Sustainable Information Retrieval and Green Artificial Intelligence: A Solution for Environmentally-Friendly Computing

Niloofar Mozafari*
PhD in Artificial Intelligence; Assistant Professor;
Islamic World Science & Technology Monitoring and Citation Institute (ISC); Shiraz, Iran Email: mozafari@isc.ac

Seyed Yasin Shariati Alsaadi
Undergraduate Student in Computer Engineering;
Shiraz University; Shiraz, Iran Email: s.yasin.shariati@gmail.com

Iranian Journal of Information Processing and Management

Iranian Research Institute for Information Science and Technology (IranDoc)
ISSN 2251-8223
eISSN 2251-8231
Indexed by SCOPUS, ISC, & LISTA
Vol. 40 | No. 4 | pp. 1079-1112
Summer 2025
https://doi.org/10.22034/jipm.2025.2052948.1937

Received: 09, Feb. 2025 **Accepted: 23, May 2025**

Abstract: Information retrieval plays a fundamental role in organizing and searching data across various information systems including digital libraries, search engines, recommender systems, and online platforms. These systems are widely used to facilitate access to information across different scales, including in scientific, commercial, and social domains. However, the use of complex models such as deep neural networks and large language models, which require high computational power and rely on powerful hardware has introduced new challenges related to energy consumption and environmental impact.

This paper addresses these challenges and explains the concept of green artificial intelligence. Green AI is presented as an approach to developing intelligent algorithms and systems while considering the limitations of energy resources and their environmental impact. Given the recent advancements in AI technologies, particularly in natural language processing and deep learning, it is essential to focus on the environmental impacts of these models. Specifically, the increased energy consumption and greenhouse gas emissions during the training and inference processes of complex models necessitate innovative approaches to mitigate these effects. The paper also introduces the concept of sustainable information retrieval and presents methods for measuring greenhouse gas emissions and strategies to reduce these emissions in information retrieval processes. The findings of this study indicate that in recent years, interest in green artificial intelligence has grown significantly with the number of published articles in this field increasing from 1 article in 2015 to 276 articles in 2024. A content analysis of the articles reveals that most researches have focused on energy efficiency (67%) and carbon reduction (24%), while other environmental aspects such as ecological footprint, have received less attention. In terms of scientific disciplines the highest contributions

* Corresponding Author

have come from the fields of energy, computer science, engineering, and decision sciences, respectively, highlighting the interdisciplinary and practical nature of this domain.
The primary objective of this paper is to raise awareness within the scientific community about the importance of minimizing environmental impacts when designing and implementing information retrieval systems. The paper emphasizes that researchers and system designers should consider environmental effects alongside system performance and accuracy. To achieve sustainable information retrieval, energy consumption and costs can be reduced by optimizing algorithms, reusing pre-trained models and leveraging cloud computing. These approaches not only reduce costs and improve system efficiency but also contribute to environmental sustainability. Furthermore, the paper encourages researchers to consider environmental impacts as a critical parameter in their research processes.

Keywords: Green Artificial Intelligence, Sustainable Information Retrieval, Greenhouse Gas Emissions, Red Artificial Intelligence, Neural Networks

بازیابی اطلاعات پایدار و هوش مصنوعی سبز:
راهکاری به‌سوی محاسبات سازگار با محیط زیست

نیلوفر مظفری | دکتری هوش مصنوعی؛ استادیار؛ مؤسسه استنادی و پایش علم و فناوری جهان اسلام (ISC)؛ شیراز، ایران؛ پدیدآور رابط mozafari@isc.ac

سید یاسین شریعتی آلسعدی | دانشجوی کارشناسی مهندسی کامپیوتر؛ دانشگاه شیراز؛ شیراز، ایران s.yasin.shariati@gmail.com

پژوهش‌نامهٔ پردازش و مدیریت اطلاعات

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱ | پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳ | مقاله برای اصلاح به مدت ۲۷ روز نزد پدیدآوران بوده است.

چکیده: بازیابی اطلاعات در سامانه‌های مختلف اطلاعاتی از جمله کتابخانه‌های دیجیتال، موتورهای جست‌وجو، سامانه‌های توصیه‌گر و پلتفرم‌های آنلاین، نقشی اساسی در سازماندهی و جست‌وجوی اطلاعات ایفا می‌کنند. این سامانه‌ها به‌طوری گسترده برای تسهیل دسترسی به اطلاعات در مقیاس‌های مختلف از جمله در حوزه‌های علمی، تجاری و اجتماعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، استفاده از مدل‌های پیچیده‌ای مانند شبکه‌های عصبی عمیق و مدل‌های زبان بزرگ، که به‌دلیل نیاز به توان پردازشی بالا از سخت‌افزارهای قدرتمندی بهره‌مند هستند، چالش‌های جدیدی در زمینه مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی به‌وجود آورده است.

این مقاله که به‌صورت مروری نظام‌مند تدوین شده، به بررسی این چالش‌ها پرداخته و مفهوم هوش مصنوعی سبز را معرفی می‌کند. هوش مصنوعی سبز به‌عنوان رویکردی برای توسعه الگوریتم‌ها و سامانه‌های هوشمند با توجه به محدودیت‌های منابع انرژی و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها مطرح شده است. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه در زمینه‌های پردازش زبان طبیعی و یادگیری عمیق، توجه به تأثیرات زیست‌محیطی این مدل‌ها ضروری به نظر می‌رسد. از سوی دیگر، افزایش مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای در فرایندهای آموزشی و استنتاج مدل‌های پیچیده، نیازمند رویکردهای نوآورانه برای کاهش این اثرات است. در این پژوهش مفهوم بازیابی اطلاعات پایدار معرفی شده و روش‌های اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای و راهبردهای کاهش این گازها در فرایندهای بازیابی اطلاعات ارائه می‌گردد.

یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که طی سال‌های اخیر، توجه به هوش

نشریهٔ علمی | رتبهٔ بین‌المللی
پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران
(ایرانداک)
شاپا (چاپی) ۸۲۲۳-۲۲۵۱
شاپا (الکترونیکی) ۸۲۳۱-۲۲۵۱
نمایه در LISTA، ISC، و SCOPUS
jipm.irandoc.ac.ir
دورهٔ ۴۰ | شمارهٔ ۴ | ص‌ص ۱۰۷۹-۱۱۱۲
تابستان ۱۴۰۴
https://doi.org/10.22034/jipm.2025.2052948.1937

مصنوعی سبز رشد چشمگیری داشته و تعداد مقالات منتشرشده در این حوزه از ۱ مقاله در سال ۲۰۱۵ به ۲۷۶ مقاله در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته است. بررسی محتوایی مقالات نیز بیانگر آن است که بیشترین تمرکز پژوهش‌ها بر بهره‌وری انرژی (۶۷ درصد) و کاهش کربن (۲۴ درصد) بوده و سایر جنبه‌های زیست‌محیطی مانند رد پای بوم‌شناختی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از نظر حوزه‌های علمی نیز بیشترین مشارکت به‌ترتیب از حوزه‌های انرژی، علوم رایانه، مهندسی و علوم تصمیم‌گیری بوده است که نشان‌دهنده ماهیت میان‌رشته‌ای و کاربردی این حوزه است

هدف اصلی این مقاله، جلب توجه جامعه علمی به اهمیت کاهش اثرات زیست‌محیطی در طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های بازیابی اطلاعات است. به‌ویژه، بر این نکته تأکید می‌شود که محققان و طراحان سامانه‌های بازیابی اطلاعات باید افزون بر تمرکز بر کارایی و دقت سامانه‌ها، اثرات زیست‌محیطی آن‌ها را نیز در نظر بگیرند. در این راستا، برای ایجاد بازیابی اطلاعات پایدار می‌توان با بهینه‌سازی الگوریتم‌ها، استفاده مجدد از مدل‌های پیش‌آموزش‌دیده و بهره‌گیری از محاسبات ابری مصرف انرژی و هزینه‌ها را کاهش داد. این رویکردها نه‌تنها موجب کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی سامانه‌ها می‌شود، بلکه گامی مؤثر در جهت پایداری زیست‌محیطی نیز خواهند بود. افزون بر این، این مقاله به محققان پیشنهاد می‌کند که در فرایند تحقیقاتی خود، اثرات زیست‌محیطی را به‌عنوان یک پارامتر حیاتی در نظر بگیرند

کلیدواژه‌ها: هوش مصنوعی سبز، بازیابی اطلاعات پایدار، انتشار گازهای گلخانه‌ای، هوش مصنوعی قرمز، شبکه‌های عصبی

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، سامانه‌های بازیابی اطلاعات[1] و موتورهای جست‌وجو[2] به کمک هوش مصنوعی[3] و یادگیری ماشین[4]، تحولات چشمگیری را تجربه کرده و به بخشی جدایی‌ناپذیر از زندگی روزمره کاربران تبدیل شده‌اند (Zhai 2024). این سامانه‌ها نه‌تنها دسترسی به اطلاعات را سریع‌تر و دقیق‌تر کرده‌اند، بلکه از طریق ارائه خدمات شخصی‌سازی‌شده، تجربه کاربری[5] بهتری را نیز فراهم آورده‌اند. یکی از اصلی‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی در موتورهای جست‌وجو، رتبه‌بندی نتایج جست‌وجو بر اساس نیازهای کاربر است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند با تحلیل رفتار کاربر، مانند کلیک‌ها، زمان

1. information retrieval system
2. search engine
3. artificial intelligence
4. machine learning
5. user experience

صرف‌شده روی صفحات و تاریخچه جست‌وجوها، نتایجی را که به احتمال، بیشترین ارتباط را با نیاز او دارند، نمایش دهند. به‌عنوان مثال، موتور جست‌وجویی مانند گوگل از مدل‌های پیشرفته زبان، مانند «برت»[1] (Kenton & Toutanova 2019)، (Koroteev 2021) و GPT (Achiam et al. 2023)، برای درک بهتر پرسش‌های کاربران و ارائه پاسخ‌های دقیق‌تر استفاده می‌کند (Wang et al. 2024). این مدل‌ها با پردازش انبوهی از داده‌ها و تحلیل معنایی عمیق، تجربه جست‌وجو را به سطح جدیدی ارتقا داده‌اند (Fitria 2023).

در سامانه‌های بازیابی اطلاعات خاص‌منظوره، مانند جست‌وجو در پایگاه‌های علمی، یادگیری ماشین نقش مهمی در استخراج اطلاعات مرتبط دارد. به‌عنوان مثال، در سامانه‌هایی که برای پژوهشگران طراحی شده‌اند، الگوریتم‌های هوشمند می‌توانند با تحلیل عبارات کلیدی و اهداف کاربر، مقالات، گزارش‌ها و داده‌های مرتبط را پیشنهاد دهند. این امر نه‌تنها موجب صرفه‌جویی در زمان می‌شود، بلکه کیفیت پژوهش را نیز بهبود می‌بخشد (Musaev et al. 2024).

سامانه‌های جست‌وجوی چندوجهی که قادرند از انواع مختلف داده‌ها مانند متن، تصویر، ویدئو و صوت استفاده کنند، نمونه‌ای دیگر از پیشرفت‌های به‌دست‌آمده در این زمینه هستند. این سامانه‌ها با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق، اطلاعات موجود در قالب‌های مختلف را تحلیل کرده و نتایج دقیقی ارائه می‌دهند. برای مثال، یک کاربر می‌تواند تصویری را بارگزاری کرده و اطلاعات مرتبط با آن را جست‌وجو کند، یا از طریق جست‌وجوی صوتی، پاسخ‌های مورد نظر خود را دریافت نماید (Mandl & Struß 2024).

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر سامانه‌های بازیابی اطلاعات به‌واسطهٔ به‌کارگیری مدل‌های یادگیری عمیق، این سامانه‌ها با چالش‌های زیست‌محیطی روبه‌رو هستند؛ چرا که آموزش و اجرای این مدل‌ها به منابع محاسباتی قابل توجهی نیاز دارند که به مصرف بالای انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود. مراکز داده‌ای که این سامانه‌ها را پشتیبانی می‌کنند، به‌ویژه در مقیاس جهانی، تأثیرات زیست‌محیطی قابل توجهی دارند (Bolón-Canedo et al. 2024). برای مقابله با این چالش‌ها، توسعه سامانه‌های بازیابی اطلاعاتِ پایدار ضروری است. این سامانه‌ها باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که افزون بر

1. BERT

حفظ کارایی و دقت، مصرف منابع زیست‌محیطی و محاسباتی را کاهش دهند. به‌عنوان مثال، می‌توان با استفاده از مدل‌های فشرده‌تر و الگوریتم‌های سبک‌تر، میزان مصرف انرژی را کاهش داد. همچنین، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین برق مراکز داده، گامی مؤثر در جهت کاهش ردپای کربنی این سامانه‌ها خواهد بود (Kannan & Patel 2024). سرانجام، ترکیب هوش مصنوعی سبز با سامانه‌های بازیابی اطلاعات می‌تواند نقشی کلیدی در ایجاد فناوری‌هایی ایفا کند که هم پاسخگوی نیازهای کاربران باشند و هم در حفظ محیط زیست و پایداری آن سهیم شوند. این مسیر نه‌تنها به توسعه فناوری کمک می‌کند، بلکه مسئولیت اجتماعی در قبال زمین و نسل‌های آینده را نیز به رسمیت می‌شناسد (Bolón-Canedo et al. 2024).

هدف این پژوهش بررسی چالش‌ها و نگرانی‌های مربوط به اثرات زیست‌محیطی هوش مصنوعی بر محیط زیست است. با توجه به رشد روزافزون کاربردهای هوش مصنوعی در صنایع مختلف، مسئله پایداری و تأثیرات آن بر منابع طبیعی و مصرف انرژی به یکی از دغدغه‌های اصلی محققان و سیاست‌گذاران تبدیل شده است. این مطالعه در مرحله نخست به بررسی راهکارهایی می‌پردازد که از طریق آن‌ها هوش مصنوعی می‌تواند به کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک کند. سپس، مفهوم هوش مصنوعی سبز به‌عنوان رویکردی برای توسعه مدل‌های هوش مصنوعی با حداقل مصرف انرژی و بیشترین کارایی معرفی و تحلیل می‌شود. سرانجام اینکه پژوهش حاضر به بررسی مفهوم بازیابی اطلاعات پایدار پرداخته و نقش آن را در توسعه سیستم‌های اطلاعاتی کم‌مصرف و بهینه از نظر زیست‌محیطی مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

هدف اصلی این مقاله این است که محققان را به تفکر در مورد کاهش مصرف انرژی و استفاده بهینه از منابع در فرایندهای تحقیقاتی خود ترغیب کرده و راهکارهایی برای توسعه فناوری‌های پایدار در حوزه بازیابی اطلاعات و هوش مصنوعی پیشنهاد کند. همچنین در این مقاله، سؤالات پژوهشی زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند:

۱. روند رشد و توزیع انتشارات علمی در حوزه هوش مصنوعی سبز طی دههٔ گذشته چگونه بوده و کدام نوع منبع علمی بیشترین سهم را داشته است؟
۲. در میان تعاریف و رویکردهای مختلف مرتبط با هوش مصنوعی سبز، کدام جنبه‌ها بیشترین تمرکز پژوهشی را در مطالعات علمی به خود اختصاص داده‌اند؟
۳. مقالات منتشرشده در حوزه هوش مصنوعی سبز چگونه در میان حوزه‌های مختلف

علمی توزیع شده‌اند و کدام حوزه‌ها بیشترین سهم موضوعی را به خود اختصاص داده‌اند؟

۲. مبانی نظری

در این بخش، به بررسی نقش هوش مصنوعی در توسعه راهکارهای نوآورانه به‌منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی پرداخته می‌شود. همچنین، در ادامه، تعریف هوش مصنوعی سبز ارائه خواهد شد

۲-۱. هوش مصنوعی در توسعه راهکارهای نوآورانه برای کاهش اثرات زیست‌محیطی

هوش مصنوعی پتانسیل زیادی در زمینه کمک به تحقق برنامه سبز و کاهش همزمان تأثیرات زیست‌محیطی دارد. هوش مصنوعی می‌تواند نقش کلیدی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش بهره‌وری در بخش‌های مختلف از جمله تولید و مصرف انرژی، کشاورزی، استفاده از اراضی، مدیریت تنوع زیستی، ارتباطات، حمل‌ونقل و تحرکِ هوشمند ایفا کند. افزون بر این، کاربرد روزافزون هوش مصنوعی به مقابله با تغییرات اقلیمی و سازگاری با آن به‌طور مؤثر کمک می‌کند؛ به‌طوری‌که ابزارهای پیش‌بینی قوی، تاب‌آوری و مدیریت راهبردی را فراهم می‌آورد. به‌عنوان مثال، «وینوسا» و همکاران در تحلیلی از تأثیر هوش مصنوعی در دستیابی به اهداف توسعه پایدار سازمان ملل به این نتیجه رسیدند که هوش مصنوعی می‌تواند در دستیابی به ۱۳۴ هدف تسهیل‌کننده باشد؛ در حالی که می‌تواند در ۵۹ هدف به‌منزلهٔ مانع عمل کند (Vinuesa et al. 2020).

یکی از کاربردهای اصلی که هوش مصنوعی می‌تواند به‌طور گسترده برای بهبود پایداری استفاده شود، بهره‌وری انرژی است. در واقع، کاهش مصرف انرژی یکی از چالش‌های کلیدی برای ایجاد یک جامعه پایدار است. هوش مصنوعی، به‌ویژه از طریق شبکه‌های هوشمند می‌تواند به‌طور بالقوه نیاز کلی به برق را با بهینه‌سازی هماهنگی بین تولید برق منطقه‌ای و تقاضای محلی کاهش دهد. بر خلاف شبکه‌های سنتی که جریان یک‌طرفهٔ برق از تولیدکنندگان به مصرف‌کنندگان را تسهیل می‌کنند، شبکه‌های هوشمند امکان تغییر در اندازه و جهت جریان برق را فراهم می‌آورند. این تعادلِ مداوم بین عرضه و تقاضا باعث افزایش بهره‌وری کلی می‌شود. همچنین هوش مصنوعی سبز می‌تواند به بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی در ساختارها کمک کند. مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند

داده‌های حسگری از ساختمان‌های هوشمند (Qolomany et al. 2019) و شهرها (Zekić-Sušac, Mitrović & Has 2021) را تجزیه‌وتحلیل کنند تا سامانه‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع، روشنایی و الگوهای مصرف انرژی را بهینه‌سازی کنند تا در انتها به صرفه‌جویی قابل توجه در انرژی و کاهش انتشار کربن منجر شود (Milojevic-Dupont & Creutzig 2021).

هوش مصنوعی نقش حیاتی در پیشرفت تحرک هوشمند و تبدیل سامانه‌های حمل‌ونقل سنتی به شبکه‌های کارآمد، پاسخگو و پایدار ایفا می‌کند. با رشد روزافزون جمعیت شهری، چالش‌ها در شهرهای بزرگ مانند ترافیک و آلودگی محیط زیست افزایش می‌یابد. شهرهای هوشمند می‌توانند این مشکلات را کاهش دهند و در عین حال، رشد اقتصادی را تقویت کرده و کیفیت کلی زندگی برای ساکنان را بهبود بخشند (Chen et al. 2022). با تجزیه‌وتحلیل داده‌های بلادرنگ، هوش مصنوعی می‌تواند الگوهای ترافیکی را پیش‌بینی کند، مسیرها را بهینه‌سازی کرده و از ازدحام ترافیک جلوگیری نماید. هوش مصنوعی همچنین به توسعه خودروهای خودران کمک می‌کند، ایمنی و کارایی آن‌ها را بهبود می‌بخشد و در عین حال، تصادفات ترافیکی را کاهش می‌دهد. به‌عنوان مثال، «وو» و همکاران از یادگیری تقویتی برای طراحی کنترل‌کننده‌های خودروهای خودران استفاده کردند که به‌طور مؤثر تعاملات ترافیکی را مدیریت می‌کنند (Wu et al. 2017). ادغام هوش مصنوعی با سامانه‌های حمل‌ونقل شهری، تحرک هوشمند و پیاده‌سازی خدمات حمل‌ونقل اشتراکی را تسهیل می‌کند و از ایجاد روش‌های حمل‌ونقل دوستدار محیط زیست پشتیبانی به عمل می‌آورَد؛ به‌طوری که به ایجاد یک محیط شهری پایدارتر و متصل‌تر کمک می‌رساند (Bolón-Canedo et al. 2024).

هوش مصنوعی می‌تواند در کشاورزی نیز به توسعه پایدار کمک کند. در واقع، با کمک هوش مصنوعی می‌توان اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت سلامت محصولات، شرایط خاک و نیازهای آبیاری به‌دست آورد. این اطلاعات به کشاورزان امکان می‌دهد که از منابع آب، کود و سموم به‌طور دقیق و هدفمند استفاده کنند و در نتیجه، تأثیرات زیست‌محیطی را کاهش دهند و کارایی منابع را افزایش دهند. تجزیه‌وتحلیل پیش‌بینی‌کننده مبتنی بر هوش مصنوعی همچنین در پیش‌بینی عملکرد محصولات و تشخیص بیماری‌ها کمک می‌کند و به کشاورزان این امکان را می‌دهد که مداخلات به‌موقع انجام دهند و خسارات را به حداقل برسانند (Sharma et al. 2020).

در مبارزه با تغییرات اقلیمی، هوش مصنوعی سهم قابل توجهی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و سازگاری با تغییرات اقلیمی در حوزه‌های مختلف دارد (Rolnick et al. 2022). از آنجا که سامانه‌های برق سالانه تقریباً ۲۵ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای انسانی را به خود اختصاص می‌دهند (Change 2014)، تکنیک‌های یادگیری ماشین برای حل این مشکل به‌کار رفته‌اند. به‌عنوان مثال، روش‌های پیش‌بینی مختلفی برای پیش‌بینی تقاضای کوتاه‌مدت تا میان‌مدت (Hong & Fan 2016) و دسترس‌پذیری انرژی خورشیدی (Ahmed et al. 2020)، و باد (Giebel & Kariniotakis 2017) به‌کار رفته‌اند. این روش‌ها شامل داده‌های تاریخی، خروجی‌های مدل‌های فیزیکی، تصاویر و داده‌های ویدیوئی هستند که از تکنیک‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده[1]، منطق فازی[2] و مدل‌های فیزیکی ترکیبی برای تجزیه‌وتحلیل استفاده می‌کنند.

ادغام هوش مصنوعی در طراحی سیاست‌های زیست‌محیطی یک رویکرد تحول‌آفرین برای بهبود پایداری در بخش‌های مختلف است. قابلیت‌های تحلیلی هوش مصنوعی همراه با توانایی آن در پردازش داده‌های عظیم به سیاست‌گذاران این امکان را می‌دهد که راهبردهای مؤثرتری برای حفاظت از محیط زیست و مدیریت منابع تدوین کنند. با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، هوش مصنوعی می‌تواند الگوها را شناسایی کند، روندها را تشخیص دهد، و نتایج بالقوه را پیش‌بینی نماید. این امر به‌نوبه خود، امکان سیاست‌هایی را فراهم می‌آورد که نه‌تنها به چالش‌های کنونی پاسخ می‌دهند، بلکه نیازهای زیست‌محیطی آینده را نیز پیش‌بینی می‌کنند (Sánchez-Maroño et al. 2022).

یکی دیگر از فناوری‌هایی که می‌توان در این حوزه استفاده کرد، مدل‌سازی مبتنی بر عامل است که امکان طراحی راهبردهای هدفمند برای مشارکت شهروندان در تغییرات ضروری را با توجه به ارزش‌های جمعی و فردی برای شناسایی رفتارهای نوظهور از تعاملات و تغییرات کوچک شخصی فراهم می‌آورَد (Jager et al. 2024)

طراحی سیاست‌های مبتنی بر هوش مصنوعی ابزاری قدرتمند در مسیر توسعه پایدار در بهینه‌سازی مصرف انرژی تا پیاده‌سازی شیوه‌های سازگار با محیط زیست در برنامه‌ریزی شهری است. دقت و انطباق‌پذیری ذاتی سامانه‌های هوش مصنوعی این وعده را می‌دهند

1. supervised machine learning
2. fuzzy logic

کـه عصـر جدیـدی از نوآوری‌هـای سیاسـتی را بـه ارمغـان آورنـد؛ جـایی کـه بینش‌هـای مبتـنی بـر داده بـه تقویـت جامعـه‌ای مقـاوم و آگاه از محیـط زیسـت کمـک می‌کننـد

۲-۲. هوش مصنوعی سبز

در بخـش پیـش نشـان داده شـد کـه هـوش مصنـوعی چگونـه تلاش می‌کنـد بـا ترکیـب بـا دیگـر رشـته‌ها بـه پایـداری و کاهـش مصـرف انـرژی کمـک کنـد. امـا بایـد توجـه داشـت کـه به‌رغـم تلاش‌هـا و کاربردهـای مختلـف هـوش مصنـوعی در بخش‌هـای مختلـف بـرای بهبـود پایـداری، خـودِ سـامانه‌های هـوش مصنـوعی بـه نیـروی ضـد منطـقی تبدیـل نشـوند کـه نیازمنـد مقادیـر زیـادی انـرژی باشـند

بـرای اینکـه هـوش مصنـوعی به‌طـور واقـعی بـه ابـزاری بـرای کاهـش مصـرف انـرژی تبدیـل شـود، بایسـتی بـه کارایی الگوریتم‌هـا و فرایندهـای محاسـباتی هـوش مصنـوعی توجـه کـرد. ایـن بـدان معناسـت کـه بایـد از راه‌حل‌هـای هـوش مصنـوعی اسـتفاده کـرد؛ راه‌حل‌هـایی کـه نه‌تنهـا در بهینه‌سـازی مصـرف انـرژی در بخش‌هـای دیگـر مؤثـر باشـند، بلکـه خـود نیـز حتی‌الامـکان از انـرژی کـمی اسـتفاده کننـد. حفـظ ایـن تعـادل ضـروری اسـت تـا هـوش مصنـوعی به‌جـای تشـدید مشـکلاتی کـه قـرار اسـت آن‌هـا را برطـرف کنـد، در جهـت دسـتیابی بـه اهـداف پایـداری مؤثـر باشـد و ایـن موضـوعی اسـت کـه تفـاوت هـوش مصنـوعی سـبز و هـوش مصنـوعی قرمـز را مشـخص می‌کنـد (Bolón-Canedo et al. 2024).

هـوش مصنـوعی قرمـز مفهـومی اسـت کـه در مقابـل هـوش مصنـوعی سـبز قـرار می‌گیـرد. ایـن اصـطلاح بـه توسـعه و اسـتفاده از مدل‌هـای هـوش مصنـوعی بـدون در نظـر گرفتـن مصـرف انـرژی، هزینه‌هـای محاسـباتی و اثـرات زیسـت‌محیطی اشـاره دارد. ایـن مفهـوم بـر اسـاس تحلیـلی از ۶۰ مقالـه ارائه‌شـده در معتبرتریـن کنفرانس‌هـا به‌دسـت آمـده و نشـان می‌دهـد کـه بخـش عظیـمی از مقـالات (بیـن ۷۵ درصـد تـا ۹۰ درصـد بسـته بـه کنفرانـس) دقـت را بـر کارایی ترجیـح داده‌انـد. یـک مطالعـه در سـال ۲۰۱۸ نشـان می‌دهـد کـه نیازهـای محاسـباتی بـرای آمـوزش مدل‌هـای بـزرگ یادگیـری ماشیـن از سـال ۲۰۱۲ هـر ۳ تـا ۴ مـاه دو برابـر شـده‌اند (Bolón-Canedo et al. 2024; Jain, Sharma & Kaushik 2022 و Schwartz et al. 2019). بـا ایـن حـال، مصـرف انـرژی الگوریتم‌هـای هـوش مصنـوعی و یادگیـری ماشیـن نبایـد به‌عنـوان یـک چالـش غیرقابـل حـل تلـقی شـود و نبایـد آن را هزینـه‌ای اجتناب‌ناپذیـر در مسیـر پیشـرفت ایـن حـوزه دانسـت. هـوش مصنـوعی سـبز رویکـردی نوآورانـه در تحقیقـات هـوش مصنـوعی

است که هدف آن نه‌تنها تولید نتایج کارآمد و مؤثر، بلکه بهینه‌سازی مصرف منابع محاسباتی است که در بهترین حالت، با کاهش هزینه‌های محاسباتی یا حداقل جلوگیری از افزایش آن انجام می‌گیرد

۲-۳. بازیابی اطلاعات پایدار

اگرچه تحقیقات و توسعه در مورد کتابخانه‌های دیجیتال و خدمات اطلاعات آنلاین در سال‌های گذشته گسترش یافته، اما هنوز بخشی از صنعت و خدمات اطلاعات همچنان بر منابع اطلاعات چاپی متکی است و مقدار زیادی انرژی مصرف می‌کند (Chowdhury 2012a & b). مصرف انرژی به‌طور مستقیم با مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای یا GHG[1] مرتبط است که تعاریف گوناگونی دارد. برخی فقط به انتشار گاز CO_2 توجه دارند؛ اما برخی هم به تمامی گازهای مضر گلخانه‌ای اشاره می‌کنند. انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌طور معمول، بر حسب «تن متریک معادل دی‌اکسید کربن» یا $mTCO_2e$ که در واقع، واحدی برای اندازه‌گیری و مقایسه اثر گازهای گلخانه‌ای مختلف بر گرمایش زمین است، اندازه‌گیری می‌شود. این مقیاس تمامی گازهای گلخانه‌ای را شامل می‌شود و مقدار هر یک را بر اساس تأثیر گرمایش جهانی آن‌ها به معادل CO_2 تبدیل می‌کند، تا یک مقدار کلی و قابل مقایسه ارائه شود (Legg 2021)

برای توسعه پایدار باید اجزای آن یعنی پایداری محیط زیست، و پایداری اقتصادی و اجتماعی را در نظر گرفت که در سال‌های اخیر پایداری محیط زیست بسیار مورد توجه جهان بوده و در این مقاله نیز این جنبه مورد توجه است. «هیئت بین دولتی تغییرات اقلیمی»[2] یک نهاد تحقیقاتی و مشورتی علمی بین دولتی است که در حال حاضر ۱۹۵ کشورِ عضو دارد و وظیفه آن بررسی و ارزیابی اطلاعات علمی، فنی و اقتصادی اجتماعی تولیدشده در سراسر جهان در مورد مسئله تغییرات اقلیمی است و گزارش‌های دقیقی از مقدار انتشار GHG ارائه داده و تأثیرات آینده آن را مورد بحث قرار می‌دهد

در توسعه پایدار، افزون بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای یا GHG یا معادل آن بر اساس CO_2، مصرف آب ناشی از فرایند تولید انرژی و خنک‌سازی مراکز داده‌ای که مدل‌های یادگیری ماشین در آن‌ها اجرا می‌شوند نیز باید در نظر گرفته شود. این جنبه‌ها

1. greenhouse gas (GHG)
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

نگرانی‌هـایی را دربـاره تأثیـرات زیسـت‌محیطی بازیـابی اطلاعـات به‌وجـود آورده‌انـد (Scells, Zhuang & Zuccon 2022). بـا توجـه بـه اینکـه کمبـود آب و دوره‌هـای خشک‌سـالی بـه مسـائل جهـانی فزاینـده‌ای تبدیـل شـده (World Health Organization 2019 و Zhang et al. 2019)، بـررسی و ارزیـابی مصـرف آبِ مدل‌هـای بازیـابیِ اطلاعـات در کنـار مصـرف انـرژی و انتشـار CO_2، بـه پژوهـشی ضـروری تبدیـل شـده اسـت

«کارل-اتـو گنـش» بـر اسـاس مطالعـات مختلـف تحقیقـاتی محاسـبه کـرده اسـت کـه تولیـد ده کتـاب ۲۰۰ صفحـه‌ای از کاغـذ بـا الیـاف تـازه حـدود ۱۱ کیلوگـرم CO_2 منتشـر می‌کنـد. بـرای کتاب‌هـایی کـه از کاغـذ بازیافتی سـاخته شـده‌اند، ایـن مقـدار حـدود دو کیلوگـرم کمتـر اسـت و بـه ۹ کیلوگـرم CO_2 می‌رسـد (Carl-Otto Gensch نقـل در Oeko-Institut 2020). به‌تقریـب، نیـمی از انـرژی مـورد نیـاز بـرای تولیـد کتـاب، صـرف تولیـد کاغـذ آن می‌شـود؛ حـتی در مـورد کتاب‌هـایی کـه روی کاغـذ بازیافـتی چـاپ شـده‌اند. زیـرا پـردازش کاغـذ باطلـه فراینـدی پیچیـده و پرهزینـه از نظـر انـرژی اسـت. بـا ایـن حـال، اسـتفاده از کاغـذ بازیافـتی بـرای محیـط زیسـت بهتـر از قطـع درختـان بـرای تولیـد کاغـذ جدیـد اسـت. بسـیاری از کتاب‌هـا اطلاعـاتی دربـاره نـوع کاغـذ مـورد اسـتفاده در چـاپ آن‌هـا ارائـه می‌دهنـد. به‌طـور کلی، کتاب‌هـای جلـد شُـمیز[1] نسـبت بـه نسـخه‌های جلـد مقـوایی[2] دوسـتدار محیـط زیسـت هسـتند؛ زیـرا تولیـد جلـد مقـوایی دو برابـر بیشـتر از جلـد شـمیز منابـع مصـرف می‌کنـد. کتـاب هرچـه بیشـتر و بـرای مـدت طولانی‌تـری اسـتفاده شـود، چـاپ آن روی کاغـذ محکـم و بـادوام به‌صرفه‌تـر اسـت. اولویت‌بنـدی در حفاظـت از محیـط زیسـت همیشـه بـه ایـن ترتیـب اسـت: پرهیـز، کاهـش، جبـران. یعـنی بهتریـن کار ایـن اسـت کـه کتاب‌هـای جدیـد نخریـم، بلکـه آن‌هـا را از بازارهـای دسـت دوم تهیـه کنیـم. یـا از کتابخانه‌هـا، دوسـتان، و سـامانه‌های تبـادل کتـاب عمـومی قـرض بگیریـم و در مقابـل، کتاب‌هـای خـود را نیـز در اختیـار دیگـران بگذاریـم. در ایـن صـورت، مصـرف منابـع و آلـودگی زیسـت‌محیطی نـاشی از تولیـد کتـاب بیـن کاربـران متعـددی تقسیـم می‌شـود (Oeko-Institut 2020).

محتـوای چـاپی مقـدار قابـل توجـهی از گازهـای گلخانـه‌ای تولیـد می‌کنـد. بنابرایـن، بـرای ایجـاد خدمـات اطلاعـات سـبز، بایـد محتـوای چـاپی را بـا همتـای دیجیتـال آن جایگزیـن کنیـم

1. paperback
2. hardcover

(Chowdhury 2012c). اما این امر باعث افزایش تقاضا برای اینترنت و سامانه‌های بازیابی اطلاعات خواهد شد که مصرف انرژی را افزایش می‌دهد و بنابراین گازهای گلخانه‌ای بیشتری تولید می‌کند. برآورد مصرف انرژی اینترنت یک فرایند پیچیده است؛ زیرا به متغیرهای زیادی بستگی دارد. اما یک مطالعه در دانشگاه کالیفرنیا، برکلی برآورد می‌کند که اینترنت بین ۱۷۰ تا ۳۰۷ گیگاوات (GW) برق مصرف می‌کند که معادل ۱/۱ تا ۱/۹ درصد از کل مصرف انرژی بشریت (که حدود ۱۶ ترابایت (TW) تخمین زده می‌شود) است (Raghavan & Ma 2011)

یک مطالعه توسط «انجمن کامپیوتر استرالیا» خاطرنشان کرده است که در سال ۲۰۰۹ کاربران فناوری اطلاعات در استرالیا ۱۳/۲۴۸ میلیون کیلووات ساعت برق مصرف کرده‌اند که معادل ۱۴/۲۴۸ میلیون تن گاز CO_2 تولید کرده است و این به‌تقریب، ۲/۵ درصد از کل انتشار گاز استرالیا را (که ۵۳۹ میلیون تن در آن سال است)، تشکیل می‌دهد (Australian Computer Society 2010). در سال ۲۰۱۰، کل مصرف برق گوگل ۲/۲۶ میلیون مگاوات ساعت گزارش شده بود (Albanesius 2011). از آنجا که «گوگل» در بسیاری از کشورها دارای عملیات و سرورهای اصلی است و آن‌ها از انواع مختلف منابع انرژی با نرخ‌های مختلف انتشار گاز گلخانه‌ای استفاده می‌کنند، دشوار است که به‌طور دقیق این رقم مصرف انرژی را به معادل انتشار گاز گلخانه‌ای آن تبدیل کنیم. همچنین برآورد دقیق مصرف انرژی سامانه بازیابی اطلاعات و تأثیر آن بر محیط زیست پیچیده است؛ زیرا باید ارقام مصرف انرژی ارائه‌دهندهٔ خدمت، هزینهٔ تمام تجهیزات و خدماتی که برای ساخت و مدیریت یک خدمت جست‌وجو استفاده می‌شود، و همچنین هزینهٔ انرژی تمام تجهیزات و تسهیلاتی که برای دسترسی به خدمت استفاده می‌شود نیز محاسبه شود

با گذشت زمان، سامانه‌های بازیابی اطلاعات پیچیده‌تر شده و از مدل‌های ساده تطابق کلمات کلیدی مبتنی بر آمار (Robertson & Zaragoza 2009) به مدل‌های یادگیری برای رتبه‌بندی مبتنی بر ویژگی‌ها (Liu 2009) و به روند کنونی بازیابی اطلاعات مبتنی بر شبکه‌های عصبی (Zhu et al. 2023) تکامل یافتند. به‌ویژه اینکه مدل‌های عصبی مبتنی بر مدل‌های زبانی بزرگ، عملکرد فوق‌العاده‌ای در انواع وظایف، مانند بازیابی پاراگراف و سند، پرسش و پاسخ، بازیابی چند زبان و جست‌وجوی خاص حوزه نشان داده‌اند (Formal, Piwowarski & Clinchant 2021; Lin, Nogueira & Yates 2022 و Zhuang, Shou & Zuccon 2023)

با افزایش پیچیدگی و اندازه مدل‌ها، مصرف انرژی آن‌ها نیز افزایش یافته است (Scells, Zhuang & Zuccon 2022). نگرانی‌ها در مورد مصرف انرژی در زمینه هوش مصنوعی پس از مطالعه‌ای که توسط Strubell, Ganesh & McCallum (2020) انجام شده بود، افزایش یافت. این در واقع، از نخستین مطالعاتی بود که به استفاده بالای انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای تولیدشده توسط مدل‌های زبانی بزرگ اشاره می‌کرد. دو رویکرد برای کمّی‌سازی انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای وجود دارد: ارزیابی چرخه زندگی[1] و اندازه‌گیری مصرف انرژی (Zuccon, Scells & Zhuang 2023). ارزیابی چرخه زندگی روشی علمی برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی یک محصول، فرایند یا خدمت در طول کل چرخه عمر آن است (Hauschild, Rosenbaum & Olsen 2018). به‌دلیل پیچیدگی و تعداد منابع مورد نیاز در LCA بیشتر مطالعات انتخاب می‌کنند که مصرف انرژی را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری کنند (Chowdhury 2012a)

مدل‌های بازیابی اطلاعات مبتنی بر هوش مصنوعی به‌طور طبیعی انرژی مصرف می‌کنند و به همین دلیل ممکن است گازهای گلخانه‌ای تولید کنند. با این حال، تنها منبع محدودی که این مدل‌ها مصرف می‌کنند، انرژی نیست. در آموزش یا اجرای مدل‌های بازیابی اطلاعات، مصرف آب نیز عامل مهمی است که باید در نظر گرفته شود؛ به‌ویژه هنگامی که مدل‌های عصبی بزرگی که به‌طور فزاینده‌ای محاسباتی و پرتقاضا هستند، در حال توسعه‌اند. افزایش پیچیدگی مدل‌ها به‌دلیل پیشرفت‌های اخیر در مدل‌های هوش مصنوعی، نیاز به سرورهای قدرتمندتر را به‌دنبال داشته است. سرورهای با عملکرد بالا مقادیر زیادی گرما تولید می‌کنند که باید برای حفظ شرایط عملیاتی بهینه دفع شود. سامانه‌های خنک‌کننده سنتی به‌طور معمول، به آب وابسته هستند و از برج‌های خنک‌کننده تبخیری یا سیستم‌های آب سرد برای حفظ دما استفاده می‌کنند. در نتیجه، مصرف آب در این مراکزِ داده می‌تواند قابل توجه باشد. مصرف آب در مراکز داده به‌طور عمده به‌دلیل دو عامل متمایز انجام می‌شود: اول، به‌عنوان یک پیامد غیرمستقیم از تولید برق که به‌طور معمول از طریق منابع قدرت حرارتی به‌دست می‌آید، و دوم، به‌عنوان یک نیاز مستقیم برای سامانه‌های خنک‌کننده که به حفظ شرایط ایده‌آل عملیاتی کمک می‌کنند (Zuccon, Scells & Zhuang 2023)

1. life cycle assessment (LCA)

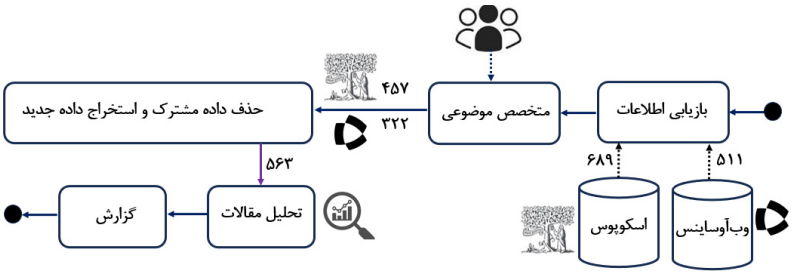
۳. روش پژوهش

در ایـن پژوهـش کـه مـروری نظام‌منـد از هـوش مصنـوعی سـبز اسـت، در مرحلـه اول از معیارهـای پیشـنهادی Okoli & Schabram (2015) اسـتفاده شـده اسـت. ایـن معیارهـا شـامل محتـوا، طـرح تحقیـق، زمینـه، زبـان، تاریـخ انتشـار، و نـوع سـند اسـت. بـر اسـاس ایـن معیارهـا، پژوهش‌هـایی انتخـاب شـدند کـه محتـوای آن‌هـا بـا هـدف پژوهـش حاضـر تطابـق داشـته و به‌عنـوان مقـالاتی معتبـر در زمینه‌هـای مختلـف، بـه زبـان انگلیسـی و در بـازه زمـانی ۱۰ سـاله بیـن سـال‌های ۲۰۱۵ تـا ۲۰۲۴ در نشـریات و کنفرانس‌هـای علـمی منتشـر شـده‌اند. در مرحلـه بعـد، بـا هـدف جسـت‌وجوی نظام‌منـد جهـت شناسـایی مقـالات، پایگاه‌هـای «اسـکوپوس»[1] و «وب‌آوسـاینس»[2] بـرای فراینـد جسـت‌وجو انتخـاب شـدند. سـپس جسـت‌وجو در ایـن پایگاه‌هـا بـا توجـه بـه فیلدهـای «عنوانـم، «کلیـدواژه» و «چکیـده» بـا ترکیـب کلیدواژه‌هـای green computing، carbon footprint، sustainable، low-carbon، energy-saving، green، environmental concerns، power saving techniques، climate change، carbon emissions، energy-efficient، greenhouse gas emission، CO2 emission و energy consumption بـا artificial intelligence و information retrieval انجـام گرفـت.

بـرای انتخـاب مقـالات متناسـب بـا اهداف پژوهـش و مطابق بـا معیارهـای از پیش تعیین‌شـده، یـک فراینـد گزینـش چندمرحلـه‌ای طـراحی و اجـرا شـد (شـکل ۱). در مرحلـه نخسـت، اطلاعـاتی همچـون عنـوان مقالـه، کلیدواژه‌هـا و چکیـده به‌عنـوان معیارهـای اولیـه غربالگـری در نظـر گرفتـه شـد. ایـن مرحلـه نقـش حیـاتی در شناسـایی اولیـه مقـالات مرتبـط بـا موضـوع پژوهـش ایفـا نمـود و امـکان حـذف مقـالات نامرتبـط را فراهـم کـرد. خـروجی ایـن مرحلـه شـامل ۵۱۱ مقالـه مسـتخرج از پایـگاه «وب‌آوسـاینس» و ۶۸۹ مقالـه از پایـگاه «اسـکوپوس» بـود. در مرحلـه دوم، فراینـد غربالگـری دقیق‌تـری انجـام شـد؛ بدین‌صـورت کـه مقـالات انتخاب‌شـده در مرحلـه نخسـت، توسـط یـک متخصـص موضـوعی مـورد بـررسی دقیـق قـرار گرفتنـد. در ایـن مرحلـه، تنهـا مقـالاتی کـه بـا حـوزه پژوهـش بیشـترین ارتبـاط مفهـومی را داشـتند، حفـظ شـدند و سـایر مقـالات حـذف گردیدنـد. ایـن مرحلـه منجـر بـه ایجـاد مجموعـه‌ای هدفمنـد از مقـالات شـد کـه بـا اهـداف پژوهـش همراسـتایی کامـل داشـتند. خـروجی ایـن مرحلـه، همان‌طـور کـه شـکل ۱،

1. Scopus
2. Web of science

نشان می‌دهد، ۴۵۷ مقاله از پایگاه «اسکوپوس» و ۳۲۲ مقاله از پایگاه «وب‌آوساینس» بود

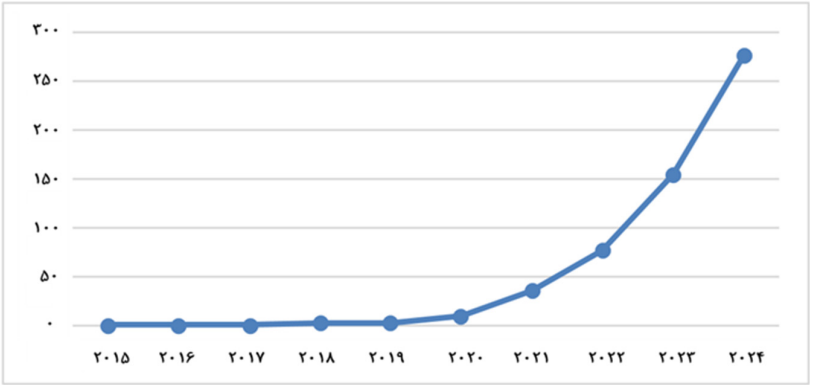


شکل ۱. روند کلی فرایند روش پژوهش

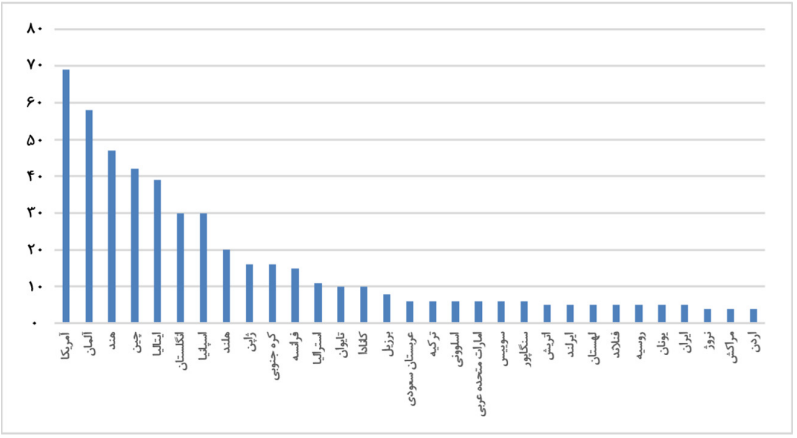
در مرحله بعد، برای جلوگیری از شمارش تکراری، همپوشانی مقالات بین پایگاه‌های مختلف مورد توجه قرار گرفت. مقالاتی که عنوان یکسانی داشتند و در یک سال در هر دو پایگاه نمایه شده بودند، با حفظ یکی از آن‌ها حذف شدند. سرانجام، ۵۶۳ مقاله منتخب از پایگاه‌های «اسکوپوس» و «وب‌آوساینس» به‌عنوان مجموعه نهایی مورد تحلیل قرار گرفت و برای تحلیل محتوای این مجموعه، از روش‌های مبتنی بر پردازش زبان طبیعی بهره‌گرفته شد

٤. یافته‌ها

در این بخش، نتایج و یافته‌های حاصل از تجزیه‌وتحلیل مقاله‌ها ارائه می‌گردد. به‌منظور پاسخ به پرسش اول مقاله که در مورد روند رشد و توزیع انتشارات علمی در حوزه هوش مصنوعی سبز طی دهه گذشته است، شکل ۲، فراوانی مقاله‌های مستخرج در سال‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، تعداد مقالات منتشرشده در حوزه هوش مصنوعی سبز و بازیابی اطلاعات پایدار در سال‌های اخیر روندی صعودی داشته و به‌طور ویژه، نگارش مقاله‌ها در این حوزه از سال ۲۰۲۳ به بعد افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد (شکل ۲). این افزایش نشان‌دهنده توجه روزافزون پژوهشگران به این حوزه و اهمیت فزاینده آن در راستای توسعه پایدار است



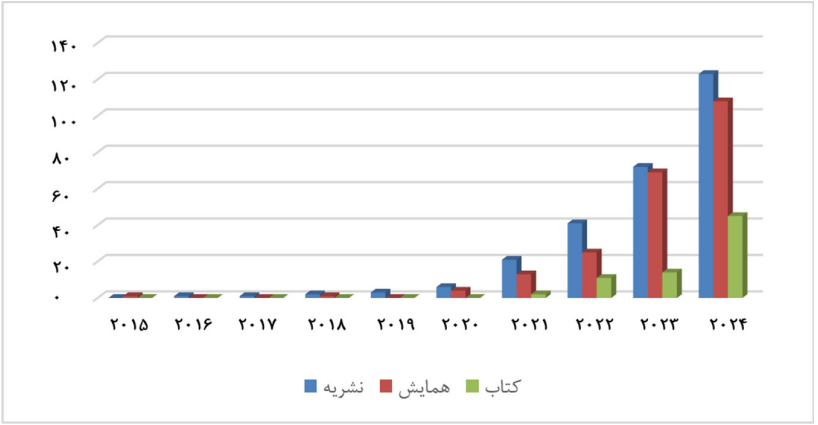
افزون بر این، کشورهایی که بیشترین میزان توجه و فعالیت پژوهشی را در زمینه هوش مصنوعی سبز و بازیابی اطلاعات پایدار داشته‌اند، در شکل ۳، نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که بررسی‌های انجام‌شده در دوره زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ بوده است



شکل ۳. میزان مشارکت کشورهای برتر در حوزه پژوهش‌های مرتبط با هوش مصنوعی سبز و بازیابی اطلاعات پایدار

شکل ۴، فراوانی انتشارات علمی مرتبط با هوش مصنوعی سبز را به‌تفکیک نوع منبع (نشریه، همایش و کتاب) نشان می‌دهد. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد، در سال‌های اخیر روند انتشار مقالات در حوزه هوش مصنوعی سبز رشد چشمگیری داشته است. تعداد مقالات منتشرشده در مجلات علمی از تنها یک مقاله در سال ۲۰۱۶ به ۱۲۳ مقاله در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته است که بیانگر افزایش توجه جامعه علمی به

مسائل زیست‌محیطی در حوزه هوش مصنوعی است. همچنین، تعداد مقالات ارائه‌شده در همایش‌ها نیز از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ به‌صورت مستمر رو به افزایش بوده و در سال ۲۰۲۴ به رقم ۱۰۸ رسیده است. این رشد بیانگر افزایش نقش و اهمیت هوش مصنوعی سبز در تحقیقات بین‌المللی است. در بخش کتاب‌ها نیز اگرچه آمار کلی پایین‌تر از مقالات نشریه و همایشی است، اما روندی صعودی را نشان می‌دهد. تعداد کتاب‌های منتشرشده با موضوع هوش مصنوعی سبز از سال ۲۰۲۱ رشد خود را آغاز کرده و در سال ۲۰۲۴ به ۴۵ مورد رسیده است.

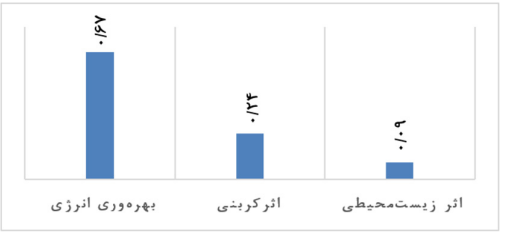


شکل ٤. فراوانی سالانه انتشارات علمی مرتبط با هوش مصنوعی سبز به‌تفکیک نوع منبع

همان‌گونه که در بخش‌های پیشین توضیح داده شد، هوش مصنوعی سبز مفاهیم و تعاریف متعددی را دربرمی‌گیرد. برخی پژوهش‌ها تمرکز خود را بر بهره‌وری انرژی قرار داده‌اند، در حالی که برخی دیگر بر کاهش کربن تأکید کرده‌اند، و گروهی نیز به بررسی رد پای اکولوژیکی ناشی از توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های هوش مصنوعی پرداخته‌اند.

پرسش دوم این مقاله به‌منظور بررسی این مسئله ارائه شده است. شکل ۵، توزیع مقالات مستخرج را بر اساس تعاریف مختلف هوش مصنوعی سبز ارائه می‌دهد. بر اساس تحلیل انجام‌شده، ۶۷ درصد از مقالات مرتبط با مفاهیم مختلف هوش مصنوعی سبز به بهره‌وری انرژی اختصاص داشته و به کاهش و بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های هوش مصنوعی پرداخته‌اند. این نشان‌دهنده اهمیت بالای کاهش مصرف انرژی در توسعه

فناوری‌های هوش مصنوعی است. در مقام دوم، ۲۴ درصد از مقالات به کاهش کربن و اثرات آن بر محیط زیست اختصاص یافته‌اند، که به کاهش گازهای گلخانه‌ای و تأثیرات آن بر تغییرات اقلیمی توجه دارد. و سرانجام، تنها ۹ درصد از مقالات به ابعاد گسترده‌تری از اثرات زیست‌محیطی مانند رد پای اکولوژیکی پرداخته‌اند که به تأثیرات انسانی بر منابع طبیعی و تنوع زیستی اشاره دارد.

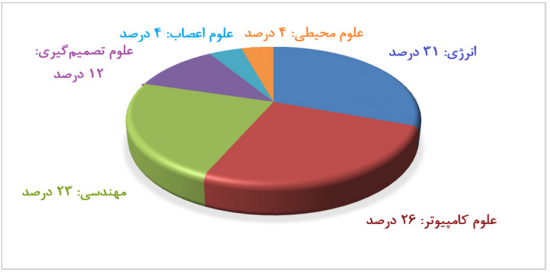


شکل ۵. توزیع مقالات هوش مصنوعی سبز با توجه به تعاریف مختلف آن

به‌منظور پاسخ به پرسش سوم و به‌دست آوردن توزیع مقالات در حوزه‌های مختلف علمی، از حوزه‌های موضوعی الهام گرفته‌شده از «اسکوپوس» به‌عنوان برچسب‌های مرجع مورد استفاده قرار گرفتند. این حوزه‌ها عبارت‌اند از: «شیمی»، «علوم رایانه»، «علوم زمین و سیاره‌ای»، «انرژی»، «مهندسی»، «علوم محیط زیست»، «علوم مواد»، «ریاضیات»، «فیزیک و نجوم»، «علوم کشاورزی و زیستی»، «بیوشیمی، ژنتیک و زیست‌شناسی مولکولی»، «ایمونولوژی و میکروبیولوژی»، «عصب‌شناسی»، «سم‌شناسی و داروسازی»، «پزشکی»، «دندان‌پزشکی»، «حرفه‌های بهداشتی»، «پرستاری»، «دامپزشکی»، «هنر و علوم انسانی»، «مدیریت کسب‌وکار و حسابداری»، «علوم تصمیم‌گیری»، «اقتصاد، اقتصادسنجی و مالی»، «روان‌شناسی»، و «علوم اجتماعی». به‌منظور تشخیص حوزه موضوعی مقالات از رویکرد طبقه‌بندی بدون نیاز به یادگیری[1] بهره‌گیری شده است که بر پایه مدل‌های زبانی از پیش آموزش‌دیده عمل می‌کند. در این روش، بدون نیاز به برچسب‌گذاری قبلی یا آموزش مجدد، مدل قادر است شباهت معنایی عنوان مقاله را با برچسب‌های موضوعی محاسبه کرده و مرتبط‌ترین حوزه‌ها را برای هر مقاله تعیین کند. برای هر مقاله، مدل به‌صورت چندبرچسبی اجرا شد و دو حوزه موضوعی با بیشترین میزان شباهت معنایی به‌عنوان

1. zero-shot classification

برچسب نهایی آن مقاله انتخاب شدند که نتایج در شکل ۶، نشان داده شده است. بر اساس این شکل، بیشترین تمرکز در پژوهش‌های مرتبط با هوش مصنوعی سبز بر حوزه انرژی بوده است. وجود ۳۱ درصد از مقالات در این حوزه نشان می‌دهد که استفاده از هوش مصنوعی در بهینه‌سازی مصرف انرژی، توسعه منابع تجدیدپذیر، مدیریت شبکه‌های هوشمند و کاهش آلاینده‌ها نقش محوری در پژوهش‌ها داشته است. پس از آن، علوم کامپیوتر قرار دارد که بیانگر توجه گسترده به توسعه الگوریتم‌ها و مدل‌های یادگیری ماشین کم‌مصرف، طراحی معماری‌های بهینه و روش‌های محاسباتی دوستدار محیط زیست است. حوزه مهندسی با ۲۳ درصد مقاله نیز جایگاه قابل توجهی دارد و نشان می‌دهد که بسیاری از کاربردهای هوش مصنوعی سبز در طراحی سیستم‌های هوشمند، فناوری‌های پایدار و اتوماسیون سبز گسترش یافته‌اند. در رتبه‌های بعدی، علوم تصمیم‌گیری قرار دارد که به استفاده از هوش مصنوعی در انتخاب راهکارهای بهینه و چندمعیاره در زمینه‌هایی مانند مدیریت انرژی، زنجیره تأمین سبز و سیاست‌گذاری محیط زیستی می‌پردازد.



شکل ٦. توزیع فراوانی مقالات در حوزه‌های علمی مختلف

۵. بحث

بررسی روند انتشار مقالات در حوزه هوش مصنوعی سبز در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ نشان‌دهنده رشد چشمگیر و پیوسته‌ای در این زمینه است. در سال‌های ابتدایی، به‌ویژه بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹، این حوزه توجه چندانی به خود جلب نکرده بود و تعداد مقالات منتشرشده بسیار محدود بود (در مجموع، تنها ۹ مقاله طی پنج سال). با این حال، از سال ۲۰۲۰ به بعد، افزایش تدریجی در تعداد مقالات مشاهده می‌شود که به احتمال، تحت تأثیر افزایش آگاهی جهانی نسبت به چالش‌های زیست‌محیطی، اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد، و لزوم به‌کارگیری فناوری‌های کم‌مصرف و سازگار با محیط

زیست بوده است. رشد انفجاری مقالات از سال ۲۰۲۱ به بعد، به‌ویژه در سال ۲۰۲۳ (۱۵۵ مقاله) و در سال ۲۰۲۴ (۲۷۶ مقاله)، نشان می‌دهد که هوش مصنوعی سبز به یک موضوع محوری در تحقیقات بین رشته‌ای تبدیل شده است. این روندِ افزایشی می‌تواند ناشی از چند عامل کلیدی باشد: افزایش دسترسی به منابع محاسباتی با مصرف انرژی پایین، توجه سیاست‌گذاران و صنایع به ملاحظات زیست‌محیطی در توسعه فناوری، و گسترش چارچوب‌های نظری و عملی در زمینه هوش مصنوعی پایدار. با توجه به این رشد سریع، انتظار می‌رود که این حوزه در آینده نیز شاهد افزایش سرمایه‌گذاری‌های پژوهشی و صنعتی بیشتری باشد و به‌تدریج نقش پررنگ‌تری در تصمیم‌سازی‌های فناورانه ایفا نماید

تحلیل نوع منابع علمی منتشرشده در حوزه هوش مصنوعی سبز نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، این حوزه با رشد قابل توجهی در تمامی قالب‌های انتشارات علمی همراه بوده است؛ به‌ویژه اینکه تعداد مقالات منتشرشده در نشریات علمی از تنها یک مورد در سال ۲۰۱۶ به ۱۲۳ مقاله در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته که حاکی از افزایش چشمگیر توجه پژوهشگران به نقش هوش مصنوعی در حل چالش‌های زیست‌محیطی است. این رشد را می‌توان به گسترش دغدغه‌های جهانی درباره پایداری و همچنین افزایش حمایت نهادهای علمی و سیاست‌گذار از پژوهش‌های مرتبط با فناوری‌های سبز نسبت داد. افزایش تعداد مقالات ارائه‌شده در کنفرانس‌ها نیز از دیگر نشانه‌های گسترش فعالیت علمی در این زمینه است؛ به‌طوری که در سال ۲۰۲۴، تعداد این مقالات به ۱۰۸ مورد رسیده است. این روند افزایشی می‌تواند نشان‌دهنده پویایی بالای این حوزه و تقاضای روبه‌رشد برای ارائه یافته‌ها در رویدادهای علمی بین‌المللی باشد. همچنین، اگرچه تعداد کتاب‌های منتشرشده با موضوع هوش مصنوعی سبز نسبت به مقالات کمتر است، اما روندی صعودی را از سال ۲۰۲۱ نشان می‌دهد و در سال ۲۰۲۴ به ۴۵ عنوان رسیده است. این موضوع بیانگر بلوغ تدریجی مفاهیم بنیادی در این حوزه و تلاش برای تبیین چارچوب‌های نظری و کاربردی به شکل ساختاریافته‌تر است. مجموع این شواهد گویای آن است که هوش مصنوعی سبز در مسیر تبدیل شدن به یک حوزه علمی تثبیت‌شده و بین رشته‌ای قرار دارد

هوش مصنوعی سبز مفهومی چندوجهی است که دربردارنده ابعاد گوناگونی نظیر بهره‌وری انرژی، کاهش کربن، و بررسی اثرات اکولوژیکی توسعه فناوری‌های هوش مصنوعی است. بررسی مقالات منتشرشده در این حوزه نشان می‌دهد که تمرکز اصلی پژوهش‌ها بر کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های هوش مصنوعی

بوده است؛ به‌طوری که حدود ۶۷ درصد از مقالات به این موضوع اختصاص یافته‌اند. این مسئله بیانگر آن است که مصرف بالای انرژی در فرایندهای آموزش و استقرار مدل‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه مدل‌های بزرگ و پیچیده به یک چالش مهم برای پایداری محیط زیست تبدیل شده و در نتیجه، به اولویت پژوهشی تبدیل شده است. در جایگاه دوم، ۲۴ درصد از مطالعات به بررسی نقش هوش مصنوعی در کاهش انتشار کربن و تأثیرات آن بر تغییرات اقلیمی پرداخته‌اند. این مقالات به‌طور عمده بر چگونگی طراحی و به‌کارگیری الگوریتم‌هایی تمرکز دارند که با حداقل مصرف منابع و در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی بتوانند به کاهش گازهای گلخانه‌ای کمک کنند. در مقابل، تنها ۹ درصد از مقالات به ابعاد وسیع‌تری مانند رد پای اکولوژیک توجه کرده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که جنبه‌هایی چون تأثیر فناوری‌های هوش مصنوعی بر منابع طبیعی، تنوع زیستی و پایداری اکوسیستم‌ها هنوز به‌طور کافی در ادبیات علمی مورد توجه قرار نگرفته‌اند. بنابراین، شکاف قابل توجهی در پژوهش‌ها نسبت به بررسی اثرات غیرمستقیم و سیستمی توسعه هوش مصنوعی بر محیط زیست وجود دارد که می‌تواند به‌عنوان یک مسیر تحقیقاتی آینده مورد توجه قرار گیرد

تحلیل موضوعی مقالات مرتبط با هوش مصنوعی سبز نشان‌دهنده ماهیت میان‌رشته‌ای این حوزه و تمرکز آن بر مسائلی با پیامدهای گستردهٔ زیست‌محیطی است. نتایج طبقه‌بندی نشان می‌دهد که بیشترین تمرکز پژوهش‌ها بر حوزه انرژی قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که بخش قابل توجهی از مطالعات به بهینه‌سازی مصرف انرژی، توسعه فناوری‌های مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، مدیریت شبکه‌های هوشمند انرژی و کاهش آلاینده‌ها اختصاص یافته‌اند. این تمرکز را می‌توان ناشی از نقش کلیدی هوش مصنوعی در ارتقای کارایی سامانه‌های انرژی و کمک به گذار به سمت زیرساخت‌های پایدار دانست. حضور پررنگ علوم رایانه در رتبه دوم نیز نشان می‌دهد که توسعه الگوریتم‌ها، معماری‌های بهینه محاسباتی و روش‌های یادگیری ماشین با مصرف انرژی پایین از اولویت‌های اصلی محققان بوده است. این امر به‌ویژه در پاسخ به نگرانی‌های ناشی از مصرف بالای انرژی در مدل‌های هوش مصنوعی پیشرفته و یادگیری عمیق اهمیت یافته است. همچنین، سهم قابل توجه حوزه مهندسی، بیانگر نقش آن در کاربردی‌سازی فناوری‌های سبز و طراحی سیستم‌های هوشمند و کارآمد است که در صنایع مختلف از جمله حمل‌ونقل، ساختمان، و تولید کاربرد دارند. افزون بر این، حوزه‌هایی همچون علوم تصمیم‌گیری نیز در این میان نقش مهمی ایفا

کرده‌انـد؛ به‌ویـژه از نظـر ارائـه چارچوب‌هـایی بـرای تحلیـل و انتخـاب راهکارهـای بهینـه و چندمعیـاره در زمینه‌هـایی نظیـر مدیریـت منابـع، زنجیـره تأمیـن پایـدار و تدویـن سیاسـت‌های زیسـت‌محیطی. ایـن توزیـع موضـوعی نشـان می‌دهـد کـه هـوش مصنـوعی سـبز در تعامـل بـا رشـته‌هایی بـا مصـرف انـرژی بـالا یـا تأثیـر مسـتقیم بـر محیـط زیسـت، بیشـترین پتانسیـل را بـرای تأثیرگـذاری دارد. همچنیـن، تأکیـد بـر کاربردهـای میان‌رشـته‌ای ایـن فنـاوری می‌توانـد مسیـر پژوهش‌هـای آتی را بـه سـمت حـل چالش‌هـای جهـانی محیـط زیسـت همـوار کنـد

بـررسی مطالعـات بـرای کاهـش اثـرات گازهـای گلخانـه‌ای حاصـل از اجـرای الگوریتم‌های هـوش مصنـوعی و بازیـابی اطلاعـات نشـان می‌دهـد کـه می‌تـوان بـا اسـتفاده از راهبردهـای نرم‌افـزاری و سـخت‌افزاری تأثیـر زیسـت‌محیطی هـوش مصنـوعی را کاهـش داد. ایـن رویکردهـا شـامل بهینه‌سـازی الگوریتم‌هـا، اسـتفاده از مدل‌هـای فشـرده‌تر، یادگیـری انتقـالی، پـردازش توزیع‌شـده کارآمـد و همچنیـن توسـعه سـخت‌افزارهای کم‌مصرف‌تـر ماننـد واحدهـای پـردازش عصـبی و تراشـه‌های اختصـاصی اسـت. کارآمدتـر کـردن الگوریتم‌هـا فوایـد زیـادی، فراتـر از کاهـش رد پـای زیسـت‌محیطی آن‌هـا دارد. یـکی از راهبردهـای مؤثـر در توسـعه الگوریتم‌هـای سـبز طـراحی تکنیک‌هـای بهینه‌سـازی اسـت کـه نیـاز بـه منابـع محاسـباتی را کاهـش داده و بدین‌ترتیـب، مصـرف انـرژی را کمینـه می‌کنـد. حوزه‌هـای پژوهـشی کـه در کاهـش همزمـان حجـم حافظـه و پیچیـدگی محاسـباتی آمـوزش مدل‌هـا فعـال هسـتند، شـامل روش‌هـای فشرده‌سـازی مدل‌هـای یادگیـری ماشیـن[1] ماننـد بـرش وزنی[2] (Hoefler et al. 2021)، الگوریتم‌هـای یادگیـری کارآمـد[3] (Menghani 2023)، بهینه‌سـازی معمـاری مـدل[4] (Pham et al. 2018) و همچنیـن یادگیـری ماشیـن کم‌نمونـه ماننـد یادگیـری کم‌نمونـه[5] (Zeng & Xiao 2024) و یادگیـری بـدون نمونـه[6] (Pourpanah et al. 2022) اسـت.

انتخـاب سـخت‌افزارهای کارآمدتـر از نظـر محاسـباتی نیـز می‌توانـد بـه صرفه‌جـویی در انـرژی کمـک کنـد؛ زیـرا بـرخی از واحدهـای پـردازش گرافیـکی (GPU) نسـبت بـه دیگـران

1. model compression
2. weight pruning
3. efficient learning algorithm
4. efficient neural architecture
5. zero-shot learning
6. few-shot learning

از نظر عملیات نقطه شناور در ثانیه[1] به ازای هر وات مصرف انرژی، کارایی بسیار بالاتری دارند. دیگر شتاب‌دهنده‌های سخت‌افزاری تخصصی، واحدهای پردازش تنسور[2] هستند که به‌طور خاص برای وظایف یادگیری ماشین طراحی شده و قابلیت سفارشی‌سازی مدل‌های یادگیری ماشین برای استفاده در آن سخت‌افزار خاص را دارند (Osta et al. 2019). روشی دیگر برای کاهش زمان آموزش الگوریتم‌ها موازی‌سازی و یا توزیع محاسبات میان چندین هسته پردازشی است. «آنتونی» و همکاران نشان دادند که برای یک وظیفه خاص، افزایش تعداد هسته‌ها به ۱۵ هسته، زمان‌های اجرایی را بهبود می‌بخشد و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد (Anthony, Kanding & Selvan 2020).

Chowdhury (2013) راهکاری برای بازیابی اطلاعات سبز پیشنهاد کرد که تمرکز خود را بر اندازه‌گیری و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در زمینه کتابخانه‌های دیجیتال قرار داد. افزون بر این، تحقیقات متعددی انجام شده‌اند که روش‌هایی برای کاهش مصرف انرژی در آزمایش‌های بازیابی اطلاعات ارائه می‌دهند. یکی از محققان برجسته در این حوزه «کاتنا»ست که روش‌هایی را برای اندازه‌گیری مصرف انرژی در پرس‌وجوهای موتورهای جست‌وجو (Catena & Tonellotto 2015)، مدیریت مصرف انرژی در موتورهای جست‌وجوی وب (Catena, Macdonald & Tonellotto 2015)، پردازش پرس‌وجوهای انرژی‌کارآمد در موتورهای جست‌وجو (Catena & Tonellotto 2017)، مدیریت مصرف انرژی جست‌وجوی توزیع‌شده وب (Catena, Frieder & Tonellotto 2018)، و اندازه‌گیری هزینه‌های موتورهای جست‌وجوی وب چندمرکزی (Blanco, Catena & Tonellotto 2016) معرفی کرده است. تمرکز این تحقیقات به‌طور عمده روش‌های آزمایشی سنتی بازیابی اطلاعات بوده است و از روش‌های جدیدتر که از GPUها بهره می‌برند، غافل مانده‌اند

یکی از روندهای موفق اخیر در بازیابی اطلاعات، استفاده از مدل‌های زبانی «ترنسفورمر»[3] (Waswani et al. 2017) نظیر «برت»[4] (Kenton & Toutanova 2019) است که به‌شدت از GPUها برای آموزش و استنتاج استفاده می‌کنند. اگرچه برخی تحقیقات بر بهبود کارایی مدل‌ها (یعنی کاهش زمان استنتاج برای رتبه‌بندی) تمرکز کرده‌اند، اما

1. floating Point Operation Per Second (FLOPS)
2. tensor processing unit (TPU)
3. transformer
4. BERT

این به معنای کاهش مصرف انرژی نیست. یک مدل عصبی کارآمد ممکن است حتی بیشتر از یک روش مبتنی بر CPU انرژی مصرف کند، با وجود اینکه هر دو در مدت‌زمان مشابهی اجرا می‌شوند (Scells et al. 2022).

Xu et al. (2021) یادگیری عمیق سبز[1] را به‌عنوان استفاده از معماری‌ها، روش‌های آموزشی، روش‌های استنتاج و تکنیک‌های استفاده از داده‌های با مصرف انرژی کمتر تعریف می‌کنند. Naidu et al. (2021) انتشار گازهای گلخانه‌ای الگوریتم‌های یادگیری ماشین را با حفظ حریم خصوصی کمیت‌سازی کردند و نشان دادند که استفاده از حریم خصوصی قوی‌تر منجر به تولید گازهای گلخانه‌ای بیشتری می‌شوند. آن مقاله به یادگیری فدرال[2] که یک حوزه تحقیقاتی جدید در بازیابی اطلاعات است، بسیار مرتبط است. یادگیری فدرال به معنای فرایندی است که در آن مدل‌های یادگیری ماشینی در چندین دستگاه مختلف به‌طور همزمان و بدون نیاز به انتقال داده‌های خام به سرور مرکزی، آموزش می‌بینند. این روش باعث حفظ حریم خصوصی داده‌ها و کاهش پهنای باند مصرفی می‌شود. به‌گفته دیگر، در این روش، دستگاه‌ها داده‌های خود را نگه می‌دارند و فقط مدل‌های به‌روزشده یا تغییرات آن‌ها را به اشتراک می‌گذارند. در واقع، یافته‌های اخیر یادگیری فدرال نشان داده است که این روش نسبت به خطوط لوله یادگیری ماشین مبتنی بر GPU انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتری را ایجاد می‌کند (Qiu et al. 2020). Wiesner et al. (2021) روشی برای کاهش انتشار کربن آزمایش‌های یادگیری ماشین با برنامه‌ریزی آموزش مدل‌ها در ساعات غیر اوج را پیشنهاد کرده و دریافتند که جابه‌جایی بارهای کاری به روز بعد، صرف‌نظر از منطقه و محل زندگی می‌تواند انتشار را به میزان ۵ درصد کاهش دهد.

«اسکِلز، ژوآنگ و زوکن» چارچوبی برای به حداقل رساندن مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای برای سامانه‌های بازیابی اطلاعات با روش «کاهش، استفاده مجدد، بازیافت» پیشنهاد کردند. در پژوهش آن‌ها برای هر مفهوم، چندین راه برای کاهش مصرف انرژی ارائه شد. به‌عنوان مثال، می‌توان تعداد آزمایش‌ها را کاهش داد، از مدل‌های پیش‌آموزش‌دیده موجود برای آزمایش‌ها استفاده مجدد کرد، یا از مدل‌های از

1. green deep learning
2. federated learning

پیش‌آموزش‌دیده‌ای که در ابتدا برای یک وظیفه آموزش دیده‌اند برای وظیفه‌ای دیگر استفاده کرد (Scells, Zhuang & Zuccon 2022). با الهام از این مفهوم، می‌توان به‌دنبال کاهش انرژی مصرفی در فرایندهای بازیابی اطلاعات به‌ویژه در الگوریتم‌های جست‌وجو و پردازش داده‌ها از طریق بهینه‌سازی سامانه‌های جست‌وجو و استفاده از روش‌های کم‌هزینه‌تر محاسباتی، کاهش تعداد درخواست‌های غیرضروری به سرورها، و بهینه‌سازی ذخیره‌سازی داده‌ها بود. به‌عنوان مثال، با استفاده از تکنیک‌هایی مانند کاهش ابعاد داده‌ها[1] یا الگوریتم‌های جست‌وجوی سریع‌تر، می‌توان مصرف انرژی را در سامانه‌های جست‌وجو کاهش داد که باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. استفاده مجدد از داده‌ها و مدل‌ها در سامانه‌های بازیابی اطلاعات می‌تواند به‌جای ایجاد داده‌های جدید یا آموزش مجدد مدل‌ها، به کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند. به‌عنوان مثال، استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین پیشرفته‌ای که قبلاً آموزش دیده‌اند[2]، به‌جای آموزش دوباره مدل‌ها از صفر، به کاهش بار پردازشی و مصرف انرژی کمک می‌کند. بازیافت منابع در زمینه بازیابی اطلاعات می‌تواند شامل استفاده مجدد از داده‌ها، الگوریتم‌ها و زیرساخت‌های فناوری باشد. این امر می‌تواند به معنای بازیابی و استفاده مجدد از داده‌های قدیمی یا بهینه‌سازی منابع سخت‌افزاری برای استفاده بیشتر از ظرفیت‌های موجود باشد. به‌عنوان مثال، می‌توان از سرورها و محاسبات ابری[3] استفاده کرد.

محاسبات ابری در واقع، یک مدل محاسباتی نوین است که امکان ارائه منابع محاسباتی مقیاس‌پذیر و انعطاف‌پذیر را از طریق اینترنت فراهم می‌آوَرَد. این فناوری با بهره‌گیری از مراکز داده بزرگ و زیرساخت‌های مجازی‌سازی، امکان پردازش و ذخیره‌سازی داده‌ها را به‌صورت بهینه و مقرون‌به‌صرفه فراهم می‌سازد. محاسبات ابری یکی از گزینه‌های مناسب برای تحقق هدف بازیابی اطلاعات پایدار به‌شمار می‌آید که کاهش هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی فناوری اطلاعات و ارتباطات از طریق اشتراک‌گذاری منابع محاسباتی و شبکه‌ای را ممکن می‌سازد (Jenkin, Webster & McShane 2011). هر نوع خدمات ابری، شامل سطوح مختلفی از اشتراک‌گذاری منابع است و ممکن است برای انواع

1. dimensionality reduction
2. pre-trained models
3. cloud computing

مختلفی از راه‌حل‌های کامپیوتری و نرم‌افزاری/ سیستمی مناسب باشد. مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی محاسبات ابری از استفاده مشترک از منابع محاسباتی و شبکه‌ای ناشی می‌شود و بسته به سطح خدمات انتخاب‌شده، ممکن است درجات مختلفی از استفاده مشترک از شبکه، سخت‌افزار، نرم‌افزار و همچنین برنامه‌ها و ابزارهای خاص وجود داشته باشد. از مزایای خدمات ابری کاهش سرمایه‌گذاری اولیه مصرف‌کنندگان برای زیرساخت فناوری اطلاعات و همچنین کاهش کلی محاسبات است (Jasma 2022)

مراکز داده ابری بزرگ به‌طور معمول، از سرورهای کارآمدتر و بهینه‌سازی مصرف انرژی بهره می‌برند. همچنین استفاده از زیرساخت‌های مقیاس‌پذیر و مدیریت بار کاری بهتر، انرژی مصرفی را نسبت به مراکز داده محلی کاهش می‌دهد. افزون بر این، بسیاری از ارائه‌دهندگان خدمات ابری (مانند AWS[1]، Google Cloud[2] و Microsoft Azure[3]) از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی برای تأمین انرژی مراکز داده خود استفاده می‌کنند. این امر باعث کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار CO_2 می‌شود. همچنین مجازی‌سازی و کانتینرسازی مانند Docker[4] و Kubernetes[5] باعث می‌شود که چندین برنامه روی یک سرور اجرا شوند. این امر به استفاده بهینه‌تر از منابع منجر می‌شود. بنابراین سازمان‌هایی که به‌جای استفاده از سرورهای محلی از خدمات ابری استفاده می‌کنند، به سخت‌افزارهای فیزیکی کمتری نیاز دارند. این خود مصرف انرژی و تولید زباله الکترونیک را کاهش می‌دهد. اما باید توجه کرد زمانی که با افزایش ترافیک داده و مصرف انرژی در شبکه به‌دلیل میزان جابه‌جایی داده‌ها بین مراکز داده و کاربران از طریق اینترنت روبه‌رو باشیم و یا مدیریت ضعیفی روی منابع صورت گیرد، می‌تواند به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شود

مزایای فناوری‌های محاسبات ابری می‌تواند از طریق استانداردسازی بیشتر در زمینه تولید، سازماندهی، و پردازش محتوا افزایش یابد. این امر در بررسی «هارگریوز» که مطالعه‌ای در مورد وضعیت فعلی قوانین حق مالکیت معنوی در بریتانیاست، تأکید شده است. وی توصیه‌های خاصی برای اصلاح قوانین حق مالکیت معنوی ارائه کرد تا این

1. https://aws.amazon.com/
2. https://cloud.google.com/
3. https://azure.microsoft.com/en-us/
4. https://www.docker.com/
5. https://kubernetes.io/

قوانین را به نفع نوآوری و پیشرفت در اقتصاد دیجیتال تغییر دهد. دو توصیه اصلی که تأثیر زیادی بر بازیابی اطلاعات خواهند داشت، عبارت‌اند از: تأسیس تبادل حق نشر دیجیتال به‌منظور تسهیل دسترسی و استفاده پویا از محتوای دیجیتال شامل محتوای تجاری/ حق نشر و محتوای غیرتجاری/ رایگان و استانداردسازی در فرایندها و شیوه‌ها (Hargreaves 2011).

این توصیه‌ها به همراه پتانسیل محاسبات ابری برای دسترسی از راه دور به داده‌ها و محتوا، به‌طور قابل توجهی فعالیت‌های بازیابی اطلاعات را تسهیل خواهند کرد. انتظار می‌رود که با انتقال محتوای دیجیتال و داده‌ها به فضای ابری، انتشار گازهای گلخانه‌ای که در حال حاضر به‌دلیل وجود مراکز داده محلی جداگانه تولید می‌شود، کاهش یابد. با این حال، مزایای واقعی این تسهیلات دسترسی از راه دور تنها زمانی به‌دست می‌آید که فرمت‌ها و ابزارهای متادیتای استاندارد برای ایجاد و پردازش/ فهرست‌نویسی داده‌ها و محتوای دیجیتال استفاده شود. استانداردسازی در تولید محتوا با استفاده از استانداردهای باز به‌طور قابل توجهی بازیابی اطلاعات پایدار، از جمله شناسایی محتوا و داده‌ها، فهرست‌نویسی و ساخت برنامه‌های متعدد در زمینه‌های خاص و دامنه‌های مختلف با بهره‌گیری از تکنیک‌های داده‌کاوی، تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، تجسم اطلاعات و غیره را تسهیل خواهد کرد

محاسبات ابری بر اصل اساسی اشتراک‌گذاری منابع استوار است که امکان استفاده بهینه از ظرفیت‌های محاسباتی، ذخیره‌سازی و پردازش داده‌ها را فراهم می‌کند. این رویکرد با توصیه‌های ارائه‌شده در بررسی Hargreaves (2011) همسوست که اصلاحاتی در قوانین مالکیت معنوی و ایجاد تبادل حق نشر دیجیتال را برای تسهیل اشتراک‌گذاری محتوای علمی و دانش به‌منظور تحقیق و نوآوری پیشنهاد می‌کند.

در حوزه بازیابی اطلاعات، جامعه علمی پیشتر نمونه‌های موفقی از اشتراک‌گذاری منابع و تخصص را از طریق ابتکاراتی نظیر TREC[1] به‌کار گرفته است که به توسعه و ارزیابی مدل‌های بازیابی اطلاعات کمک کرده است. گسترش چنین اشتراک‌گذاری‌هایی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای شود؛ زیرا انجام پردازش‌های تکراری و مجزا بر روی داده‌ها در سرورهای محلی نیازمند مصرف بالای انرژی و منابع

1. https://trec.nist.gov

محاسباتی است (Soboroff 2021).

استفاده از زیرساخت‌های ابری برای اشتراک‌گذاری داده‌ها، ابزارها و مدل‌های یادگیری ماشین در بازیابی اطلاعات، به‌طور قابل توجهی نیاز به انجام پردازش‌های مجزا و غیرضروری را کاهش می‌دهد (Strubell, Ganesh & McCallum 2020). به این ترتیب، پژوهشگران قادر خواهند بود با استفاده از منابع محاسباتی مشترک، بهره‌وری خود را افزایش داده و تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف انرژی در مراکز داده را کاهش دهند. در مجموع، توسعه استانداردهای باز و به‌کارگیری زیرساخت‌های ابری می‌تواند نقش مهمی در حرکت به‌سوی سامانه‌های بازیابی اطلاعات پایدار و کم‌مصرف داشته باشد

در پایان این بخش ابزارهایی معرفی می‌شوند که میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای منتشرشده توسط الگوریتم‌های یادگیری ماشین را اندازه‌گیری می‌کنند. برخی از این ابزارها که در جدول ۱، نمایش داده شده، به کاربران کمک می‌کنند تا تأثیر زیست‌محیطی سامانه‌های محاسباتی خود را ارزیابی کرده و راهکارهایی برای کاهش آن اتخاذ کنند.

جدول ۱. ابزارهای ارائه‌شده برای اندازه‌گیری میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای

نام	CPU	DRAM	GPU	Network	Repository
CodeCarbon	*	*	*		https://github.com/mlco2/codecarbon
pyJoules	*	*	*		https://github.com/powerapi-ng/pyJoules
Energyusage	*	*	*		https://github.com/responsibleproblemsolving/energy-usage
Carbontracker	*		*		https://github.com/lfwa/carbontracker
Experiment Impact Tracker	*		*		https://github.com/Breakend/experiment-impact-tracker
Cumulator	*	*	*	*	https://github.com/EPFLiGHT/cumulator
Green Algorithms	*	*	*	*	https://github.com/GreenAlgorithms/green-algorithms-tool

در این جدول، ستون اول نام ماژول را نشان می‌دهد. ستون دوم تا پنجم به‌ترتیب، میزان اندازه‌گیری CPU، DRAM، GPU و شبکه را مشخص می‌سازد. برای مثال، اگر به‌ازای یک ماژول ستون مربوط به CPU پر شده باشد، بدین معناست که آن ماژول میزان مصرف انرژی مربوط به پردازش‌های محاسباتی را که توسط CPU انجام می‌شود، محاسبه

می‌کند. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد، CodeCarbon تنها مصرف انرژی ناشی از محاسبات محلی دستگاه را اندازه‌گیری می‌کند. به‌گفته دیگر، CodeCarbon میزان مصرف انرژی مربوط به پردازش‌های محاسباتی را که توسط CPU، GPU و DRAM انجام می‌شود، محاسبه می‌کند، اما مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از استفاده از شبکه (برای انتقال داده‌ها بین سرورها یا دستگاه‌های مختلف) را در نظر نمی‌گیرد

٦. نتیجه‌گیری

پیشرفت‌های اخیر در حوزه بازیابی اطلاعات نقش مهمی در توسعه ابزارها و سامانه‌های هوشمند برای دسترسی به داده‌ها ایفا کرده است. این پیشرفت‌ها شامل طراحی الگوریتم‌های نوین داده‌کاوی و متن‌کاوی، استفاده از تکنیک‌های پیشرفته تجسم داده و توسعه روش‌هایی برای ادغام اطلاعات از پلتفرم‌های ناهمگن است. با این حال، همزمان با گسترش کاربرد سامانه‌های بازیابی اطلاعات لازم است تأثیرات زیست‌محیطی این فناوری‌ها نیز مورد توجه قرار گیرد. هوش مصنوعی سبز و بازیابی اطلاعات پایدار به‌عنوان مفاهیمی نوظهور، با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرایندهای جست‌وجو و بازیابی اطلاعات دیجیتال ارائه شده‌اند. در این راستا، طراحی الگوریتم‌ها و سامانه‌های بازیابی اطلاعات باید به‌گونه‌ای انجام شود که افزون بر دقت و کارایی، مصرف انرژی و منابع محاسباتی را نیز به حداقل برساند.

اگرچه در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه فناوری اطلاعات سبز و محاسبات ابری انجام شده است، اما پژوهش‌های متمرکزی در حوزه بازیابی اطلاعات پایدار هنوز در مراحل اولیه است. برای توسعه سامانه‌های بازیابی اطلاعات پایدار ابتدا باید میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرایندهای مختلف این سامانه‌ها شناسایی شود و سپس روش‌های بهینه‌سازی مناسبی برای کاهش انتشار این گازها مورد بررسی قرار گیرد. از آنجا که این سامانه‌ها اغلب بخشی از کتابخانه‌های دیجیتال، موتورهای جست‌وجو و سایر خدمات اطلاعاتی هستند، تحقیق در این زمینه نیازمند رویکردهای بین رشته‌ای و تحلیل‌های دقیق است.

تحقیقات در زمینه بازیابی اطلاعات پایدار می‌تواند به استانداردسازی، بهینه‌سازی و استفاده مجدد از محتوای دیجیتال، ابزارهای جست‌وجو و فناوری‌های مرتبط کمک کند. این امر نه‌تنها موجب بهبود عملکرد سامانه‌های بازیابی اطلاعات خواهد شد، بلکه به

کاهش مصرف انرژی و منابع محاسباتی نیز منجر می‌شود. افزون بر این، توسعه سامانه‌های بازیابی اطلاعات پایدار و طراحی صحیح خدمات بازیابی اطلاعات می‌تواند نقش مهمی در کاهش تأثیرات زیست‌محیطی و دستیابی به اهداف توسعه پایدار ایفا کند.

به‌عنوان یک جامعه علمی، لازم است نسبت به هزینه‌های بالقوه‌ای که تحقیقات ما ممکن است بر محیط زیست تحمیل کند، آگاه باشیم. کمی‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی سامانه‌های بازیابی اطلاعات، یک گام اساسی در راستای توسعه فناوری‌های پایدار محسوب می‌شود. در حال حاضر، جامعه پژوهشگرانِ بازیابی اطلاعات در یک نقطه عطف از نظر نوع مدل‌های یادگیری عمیق مورد استفاده، مقیاس این مدل‌ها و نحوه آموزش آن‌ها قرار دارد. در حالی که توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر از اهداف تحقیقاتی ارزشمند محسوب می‌شود، ضروری است که هزینه‌ها و تأثیرات زیست‌محیطی این تکنیک‌ها نیز مورد توجه قرار گیرد.

با افزایش وابستگی به مدل‌های یادگیری عمیق در بازیابی اطلاعات، احتمالاً چالش‌های مشابهی که در سایر حوزه‌های هوش مصنوعی از نظر هزینه‌های محاسباتی و اثرات زیست‌محیطی مشاهده شده، در این حوزه نیز ظهور خواهد کرد. به‌ویژه با توجه به روند فعلی استفاده از مدل‌های عصبی بسیار پیچیده برای بازیابی اطلاعات، ضروری است که بازیابی اطلاعات پایدار به‌عنوان یک جنبه کلیدی از تحقیقات بازیابی اطلاعات مورد توجه قرار گیرد.

برای پیشبرد تحقیقات در زمینه بازیابی اطلاعات پایدار پیشنهاد می‌شود که الگوریتم‌های بهینه‌تری با هدف کاهش پیچیدگی محاسباتی مدل‌های بازیابی اطلاعات بدون کاهش دقت، توسعه داده شود. همچنین از روش‌های کاهش هزینه‌های محاسباتی و پردازشی در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی در سامانه‌های بازیابی اطلاعات استفاده شود.

لازم است از محاسبات ابری تا آنجا که امکان دارد، استفاده شود و با کاهش تعداد آزمایش‌ها و درخواست‌های غیرضروری به سرورها از طریق بهینه‌سازی الگوریتم‌های جست‌وجو و پردازش داده‌ها با استفاده از روش‌های کم‌هزینه‌تر محاسباتی و کاهش ابعاد داده‌ها میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داد. همچنین، استفاده مجدد از مدل‌های از پیش‌آموزش‌دیده و داده‌های موجود به‌جای آموزش مجدد مدل‌ها یا تولید داده‌های جدید می‌تواند بار پردازشی و مصرف انرژی را کاهش دهد. در کنار همه این موارد،

بازیافت منابع از طریق استفاده مجدد از داده‌های قدیمی و بهینه‌سازی منابع سخت‌افزاری، از جمله استفاده از سرورها و محاسبات ابری، می‌تواند تأثیرات زیست‌محیطی و اقتصادی سامانه‌های بازیابی اطلاعات را کاهش دهد و به بهبود کارایی سیستم‌ها کمک کند

در مجموع، تحقیقات در حوزه بازیابی اطلاعات پایدار و هوش مصنوعی سبز نه‌تنها از منظر زیست‌محیطی، بلکه از نظر افزایش کارایی، کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد سامانه‌های بازیابی اطلاعات نیز سودمند خواهد بود. اتخاذ رویکردهای پایدار در طراحی سامانه‌های بازیابی اطلاعات، گامی اساسی در مسیر توسعه فناوری‌های هوشمند و مسئولانه خواهد بود. هدف نهایی این مقاله آن است که جامعه تحقیقاتی نه‌تنها به مسئولیت‌های خود در قبال محیط زیست آگاه شود، بلکه به‌طور فعال در جهت توسعه فناوری‌های پایدار گام بردارد. این آگاهی باید از سطح فردی به سطح جمعی گسترش یابد، به‌طوری که محققان، مهندسان و طراحان سامانه‌ها در فرایندهای تحقیقاتی و توسعه فناوری‌ها، اثرات زیست‌محیطی را به‌عنوان یکی از اولویت‌های اصلی خود در نظر بگیرند. برای تحقق این هدف، ضروری است که ابزارها و روش‌های ارزیابی جدیدی برای سنجش تأثیرات محیطی طراحی شوند تا محققان بتوانند تصمیمات خود را با توجه به آثار بلندمدت زیست‌محیطی اتخاذ کنند. همچنین، همکاری‌های بین‌المللی و بین رشته‌ای در این زمینه می‌تواند به تسریع فرایندهای توسعه فناوری‌های سبز و پایداری محیط زیست کمک کند. سرانجام اینکه با تلاش مستمر در این راستا، جامعه علمی می‌تواند نقش فعالی در کاهش تغییرات اقلیمی، کاهش مصرف منابع طبیعی و ارتقای کیفیت زندگی بشری ایفا کند

References

Achiam, J., S. Adler, S. Agarwal, L. Ahmad, I. Akkaya, F. L. Aleman, F. L., ... & B. McGrew. 2023. Gpt-4 technical report. arXiv preprint arXiv: 2303.08774.

Ahmed, R., V. Sreeram, Y. Mishra & M. D. Arif. 2020. A review and evaluation of the state-of-the-art in PV solar power forecasting: Techniques and optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 124: 109792.

Albanesius, C. 2011. How much electricity does Google consume each year? PC Mag. https://uk.pcmag.com/news/112540/how-much-electricity-does-google-consume-each-year (accessed July 14, 2025).

Anthony, L. F. W., B. Kanding, & R. Selvan. 2020. Carbontracker: Tracking and predicting the carbon footprint of training deep learning models. arXiv preprint arXiv:2007.03051.

Australian Computer Society. 2010. Carbon and computers in Australia: The energy consumption and carbon footprint of ICT usage in Australia in 2010 (Version 2.0) [Report]. Connection Research. Australian Computer Society. Released May 2010.

Blanco, R., M. Catena & N. Tonellotto. 2016. Exploiting green energy to reduce the operational costs of multi-center web search engines. In Proceedings of the 25th International Conference on World Wide Web (pp. 1237-1247). Montreal, Canada.

Bolón-Canedo, V., L. Morán-Fernández, B. Cancela & A. Alonso-Betanzos. 2024. A review of green artificial intelligence: Towards a more sustainable future. *Neurocomputing journal* 599: 128096.

Catena, M., & N. Tonellotto. 2015. A Study on Query Energy Consumption in Web Search Engines. In Italian Information Retrival workshop (IIR), Cagliari, Italy. 2017. Energy-efficient query processing in web search engines. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering 29 (7): 1412-1425.

_____. 2017. Energy-efficient query processing in web search engines. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering 29 (7): 1412-1425.

Catena, M., C. Macdonald & N. Tonellotto. 2015. Load-sensitive CPU power management for web search engines. In Proceedings of the 38th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (pp. 751-754). Santiago, Chile.

Catena, M., O. Frieder & N. Tonellotto. 2018. Efficient energy management in distributed web search. In Proceedings of the 27th ACM International Conference on Information and Knowledge Management (pp. 1555-1558). Torino Italy.

Chen, Z. G., Z. H. Zhan, S. Kwong & J. Zhang. 2022. Evolutionary computation for intelligent transportation in smart cities: A survey. *IEEE Computational Intelligence Magazine* 17 (2): 83-102.

Chowdhury, G. 2012a. An agenda for green information retrieval research. *Information Processing & Management* 48 (6): 1067-1077.

_____. 2012b. How digital information services can reduce greenhouse gas emissions. *Online Information Review* 36 (4): 489-506.

_____. 2012c. Building environmentally sustainable information services: A green is research agenda. *Journal of the American Society for Information Science and Technology* 63 (4): 633-647.

Chowdhury, G. 2013. Sustainability of digital information services. *Journal of Documentation* 69 (5): 602-622.

Fitria, K. M. 2023. Information Retrieval Performance in Text Generation using Knowledge from Generative Pre-trained Transformer (GPT-3). *Jambura Journal of Mathematics* 5 (2): 327-338.

Formal, T., B. Piwowarski & S. Clinchant. 2021. SPLADE: Sparse lexical and expansion model for first stage ranking. In Proceedings of the 44th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (pp. 2288-2292). New York, NY, United States.

Giebel, G., & G. Kariniotakis. 2017. Wind power forecasting—a review of the state of the art. In G. Kariniotakis (Ed.), Renewable energy forecasting: From models to applications (pp. 59–109). Woodhead Publishing.

Hargreaves, I. 2011. Digital opportunity: A review of intellectual property and growth (Independent report No. 11/968). Department for Business, Innovation & Skills.

Hauschild, M. Z., R. K. Rosenbaum & S. I. Olsen. 2018. Life cycle assessment (Vol. 2018). Springer International Publishing, Cham. https://doi. org/10.1007/978-3-319-56475-3.

Hoefler, T., D. Alistarh, T. Ben-Nun, N. Dryden & A. Peste. 2021. Sparsity in deep learning: Pruning and growth for efficient inference and training in neural networks. *Journal of Machine Learning Research* 22 (241): 1-124.

Hong, T., & S. Fan. 2016. Probabilistic electric load forecasting: A tutorial review. *International Journal of Forecasting* 32 (3): 914-938.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. ISBN: 9781107654815.

Jager, W., A. Alonso-Betanzos, P. Antosz, B. Beersma, L. Bouman, B. Guijarro-Berdiñas, ... & N. Sánchez-Maroño. 2024. Simulating the role of norms in processes of social innovation: Three case studies. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 276 :(1) .

Jain, B., R. Sharma & N. Kaushik. 2022. An Analysis Of Green Artificial Intelligence As A Major Receiver Improvement Finalized Red Ai & Execution Of The Environmental Footprint Toward Increasing Green Artificial Intelligence. *NeuroQuantology* 20 (17): 1733.

Jamsa, K. 2022. *Cloud computing*. Burlington, MA: Jones & Bartlett Learning.

Jenkin, T. A., J. Webster & L. McShane. 2011. An agenda for 'Green'information technology and systems research. *Information and organization* 21 (1): 17-40.

Kannan, D. M. J., & S. Patel. 2024. Sustainable Information Retrieval Techniques for Onion Market Instability Prediction using Machine Learning and Deep Learning Approaches. International *Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology* 10 (6): ? .

Kenton, J. D. M. W. C., & L. K. Toutanova. 2019. Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. In Proceedings of North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies (naacL-HLT), Minneapolis, Minnesota (Vol. 1, No. 2).

Koroteev, M. V. 2021. BERT: a review of applications in natural language processing and understanding. arXiv preprint arXiv: 2103.11943.

Legg, S. 2021. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Climate change 2021-the physical science basis. *Interaction* 49.44-45 :(4)

Lin, J., R. Nogueira & A. Yates. 2022. Pretrained transformers for text ranking: Bert and beyond. Cham, Switzerland: Springer Nature.

Liu, T. Y. 2009. Learning to rank for information retrieval. *Foundations and Trends® in Information Retrieval* 3 (3) 225-331.

Mandl, T., & J. M. Struß. 2024. *Information retrieval: core techniques, issues, current and future developments.* In Handbook on Information Sciences (pp. 137-151). Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing.

Menghani, G. 2023. Efficient deep learning: A survey on making deep learning models smaller, faster, and better. *ACM Computing Surveys* 55 (12): 1-37.

Milojevic-Dupont, N., & F. Creutzig. 2021. Machine learning for geographically differentiated climate change mitigation in urban areas. *Sustainable Cities and Society* 64: 102526.

Musaev, M., M. Rakhmatullaev, S. Normatov, K. Shukurov & M. Abdullaeva. 2024. Integrated Intelligent System for Scientific and Educational Information Retrieval. In environment technologies resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (Vol. 2, pp. 212-219). Vienna, Austria.

Naidu, R., H. Diddee, A. Mulay, A. Vardhan, K. Ramesh & A. Zamzam. 2021. Towards quantifying the carbon emissions of differentially private machine learning. arXiv preprint arXiv:2107.06946.

Oeko-Institut. 2020. How environmentally friendly are books? https://www.oeko.de/en/blog/how-environmentally-friendly-are-books/#:~:text=Printed%20books,nine%20kilograms%20of%20CO2. (accessed July 14, 2025)

Okoli, Chitu and Schabram, Kira, A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research (May 5, 2010). Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=1954824 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1954824 (accessed ?)

Osta, M., M. Alameh, H. Younes, A. Ibrahim & M. Valle. 2019. Energy efficient implementation of machine learning algorithms on hardware platforms. In 2019 26th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS) (pp. 21-24). IEEE. Genova, Italy

Pham, H., M. Guan, B. Zoph, Q. Le & J. Dean. 2018. Efficient neural architecture search via parameters sharing. In International conference on machine learning (pp. 4095-4104). PMLR. Stockholmsmässan, Stockholm SWEDEN (pp. 4095-4104). PMLR.

Pourpanah, F., M. Abdar, Y. Luo, X. Zhou, R. Wang, C. P. Lim, ... & Q. J. Wu. 2022. A review of generalized zero-shot learning methods. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 45 (4): 4051-4070.

Qiu, X., T. Parcollet, D. J. Beutel, T. Topal, A. Mathur & N. D. Lane. 2020. Can federated learning save the planet? In NeurIPS-Tackling Climate Change with Machine Learning. In NeurIPS Workshop: Tackling Climate Change with Machine Learning, was held virtually, due to the pandemic.

Qolomany, B., A. Al-Fuqaha, A. Gupta, D. Benhaddou, S. Alwajidi, J. Qadir & A. C. Fong. 2019. Leveraging machine learning and big data for smart buildings: A comprehensive survey. IEEE access Journal 7, 90316-90356.

Raghavan, B., & J. Ma. 2011. The energy and emergy of the internet. In Proceedings of the 10th ACM Workshop on hot topics in networks (pp. 1-6). Cambridge Massachusetts.

Robertson, S., & H. Zaragoza. 2009. The probabilistic relevance framework: BM25 and beyond. *Foundations and Trends® in Information Retrieval* 3 (4): 333-389.

Rolnick, D., P. L. Donti, L. H. Kaack, K. Kochanski, A. Lacoste, K. Sankaran, ... & Y. Bengio. 2022. Tackling climate change with machine learning. *ACM Computing Surveys (CSUR)* 55 (2): 1-96.

Sánchez-Maroño, N., A. Rodríguez-Arias, A. Dumitru, I. Lema-Blanco, B. Guijarro-Berdiñas & A. Alonso-Betanzos. 2022. How Agent-based modeling can help to foster sustainability projects. *Procedia Computer Science* 207: 2546-2555.

Scells, H., S. Zhuang & G. Zuccon. 2022. Reduce, reuse, recycle: Green information retrieval research. In Proceedings of the 45th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (pp. 2825-2837). Madrid Spain

Schwartz, R., J. Dodge, N. A. Smith & O. Etzioni. 2019. Green ai. arXiv. arXiv preprint arXiv:1907.10597.

Sharma, R., S. S. Kamble, A. Gunasekaran, V. Kumar & A. Kumar. 2020. A systematic literature review on machine learning applications for sustainable agriculture supply chain performance. *Computers & Operations Research* 119: 104926.

Soboroff, I. 2022. Overview of TREC 2021. In 30th Text REtrieval Conference (Special Publication NIST SP 500-335). National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD.

Strubell, E., A. Ganesh & A. McCallum. 2020. Energy and policy considerations for modern deep learning research. In Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence (Vol. 34, No. 09, pp. 13693-13696). Hilton New York Midtown, New York, USA.

Vinuesa, R., H. Azizpour, I. Leite, M. Balaam, V. Dignum, S. Domisch, ... & F. Fuso Nerini. 2020. The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Communications* 11 (1): 1-10.

Wang, J., J. X. Huang, X, Tu, J. Wang, A. J. Huang, M. T. R. Laskar & A. Bhuiyan. 2024. Utilizing BERT for Information Retrieval: Survey, Applications, Resources, and Challenges. *ACM Computing Surveys* 56 (7): 1-33.

Vaswani, A., N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, ... & I. Polosukhin. 2017. Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems* 30 (1): 2.

Wiesner, P., I. Behnke, D. Scheinert, K. Gontarska & L. Thamsen. 2021. Let's wait awhile: How temporal workload shifting can reduce carbon emissions in the cloud. In Proceedings of the 22nd International Middleware Conference (pp. 260-272). Québec city Canada.

World Health Organization. 2019. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017. Special focus on inequalities. New York: United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization, 2019.

Wu, C., A. Kreidieh, K. Parvate, E. Vinitsky & A. M. Bayen. 2017. Flow: Architecture and benchmarking for reinforcement learning in traffic control. arXiv preprint arXiv:1710.05465, 10.

Xu, J., W. Zhou, Z. Fu, H. Zhou & L. Li. 2021. A survey on green deep learning. arXiv preprint arXiv:2111.05193.

Zekić-Sušac, M., S. Mitrović & A. Has. 2021. Machine learning based system for managing energy efficiency of public sector as an approach towards smart cities. *International journal of information management* 58: 102074.

Zhai, C. 2024. Large language models and future of information retrieval: opportunities and challenges. In Proceedings of the 47th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (pp. 481-490). Washington DC USA.

Zhang, X., N. Chen, H. Sheng, C. Ip, L. Yang, Y. Chen ... & D. Niyogi. 2019. Urban drought challenge to 2030 sustainable development goals. *Science of the Total Environment* 693: 133536.

Zeng, W., & Z. Y. Xiao. 2024. Few-shot learning based on deep learning: A survey. *Mathematical Biosciences and Engineering* 21 (1): 679-711.

Zhu, Y., H. Yuan, S. Wang, J. Liu, W. Liu, C. Deng ... & J. R. Wen. 2023. Large language models for information retrieval: A survey. arXiv preprint arXiv:2308.07107.

Zhuang, S., L. Shou & G. Zuccon. 2023. Augmenting passage representations with query generation for enhanced cross-lingual dense retrieval. In Proceedings of the 46th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (pp. 1827-1832). Taipei Taiwan.

Zuccon, G., H. Scells & S. Zhuang. 2023. Beyond CO2 emissions: The overlooked impact of water consumption of information retrieval models. In Proceedings of the 2023 ACM SIGIR International Conference on Theory of Information Retrieval (pp. 283-289). Taipei Taiwan.

نیلوفر مظفری

متولد ۱۳۶۴، دارای مدرک دکتری در رشته هوش مصنوعی از دانشگاه شیراز است.

ایشان هم‌اکنون استادیار مؤسسه استنادی و پایش علم و فناوری جهان اسلام (ISC) است.

یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و پردازش زبان طبیعی از جمله علایق پژوهشی وی است.

سید یاسین شریعتی آلسعدی

متولد سال ۱۳۷۹، دانشجوی کارشناسی در رشته مهندسی کامپیوتر، گرایش فناوری اطلاعات از دانشگاه شیراز است.

داده‌کاوی و هوش مصنوعی از جمله علایق پژوهشی وی است.