

Applications of artificial intelligence in climate change adaptation and mitigation: A systematic review of challenges, research gaps, and future directions

Yousef Taghimollaei¹ 

1. Corresponding Author, Natural Resources Research Department, Fars Province Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research and Education Extension Organization, Shiraz, Iran. E-mail: taghimollaei@yahoo.com.

Article Info

Article type:
Review Article

Article history:

Received 19 Apr 2026
Revised 10 Jun 2026
Accepted 25 Jun 2026
Published 30 Jun 2026

Keywords:

Artificial Intelligence,
Climate Change Mitigation,
Machine Learning,
Smart Agriculture,
Natural Resource Management.

ABSTRACT

Objective: Climate change is one of the most pressing challenges of the twenty-first century, requiring innovative and multidisciplinary solutions. This study aims to provide a comprehensive systematic review of the role of artificial intelligence (AI) in addressing climate change, with a particular focus on its practical applications in four key domains: renewable energy, climate prediction, smart agriculture, and natural resource management.

Method: This study was conducted as a systematic literature review following the PRISMA guidelines. A structured search was conducted across major scientific databases, including ScienceDirect, IEEE Xplore, Springer, Frontiers, Nature Climate Change, and official reports from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), covering the period from 2020 to 2026. From an initial pool of 487 publications, 72 studies were selected for final analysis based on predefined criteria of relevance, methodological quality, and publication recency. The extracted data were synthesized and analyzed according to five thematic categories.

Results: The findings indicate that AI has demonstrated significant potential in optimizing renewable energy systems, accurately forecasting extreme climate events, reducing agricultural inputs (up to 30% less fertilizer, 40% lower pesticide use, and 35% lower irrigation water consumption), enabling intelligent natural resource management, and improving carbon stock estimation in ecosystems. Furthermore, advanced deep learning models, such as FourCastNet and GraphCast, have achieved highly accurate weather forecasting while requiring substantially lower computational costs than conventional numerical forecasting models.

Conclusion: The review highlights several strategic priorities for advancing AI-driven climate action, including the development of region-specific AI solutions, increased investment in mitigation-oriented applications, the establishment of ethical and regulatory frameworks to enhance algorithmic transparency, the promotion of physics-informed and data-driven hybrid approaches, stronger interdisciplinary collaboration, and greater consideration of the carbon footprint associated with AI technologies.

Cite this article: Taghimollaei Y. Applications of artificial intelligence in climate change adaptation and mitigation: A systematic review of challenges, research gaps, and future directions. *Water Resources and Climate Change*. (2026); 2(2): 73-88. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2026.16475.1037>.

Introduction

Climate change is one of the most significant environmental, economic, and social challenges of the twenty-first century. Rising greenhouse gas emissions have increased global temperatures, intensified extreme weather events, and threatened ecosystems, agriculture, water resources, and human well-being. Addressing these challenges requires innovative solutions that support both climate change adaptation and mitigation.

Artificial Intelligence (AI) has emerged as a promising technology for climate action. Through machine learning, deep learning, computer vision, and optimization techniques, AI enhances climate prediction, precision agriculture, renewable energy management, environmental monitoring, and resource optimization. Recent models, such as GraphCast and FourCastNet, have improved weather forecasting while reducing computational costs. AI has also demonstrated strong potential in smart grids, carbon monitoring, and sustainable agricultural practices.

Despite these advances, several barriers limit the widespread adoption of AI for climate applications. Key challenges include limited data availability and quality, lack of model transparency, algorithmic bias, high energy consumption, implementation costs, insufficient regulatory frameworks, and regional disparities. Moreover, existing research focuses predominantly on climate adaptation, with comparatively less attention given to mitigation.

Given the rapid growth of AI research in climate science, a comprehensive synthesis of current knowledge is needed. Therefore, this systematic review examines AI applications in climate change adaptation and mitigation, identifies major challenges and research gaps, and outlines future directions for supporting sustainable climate action.

Method

This study employed a systematic literature review following the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) framework. A comprehensive search was conducted using major scientific databases, including ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink, Frontiers, Nature Climate Change, and official reports published by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

The search covered publications published between 2020 and 2025 using combinations of keywords related to *Artificial Intelligence*, *Machine Learning*, *Climate Change*, *Climate Adaptation*, *Climate Mitigation*, *Renewable Energy*, *Precision Agriculture*, and *Environmental Management*. After removing duplicate records and screening titles and abstracts, studies were evaluated according to predefined inclusion criteria, including scientific quality, relevance to AI applications in climate change, methodological rigor, and publication recency.

From an initial collection of 487 publications, 72 high-quality studies were selected for detailed analysis. Extracted information included AI techniques, application domains, geographical distribution, implementation challenges, reported outcomes, and research

limitations. The selected studies were then categorized into five major thematic areas to facilitate qualitative synthesis and comparative analysis.

Results

The reviewed studies demonstrate that Artificial Intelligence has become an essential enabling technology for both climate change adaptation and mitigation across multiple sectors.

One of the most mature application areas is renewable energy management. Machine learning algorithms significantly improve the forecasting of solar and wind energy production, optimize energy storage systems, and enhance smart grid operation. These improvements increase renewable energy integration while reducing operational costs and carbon emissions.

Climate prediction represents another rapidly advancing field. Deep learning models such as GraphCast and FourCastNet have achieved forecasting accuracy comparable to or better than conventional numerical weather prediction systems while requiring substantially lower computational resources. Improved forecasting enhances disaster preparedness and strengthens climate resilience.

Precision agriculture has also benefited considerably from AI technologies. Intelligent irrigation systems, crop monitoring, pest detection, and fertilizer optimization have reduced fertilizer consumption by approximately 30%, pesticide use by nearly 40%, and irrigation water demand by about 35% in several reported case studies. These improvements contribute simultaneously to increased agricultural productivity and reduced environmental impacts.

AI has further demonstrated substantial potential in ecosystem monitoring, carbon accounting, forest management, biodiversity conservation, and environmental risk assessment through satellite image analysis, remote sensing, and automated environmental monitoring systems.

Nevertheless, the review identifies several critical barriers limiting large-scale implementation. The most frequently reported challenges include limited availability of high-quality data, concerns regarding data privacy and ownership, lack of model transparency, algorithmic bias, substantial computational energy consumption, high implementation costs, limited technical expertise, insufficient interdisciplinary collaboration, and the absence of comprehensive regulatory and ethical frameworks. The analysis also reveals an imbalance in current research priorities. Approximately two-thirds of published studies focus primarily on climate adaptation, whereas only a relatively small proportion explicitly addresses AI applications for climate change mitigation. In addition, geographical analysis indicates that Asia and global-scale studies dominate the literature, while Africa and South America remain significantly underrepresented despite their high vulnerability to climate change.

Conclusion

Artificial Intelligence is transforming climate science by providing advanced analytical capabilities that improve climate prediction, optimize renewable energy systems, support

precision agriculture, and enhance natural resource management. The evidence synthesized in this review demonstrates that AI can contribute significantly to both climate adaptation and mitigation while improving decision-making across multiple sectors.

However, realizing the full potential of AI requires addressing several technical, economic, ethical, and institutional challenges. Improving data accessibility and quality, increasing model transparency and explainability, reducing the environmental footprint of AI systems, strengthening interdisciplinary collaboration, and establishing robust regulatory frameworks should be considered priority research and policy objectives. Future studies should place greater emphasis on AI applications that directly reduce greenhouse gas emissions, develop region-specific solutions for vulnerable countries, and promote equitable access to AI technologies. Addressing these priorities will enable Artificial Intelligence to become a more effective and sustainable tool for accelerating global climate action.

Declarations**Ethical Approval**

The paper is not currently being considered for publication elsewhere. All authors have been personally and actively involved in substantial work leading to the paper, and will take public responsibility for its content.

Competing interests

Conflict of Interest – None

Availability of data and materials

Data will be made available on the request.

Authors Contributions

Yousef Taghimollaei performed the calculations. He approved the analytical methods. He supervised the findings of this work. Yousef Taghimollaei discussed the results, and contributed to the final version of the paper.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

کاربردهای هوش مصنوعی در سازگاری و کاهش تغییرات اقلیمی: مرور نظام‌مند چالش‌ها، شکاف‌های پژوهشی و مسیرهای آینده

یوسف تقی‌ملایی^۱

۱. نویسنده مسئول، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات و آموزش ترویج کشاورزی، شیراز، ایران. رایانامه: taghimollaei@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله مروری	هدف: تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن بیست و یکم، نیازمند راه‌حل‌های نوآورانه و چندبعدی است. این مطالعه با هدف ارائه مروری جامع بر نقش هوش مصنوعی در کاهش تغییرات اقلیمی با تأکید بر کاربردهای عملی در چهار حوزه کلیدی انرژی، پیش‌بینی اقلیمی، کشاورزی هوشمند و مدیریت منابع طبیعی انجام شده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰	روش: این پژوهش یک مطالعه مروری نظام‌مند براساس پروتکل PRISMA می‌باشد. جستجوی سازماندهی‌شده در پایگاه‌های داده معتبر شامل ScienceDirect, IEEE Xplore, Springer, Frontiers, Nature Climate Change و گزارش‌های رسمی IPCC بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶ انجام شد. از میان ۴۸۷ مقاله اولیه، پس از اعمال معیارهای کیفیت، ارتباط موضوعی و تازگی، ۷۲ منبع برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. اطلاعات استخراج‌شده براساس پنج محور اصلی دسته‌بندی و تحلیل شد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰	یافته‌ها: هوش مصنوعی در بهینه‌سازی سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر، پیش‌بینی رویدادهای اقلیمی حدی با دقت بالا، کاهش مصرف نهاده‌های کشاورزی (تا ۳۰ درصد کاهش کود، ۴۰ درصد کاهش سموم و ۳۵ درصد کاهش آب)، مدیریت هوشمند منابع طبیعی و اندازه‌گیری دقیق ذخیره کربن در زیست‌بوم‌ها کارایی قابل توجهی نشان داده است. مدل‌های یادگیری عمیق مانند FourCastNet و GraphCast توانسته‌اند پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی را با هزینه محاسباتی بسیار کم‌تر از مدل‌های عددی سنتی ارائه دهند.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴	نتیجه‌گیری: تدوین راه‌حل‌های بومی‌شده منطقه‌ای، افزایش سرمایه‌گذاری در کاربردهای کاهش‌محور، ایجاد چارچوب‌های اخلاقی و شفافیت الگوریتمی، ترویج رویکردهای ترکیبی فیزیک-داده، تقویت همکاری‌های بین‌رشته‌ای و توجه به ردپای کربنی خود هوش مصنوعی از توصیه‌های کلیدی این مطالعه هستند.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹	
کلیدواژه‌ها: هوش مصنوعی، کاهش تغییرات اقلیمی، یادگیری ماشین، کشاورزی هوشمند، مدیریت منابع طبیعی.	

استناد: تقی‌ملایی یوسف. کاربردهای هوش مصنوعی در سازگاری و کاهش تغییرات اقلیمی: مرور نظام‌مند چالش‌ها، شکاف‌های پژوهشی و مسیرهای آینده. *منابع آب و تغییر اقلیم*. ۱۴۰۵؛ ۲(۲): ۷۳-۸۸. <http://doi.org/10.22091/wrcc.2026.16475.1037>

۱- مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی قرن بیست و یکم محسوب می‌شود. غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفر از زمان انقلاب صنعتی از ۲۸۰ ppm به بیش از ۴۲۰ ppm افزایش یافته است که به افزایش حدود ۱/۵ درجه سانتی‌گراد دمای متوسط جهانی نسبت به دوران پیش صنعتی کمک کرده است [۱]. این افزایش، وقوع و شدت رویدادهای اقلیمی حادی نظیر امواج گرما، آتش‌سوزی‌های جنگلی، خشک‌سالی‌ها و بالا آمدن سطح دریاها را به‌طور قابل توجهی تشدید کرده و تهدیدات جدی برای تنوع زیستی، امنیت غذایی و سلامت عمومی ایجاد نموده است [۲]. برآوردها نشان می‌دهند که بدون کاهش مؤثر انتشار، گرمایش جهانی می‌تواند تولید ناخالص داخلی جهانی را بین ۵ تا ۱۸ درصد کاهش دهد و نابرابری اقتصادی جهانی را تشدید نماید [۳].

در پاسخ به این مخاطرات چندبعدی، هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای افزایش تاب‌آوری سامانه‌ها در حوزه‌های گوناگون از کشاورزی و انرژی گرفته تا مدیریت بلایا و بهداشت، ظهور یافته است. توانایی هوش مصنوعی در پردازش حجم عظیمی از داده‌ها، تولید مدل‌های پیش‌بینی‌کننده، بهینه‌سازی تخصیص منابع و پشتیبانی از تصمیم‌گیری، آن را به یک توانمندساز کلیدی برای سازگاری و کاهش اثرات اقلیمی تبدیل کرده است [۴]. پیشرفت‌های اخیر در یادگیری عمیق، یادگیری تقویتی و مدل‌های مولد، افق‌های جدیدی را در مدل‌سازی اقلیمی، کشاورزی دقیق، مدیریت شبکه‌های انرژی و توسعه مواد پیشرفته برای جذب کربن گشوده است [۵].

هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم^۱ (IPCC) در گزارش ششم ارزشیابی^۲ (AR6) خود به نقش فزاینده هوش

مصنوعی و یادگیری ماشین^۳ در تحلیل داده‌های اقلیمی، مدل‌سازی زمین و تسریع فرآیندهای علمی اشاره کرده است، هرچند هم‌زمان نسبت به مصرف انرژی بالا، انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از زیرساخت‌های محاسباتی، سوگیری‌ها و نگرانی‌های اخلاقی مرتبط با این فناوری هشدار داده است [۱].

با وجود رشد چشمگیر کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه اقلیم، درک نظام‌مند از نحوه مشارکت این فناوری در کاهش تغییرات اقلیمی هم‌چنان محدود است و پژوهش‌های موجود در سطح بخش‌ها و مناطق مختلف پراکندگی قابل توجهی دارند [۳]. این تحقیق با هدف ارائه مروری جامع بر نقش هوش مصنوعی در کاهش تغییرات اقلیمی با تأکید بر کاربردهای عملی در چهار حوزه کلیدی انرژی، پیش‌بینی اقلیمی، کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی تدوین شده است.

هوش مصنوعی به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوظهور، نقش مهمی در کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و ارتقای توسعه پایدار ایفا می‌کند. شکل ۱ مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در این حوزه را نشان می‌دهد. این فناوری با بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی، پایش و کاهش انتشار کربن، پیش‌بینی و مدیریت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، و بهبود عملکرد سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی، به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. هم‌چنین، هوش مصنوعی در بهینه‌سازی سامانه‌های حمل‌ونقل، توسعه کشاورزی دقیق، مدیریت هوشمند منابع طبیعی، طراحی ساختمان‌های کم‌مصرف و مقاوم، پیش‌بینی شرایط آب‌وهوایی و بهبود فرآیندهای صنعتی کاربرد گسترده‌ای دارد. افزون بر این، به کارگیری این فناوری زمینه‌ساز توسعه شهرهای هوشمند، پایدار و تاب‌آور شده و می‌تواند نقش مؤثری در افزایش سازگاری جوامع با پیامدهای تغییرات اقلیمی و تحقق توسعه پایدار شهری ایفا کند.

³- Machine Learning

¹- Intergovernmental Panel on Climate Change

²- Sixth Assessment Report

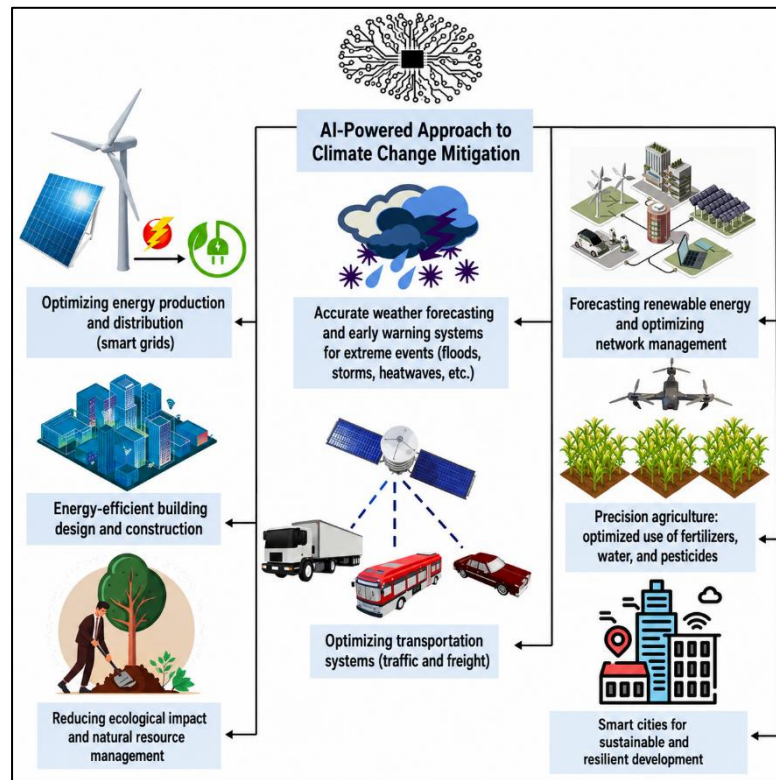


Figure 1. The effectiveness of artificial intelligence in all dimensions

شکل ۱- کارآیی هوش مصنوعی در همه ابعاد

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش یک مطالعه مروری نظام‌مند براساس جدیدترین منابع علمی معتبر در حوزه کاربرد هوش مصنوعی در کاهش تغییرات اقلیمی می‌باشد. برای گردآوری اطلاعات، جستجوی ساماندهی‌شده در پایگاه‌های داده علمی معتبر از جمله ScienceDirect، IEEE، Nature Climate، Frontiers، Springer، Xplore Change و گزارش‌های رسمی IPCC انجام شد.

معیارهای جستجو و انتخاب منابع: مقالات و گزارش‌های منتشرشده بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶ که به موضوع کاربردهای هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در کاهش تغییرات اقلیمی پرداخته بودند، مورد بررسی قرار گرفتند. کلیدواژه‌های جستجو شامل ترکیبی از عبارات «هوش مصنوعی»، «یادگیری ماشین»، «کاهش تغییرات اقلیمی»، «انرژی تجدیدپذیر»، «جذب

کربن»، «کشاورزی هوشمند»، «مدل‌سازی اقلیمی» و «مدیریت منابع طبیعی» به دو زبان فارسی و انگلیسی بودند. از میان ۴۸۷ مقاله اولیه، پس از اعمال معیارهای کیفیت، ارتباط موضوعی و تازگی، ۷۲ منبع برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. این فرایند براساس پروتکل مرور نظام‌مند PRISMA هدایت شده است که در پژوهش‌های مشابه نیز به کار گرفته شده است.

روش تحلیل: اطلاعات استخراج‌شده از منابع براساس پنج محور اصلی دسته‌بندی شدند: (۱) کاربردهای هوش مصنوعی در بهینه‌سازی سامانه‌های انرژی و کاهش انتشار، (۲) کاربردهای هوش مصنوعی در پیش‌بینی و مدل‌سازی اقلیمی، (۳) کاربردهای هوش مصنوعی در کشاورزی هوشمند و بهبود مصرف نهاده‌ها، (۴) کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت منابع طبیعی، احیای زیست بوم و ذخیره‌سازی کربن، و (۵) چالش‌ها و محدودیت‌های موجود. در هر بخش، ضمن ارائه یافته‌های کلیدی، جداول

تحلیلی برای شفاف سازی کاربردها، روش ها و اثرات تدوین شد.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- کاربردهای هوش مصنوعی در بهینه سازی انرژی و کاهش انتشار

یکی از مهم ترین حوزه های کاربرد هوش مصنوعی در کاهش تغییرات اقلیمی، بهینه سازی سامانه های انرژی است. هوش مصنوعی می تواند رویکرد مدیریت انرژی را از طریق بهینه سازی مصرف، پیش بینی تأمین انرژی های تجدید پذیر، بهبود کارایی شبکه های توزیع برق و افزایش دقت مدل سازی و پیش بینی اقلیمی متحول سازد [۶].

یافته های یک مطالعه مروری دامنه ای نشان می دهد که هوش مصنوعی در حال حاضر در بخش انرژی برای کاهش انتشار CO₂ به کار گرفته می شود و بیش از ۶۰ درصد از اسناد مرتبط در دو سال اخیر منتشر شده اند که نشان دهنده رشد تصاعدی توجه به این حوزه است. یادگیری ماشین به طور قابل توجهی کارایی، قابلیت مقیاس پذیری و کاهش انتشار سامانه های انرژی تجدید پذیر را از طریق بهبود پیش بینی ها افزایش می دهد [۷].

در حوزه انرژی خورشیدی، الگوریتم های یادگیری ماشین با تحلیل داده های بلادرنگ، الگوهای آب و هوا را پیش بینی کرده و موقعیت پنل های خورشیدی را برای بیشینه سازی تولید انرژی تنظیم می کنند. همچنین این الگوریتم ها قادر به شناسایی سلول های خورشیدی با عملکرد پایین و توزیع مجدد بار هستند که منجر به بهبود قابل توجه در تولید کلی انرژی می شود [۸].

در حوزه انرژی بادی نیز مدل های یادگیری عمیق با پیش بینی سرعت و جهت باد در بازه های زمانی کوتاه مدت، به مدیریت بهتر تولید و توزیع انرژی کمک می کنند [۷].

علاوه بر این، هوش مصنوعی در مدیریت شبکه های هوشمند^۴ با پیش بینی تقاضا، مدیریت پاسخ گویی به بار و یکپارچه سازی منابع انرژی توزیع شده، نقش کلیدی در کاهش اتلاف انرژی و افزایش بهره وری ایفا می کند [۴].
۱ استفاده از دوقلو دیجیتال^۵ مبتنی بر هوش مصنوعی در نیروگاه ها و شبکه های توزیع، امکان شبیه سازی و بهینه سازی عملکرد سامانه را در شرایط مختلف فراهم می آورد و از انتشار میلیون ها تن CO₂ جلوگیری می کند [۵].

۳-۲- کاربردهای هوش مصنوعی در پیش بینی و مدل سازی اقلیمی

پیش بینی دقیق اقلیمی برای تدوین سیاست های مؤثر کاهش و سازگاری امری حیاتی است. هوش مصنوعی با ترکیب توانایی های سنجش از دور، امکان شناسایی در مقیاس بزرگ و با دقت بالا از انتشار گازهای گلخانه ای، جزایر حرارتی شهری، عقب نشینی یخچال ها و جنگل زدایی را فراهم می آورد [۳]. جدول ۱ نمونه هایی از کاربردهای هوش مصنوعی در پیش بینی آب و هوا و اقلیم را در مقیاس های مختلف نشان می دهد.

پیشرفت های اخیر در فناوری های هوش مصنوعی به طور گسترده در تمام مراحل سامانه های پیش بینی اقلیمی ادغام شده و نوآوری های قابل توجهی را به همراه داشته است. مدل های مبتنی بر یادگیری عمیق مانند FourCastNet و GraphCast نشان داده اند که می توانند پیش بینی های آب و هوایی را با دقتی قابل رقابت با مدل های عددی سنتی، اما با هزینه محاسباتی بسیار کم تر، تولید کنند [۱۳].

این مدل ها با آموزش بر روی داده های بازتحلیل ERA5، الگوهای پیچیده اتمسفری را یاد گرفته و قادر به پیش بینی رویداد های حدی نظیر توفان های حاره ای و امواج گرما با چند روز هستند.

^۴- Smart Grids

^۵- Digital Twin

جدول ۱- نمونه‌های کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی آب‌وهوا و اقلیم

Table 1. Examples of the use of artificial intelligence in weather and climate forecasting

Scale	Year	Prediction Horizon	Method	Application	Resource
Global	2025	Short- to Medium-Term	FourCastNet, FourCastNet-SFNO, Pangu-Weather, GraphCast, Aurora, AIFS, and GenCast	Forecasting air temperature, wind fields, global kinetic energy spectrum, regional precipitation, cloud cover, tropical cyclone tracks, and hyperlocal extreme events during the South Asian monsoon	[9]
Global	2026	Short- to Medium-Term	Physics-Informed Neural Networks (PINNs) and Neural Operators	Competing with operational Numerical Weather Prediction (NWP) systems in specific applications, including climate modeling, extreme event analysis, renewable energy optimization, and emissions monitoring	[10]
Mexico	2025	Drought Forecasting	DeepGA-LSTM (Genetic Algorithm-Long Short-Term Memory Hybrid Model)	Optimizing the architecture and hyperparameters of LSTM networks for drought forecasting by modeling complex nonlinear patterns	[11]
China (Ningbo Port)	2026	24 Hours (Hourly Rolling Forecast)	Dynamic Graph Neural Networks (DGNN), Graph Attention Networks (GAT), and LSTM	Hourly sea fog forecasting for 72 monitoring stations in the port area, with successful operational validation in 2023	[12]
New Zealand	2025	Temperature Forecasting	Artificial Neural Network (ANN) versus Multiple Linear Regression (MLR)	Daily temperature forecasting; results indicated that traditional statistical methods outperformed artificial neural networks in certain cases	[2]
Multiple Regions	2026	Rainfall Forecasting	Physics-Informed Neural Networks (PINN)	Rainfall forecasting by incorporating key meteorological variables, such as humidity, through the integration of physical principles with deep learning	[13]
China (Pre-Meiyu Season)	2026	Seasonal Classification	CNN-Enhanced Autoencoders with ERA5 Reanalysis Data (1979–2023)	Objective identification of the Pre-Meiyu season and classification of weather patterns associated with regional precipitation	[14]

هوش مصنوعی و سنجش از دور در کشاورزی هوشمند اقلیمی با ارائه ابزارهای پیشرفته برای بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها (کود، آب، سموم)، کاهش انتشار و کشاورزی دقیق، می‌توانند به‌طور قابل توجهی به امنیت غذایی کمک کنند. جدول ۲ نمونه‌هایی از کاربردهای موفق هوش مصنوعی در بهبود مصرف کود و مواد شیمیایی در کشاورزی دقیق را نشان می‌دهد.

یافته‌های جدول ۲ نشان می‌دهند که هوش مصنوعی در کشاورزی دقیق به‌طور عمده از طریق سه رویکرد اصلی به کاهش مصرف نهاده‌ها و افزایش بهره‌وری کمک می‌کند: (۱) تشخیص بلادرنگ کمبودها با استفاده از تصاویر چندطیفی و فراطیفی، (۲) تولید نقشه‌های نسخه‌دهی برای کوددهی متغیر با توجه به نیاز هر قطعه زمین، و (۳) سامانه‌های پشتیبانی تصمیم مبتنی بر مدل‌های یادگیری ماشین که ترکیبی از داده‌های خاک، آب‌وهوا و محصول را پردازش می‌کنند.

مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند پیش‌بینی اقلیمی و تشخیص آستانه‌های بحرانی در زیست‌بوم‌ها مانند امواج گرما، رویدادهای اقلیمی حادی و بالا آمدن سطح دریا را بهبود بخشند. ادغام هوش مصنوعی، اتوماسیون و کشاورزی دقیق، امکان پایش و مدیریت بلادرنگ خاک، محصولات و شرایط اقلیمی را فراهم می‌آورد که به بهینه‌سازی عملکرد و بهره‌وری منابع منجر می‌شود. هم‌چنین، توسعه محصولات مقاوم به اقلیم با استفاده از ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی و کشاورزی دقیق، معیشت کشاورزان را بهبود می‌بخشد و دسترسی عادلانه به فناوری را تسهیل می‌کند [۳].

با این حال، چالش‌هایی نظیر هزینه‌های اولیه بالا، نیاز به زیرساخت‌های ارتباطی و اینترنتی، سواد دیجیتال کشاورزان و نگرانی‌های مربوط به حریم خصوصی داده‌ها، موانعی در مسیر پذیرش گسترده این فناوری‌ها در کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شوند.

مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی در حال توسعه مدل‌های یادگیری ماشین برای شبیه‌سازی اجزای مختلف زمین از جمله اقیانوس‌ها است. این مدل‌ها با معماری Graph-Based Encoder-Decoder و هسته Transformer، داده‌هایی نظیر دما، شوری، جریان‌ها و یخ‌های دریایی را پردازش می‌کنند و ابزارهای مدل‌سازی مبتنی بر داده را به‌صورت مقیاس‌پذیر و کارآمد ارائه می‌دهند [۱۵].

با این حال، تحقیقات جدید نشان می‌دهند که تنوع طبیعی در داده‌های اقلیمی می‌تواند باعث شود مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی دما و بارش محلی دچار مشکل شوند. در برخی موارد، مدل‌های ساده‌تر مبتنی بر فیزیک می‌توانند دقت بیش‌تری نسبت به مدل‌های یادگیری عمیق داشته باشند.

بنابراین، هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری توانمند در کنار علم فیزیک جو به کار گرفته می‌شود، نه جایگزینی کامل برای آن. رویکردهای ترکیبی که مدل‌های فیزیکی را با یادگیری ماشین تلفیق می‌کنند، در حال حاضر به‌عنوان مسیرهای امیدوارکننده برای افزایش دقت و قابلیت تفسیر پیش‌بینی‌های اقلیمی شناخته می‌شوند [۱۶].

۳-۳- کاربردهای هوش مصنوعی در کشاورزی هوشمند و بهبود مصرف نهاده‌ها

بخش کشاورزی هم به‌عنوان یکی از منابع عمده انتشار گازهای گلخانه‌ای (حدود ۲۵ درصد از انتشارات جهانی) و هم به‌عنوان یکی از آسیب‌پذیرترین بخش‌ها در برابر تغییرات اقلیمی، از حوزه‌های کلیدی کاربرد هوش مصنوعی محسوب می‌شود. بخش کشاورزی و زیرساخت‌های شهری بیش‌ترین توجه را در میان کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه اقلیم به‌خود اختصاص داده‌اند [۳].

جدول ۲- نقش هوش مصنوعی در بهبود استفاده از کود و مواد شیمیایی در کشاورزی دقیق

Table 2. The role of artificial intelligence in improving the use of fertilizers and chemicals in precision agriculture

Crop	AI Method	Description	Outcomes	Ref.
Maize (China)	Data-Driven Smart Agriculture System	Collection of soil, moisture, temperature, and crop growth data using sensors, followed by AI-based analysis to provide precise irrigation and fertilization recommendations.	20–30% increase in crop yield; reduced fertilizer and pesticide use; record yield of 1,384 kg/ha.	[17]
Rice (China)	HOUJI AI Platform	Use of UAV multispectral imagery, real-time machine learning analysis, and generation of digital prescription maps to detect water and nutrient deficiencies in agricultural fields.	10–30% reduction in nitrogen application; 10–35% reduction in water consumption; improved crop yield.	[18]
Wheat (China)	Large Language Model (LLM) and Precision Agriculture System	Analysis of satellite imagery to generate high-resolution prescription maps for individual field plots, integrated with tractors equipped with Variable Rate Technology (VRT) for site-specific fertilization.	10% increase in crop yield; 10% reduction in fertilizer and pesticide use; 50% reduction in water consumption; 5% reduction in seed usage.	[19]
Multiple Crops (China)	Knowledge-Based Multi-Agent Intelligent System	Integration of agricultural databases with multi-agent models to generate customized cultivation plans for each field and crop.	25% reduction in chemical fertilizer use; 30% reduction in pesticide application; 35% reduction in water consumption; annual increase of 0.1% in soil organic matter.	[20]
Maize (China)	Random Forest (RF) Model with Remote Sensing Data	Acquisition of hyperspectral, thermal, and three-dimensional (3D) UAV data; extraction of 15 predictive features and modeling of crop yield response to fertilizer application.	More than 25% reduction in nitrogen application; model accuracy of $R^2 = 0.88$; minimum prediction error of 0.384 t/ha.	[21]
Mango (India)	Machine Learning Using Sentinel-2 Satellite Imagery	Estimation of carbon sequestration in mango orchards using artificial intelligence and satellite imagery.	Accurate estimation of carbon sequestration capacity in mango orchards.	[22]
Agricultural Systems (Europe)	Smart Droplets Project: Artificial Intelligence (AI), Digital Twin, and Robotics	Autonomous robotic spraying systems with AI-based optimization to reduce agrochemical input consumption.	40% reduction in pesticide use; 15% reduction in liquid fertilizer consumption; 40% reduction in water use; 15% increase in profitability.	[23]
Wheat, Maize, and Sugar Beet (Egypt)	Artificial Intelligence-Based Decision Support System (AI-DSS)	AI-based irrigation and fertilization management in sandy soils over three consecutive growing seasons (2022–2025).	Improved water-use efficiency, enhanced soil sustainability, and increased crop productivity.	[24]

۳-۴- کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت منابع طبیعی و ذخیره سازی کربن

در سال های اخیر، مشکلات و پتانسیل های مربوط به مدیریت منابع طبیعی (به ویژه زمین، آب و جنگل ها) موضوع داغی برای کاوش در سراسر جهان بوده است. انسان ها با از دست دادن جنگل ها، خدمات ارزشمند زیست بوم و زیستگاه های حیاتی که تنوع زیستی را حفظ می کنند، از دست می دهند، بنابراین تصور می شود که مدل های هوش مصنوعی خطر از دست دادن منابع طبیعی را کاهش می دهند [۲۵ و ۲۶]. به منظور پیش بینی جنگل زدایی تدریجی و نرخ جنگل زدایی در جنگل های بارانی آمازون، دومینگز^۶ و همکاران از یک شبکه عصبی متراکم برای مدل سازی داده های مکانی ایستا و یک شبکه حافظه کوتاه مدت توسعه یافته برای مدل سازی داده های

زمانی در مورد جنگل زدایی استفاده کردند. نرخ از دست دادن جنگل های آینده با مقایسه نتایج پیش بینی و انجام آموزش مجدد برای به روز رسانی مدل با داده های جدید تخمین زده شدند [۲۷].

هوش مصنوعی می تواند جنگل ها را رصد کند، جنگل زدایی را کاهش دهد و به تصمیم گیرندگان در صدور هشدارهای اولیه آتش سوزی کمک کند. استفاده از هوش مصنوعی برای مدیریت احیای هوشمند زیست بوم و سازگاری با تغییرات اقلیمی می تواند آلودگی زیست بوم را کاهش داده و اقدامات حفاظتی مؤثری را اجرا کند. هوش مصنوعی برای مدیریت مؤثر منابع آب شهری ضروری است. فناوری های سنجش از دور و سامانه های اطلاعات جغرافیایی، کاربری و برنامه ریزی زمین شهری را بهبود می بخشد (شکل ۲).

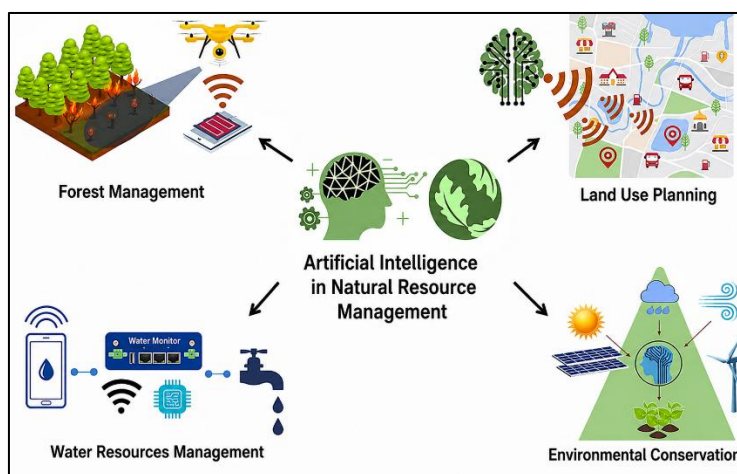


Figure 2. Artificial intelligence in natural resource management

شکل ۲- هوش مصنوعی در مدیریت منابع طبیعی

این حوزه ایفا می کند [۶]. جدول ۳ نمونه هایی از کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت منابع طبیعی، احیای زیست بوم، برنامه ریزی کاربری اراضی و ذخیره سازی کربن را نشان می دهد.

مدیریت پایدار منابع طبیعی، احیای زیست بوم های تخریب شده و افزایش ظرفیت ذخیره سازی کربن در زمین و اقیانوس ها از ارکان اساسی راهبردهای کاهش تغییرات اقلیمی هستند. هوش مصنوعی با ارائه ابزارهای قدرتمند برای پایش، مدل سازی و بهینه سازی، نقش فزاینده ای در

^۶- Dominguez

جدول ۳- نقش هوش مصنوعی در مدیریت منابع طبیعی، احیای زیست‌بوم، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و ذخیره‌سازی کربن

Table 3. The role of artificial intelligence in natural resource management, ecosystem restoration, land use planning, and carbon storage

Natural Resource Management	Ecosystem Restoration	Land Use Planning	Carbon Sequestration
Google Earth AI: Identification of fine-scale ecological features (hedgerows and riparian woodlands) across more than 130,000 km ² of the United Kingdom using a Vision Transformer model.	AI-based framework: Identification of ecosystem conservation and restoration priorities across Canada in support of the 30×30 conservation target.	Urmia (Iran): Integration of artificial intelligence, multi-criteria decision-making (MCDM), and GIS for high-accuracy assessment and prediction of urban expansion and land-use mapping.	Stanford University, Brown University, and Planet Labs: Development of satellite- and AI-based systems for accurate estimation of forest carbon stocks.
Microsoft + TealWaters: AI-based detection of hidden wetlands to support ecosystem conservation, carbon sequestration, and sustainable land-use planning.	Loess Plateau (China): Integration of artificial intelligence and multi-criteria decision analysis (MCDA) to develop climate-resilient energy policies and balance ecological restoration with economic development under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios.	Melbourne (Australia): Modeling land-use performance using machine learning algorithms.	ForestCarbon-Net: A hierarchical convolutional neural network architecture integrating Sentinel-2, Landsat, and LiDAR data to monitor and assess carbon sequestration dynamics.
BIOREFOREST: Integration of advanced data collection, modeling, artificial intelligence, and participatory approaches to support forest and orchard restoration decision-making.	Dual-Logic Spatial Zoning Model (DLSZM): A hybrid framework that translates socio-ecological indicators into four spatial planning regimes: strict conservation, managed use, development guidance, and ecological restoration.	Ocean Carbon Sequestration (Canada): Monitoring ocean health and carbon sequestration capacity using advanced sensors, machine learning, and remotely operated vehicles (ROVs).	-
NetCarbon (French startup): AI-driven optimization of land use for carbon sequestration, ecosystem restoration, and biodiversity enhancement.	Baghdad (Iraq): A geospatial-political framework integrating high-resolution Landsat and Sentinel imagery to support sustainable post-conflict urban planning.	Agricultural carbon assessment: Integration of agricultural machinery and machine learning for estimating carbon storage in agricultural lands using satellite imagery and soil data.	
Taiwan Smart Forest Management System: Rapid assessment of forest carbon potential and carbon-related risks using artificial intelligence and remote sensing technologies.	Land-use change and carbon dynamics: A machine learning-based approach for spatial simulation of land-use change and assessment of its impacts on terrestrial carbon dynamics in rapidly urbanizing regions.	Real-time CO ₂ leakage monitoring in geological reservoirs: Performance evaluation of KNN, SVM, Random Forest, XGBoost, and LightGBM algorithms.	

پایش کنند. همچنین در حوزه ذخیره‌سازی کربن زمین‌شناسی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پایش بلادرنگ نشتی CO₂ از چاه‌های تزریق به کار گرفته می‌شوند که برای اطمینان از یکپارچگی ذخیره‌سازی حیاتی است [۶].

علاوه بر مدیریت منابع طبیعی، فناوری‌های جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن (CCUS^۸) به عنوان یکی از مسیرهای مهم برای دستیابی به اهداف کربن‌زدایی، نقشی کلیدی در کاهش سطح CO₂ اتمسفر ایفا می‌کنند. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین به طور فزاینده‌ای برای اثربخشی CCUS حیاتی شده‌اند، نه تنها در غربالگری با توان بالا مواد و مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده برای فعالیت کاتالیزوری و پیش‌بینی حرکت پلوم، بلکه در بهینه‌سازی سامانه. یک مطالعه جامع در مورد CCUS مبتنی بر هوش مصنوعی نشان می‌دهد که روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، به ویژه یادگیری ماشین، برای بهینه‌سازی فرایندهای جذب، بهبود عملکرد سامانه و تسهیل کشف مواد پیشرفته به کار گرفته می‌شوند. الگوریتم‌های یادگیری با نظارت، بدون نظارت، یادگیری تقویتی و مدل‌های مولد برای وظایف مشخص CCUS شامل غربالگری جاذب‌ها، حس‌گری نرم، پیش‌بینی انتشار، کنترل دوقلوی دیجیتال و نظارت بر یکپارچگی ذخیره‌سازی نگاشت شده‌اند [۶]. تخمین زده می‌شود که CCUS می‌تواند حدود ۸ درصد از کاهش انتشار مورد نیاز برای دستیابی به انتشار خالص صفر تا سال ۲۰۵۰ را تأمین کند که معادل حدود ۶ میلیارد تن CO₂ در سال است.

اهمیت هوش مصنوعی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با بهینه‌سازی سامانه‌های حمل و نقل در شکل ۳ آورده شده است. این تصویر، کاربرد فناوری هوش مصنوعی را برای بهبود سامانه‌های حمل و نقل و کاهش انتشار کربن نشان می‌دهد. این بیانیه بر پتانسیل هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی مسیرهای حمل و نقل براساس

تحلیل جدول ۳ نشان می‌دهد که هوش مصنوعی در چهار حوزه اصلی مدیریت منابع طبیعی نقش‌آفرینی می‌کند:

اول، پایش و شناسایی منابع با دقت بالا: ابزارهایی مانند Google Earth AI و Microsoft TealWaters با استفاده از مدل‌های بینایی رایانه‌ای و یادگیری عمیق، قادر به شناسایی ویژگی‌های ظریف بوم‌شناسی (مانند پرچین‌ها، تالاب‌های پنهان و جنگل‌های حاشیه‌ای) در مقیاس وسیع هستند که با روش‌های سنتی قابل تشخیص نبودند. این قابلیت، امکان برنامهریزی دقیق‌تر برای حفاظت و احیا را فراهم می‌آورد.

دوم، اولویت‌بندی احیای زیست‌بوم: چارچوب‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در کانادا و چین، با تلفیق داده‌های چندمنظوره (زیست‌بوم، اقتصادی و اجتماعی)، به شناسایی مناطق اولویت‌دار برای احیا و تدوین سناریوهای متوازن کمک می‌کنند. این رویکردها به سیاست‌گذاران امکان می‌دهند تا بین اهداف حفاظت، احیا و توسعه اقتصادی تعادل برقرار کنند.

سوم، برنامه‌ریزی کاربری اراضی هوشمند: تلفیق هوش مصنوعی با GIS و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۷ (MCDM)، امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی را در سناریوهای مختلف اقلیمی و توسعه‌ای فراهم می‌آورد. این مدل‌ها با دقت بالایی می‌توانند الگوهای توسعه شهری، جنگل‌زدایی و تغییرات کاربری را پیش‌بینی کرده و به برنامه‌ریزی پایدار کمک کنند [۳].

چهارم، اندازه‌گیری و پایش ذخیره کربن: یکی از مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی، برآورد دقیق و پویای ذخیره کربن در زیست‌بوم‌های مختلف است. مدل‌هایی مانند ForestCarbon-Net با تلفیق تصاویر ماهواره‌ای چندمنظوره (Landsat، Sentinel-2) و داده‌های LiDAR، می‌توانند تغییرات ذخیره کربن را در بازه‌های زمانی کوتاه

^۷- Multi-Criteria Decision Making

^۸- Carbon Capture, Utilization, and Storage

نمودار نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند به‌طور نهفته سامانه‌های حمل و نقل عمومی را بهینه کرده و تقاضای خدمات حمل و نقل را کنترل کند. CO₂ به دی اکسیدکربن اشاره دارد (شکل ۳).

عوامل مختلف تأکید دارد. علاوه بر این، توانایی هوش مصنوعی را برای بهبود کارایی مدیریت ناوگان نشان می‌دهد. علاوه بر این، نمودار، کاربرد نهفته هوش مصنوعی را در تنظیم وسایل نقلیه را نشان می‌دهد. در نهایت،

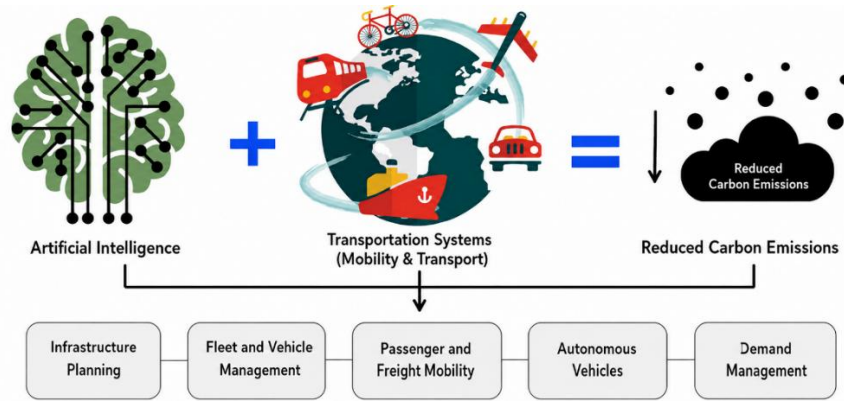


Figure 3. The importance of artificial intelligence in reducing greenhouse gas emissions by optimizing transportation systems

شکل ۳- اهمیت هوش مصنوعی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با بهینه‌سازی سامانه‌های حمل و نقل

اعتماد به خروجی‌های هوش مصنوعی را در میان سیاست‌گذاران و کاربران نهایی کاهش می‌دهد. در برخی موارد، مدل‌های ساده‌تر مبتنی بر فیزیک می‌توانند عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های یادگیری عمیق داشته باشند.

چالش‌های زیرساختی و اقتصادی: مصرف انرژی

بالای خود هوش مصنوعی، یک تناقض اقلیمی ایجاد کرده است. برآوردها نشان می‌دهند که آموزش یک مدل بزرگ زبان (مانند GPT-3) می‌تواند تا ۵۰۰ تن CO₂ معادل منتشر کند [۱]. علاوه بر این، هزینه‌های بالای پیاده‌سازی، شکاف دیجیتال بین کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه را تشدید می‌کند.

چالش‌های پذیرش و تخصص: مقاومت کاربران نهایی

(کشاورزان، جوامع محلی) در برابر پذیرش فناوری‌های جدید و کمبود نیروی متخصص چندرشته‌ای، از موانع اصلی گسترش کاربردهای هوش مصنوعی در حوزه اقلیم هستند.

۳-۵- چالش‌ها و محدودیت‌های هوش مصنوعی

علی‌رغم پتانسیل بالای هوش مصنوعی در کاهش تغییرات اقلیمی، چالش‌های قابل توجهی در مسیر بهره‌گیری کامل از این ظرفیت‌ها وجود دارد. جدول ۴ مهم‌ترین این چالش‌ها را در حوزه‌های مختلف دسته‌بندی کرده است. تحلیل جدول ۴ نشان می‌دهد که چالش‌های هوش مصنوعی در حوزه اقلیم را می‌توان در پنج دسته کلی طبقه‌بندی کرد:

چالش‌های داده‌ای: کمبود داده‌های باکیفیت و استاندارد، به‌ویژه در مناطق در حال توسعه، مهم‌ترین مانع برای پیاده‌سازی مؤثر هوش مصنوعی است. حتی زمانی که داده در دسترس است، نگرانی‌های مربوط به حریم خصوصی و مالکیت، مانع از اشتراک‌گذاری و استفاده گسترده می‌شود.

چالش‌های مدل‌سازی: شفافیت پایین مدل‌های پیشرفته (مسئله جعبه سیاه) و سوگیری‌های الگوریتمی،

جدول ۴- چالش‌ها و محدودیت‌های هوش مصنوعی در کشاورزی، اقلیم و مدیریت منابع طبیعی

Table 4. Challenges and limitations of artificial intelligence in agriculture, climate, and natural resource management

Challenge Category	Challenge Type	Description	Implications
Data	Data Availability and Quality	Lack of high-quality, standardized, and accessible data in many regions, particularly in developing countries.	Reduced model accuracy, biased predictions, and limited generalizability to new regions.
Data	Data Privacy and Ownership	Concerns regarding the collection of agricultural, geospatial, and personal data, as well as the lack of transparency in data ownership.	Lower willingness among farmers and local communities to share data, along with legal and regulatory challenges.
Modeling	Transparency and Interpretability (Black Box)	The opaque nature of many deep learning models (especially deep neural networks) makes it difficult to understand the reasoning behind their predictions.	Reduced trust among policymakers and end users, making it more difficult to detect errors and algorithmic bias.
Modeling	Algorithmic Bias	Models trained on data from specific regions often perform poorly when applied to regions with different environmental or socioeconomic conditions.	Worsening regional inequalities and unfair resource allocation decisions.
Infrastructure	High Energy Consumption	Training and deploying large AI models require substantial energy consumption, resulting in increased greenhouse gas emissions.	A climate paradox: using energy-intensive technologies to address climate change.
Infrastructure	Implementation Costs	High upfront investment is required for hardware infrastructure, software, communication networks, and workforce training.	A widening digital divide between developed and developing countries.
Adoption	User Acceptance of Technology	Farmers, local communities, and even policymakers may resist adopting new technologies due to limited awareness, lack of trust, or insufficient technical knowledge.	Lower adoption rates and underutilization of AI's potential.
Adoption	Need for Interdisciplinary Expertise	Effective AI development and deployment require close collaboration among AI experts, climate scientists, farmers, economists, and policymakers.	A shortage of multidisciplinary experts, leading to incomplete and inefficient projects.
Policy	Lack of Regulatory and Ethical Frameworks	The absence of clear regulations and ethical standards for AI applications in climate-related domains, particularly in sensitive areas such as water allocation, subsidies, and disaster management.	Greater risk of misuse, unethical decision-making, and increased inequality.
Research Focus	Imbalance Between Adaptation and Mitigation	Only 16% of AI studies focus on climate change mitigation, while the majority (64.4%) concentrate on climate adaptation.	A lack of AI solutions targeting the direct reduction of greenhouse gas emissions.
Geographic Focus	Regional Inequality	Asia and global-scale studies account for approximately two-thirds of the research literature, whereas Africa and South America remain underrepresented.	Limited access to AI solutions in vulnerable and underserved regions.

بر اساس یافته‌های این مطالعه، توصیه‌های زیر برای بهره‌گیری مؤثر از هوش مصنوعی در کاهش تغییرات اقلیمی ارائه می‌شود:

(۱) توسعه راه‌حل‌های بومی متناسب با شرایط هر منطقه: با توجه به تفاوت‌های جغرافیایی و نابرابری‌های موجود (جدول ۴)، لازم است راه‌کارهای مبتنی بر هوش مصنوعی براساس نیازها و شرایط هر منطقه طراحی و اجرا شوند. این موضوع به‌ویژه برای مناطق کم‌تر مورد مطالعه، مانند بخش‌هایی از آفریقا و آمریکای جنوبی، اهمیت بیش‌تری دارد. تحقق این هدف نیازمند سرمایه‌گذاری در توسعه زیرساخت‌های داده، تقویت توانمندی‌های فنی و آموزش نیروی انسانی محلی است. همچنین، این سرمایه‌گذاری باید بر حوزه‌های کلیدی مانند بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی، توسعه مواد پیشرفته برای جذب و ذخیره کربن، و مدیریت هوشمند زنجیره تأمین متمرکز باشد تا بتواند بیش‌ترین تأثیر را در کاهش انتشار کربن داشته باشد.

(۲) افزایش سرمایه‌گذاری در کاهش به جای سازگاری: با توجه به این که تنها ۱۶ درصد از پژوهش‌های هوش مصنوعی به کاهش تغییرات اقلیمی پرداخته‌اند، نیاز به سرمایه‌گذاری بیش‌تر در کاربردهای هوش مصنوعی برای کاهش مستقیم انتشار گازهای گلخانه‌ای احساس می‌شود.

(۳) تدوین چارچوب‌های اخلاقی و شفافیت: ایجاد چارچوب‌های اخلاقی و نظارتی برای اطمینان از مشارکت معنادار و عادلانه هوش مصنوعی در تاب‌آوری اقلیمی جهانی ضروری است. این چارچوب‌ها باید به مسائل حریم خصوصی داده‌ها، شفافیت الگوریتمی، مسئولیت‌پذیری در تصمیم‌گیری‌های خودکار و عدالت در دسترسی به فناوری بپردازند.

(۴) ترویج رویکردهای ترکیبی (هیبرید): با توجه به محدودیت‌های مدل‌های تنها داده‌محور (جدول ۴)، توسعه و به‌کارگیری رویکردهای ترکیبی که مدل‌های فیزیکی را با یادگیری ماشین تلفیق می‌کنند، توصیه می‌شود. این

چالش‌های سیاست‌گذاری و تمرکز پژوهشی: نبود چارچوب‌های نظارتی و اخلاقی شفاف، همراه با تمرکز نامتوازن پژوهش‌ها بر سازگاری به جای کاهش و نابرابری جغرافیایی در توزیع پژوهش‌ها، از موانع ساختاری در مسیر بهره‌گیری کامل از پتانسیل هوش مصنوعی محسوب می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری

هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری تحول‌آفرین در شناسایی، پیش‌بینی و کاهش تغییرات اقلیمی ظهور یافته است. یافته‌های این مطالعه مروری نشان می‌دهند که هوش مصنوعی در حوزه‌های کلیدی از جمله بهینه‌سازی سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر، پیش‌بینی دقیق اقلیمی، توسعه کشاورزی هوشمند، بهبود فناوری‌های جذب و ذخیره‌سازی کربن، مدیریت منابع طبیعی و پایش بلادرنگ انتشار گازهای گلخانه‌ای کاربردهای مؤثری یافته است. جداول تحلیلی ارائه‌شده در این مقاله، نمونه‌های عینی از موفقیت‌های هوش مصنوعی در کاهش مصرف نهاده‌های کشاورزی (تا ۳۰ درصد کاهش کود و ۴۰ درصد کاهش سموم)، پیش‌بینی رویدادهای اقلیمی حدی با دقت بالا، و اندازه‌گیری دقیق ذخیره کربن در زیست‌بوم‌های مختلف را نشان دادند.

با این حال، چالش‌های قابل توجهی از جمله دسترسی به داده‌های باکیفیت، شفافیت مدل‌ها، مصرف انرژی بالای خود سامانه‌های هوش مصنوعی، نابرابری در توزیع جغرافیایی این فناوری‌ها، سوگیری‌های الگوریتمی و تمرکز نامتوازن پژوهش‌ها بر سازگاری به جای کاهش، موانع جدی در مسیر بهره‌گیری کامل از ظرفیت‌های این فناوری محسوب می‌شوند. همان‌گونه که جدول ۴ نشان داد، این چالش‌ها در پنج دسته داده‌ای، مدل‌سازی، زیرساختی، پذیرش و سیاست‌گذاری قابل طبقه‌بندی هستند و هریک نیازمند راه‌کارهای اختصاصی می‌باشند.

شود، می‌تواند یکی از مهم‌ترین متحدان بشر در این مسیر دشوار باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان کلیه اصول اخلاقی مرتبط با انجام و انتشار پژوهش علمی را رعایت کرده‌اند. تمام مراحل گردآوری، تحلیل و ارائه داده‌ها مطابق با استانداردهای اخلاق پژوهش انجام شده و هیچ‌گونه جعل، تحریف یا استفاده نادرست از منابع صورت نگرفته است.

مشارکت نویسندگان

یوسف تقی‌ملایی محاسبات را انجام داد و روش‌های تحلیلی را محاسبه کرد و نتایج را بحث نمود و نسخه نهایی مقاله را تهیه نمود.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، شخصی یا سازمانی در انجام این پژوهش وجود ندارد.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی خاصی از نهادهای دولتی، خصوصی یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

رویکردها ضمن بهره‌گیری از توانایی هوش مصنوعی در تشخیص الگوهای پیچیده، از قوانین فیزیک برای افزایش قابلیت تفسیر و تعمیم‌پذیری استفاده می‌کنند.

(۵) تقویت همکاری‌های بین‌رشته‌ای و بین‌بخشی: با توجه به ماهیت چندبعدی چالش‌های اقلیمی و تنوع کاربردهای هوش مصنوعی، تقویت همکاری‌های بین‌رشته‌ای بین دانشمندان اقلیم، متخصصان هوش مصنوعی، کشاورزان، سیاست‌گذاران، اقتصاددانان و جوامع محلی برای بهره‌گیری کامل از پتانسیل هوش مصنوعی در مقابله با تغییرات اقلیمی ضروری است.

(۶) توجه به ردپای کربنی خود هوش مصنوعی: با توجه به مصرف انرژی بالای زیرساخت‌های محاسباتی هوش مصنوعی، توسعه الگوریتم‌های کارآمد از نظر انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین انرژی مراکز داده، و طراحی معماری‌های محاسباتی کم‌مصرف (مانند مدل‌های کوچک‌شده و فشرده) از اولویت‌های اساسی است تا هوش مصنوعی به‌جای تشدید بحران اقلیم، به حل آن کمک کند. همان‌گونه که یونسکو نیز تأکید کرده است، تقویت همکاری‌های جهانی برای اطمینان از اینکه هوش مصنوعی هم از نظر زیست‌محیطی پایدار است و هم به‌طور مؤثر برای اقدام اقلیمی به‌کار گرفته می‌شود، امری حیاتی است. هوش مصنوعی می‌تواند به‌عنوان ستون فقرات راه‌حل‌های عملی اقلیمی عمل کند، مشروط بر اینکه با نگاه انتقادی به محدودیت‌ها و چالش‌های آن، با تعهد به عدالت اقلیمی، توسعه پایدار و مشارکت گسترده ذی‌نفعان به‌کار گرفته شود. پنجره فرصت برای اقدام مؤثر در حال بسته شدن است و هوش مصنوعی، اگر به‌درستی هدایت

References

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2023. Climate change 2023: Synthesis report. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [2] Ripple WJ, Wolf C, Mann ME, Rockström J, Greg JW, Xu C, et al. The 2025 state of the climate report: A planet on the brink. BioScience. 2025; 75(12): 1016-1027. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaf149>.
- [3] Ayadi R, Forouheshfar Y, Moghadas O. Enhancing system resilience to climate change through artificial intelligence: a systematic literature review. Frontiers in Climate. 2025; 7: 1585331. <https://doi.org/10.3389/fclim.2025.1585331>.

- [4] Adegbite AO, Barrie I, Osholake SF, Alesinloye T, Bello AB. Artificial intelligence in climate change mitigation: a review of predictive modeling and data-driven solutions for reducing greenhouse gas emissions. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024; 24(1): 408-414. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.24.1.3043>.
- [5] Amiri Z, Heidari A, Navimipour NJ. Comprehensive survey of artificial intelligence techniques and strategies for climate change mitigation. *Energy*. 2024; 308: 132827. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132827>.
- [6] Mazhar S, Mumtaz MW, El Oirdi M, Mukhtar H, Raza MA, Farhan M, Aatif M, Muteeb G. Synergizing advanced materials and artificial intelligence for next-generation carbon capture, utilization, and storage (CCUS): a review. *RSC Advances*. 2025; 15: 2621-2651. <https://doi.org/10.1039/D5RA07338C>.
- [7] Ukoba K, Olatunji KO, Adeoye E, Jen TC, Madyira DM. Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: review and future prospects. *Energy & Environment*. 2024; 35(7): 3833-3879. <https://doi.org/10.1177/0958305X241256293>.
- [8] Chauhan R, Sharma S, Pachauri R, Dumka P. Deep learning for massive MIMO: AI-driven channel estimation with reduced pilot usage. *AI in Sustainable Energy and Environment*. 2026.
- [9] Brenowitz ND, Cohen Y, Pathak J, Mahesh A, Bonev B, Kurth T, et al. A practical probabilistic benchmark for AI weather models. *Geophysical Research Letters*. 2025; 52(7): e2024GL113656. <https://doi.org/10.1029/2024GL113656>.
- [10] Secci D. Surrogate models, physics-informed neural networks and climate change [PhD thesis]. Parma (Italy): University of Parma; 2024. Available from: <https://hdl.handle.net/20.500.14242/196741>.
- [11] Cai S, Sun C, Tian J. Towards smart agriculture: AI-driven prediction of key genes for revolutionizing crop breeding. *Planta*. 2025; 262(5): 116. <https://doi.org/10.1007/s00425-025-04841-8>.
- [12] Sun J, Sun Y, Qian Y, Fang Y, Wang D, Zhao C. An hourly rolling sea fog forecasting model for Ningbo–Zhoushan Port based on dynamic graph neural networks. *Journal of Meteorological Research*. 2025; 39(6): 1527-1542. <https://doi.org/10.1007/s13351-025-5104-3>.
- [13] Zhang L, Lu M, Bao Q, Zhao Y, Yang J. Global performance benchmarking of artificial intelligence models in atmospheric river forecasting. *Communications Earth & Environment*. 2025; 6(1): 894. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02567-2>.
- [14] Lee CT, Wang SYS, Lo TT. A revised Meiyu-season onset index for Taiwan based on ERA5. *Atmosphere*. 2022; 13(11): 1762. <https://doi.org/10.3390/atmos13111762>.
- [15] Costa NRT. Leveraging physics-informed neural architectures as surrogate models for space weather forecasting [master's thesis]. Porto (Portugal): University of Porto; 2024. Available from: <https://doi.org/10.34626/ejzn-kx36>.
- [16] Haghighat E, Raissi M, Moure A, Gomez H, Juanes R. A physics-informed deep learning framework for inversion and surrogate modeling in solid mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2021; 379: 113741. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.113741>.
- [17] Illés Á, Bojtor C, Harsányi E, Nagy J, Lengyel L, Széles A. Optimizing nitrogen fertilization in maize production to improve yield and grain composition based on NDVI vegetation assessment. *Agriculture*. 2025; 15(21): 2279. <https://doi.org/10.3390/agriculture15212279>.
- [18] Zhao X, Li Y. The research on dynamic monitoring and precise fertilization model of rice nitrogen demand based on big data and artificial intelligence: innovative applications of real-time tracking and intelligent decision-making. *Advances in Resources Research*. 2025; 5(1): 255-278. https://doi.org/10.50908/arr.5.1_255.
- [19] Ndour A, Gebrekidan BH, Silva JV, Sida TS. AI-powered location-specific fertilizer recommendation using data-driven machine and large language model (LLM) for maize and wheat in Ethiopia: Genesis of TeroAI. *Texcoco (Mexico): International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT)*; 2025. Available from: <https://hdl.handle.net/10883/36259>.

- [20] He L, Yan Y, Liu J, Zhao C. Intelligent decision-making for field crop production. *Tsinghua Science and Technology*. 2026; 31(3): 1393-1410. <https://doi.org/10.26599/TST.2025.9010168>.
- [21] Li Y, Wang C, Zhu J, Wang Q, Liu P. Classification of nitrogen-efficient wheat varieties based on UAV hyperspectral remote sensing. *Plants*. 2025; 14(13): 1908. <https://doi.org/10.3390/plants14131908>.
- [22] Panumonwatee G, Choosumrong S, Pampasit S, Premprasit R, Nemoto T, Raghavan V. Machine learning technique for carbon sequestration estimation of mango orchards area using Sentinel-2 data. *Carbon Research*. 2025; 4(1):33. <https://doi.org/10.1007/s44246-025-00201-z>.
- [23] Toscano F, Fiorentino C, Santana LS, Magalhães RR, Albiero D, Tomáš Ř, et al. Recent developments and future prospects in the integration of machine learning in mechanised systems for autonomous spraying: a brief review. *AgriEngineering*. 2025; 7(5):142. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050142>.
- [24] Emara EIR, Al-Saeed AM, Hamed LMM. AI-driven decision support system enhances productivity, water use efficiency, and soil sustainability of strategic crops in sandy soils. *Agricultural Water Management*. 2026; 325: 110198. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2026.110198>.
- [25] Buchanan GM, Butchart SHM, Dutson G, Pilgrim JD, Steininger MK, Bishop KD, et al. Using remote sensing to inform conservation status assessment: estimates of recent deforestation rates on New Britain and the impacts upon endemic birds. *Biological Conservation*. 2008; 141(1): 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.08.023>.
- [26] Newman ME, McLaren KP, Wilson BS. Assessing deforestation and fragmentation in a tropical moist forest over 68 years: the impact of roads and legal protection in the Cockpit Country, Jamaica. *Forest Ecology and Management*. 2014; 315: 138-152. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.033>.
- [27] Dominguez D, del Villar LJ, Pantoja O, González-Rodríguez M. Forecasting Amazon rain-forest deforestation using a hybrid machine learning model. *Sustainability*. 2022; 14(2): 691. <https://doi.org/10.3390/su14020691>.