخش سوم مقاله در مورد ضعف در ادغام سیاستی مدل‌ها مرتبط است.

بومی‌سازی و ارزیابی مدل‌ها برای شهرهای ایران. یافته‌های مرور نشان داد که تقریباً تمامی مطالعات موجود مبتنی بر داده‌ها و زیرساخت‌های کشورهای توسعه‌یافته هستند. بنابراین، توسعه‌ی مدل‌های بومی و ارزیابی تجربی به خصوص در کلانشهرهای ایران می‌تواند خلأ موجود را پر کند. این پژوهش‌ها باید با در نظر گرفتن ویژگی‌های اقلیمی، جمعیتی و زیرساختی کشور انجام شوند و از داده‌های محلی برای آموزش و ارزیابی مدل‌های هوش مصنوعی استفاده کنند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی ساختاریافته‌ی کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت محیط‌زیست شهری، در سه حوزه‌ی کلیدی شامل پایش کیفیت هوا، مدیریت پسماند و مدیریت مصرف انرژی انجام شد. یافته‌ها نشان دادند که در هر سه حوزه، هوش مصنوعی توانسته است نقش مهمی در بهبود کارایی، پیش‌بینی دقیق‌تر و تصمیم‌سازی هوشمند ایفا کند. در حوزه‌ی کیفیت هوا، مدل‌های ترکیبی نظیر LightGBM–LSTM موجب افزایش دقت پیش‌بینی آلاینده‌ها شدند؛ در حوزه‌ی پسماند، ادغام فناوری‌های AI–IoT موجب بهبود فرآیند تفکیک و افزایش نرخ بازیافت گردید؛ و در حوزه‌ی انرژی، بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تحلیل کلان‌داده باعث کاهش ۱۵ تا ۳۰ درصدی مصرف انرژی و کاهش محسوس گازهای گلخانه‌ای شد. با این وجود، تحلیل تطبیقی مقالات مرورشده نشان داد که هر سه حوزه هنوز با چالش‌های بنیادینی روبه‌رو هستند. در حوزه‌ی کیفیت هوا، انسجام داده‌های مکانی–زمانی و اتصال به فرآیندهای تصمیم‌سازی شهری محدود است؛ در حوزه‌ی پسماند، ضعف در زیرساخت‌های دیجیتال و استانداردسازی داده‌ها مانع توسعه‌ی فراگیر می‌شود؛ و در حوزه‌ی انرژی، نیاز به مدل‌های تاب‌آور و میان‌رشته‌ای همچنان احساس می‌گردد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که پژوهش‌های موجود تا حد زیادی در راستای هدف این مطالعه پیش رفته‌اند، اما «بلوغ کامل کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت یکپارچه‌ی محیط‌زیست شهری» هنوز محقق نشده است.

چشم‌انداز آینده‌ی این حوزه بر پایه‌ی یافته‌های این مرور، به سمت یکپارچه‌سازی داده‌ها، توسعه‌ی مدل‌های ترکیبی هوش مصنوعی، و پیوند فناوری با سیاست‌گذاری شهری حرکت می‌کند. با توجه به چالش‌های شناسایی‌شده شامل کمبود داده‌های بومی، هزینه‌های بالای زیرساخت‌های بلادرنگ، و فاصله‌ی بین پژوهش و اجرا پژوهش‌های آتی باید بر توسعه‌ی زیرساخت داده‌ای ملی، طراحی چارچوب‌های تصمیم‌یار هوشمند و بومی‌سازی مدل‌ها برای شهرهای ایران متمرکز شوند. در این راستا، پژوهش مناوریان و همکاران (۲۰۲۳، ۵۴۱) با ارائه یک چارچوب سه سطحی برای حکمرانی هوش مصنوعی در محیط‌های شهری، مبنای نظری مناسبی را برای استقرار و نهادینه‌سازی این فناوری‌ها فراهم می‌کند. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان مکمل جنبه‌های فنی مطالعات حاضر عمل کرده و به ایجاد هم‌افزایی بین سیاست‌گذاری و توسعه فناورانه در شهرهای هوشمند آینده کمک کند.

[1]- Reinforcement Learning

در مجموع، این پژوهش نشان داد که هوش مصنوعی می‌تواند بستری کارآمد برای مدیریت هوشمند، پایدار و تاب‌آور محیط‌زیست شهری فراهم آورد و چارچوبی تحلیلی برای ارتقای پایداری در شهرهای آینده ارائه دهد. این نتیجه مستقیماً در راستای تحقق اهداف توسعه‌ی پایدار SDG7 (انرژی پاک و مقرون‌به‌صرفه)، SDG11 (شهرهای پایدار و مقاوم) و SDG12 (تولید و مصرف مسئولانه) تفسیر می‌شود..

منابع

Andrea, H. (2025). AI-Based Solutions for Environmental Monitoring in Urban Spaces. Retrieved from https://philpapers.org/rec/Andasf-4.

Anthopoulos, L. & Kazantzi, V. (2022). Urban energy efficiency assessment models from an AI and big data perspective: Tools for policy makers. Sustainable Cities and Society, 76, 103492. Doi.org/10.1016/j.scs.2021.103492

Abbaai, M., Fallah, N. M., Noori, R., & Mirabi, M. (2020). Forecasting municipal solid waste quantity by intelligent models and their uncertainty analysis. Juornal of environmental science and technology, 22(1 (92)), 167-183. SID. https://Sid.ir/paper/364422/en .(in Persian).

Abbasi, M. and Karimi Darmian, S. (۲۰۲۵). Modeling Municipal Waste Generation Using Support Vector Machine, Artificial Neural Network and Deep Learning. Amirkabir Journal of Civil Engineering, ۵۷(۲), ۲۷۱-۲۹۰. Doi: ۱۰/۲۲۰۶۰/ceej.۲۰۲۵/۲۲۹۷۰/۸۰۸۵. (in Persian).

Anabestani, A., Tavakolinia, J. & Niknami, N. (2024). The Role of Artificial Intelligence in Improving Citizens' Quality of Life with a Future Study Approach (Case Study: Mashhad Metropolis). Urban Economics and Planning, 5(1), 6-21. Doi.org/10.22034/uep.2024.442663.1461 .(in persian).

Batty, M. (2018). Artificial intelligence and smart cities. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 45(1), 3-6. Doi.org/10.1177/2399808317751169 (Original work published 2018).

Baharvandi, N., Darvishmotevalli, M., Mohammadi, Z., Faraji, H. & Eskandari, A. (2025). An Overview of Simulation and Optimization Models for Urban Solid Waste Management Systems. Journal of Environmental Health Engineering, 12(2), 227-242. Retrieved from https://jehe.abzums.ac.ir/article-۱-۱۰۷۶-en.pdf. (in Persian).

Božić, V. (2023). Artifical Inteligence (Ai) in Urban Waste Management. Research-gate. Net, 10. Retrieved from https://www.researchgate.net/.

Chakraborty,A & et al (2024), Ai-Based Air Pollution Detection System, Educational Administration: Theory and Practice, 30(1), 1586-1590. Doi: 10.53555/kuey.v30i1.6441.

Chui, K. T., Lytras, M. D. & Visvizi, A. (2018). Energy sustainability in smart cities: Artificial intelligence, smart monitoring, and optimization of energy consumption. Energies, 11(11), 2869. Doi.org/10.3390/en11112869.

Dos Santos, S. C, Vilela, J. F, Carvalho, T. H, Rocha, T. C, Candido, T. B, Bezerra, V. S, & Silva, D. J. (2024). Artificial intelligence in sustainable smart cities: A systematic study on applications, benefits, challenges, and solutions. Sustainable Cities and Society, 110, 105012. Doi.org/10.1016/j.scs.2024.105012.

Devi, A., Singh, N., Thandra, N., Gupta, N., Salman, Z. N. & Natarajan, K. (2025). AI and IoT-Enabled Smart Urban Waste Management System for Efficient Collection, Segregation, and Disposal. In E3S Web of Conferences (Vol. 619, p. 03002). EDP Sciences. Doi.org/10.1051/e3sconf/202561903002

Elmqvist, T, Andersson, E, Frantzeskaki, N & et al. (2019). Sustainability and resilience for transformation in the urban century. Nature sustainability, 2(4), 267-273. DOI:10.1038/s41893-019-0250-1.

Fu, L., Li, J., & Chen, Y. (2023). An innovative decision making method for air quality monitoring based on big data-assisted artificial intelligence technique. Journal of Innovation & Knowledge, 8(2), 100294. Doi.org/10.1016/j.jik.2023.100294.

Faraji, M., Nadi, S., & Shojaei, D. (2021). Spatial-Temporal Prediction of PM2. 5 Pollutants Using Deep Recurrent Networks: A Case Study of Tehran. Journal of Geomatics Science and Technology, 10(3), 13-26. Retrieved from magiran.com/p2260904

Fang, B., Yu, J., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., & Yap, P. S. (2023). Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review. Environmental Chemistry Letters, 21(4), 1959-1989. Doi.org/10.1007/s10311-023-01604-3

Fuqaha, S. & Nursetiawan, N. (2025). Artificial Intelligence and IoT for Smart Waste Management: Challenges, Opportunities, and Future Directions. Journal of Future Artificial Intelligence and Technologies, 2(1), 24–46. Doi:10.62411/faith.3048-3719-85

Grimm, NB, Faeth, SH, Golubiewski, NE, Redman, CL, Wu, J, Bai, X, Briggs, JM. Global change and the ecology of cities. Science. 2008 Feb 8;319(5864):756-760. Doi: 10.1126/science.1150195. PMID: 18258902.

Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., & Bengio, Y. (2016). Deep learning (Vol. 1, No. 2). Cambridge: MIT press. Doi.org/۱۰/۱۰۰۷/s۱۰۷۱۰-۰۱۷-۹۳۱۴-z.

Guo, Q., Ren, M., Wu, S., Sun, Y., Wang, J., Wang, Q., & Chen, Y. (2022). Applications of artificial intelligence in the field of air pollution: A bibliometric analysis. Frontiers in Public Health, 10, 933665. Doi.org/10.3389/fpubh.2022.933665.

Gurjar, S. K. & Gaur, A. (2022). Application of remote sensing and GIS in integrated solid waste management-a short review. Advanced Organic Waste Management, 351-362. Doi.org/۱۰,۱۰۱۶/B-۸۵۷۹۲-۳۲۳-۰-۹۷۸ ۰-۵.۰۰۰۰۱

Giglio, E., Luzzani, G., Terranova, V., Trivigno, G., Niccolai, A. & Grimaccia, F. (2023). An efficient artificial intelligence energy management system for urban building integrating photovoltaic and storage. IEEE Access, 11, 18673-18688. Doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3241653.

Hadiyana, T, & Ji-hoon, S. (2024). AI-driven urban planning: Enhancing efficiency and sustainability in smart cities. Information Technology Engineering Journal (ITEJ), 9(1), 23–35. Doi.org/10.24235/itej.v9i2.124.

Hosseini, B & yousefi robiat, E. (2025). The application of artificial intelligence and decision support systems in urban environmental planning. (e723048). Environmant of Human Made Studies, e723048 Doi: 10.30487/hmes.2025.2045796.1063. (In Persian).

Hosseini Baghanam, A. (2023). Predicting Waste Generation Rate in Tabriz Using Artificial Intelligence (ANN and SVM) Methods and Wavelet Preprocessing for a Long Time. Journal of Civil and Environmental Engineering, 53(111), 136-146. Doi: 10.22034/jcee.2021.44740.2011. (in Persian).

Idrovo-Hurel, M., Morán-Herrera, A. & Peralta, D. (2025). Applications of artificial intelligence in urban solid waste management: A systematic literature review. International Journal of Innovative Research and Scientific Studies, 8(2), 3350–3363. Doi.org/10.53894/ijirss.v8i2.6010

Jakkani, A. K. (2024). Enhancing Urban Sustainability through AI-Driven Energy Efficiency Strategies in Cloud-Enabled Smart Cities. Journal of Energy Engineering and Thermodynamics, 4, 1–13. Doi.org/10.55529/jeet.45.1.13.

Jiang, M. & Yu, X. (2025). Enhancing the resilience of urban energy systems: The role of artificial intelligence. Energy Economics, 144, 108313. Doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108313.

Khalami, M. M., & Hasanzadeh, M. (2022). Intelligent Waste Management Based on the Internet of Things: A Step Towards the City of Knowledge. Journal of New Researches in the Smart City, 1(1), 38-56. Sid.ir/paper/1113350/fa. (in Persian).

Khosravani,F , Rafii,Y, and Nasiri, H. (2025). Smart and Sustainable Growth of Cities Using Artificial Intelligence Technologies in Urban Planning and Management. (e723050). Environmant of Human Made Studies, e723050. Doi: 10.30487/hmes.2025.2045893.1068

Kulikova, E, Sulimin, V, & Shvedov, V. (2023). Artificial intelligence for ambient air quality control. In E3S Web of Conferences (Vol. 419, p. 03011). EDP Sciences. Doi.org/10.1051/e3sconf/202341903011

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. nature, 521(7553), 436-444. Doi.org/۱۰/۱۰۳۸/nature۱۴۵۳۹.

Liu, Q, Cui, B, & Liu, Z. (2024). Air quality class prediction using machine learning methods based on monitoring data and secondary modeling. Atmosphere, 15(5), 553. Doi.org/10.3390/atmos15050553.

Li, L. (2020). A robust deep learning approach for spatiotemporal estimation of satellite AOD and PM2. 5. Remote Sensing, 12(2), 264. Doi.org/10.3390/rs12020264.

Lakhouit, A. (2025). Revolutionizing Urban Solid Waste Management with AI and IoT: A review of smart solutions for waste collection, sorting, and recycling. Results in Engineering, 104018. Doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104018.

Li, X., Wang, Q. & Tang, Y. (2024). The impact of artificial intelligence development on urban energy efficiency based on the perspective of Smart City policy. Sustainability, 16(8), 3200. Doi.org/10.3390/su16083200

Makhdoomi, A. , Ziaei, S. and Sarkhosh, M. (2025). Statistical Analysis and Forecast Modeling of Particles Concentration Using Artificial Intelligence Based on Machine Learning in Mashhad. Journal of Research in Environmental Health, 10(4), 22-35. Doi: 10.22038/jreh.2025.25727

Maleki, A. , Abedi, S. and Airajpour, A. (2024). Analyzing the Change in the Concentration of Pollutants During the Covid-19 Epidemic and Presenting a Model based on Machine Learning to Predict Air Pollution. Journal of Geography and Environmental Hazards, 13(3), 310-338. Doi: 10.22067/geoeh.2023.83939.1405.

Munir, M. T., Li, B. & Naqvi, M. (2023). Revolutionizing municipal solid waste management (MSWM) with machine learning as a clean resource: Opportunities, challenges and solutions. Fuel, 348, 128548. Doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128548.

Menai, I., Salah, H. S., Khelil, S., Aidaoui, A. & Djouad, F. Z. (2024, June). The Transition To Artificial Intelligence-Based Solutions For Improving Energy Efficiency In Urban Environments. In Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism-ICCAUA (Vol. 7, No. 1, pp. 562-567). Doi.org/10.38027/ICCAUA2024EN0161

Marinakis, V. (2020). Big data for energy management and energy-efficient buildings. Energies, 13(7), 1555. Doi.org/10.3390/en13071555.

Monavaian, A., Sadeghi, J., & Pirannejad, A. (2023). A Policy Framework for Harnessing Artificial Intelligence Systems in Urban Settings Using a Meta Synthesis Approach. Journal of Public Administration, 15(3), 512-552. Doi.org/۱۰,۲۲۰۵۹/jipa.۲۰۲۳,۳۵۵٦٤۹,۳۲۹۸.(in persian).

Nesmachnow, S., Rossit, D. G. & Moreno-Bernal, P. (2025). A literature review of recent advances on innovative computational tools for waste management in smart cities. Journal of Cleaner Production, 458, 144829. Doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144829

Olawade, D. B, Wada, O. Z, Ige, A. O, Egbewole, B. I, Olojo, A, & Oladapo, B. I. (2024). Artificial intelligence in environmental monitoring: Advancements, challenges, and future directions. Hygiene and Environmental Health Advances, 100114. Doi.org/10.1016/j.heha.2024.100114.

Ortega-Fernández, A, Martín-Rojas, R, & García-Morales, V. J. (2020). Artificial intelligence in the urban environment: Smart cities as models for developing innovation and sustainability. Sustainability, MDPI, 12(19), 7860. pages 1-26, September. Doi.org/10.3390/su12197860.

Ojadi, J. O., Odionu, C. S., Onukwulu, E. C. & Owulade, O. A. (2024). AI-Enabled Smart Grid Systems for Energy Efficiency and Carbon Footprint Reduction in Urban Energy Networks. International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation, 5(1), 1549-1566. Doi.org/10.54660/.IJMRGE.2024.5.1.1549-1566

Patil, A., Surendran, S. & Ranade, N. (2025). Turning waste into resources with AI. International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT), 13(2), Article IJCRT2502922. https://www.ijcrt.org/papers/IJCRT2502922.pdf

Russell, S, & Norvig, P. (2021). Artificial intelligence: A modern approach (4th ed.). Pearson Series in Artifical Intelligence. http://lib.ysu.am/disciplines_bk/efdd۴d۱d۴c۲۰۸۷fe۱cbe۰۳d۹ced۶۷f۳۴.pdf

Rautela, K. S, & Goyal, M. K. (2024). Transforming air pollution management in India with AI and machine learning technologies. Scientific Reports, 14(1), 20412. Doi.org/10.1038/s41598-024-68813-8.

Reza, M. & Hassan, M. (2023). AI-Driven solutions for enhanced waste management and recycling in urban areas. International Journal of Sustainable Infrastructure for Cities and Societies, 8(2), 1-13. Retrieved from https://vectoral.org/index.php/IJSICS/article/view/9

Rojek, I., Mikołajewski, D., Dorożyński, J., Dostatni, E. & Mreła, A. (2024). An ML-Based Solution in the Transformation towards a Sustainable Smart City. Applied Sciences, 14(18), 8288. Doi.org/10.3390/app14188288

Samad, A., Garuda, S., Vogt, U., & Yang, B. (2023). Air pollution prediction using machine learning techniques–an approach to replace existing monitoring stations with virtual monitoring stations. Atmospheric Environment, 310, 119987. Doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119987.

Song, Z., Chen, B., Huang, Y., Dong, L., & Yang, T. (2021). Estimation of PM 2.5 concentration in China using linear hybrid machine learning model. Atmospheric Measurement Techniques, 14(8), 5333-5347. Doi.org/10.5194/amt-14-5333-2021.

Sah, R. R. (2024). IoT-Enabled AI Solutions for Efficient Smart City Waste Management. Annals of Process Engineering and Management, 1(1), 26-32. Doi.org/١٠,٤٨٣١٤/apem.v١i١,٢٠

Singagerda, F. S., Dewi , D. A., Trisnawati, S., Septarina , L. & Dhika , M. R. (2024). Towards a Circular Economy: Integration of AI in Waste Management for Sustainable Urban Growth. Journal of Lifestyle and SDGs Review, 5(1), e02642. Doi.org/10.47172/2965-730X.SDGsReview.v5.n01.pe02642.

SubaLakshmi, C., Kumar, S. S., Kumar, R. P., Vignesh, R., Usha, D. & Kumanan, T. (2023). Revolutionizing urban waste management: A comprehensive study on IoT-based automated dust bin and enhanced waste optimization strategies for smart cities. Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology, 44(6), 5400–5409. ISSN 1001-4055. Retrieved from https://www.propulsiontechjournal.com/index.php/journal/article/view/4966

Stecuła, K., Wolniak, R. & Grebski, W. W. (2023). AI-Driven urban energy solutions—from individuals to society: a review. Energies, 16(24), 7988. Doi.org/10.3390/en16247988.

Talaie, A., Kamyab, H., & Razmfarsa, A. (2024). Advancing Environmental Engineering: The Role of Artificial Intelligence in Sustainable Solutions-A Short Review. Journal of Environmental Treatment Techniques, 12(3), 14–18. https://digitalcommons.odu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1074&context=management_fac_pubs.

Tang, D, Zhan, Y, & Yang, F. (2024). A review of machine learning for modeling air quality: Overlooked but important issues. Atmospheric Research, 300, 107261. Doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107261.

Tunde, A. H., Yusuf, S. O., Taiwo, A. I., Ocran, G., Owusu, P. & Paul-Adeleye, A. H. (2024). AI-driven innovations in energy efficiency: Transforming smart buildings and urban areas through technology and digital transformation. World Journal of Advanced Research and Reviews, 24(1), 1–15. DOI: 10.30574/wjarr.2024.24.1.2921

Un-Habitat. (2020). World cities report 2020: The value of sustainable urbanization. UN.

United Nations. (2018). The Sustainable Development Goals Report 2018.

Vardhan, V. D. & Vijaya, G. S. (2024). Smart cities, cleaner tomorrow: AI-powered waste solutions for sustainable urban living. International Journal of Research Publication and Reviews, 5(4), 2046–2065. Doi.org/10.55248/gengpi.5.0424.0952

World Bank. World development report (2021). Data for better lives.

Wu, C, Lu, S, Tian, J, Yin, L, Wang, L, & Zheng, W. (2024). Current Situation and Prospect of Geospatial AI in Air Pollution Prediction. Atmosphere, 15(12), 1411. Doi.org/10.3390/atmos15121411

Zhu, X. X, Tuia, D, Mou, L, Xia, G S., Zhang, L, Xu, F, & Fraundorfer, F. (2017). Deep learning in remote sensing: A comprehensive review and list of resources. IEEE geoscience and remote sensing magazine, 5(4), 8-36. Doi.org/١٠/١١٠٩/MGRS.٢٠١٧/٢٧٦٢٣٠٧.

Zheng, X, Ma, Z, & Yuang, Z. (2024). Urban design and pollution using AI: Implications for urban development in China. Heliyon, 10(18). Doi.org/١٠,١٠١٦/j.heliyon.٢٠٢٤.e٣٧٧٣٥

Zarei, A., Zarei, S., Kakapor, V., Vazeri, M. H., Mohammadi, E., & Aghighi, H. (2023). Prediction of daily PM2. 5 concentration using support vector training combination (SVM)-adaptive and principal component analysis (PCA). Journal of Research in Environmental Health, 9(1), 108-121. Doi.org/١٠/٢٢٠٣٨/jreh.٢٠٢٣/٦٥٥٣١/١٥١٦.

Zeynali Azim, A. (2025). Evaluating the Impact of Artificial Intelligence on the Sustainability of Tabriz City. Popularization of Science, 16(1). e221863 .Doi: 10.22034/popsci.2025.477115.1359.(in persian).