فصلنامه علمی راهبرد سیاسی
انتشارات دانشگاه راهبردی

توسعه پایدار، بحران زیست محیطی و منابع آب در غرب آسیا: فرصت‌ها و چالش

کامران لطفی[1]، رحمان حریری[2]

دوره ۱۰، شماره ۱، پیاپی ۳۶
بهار ۱۴۰۵

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۷/۳۰
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۲/۱۰
صص: ۱۰۳-۸۱

شاپا چاپی: ۴۵۶۵-۲۵۸۸
الکترونیکی: ۰۳۸۱-۲۷۱۷

چکیده

مدیریت منابع آب یکی از چالش‌های اساسی در جهان امروز است که به‌دلیل تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و گسترش فعالیت‌های صنعتی، پیچیدگی فزاینده‌ای یافته است. با توجه به محدودیت منابع آب شیرین (تنها ۵۰ درصد قابل دسترس) و تشدید تنش آبی (زندگی ۷۲۰ میلیون نفر در مناطق بحرانی)، این پژوهش تلاش دارد تا به بررسی نقش دوگانه هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب و پایداری زیست محیطی با تأکید بر مناطق خشک و نیمه خشک مانند نظیر غرب آسیا بپردازد؛ چراکه هوش‌مصنوعی به‌ابزاری سودمند در حوزه‌های مختلف از جمله علوم محیط زیست تبدیل شده است. از اینرو، هوش‌مصنوعی به‌عنوان فناوری دوسویه عمل می‌کند از یکسو با ارائه راهکارهای هوشمند در پایش کیفیت آب، پیش بینی خشکسالی، بهینه‌سازی آبیاری (کاهش ۳۰ درصد مصرف آب کشاورزی) و تشخیص نشت (جلوگیری از ۹۵درصد هدررفت شهری)، نقشی کلیدی در تحقق اهداف توسعه پایدار مانند آب پاک و اقدامات اقلیمی ایفا می‌کند. از سوی دیگر، توسعه زیرساخت‌های هوش مصنوعی به‌ویژه دیتاسترها، با مصرف سالانه میلیون‌ها لیتر آب برای خنک سازی و سهم ۱,۵ در صدی از برق جهانی، بحران منابع را تشدید می‌کند. آموزش مدل‌های بزرگی مانند چت. جی. بی. تی معادل مصرف آب هزاران نفر است و پیش‌بینی می‌شود که مصرف آب دیتاسترها تا سال ۲۰۲۷ به ۴,۲-۶,۶ میلیارد مترمکعب برسد. همچنین، تولید زباله‌های الکترونیکی (پیش بینی ۱۲۰ میلیون تنی تا ۲۰۵۰) و تأثیرات اکولوژیک استقرار دیتاسترها در مناطق کم برخوردار، چالش‌های جدی ایجاد می‌کنند. نتایج پژوهش، راهکارهایی پیشنهادی شامل تدوین استانداردهای سبز برای دیتاسترها (کاهش ۹۰ درصد مصرف آب با فناوری‌های غیرآبی)، توسعه الگوریتم‌های کم مصرف، توزیع عادلانه، بار محاسباتی در مناطق پرآب و سیاستگذاری مبتنی بر شفافیت مصرف منابع است. این پژوهش از روش تحقیق کیفی بهره‌گرفته و همگرایی نظریه توسعه پایدار با فناوری هوش مصنوعی، را مستلزم تعادل بین نوآوری و مسئولیت‌پذیری اکولوژیک می‌داند.

کلیدواژه‌ها: هوش مصنوعی، محیط زیست، منابع آبی، توسعه پایدار، غرب آسیا.

۱. استادیار و عضو هیات علمی گروه علوم سیاسی دانشکده علوم اجتماعی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲. استادیار و عضو هیات علمی گروه علوم سیاسی دانشکده علوم اجتماعی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران (نویسنده مسئول)
r.hariri@razi.ac.ir

۱. مقدمه

از آب شیرین، منبعی گران بها و محدود در سیاره زمین است؛ از کل سفره‌های زیر زمینی، تنها ۳ درصد آب شیرین است که از این مقدار، ۲,۵ درصد به‌صورت یخچال‌ها و کلاهک‌های یخی قطبی ذخیره شده و غیرقابل دسترس است. این یعنی فقط نیم درصد از آب‌های زمین به راحتی در دسترس است تا نیازهای جمعیت رو به رشد جهانی و تقاضای فزاینده بخش‌های کشاورزی و صنعت را تأمین کند. وقتی تقاضا برای آب شیرین از عرضه موجود برای تأمین نیازهای انسانی و اکولوژیکی پیشی بگیرد، با تنش‌آبی مواجه می‌شویم. بر اساس برنامه آب سازمان ملل، در سال ۲۰۲۱، حدود ۱۰ درصد از جمعیت جهان (۷۲۰ میلیون نفر) در کشورهایی با سطوح بالا و بحرانی تنش آبی زندگی می‌کردند. عامل دیگری که بحران آب را می‌تواند مدیریت یا برعکس تشدید کند، رشد سریع هوش مصنوعی است؛ مراکز داده مورد نیاز برای اجرای مدل‌های بزرگ هوش مصنوعی، مقادیر عظیمی از انرژی مصرف می‌کنند و این مصرف انرژی بالا، گرمای زیادی تولید می‌کند که برای جلوگیری از داغ شدن بیش از حد سرورهابه سیستم‌های خنک‌کننده نیاز دارد و متداول‌ترین روش‌های خنک‌سازی (مانند برج‌های خنک‌کننده) به مقادیر زیادی آب شیرین و تمیز وابسته هستند.

از اینرو، عصر حاضر با ظهور فناوری‌های نوین از جمله هوش مصنوعی، تحولات بنیادینی در عرصه های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ایجاد کرده است. هوش مصنوعی به‌عنوان یک فناوری دوسویه از یک‌سو با ارائه راهکارهای هوشمندانه در مدیریت منابع طبیعی مانند پیش‌بینی خشکسالی، بهینه سازی مصرف آب و کاهش آلودگی به‌عنوان ابزاری برای مقابله با بحران‌های زیست محیطی معرفی می‌شود و از جانبی دیگر به دلیل نیاز به زیرساخت‌های انرژی بر مانند دیتاسنترها و مصرف بالای آب در فرایندهای محاسباتی، خود به‌عاملی تهدیدکننده برای پایداری اکولوژیک تبدیل شده است (Gordon, 2024:1-5). این تناقض در نقش هوش مصنوعی، مسئله‌ای کلیدی در ادبیات پژوهش‌های زیست محیطی معاصر است. به‌ویژه در کشورهایی مانند ایران و عراق که با چالش‌های مضاعفی نظیر کم آبی شدید، تغییرات اقلیمی و فرسایش خاک مواجه‌اند و این ضرورت بررسی دقیق پیامدهای مثبت و منفی این فناوری را دوچندان می‌سازد (QJRL, 2023).

به‌علاوه اینکه، رشد فزاینده هوش مصنوعی در دهه اخیر، اگرچه نویدبخش تحقق اهدافی مانند کاهش مصرف انرژی، مدیریت هوشمند آب و پایش آلاینده‌ها است (Telefonica,

MDPI, 2024؛2023) اما گزارش‌های اخیر نشان می‌دهند که خود این فناوری به‌مثابه یک مصرف کننده کلان منابع طبیعی عمل می‌کند. برای نمونه، آموزش مدل‌های بزرگ زبانی نظیر چت جی بی تی به تنهایی به میلیون‌ها لیتر آب برای خنک‌سازی سرورها نیاز دارد و دیتاسترهای هوش مصنوعی مسئول ۱/۵ درصد از کل مصرف برق جهانی هستند (OECD, 2023)؛ این تنش بین «کاربردهای نجات بخش» و «مصرف بی رویه منابع» نیازمند بازتعریف جایگاه هوش مصنوعی در چارچوب توسعه پایدار است. به‌علاوه، در بستر جغرافیایی خاصی مانند ایران و عراق که منابع آب زیرزمینی و رودخانه-های آن آن طی ۵۰ سال اخیر بشدت کاهش یافته است (Eghtesademoaser, 2023) ؛ اتکا به-فناوری‌هایی که خود به‌آب و انرژی وابسته‌اند، بدون برنامه‌ریزی جامع، ممکن است بحران های موجود را تشدید کند.

با عطف توجه به مباحث یاد شده این پژوهش با تمرکز بر تعامل پیچیده بین هوش مصنوعی، محیط زیست و منابع آب، می‌کوشد به این پرسش محوری پاسخ دهد که: هوش مصنوعی چگونه می‌تواند همزمان به عنوان یک فرصت و یک چالش برای پایداری زیست محیطی و مدیریت منابع آبی در غرب آسیا عمل کند؟ در پاسخ این فرضیه مطرح می‌گردد که هوش‌مصنوعی از طریق تدوین استانداردهای سبز برای دیتاسترها در جهت پیش‌بینی دقیق بحران‌های آبی و بهینه‌سازی مصرف از یک سو به‌کاهش فشار بر منابع آب کمک می‌کند و در مقابل نیز توسعه بی‌رویه فناوری‌های هوش مصنوعی بدون ملاحظات زیست محیطی، منجر به تشدید بحران آب و انرژی در بلندمدت در اقلیم خشک غرب آسیا خواهد شد.

بر همین اساس، اهداف این پژوهش را مواردی نظیر بررسی نقش هوش‌مصنوعی در ایجاد فرصت‌های زیست محیطی مانند تصفیه آب، مدیریت پسماندها و کاهش انتشار کربن، تحلیل چالش-های اکولوژیک ناشی از توسعه هوش‌مصنوعی (مصرف آب، انرژی و مواد معدنی)، ارائه راهکارهای سیاسی برای بهینه‌سازی همزیستی هوش مصنوعی و محیط زیست با تأکید بر مناطق خشک و نیمه خشک (مانند ایران و عراق)، دانست. لازم به ذکر است که پژوهش حاضر از نوع‌کیفی با روش توصیفی–تحلیلی است؛ به‌عبارتی، گردآوری داده‌ها با تحلیل محتوای مقالات علمی، گزارش-های سازمانی نظیر توسعه و همکاری اقتصادی، برنامه محیط‌زیست ملل‌متحد و نیز مطالعات موردی مانند مصرف آب توسط چت.جی.بی.تی و تحلیل داده‌ها مانند طبقه‌بندی یافته‌ها در دو

گروه فرصت‌ها و چالش‌ها با استفاده از کدگذاری موضوعی و همچنین مقایسه تطبیقی بین کاربردهای هوش مصنوعی در بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت و شهری، بهره گرفته شده است.

۲.چارچوب نظری

متداول‌ترین و حتی اولین تعریف از توسعه پایدار که به احتمال زیاد جامع ترین و معتبرترین تعریف از آن مفهوم باشد، تعریفی است که «کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه» معروف به کمیسیون برانت لند در گزارش «آینده مشترک ما» ارائه کرده است به این مفهوم می‌باشد: «توسعه پایدار توسعه‌ای است که نیازهای زمان حال را بدون به خطر انداختن توانائی نسل های آینده برای برآوردن نیازهایشان برآورده سازد و اینکه توسعه پایدار رابطه متقابل انسان‌ها و طبیعت در سراسر جهان است» و یا «توسعه پایدار فرآیند تغییری است در استفاده از منابع، هدایت سرمایه‌گذاری‌ها، سمت گیری توسعه تکنولوژی و تغییری نهادی است که با نیازهای حال و آینده سازگار باشد» (آقایی، ۱۳۸۲: ١٦).

واژه توسعه پایداربه مفهوم گسترده آن شامل اداره و بهره برداری صحیح وکارا از منابع پایه، منابع طبیعی، منابع مالی و نیروی انسانی برای نیل به الگوی مصرف مطلوب همراه با بکارگیری امکانات فنی و ساختارو تشکیلات مناسب برای رفع نیاز نسل های امروز و آینده بطورمستمر و قابل رضایت می‌شود. توجه به مسایل زیست محیطی درسطح جهان پس از تشدید فعالیت های آلوده کننده در دهه های۱۹۵۰و۱۹٦۰میلادی یعنی حدود ٦٥ سال قبل، آغاز گردید. درسال ۱۹٦۸میلادی مجمع عمومی سازمان ملل متحد تصمیم به برگزاری کنفرانس بین‌المللی محیط زیست گرفت و در نتیجه اولین کنفرانس جهانی درژوئن ۱۹۷۲دراستکهلم برگزار شد. حاصل کار کنفرانس بیانیه محیط زیست انسانی و برنامه عمل شامل۱۰٦توصیه نامه بود که وابستگی انسان به محیط زیست و شکل دهندگی آن را بیان نموده و استفاده منطقی از منابع کاهش آلودگی‌ها، آموزش همگانی، محیط زیست، تحقیقات زیست محیطی و ایجاد سازمان‌های بین‌المللی زیست محیطی را به کشورها توصیه نمود. برنامه محیط زیست ملل متحد ایجاد و نامگذاری پنجم ژوئن هرسال به‌عنوان روز جهانی محیط زیست انجام شد (طاهری، ۱۳۸۷: ۱۰).

توسعه پایدار توسعه‌ای است که بتواند در دوره زمانی طولانی بدون اینکه خسارتی به محیط زیست واردکند، تداوم یابد. این عبارت، حکم شعار حزبی سیاست‌های زیست محیطی دهه ۱۹۹۰ را یافته است. در سال ۱۹۹۱سازمان ملل متحد توسعه ی پایدار را چنین تعریف کرد: سیاست توسعه پایدار سیاستی است که در نتیجه اعمال آن منافع مثبت حاصل از مصرف منابع طبیعی بتواند برای زمان‌های قابل پیش بینی در آینده ادامه و دوام داشته باشند. نحوه نگرش توسعه پایدار نسبت به برنامه‌ریزی کاربری زمین به گونه‌ای می‌باشد که ضرورت توجه به شاخص‌های اجتماعی توصیه می‌گردد که از تأثیرات مهم به کارگیری شاخص‌های اجتماعی در برنامه‌ریزی کاربری زمین، دستیابی به معیارهای جامع‌تر و دقیق‌تر در مورد شناخت و ارزیابی نیازهای فضایی است که مفهوم و کاربردی وسیع‌تر از استانداردهای سرانه کاربردی زمین دارد توسعه پایدار بر سه اصل عمده پایداری بوم شناختی، پایداری اجتماعی فرهنگی پایداری اجتماعی استواراست (عشریه و امیری رسکتی، ۱۳۹٤: ۳).

نظریه توسعه پایدار که در گزارش کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه با عنوان «آینده مشترک ما» مطرح شد بر پایه اصل برابری بین نسلی استوار است. این نظریه، تاکید می‌کند که پیشرفت فناوری و اقتصادی باید به‌گونه‌ای طراحی شود که نیازهای نسل حاضر را بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده در تأمین نیازهای خود برآورده کند. این چارچوب، سه رکن کلیدی به شرح زیر دارد: الف)پایداری زیست‌محیطی به مهنای حفظ منابع طبیعی که شامل حفاظت اتمسفر، استفاده مناسب از زمین، حفاظت جنگل‌ها، کویرزدایی، توسعه کوهستان‌ها، کشاورزی، تنوع زیستی، بیوتکنولوژی پایدار، حفاظت اقیانوس‌ها، حفاظت و مدیریت منابع آب، مدیریت مواد شیمیایی سمی و زباله‌های خطرناک ب)پایداری اقتصادی به معنای توسعه متوازن که شامل تسریع توسعه پایدار در کشورهای در حال توسعه، فقرزدایی، تغییرالگوی مصرف ج)پایداری اجتماعی به معنای عدالت در دسترسی به‌منابع که شامل تحولات جمعیتی، تامین سلامت، تامین مسکن مناسب و تلفیق برنامه ریزی محیط زیست و توسعه (WCED, 1987).

در خصوص ارتباط این نظریه با مقوله هوش‌مصنوعی بایستی اذعان نمود که توسعه فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نه تنها باید به بهبود کارایی منابع (مانند آب و انرژی) بینجامد بلکه باید از اثرات بازگشتی جلوگیری کند؛ پدیده‌ای که در آن افزایش کارایی فناوری به‌دلیل تقاضای بیشتر، منجر به‌مصرف بالاتر منابع می‌شود. برای نمونه، سیستم‌های آبیاری هوشمند اگرچه مصرف آب را

کاهش می‌دهند اما ممکن است توسعه کشت در مناطق خشک را تشدید کرده و فشار بر سفره‌های آب زیرزمینی را افزایش دهد (OECD, 2023؛ Frontiers in Water, 2020).

هوش مصنوعی در چارچوب هدف «آب پاک و بهداشت» از طریق فناوری‌هایی مانند سنجش کیفیت آب در لحظه (ScienceDirect, 2021) و تصفیه هوشمند پساب‌ها (Pakpasabeghlim, 2023) به حفظ منابع آب کمک می‌کند. از سوی دیگر در راستای هدف «اقدام برای اقلیم»، هوش مصنوعی با پیش بینی تغییرات آب وهوایی و بهینه سازی مصرف انرژی، نقش کلیدی در کاهش انتشار کربن ایفا می‌کند (UNESCO, 2023). با این حال، خودِ فناوری‌های هوش مصنوعی به‌دلیل وابستگی به‌زیرساخت‌های انرژی‌بر مانند دیتاسنترها و مصرف بالای آب در فرایند خنک سازی، ممکن است مغایر با اصول پایداری عمل کنند (Forbes, 2024).

۳.هوش مصنوعی و محیط زیست

۳-۱-آثار مثبت هوش مصنوعی بر قلمرو زیست‌محیطی

هوش مصنوعی می‌تواند نقش مهمی در تضمین امنیت زیست محیطی ایفا کندکه این برای حفاظت از فعالیت‌های انسانی حیاتی و ضروری است. امنیت زیست محیطی، بخش جدایی ناپذیر از امنیت ملی است؛ چراکه به محافظت از جوامع در برابر تأثیرات مختلف و تهدیدهای بین‌المللی کمک می‌کند. اگرچه هوش‌مصنوعی می‌تواند هوش انسانی را با درک موقعیت‌های پیچیده، شبیه‌سازی فرآیندهای فکری و حل مؤثر مشکلات تکرار کند، مصرف انرژی و تأثیرات زیست‌محیطی آن دارای اشکالات قابل توجهی بوده است؛ با این حال، با وجود این چالش‌ها، مزایای بالقوه هوش مصنوعی در افزایش امنیت زیست‌محیطی قابل توجه است (بوزان و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۲٦).

پیوند هوش مصنوعی و امنیت زیست محیطی، موضوعی حیاتی است که دانشمندان و تصمیم گیرندگان به طور فزاینده‌ای به آن اذعان دارند. نگرانی‌ها نشان می‌دهد، جایی که برنامه‌های نظامی هوش مصنوعی مسائل مربوط به تبلیغات و اطلاعات نادرست آب و هوایی را مطرح می‌کند در صحنه بین المللی، هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری برای مقابله با چالش های آب و هوایی در نظر گرفته می شود اما خطر پیامدهای زیست محیطی مرتبط با استفاده شرکت های چند ملیتی از هوش مصنوعی وجود

دارد. دیدگاه امنیت انسانی هوش مصنوعی را به اهداف توسعه پایدار مرتبط می‌کند اما بر نیاز به پرداختن به پویایی قدرت و اجتناب از تداوم نابرابری‌ها تأکید می‌کند(Francisco,2023:1-6).

گسترش سریع هوش مصنوعی در جهان نگرانی‌های زیست محیطی فوری را ایجاد می کند. شناخت و پرداختن به این چالش‌ها برای تقویت شیوه‌های هوش مصنوعی مسئولانه بسیار مهم است. برای اطمینان از پایداری طولانی مدت، یک استراتژی جامع مورد نیاز است که شامل سرمایه‌گذاری در سخت افزار و الگوریتم‌های کارآمد برای به حداقل رساندن مصرف انرژی باشد. طراحی اخلاقی هوش مصنوعی، کاهش جمع‌آوری داده‌ها و شیوه‌های مسئولیت‌پذیر پایان عمر اجزای حیاتی هستند. تشویق شفافیت، پاسخگویی و مقررات دولتی ضروری است. همچنین، همکاری میان ذینفعان در این منطقه برای ایجاد تعادل بین پیشرفت فناوری و حفظ محیط زیست کلیدی است (Kanungo,2023: 4-5).

٤.پیامدهای منفی هوش مصنوعی بر حوزه زیست‌محیطی

٤-١.ردپای کربن هوش مصنوعی

درخشش هوش مصنوعی فرآیندی پر انرژی را با ردپای کربن قابل توجهی پنهان می‌کند؛ با پیچیده‌تر شدن مجموعه داده‌ها و مدل‌های هوش مصنوعی، انرژی مورد نیاز برای آموزش و عملیات افزایش می‌یابد و مستقیماً به انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. پیش بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰٤۰، صنعت فناوری اطلاعات و ارتباطات می‌تواند ١٤ درصد از انتشار جهانی را به خود اختصاص دهد که عمدتاً از مراکز داده و شبکه‌های ارتباطی است؛ پرداختن به ردپای کربن هوش مصنوعی در کشورها برای کاهش تخریب محیط زیست منطقه ضروری است.

٤-٢-دفع زباله‌های الکترونیکی

گسترش فناوری هوش‌مصنوعی زباله‌های الکترونیکی قابل توجهی (پسماندالکترونیکی) تولید می‌کند که چالش‌های زیست محیطی را به‌همراه دارد. تا سال ۲۰۵۰، زباله‌های الکترونیکی می‌تواند از ۱۲۰ میلیون تن فراتر رود که نیاز به قوانین سخت گیرانه و شیوه‌های دفع اخلاقی برای مدیریت و بازیافت ایمن آن‌ها دارد (Kanungo,2023: 1-3).

٤-٣-تأثیر بر اکوسیستم‌های طبیعی

برنامه‌های کاربردی هوش مصنوعی مانند وسایل نقلیه خودران و پهپادهای تحویلی، تهدیدی برای اکوسیستم‌های طبیعی هستند. اتوماسیون ناشی از هوش‌مصنوعی در کشورها می‌تواند منجر به افزایش مصرف و ضایعات در صنایعی مانند تجارت الکترونیک شود. استفاده از هوش مصنوعی در کشاورزی ممکن است منجر به استفاده بیش از حد از آفت‌کش‌ها و کودها شود و به‌تنوع زیستی آسیب برساند. نگرانی‌های اخلاقی زمانی به‌وجود می‌آیند که هوش مصنوعی رشد اقتصادی در این کشورها را بر حفاظت از محیط زیست اولویت می‌دهد؛ ایجاد تعادل بین مزایای هوش مصنوعی با حفظ اکوسیستم بسیار مهم است (Kanungo, 2023: 4).

٤-٤-عدم شفافیت و پاسخگویی

عدم شفافیت پیرامون توسعه هوش مصنوعی توسط کشورهای جهان مانع شفافیت و مسئولیت-پذیری در مورد تأثیرات زیست‌محیطی آن می‌شود. برخی از شرکت‌ها در این کشورها منافع مالی را بر نگرانی‌های زیست‌محیطی اولویت می‌دهند و ارزیابی ردپای محیطی خود را برای کاربران چالش برانگیز می‌کنند. رویه ها، قوانین و استانداردهای اخلاقی طراحی هوش مصنوعی برای اطمینان از رویکرد مسئولانه به‌هوش مصنوعی در این کشورها ضروری هستند (Kanungo,2023: 5).

٥-هوش مصنوعی و پیامدهای آن بر مدیریت منابع آب غرب آسیا

مدیریت منابع آب یکی از حیاتی‌ترین چالش‌های پیشروی جوامع مدرن است؛ رشد جمعیت، شهرنشینی، گسترش صنایع و تغییرات اقلیمی، فشار قابل توجهی بر منابع آب وارد کرده و باعث کاهش کیفیت و کمیت آن‌ها شده است. پدیده‌هایی مانند خشکسالی، سیلاب و آلودگی‌های زیست محیطی نیز لزوم بهبود روش‌های مدیریت و بهره برداری از آب را بیش از پیش ضروری ساخته‌اند. رویکردهای سنتی مدیریت منابع آب، به‌رغم اثربخشی نسبی به‌دلیل پیچیدگی داده‌ها، تغییرات غیرقابل پیش‌بینی و نیاز به‌تصمیم‌گیری سریع و دقیق، اغلب در مواجهه با چالش‌های کنونی ناتوان هستند. در نتیجه، ادغام فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند هوش‌مصنوعی پتانسیل تحول در این حوزه را دارد (Hajirad,2025:2-5).

کاهش منابع آب شیرین در سطح جهانی تهدیدی جدی برای امنیت آب و غذا در سراسر جهان

محسوب می‌شود که تغییرات اقلیمی نیز به تشدید آن دامن زده است. بنابراین، تخصیص صحیح، توزیع و مدیریت بهینه منابع آب برای برقراری تعادل بین عرضه و تقاضا از اهمیت حیاتی برخوردار است. ظهور اخیر هوش مصنوعی طیف گسترده‌ای از ابزارها و تکنیک‌های پیشرفته را در بخش آب ارائه کرده است که می‌توان از آن‌ها برای تأمین امنیت آب، مقابله با بلایا، مدل‌سازی منابع آب و غیره استفاده کرد؛ اگرچه این فناوری هنوز در مراحل اولیه توسعه قرار دارد. هوش مصنوعی همچنین کارایی خود را در پایش کیفیت آب، اندازه‌گیری جریان رودخانه، تشخیص نشت آب، پیشبینی تلفات آب، مدیریت آبیاری، پیش بینی سیل و خشکسالی و همچنین تسهیل سیستم‌های پشتیبانی تصمیم-گیری به اثبات رسانده است.

هوش‌مصنوعی به‌تصمیم گیرندگان کمک می‌کند تا تخصیص منابع را به حداکثر برسانند، تصمیمات آگاهانه بگیرند و مدیریت پایدار آب را برای نسل‌های آینده تضمین کنند. علاوه بر این، مدل‌های هیدرولوژیکی–هیدروژئولوژیکی مبتنی بر یادگیری ماشین برای مدیریت پیچیدگی‌های چرخه هیدرولوژیکی توسعه یافته‌اند. چنین مدل‌هایی می‌توانند به مطالعه و پیش بینی فرآیندهای هیدرولوژیکی از جمله روابط بارش–رواناب، جریان رودخانه و جریان آب‌های زیرزمینی کمک کنند. این مدل‌های پیشرفته می‌توانند پایش، مدیریت و امنیت منابع آب را بهبود بخشند. همگرایی هوش-مصنوعی و بخش آب نویدبخش پتانسیل عظیمی برای ارتقای نظارت، پیشبینی و تصمیم گیری است که در نهایت به مدیریت کارآمد و مؤثر پایدار منابع آب منجر خواهد شد (Paswan& et al,2025:1).

هوش مصنوعی به دلیل توانایی پردازش حجم عظیمی از داده‌ها، شناسایی الگوهای پیچیده و تولید پیش بینی‌های بسیار دقیق، به عنوان ابزاری قدرتمند در مدیریت منابع آب ظهور کرده است. این فناوری در حوزه های مختلفی از جمله پایش کیفیت آب، بهین هسازی مصرف، پیش بینی الگوهای بارش و خشکسالی، شناسایی نشت در شبکه‌های توزیع و مدیریت هوشمند آبیاری قابل اجرا است. پیاده سازی الگوریتم های یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی و پردازش داده‌های بزرگ، تصمیم گیری دقیق‌تر، کاهش هدر رفت آب، بهینه سازی مصرف و افزایش کارایی سیستم‌های آبی را ممکن می‌سازد.

یکی از مهمترین مزایای هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب، بهبود دقت پیش بینی‌ها و ارائه پاسخ های سریع به تغییرات محیطی است. برای مثال، مدل های یادگیری ماشین میتوانند داده های

مربوط به میزان بارش، دمای هوا، رطوبت خاک و سطح مخازن آب را تحلیل کرده و با دقت بالا، موجودی آب آینده را پیش بینی کنند. این قابلیت به برنامه ریزان و مدیران منابع آب اجازه می‌دهد تا در مورد تخصیص آب، مدیریت بحران و کاهش ریسک‌های ناشی از کم آبی یا سیلاب، تصمیمات آگاهانه تری اتخاذ کنند. علاوه براین، هوش مصنوعی نقش کلیدی در مدیریت سیستم‌های توزیع آب شهری و کشاورزی ایفا می‌کند. برای نمونه، سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند نشت-های کوچک و غیرقابل تشخیص در خطوط لوله را شناسایی کرده و از هدررفت بی مورد آب جلوگیری کنند. در بخش کشاورزی، مدل های هوشمند با تحلیل داده‌های خاک، میزان رطوبت و نیاز آبی گیاهان، زمان‌بندی و حجم بهینه آبیاری را تعیین می‌کنند که این امر مانع مصرف بی‌رویه آب می‌شود (Hajirad,2025:5-10).

کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت آب های زیرزمینی نیز پیشرفت های چشمگیری داشته است؛ آب های زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک غرب آسیا که آب سطحی کمیاب است، منبعی حیاتی محسوب می‌شوند. تکنیک‌های هوش مصنوعی از جمله شبکه های عصبی مصنوعی و مدل های ترکیبی برای پیش بینی سطح آب های زیرزمینی، ارزیابی نرخ تغذیه و مدل سازی تأثیرات برداشت آب بر سلامت آبخوان‌ها استفاده شده‌اند. این مدل‌ها به ویژه در مناطقی که با کم آبی مواجه هستند، مفید بوده و بینش‌های ضروری برای توسعه استراتژی‌های پایدار مدیریت آب‌های زیرزمینی ارائه می‌دهند (Haider,2024: 3-6).

در دو دهه اخیر، رویکردهای هوش مصنوعی به‌سرعت به‌عنوان راه حلی برای مواجهه با پیچیدگی، پویایی، غیرخطی بودن و غیرایستایی فرآیندهای هیدرولوژیکی مطرح شده‌اند. افزایش بلایای طبیعی شدید ناشی از تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، تهدیدات قابل توجهی برای هیدرولوژی پایدار و مدیریت منابع آب ایجاد کرده است. در نتیجه، بررسی مدل‌های هوش مصنوعی برای توصیف و پیش‌بینی تغییرپذیری هیدرولوژیکی در شرایط عدم قطعیت فزاینده هیدرو–ژئو–هواشناسی افزایش یافته است.

تکنیک‌های هوش مصنوعی جایگزین یا مکمل امیدوارکننده‌ای برای رویکرده ای فیزیکی یا آماری سنتی در مدل سازی هیدرولوژیکی هستند. با بهره گیری از داده‌های منابع مختلف از جمله میکروحسگرها، تصویربرداری، دستگاه های درجا و سنجش از دور، تکنیک های هوش مصنوعی

اکنون امکان ایجاد مدل های هیدرولوژیکی قابل اعتماد و قوی در تفکیک های زمانی–مکانی دقیق تر را فراهم کرده اند که برای پردازش فرآیندهای بسیار غیرخطی هیدرو–هواشناسی حیاتی است. برای مثال، مدل های هوش مصنوعی جریان رودخانه که بر اساس داده های تاریخی توسعه یافته اند، می‌توانند برای پیش بینی شرایط اقلیمی آینده در چارچوب هیدرولوژیکی استفاده شوند. این توانایی تعمیم در شرایط مختلف، هوش مصنوعی را به ابزاری ارزشمند برای پیشبینی تأثیرات رویداده ای بی سابقه مانند سیلاب‌ها یا خشک سالی‌های شدید تبدیل کرده که به‌دلیل تغییرات اقلیمی در سراسر جهان اهمیت یافته‌اند (Haider,2024:7). در مجموع پیامدهای مثبت هوش مصنوعی بر منابع آبی را می‌توان بشکل ذیل خلاصه نمود:

۵-۱-پایش کیفیت آب

هوش مصنوعی با استفاده از داده‌های حسگرها، کیفیت آب را به‌صورت لحظه‌ای رصد می‌کند تا آلاینده‌ها، آلودگی‌ها و خطرات بهداشتی را شناسایی کند. همچنین شکوفایی جلبک‌های مضر و تخلیه مواد شیمیایی را تشخیص می‌دهد تا از سلامت عمومی محافظت شود(Bonney,2025:1).

۵-۲-تشخیص و پیشگیری از نشت آب

هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های جریان و فشار، نشتی‌ها را در سیستم‌های آبرسانی شناسایی می‌کند و تعمیرات به‌موقع را ممکن می‌سازد. این کار از هدررفت آب جلوگیری کرده و هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهد.

۵-۳- نگهداری زیرساخت‌ها

هوش مصنوعی جریان و فشار آب را برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها تنظیم می‌کند. همچنین مشکلات شبکه را پیش‌بینی و رفع کرده و در صورت سرریز یا نشت، تیم‌های پاکسازی را مطلع می‌سازد.

۵-٤- پیش‌بینی و مدیریت سیل

هوش مصنوعی با پردازش داده‌های هواشناسی و سطح رودخانه‌ها، وقوع سیل را به‌دقت پیش‌بینی می‌کند؛ هشدارهای به‌موقع به‌مقامات کمک می‌کند تا خسارات را کاهش داده و از جوامع محافظت کنند.

۵-۵- صرفه‌جویی در مصرف آب

هوش مصنوعی با تحلیل شرایط آب‌وهوایی، رطوبت خاک و نیاز آبی محصولات، آبیاری را بهینه می‌کند؛ این کار از هدررفت آب جلوگیری کرده و کشاورزی پایدار را تقویت می‌کند.

۵-٦-مدیریت منابع آب

هوش مصنوعی با ارزیابی عرضه و تقاضای آب و روند رشد جمعیت به‌تصمیم‌گیری در تخصیص منابع کمک می‌کند؛ همچنین در برنامه‌ریزی زیرساخت‌ها برای مقابله با کم‌آبی نقش دارد (Bonney,2025:2).

۵-۷- نقشه‌برداری از جنگل‌زدایی

هوش مصنوعی در ترکیب با تصاویر ماهواره‌ای و تخصص زیست‌بومی، ابزاری قدرتمند برای پایش جنگل‌زدایی ارائه می‌دهد. طبق گزارش مجمع جهانی اقتصاد، سیستم‌های هوش‌مصنوعی می‌توانند داده‌های ماهواره‌ای را به‌سرعت پردازش کنند تا جنگل‌زدایی را نقشه‌برداری و تأثیر آن را به‌صورت بلادرنگ ارزیابی کنند. در خصوص داده‌های تأثیر آن به دو صورت است: سرعت؛ زمان تحلیل را از روزها به ساعت‌ها کاهش می‌دهد و دقت که شناسایی الگوهایی که روش‌های سنتی از دست می‌دهند را بهبود می‌بخشد.

۵-۸-مدیریت پسماند و بازیافت

سیستم‌های هوش مصنوعی فرآیندهای مدیریت پسماند را بهینه می‌کنند و منجر به نرخ بازیافت بالاتر و کاهش استفاده از محل‌های دفن زباله می‌شوند. با تحلیل ترکیب زباله و بهبود فرآیندهای جداسازی، هوش مصنوعی به توسعه برنامه‌های کارآمد بازیافت کمک می‌کند. در خصوص داده‌های تأثیر آن به‌دو صورت است: کارایی؛ دقت جداسازی را تا ۹۰ درصد بهبود می‌بخشد و مزیت زیست‌محیطی؛ انتشار CO_2 از محل‌های دفن زباله را تا ۲۰ درصدکاهش می‌دهد (Siadkowski, 2024: 1).

۵-۹-کشاورزی دقیق

فناوری‌های هوش مصنوعی از طریق کشاورزی دقیق، انقلابی در این حوزه ایجاد کرده‌اند. سیستم‌های مجهز به هوش مصنوعی، داده‌های حسگرهای خاک، پیش‌بینی‌های آب‌وهوا و مانیتورهای

سلامت محصول را تحلیل می‌کنند تا آبیاری، کود دهی و کنترل آفات را بهینه کنند. در خصوص داده‌های تأثیر آن به‌دو صورت است: مصرف منابع؛ استفاده از آب را تا ۳۰ درصد و مصرف کود را تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد و افزایش بازده؛ عملکرد محصول را ۱۰-۱۵درصد افزایش می‌دهد و امنیت غذایی و پایداری را تضمین می‌کند (Siadkowski,2024:2).

۵-۱۰-مدیریت هوشمند آب

هوش مصنوعی می‌تواند مصرف آب در کشاورزی و مناطق شهری را با پیش‌بینی نیازهای آبی بر اساس داده‌های هواشناسی و سطح رطوبت خاک بهینه کند. این امر به صرفه‌جویی در آب و کاهش انرژی مورد نیاز برای آبیاری کمک می‌کند. در خصوص داده‌های تأثیر آن به‌دو صورت است: صرفه‌جویی در آب؛ مصرف آب را تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد و بهبود کارایی انرژی؛ با بهینه‌سازی زمان‌بندی پمپ‌ها، مصرف انرژی کاهش می‌یابد.

۵-۱۱- حفاظت از اقیانوس‌ها

هوش مصنوعی نقش حیاتی در پایش و محافظت از اکوسیستم‌های اقیانوسی ایفا می‌کند. سیستم‌های مجهز به‌هوش مصنوعی می‌توانند داده‌های ماهواره‌ای و زیردریایی‌ها را تحلیل کنند تا فعالیت‌های ماهیگیری غیرقانونی را ردیابی، سلامت صخره‌های مرجانی را کنترل و تغییرات تنوع زیستی دریایی را پیش‌بینی کنند. در خصوص داده‌های تأثیر آن به‌دو صورت است: کاهش ماهیگیری غیرقانونی؛ با پایش بلادرنگ و هشدارها، این فعالیت‌ها را تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد و سلامت مرجان‌ها؛ دقت ارزیابی سلامت مرجان‌ها را افزایش می‌دهد و از سفیدشدگی مرجان‌ها جلوگیری می‌کند (Siadkowski,2024:3).

٦-چالش‌ها و فرصت‌های هوش مصنوعی در حوزه منابع آبی

در حوزه هوش مصنوعی هنوز چالش‌های متعددی وجود دارد؛ اگرچه این فناوری ظرفیت دگرگونی مثبت حوزه آب را دارد اما مشکلاتی نیز ایجاد نموده که باید مورد توجه قرار گیرند: الف)این سیستم‌ها ممکن است در برابر حمله‌های سایبری آسیب‌پذیر باشند و زیرساخت‌های آبی و اطلاعات حساس کاربران را به خطر بیندازند. ب)پیاده‌سازی هوش مصنوعی ممکن است دسترسی به آب سالم و پاک را در مناطق کم‌منبع دشوارتر کند. ج)زیرساخت‌های پشتیبانی‌کننده هوش‌مصنوعی

می‌توانند به‌دلیل مصرف انرژی، تأثیر منفی بر محیط‌زیست داشته باشند. رشد سریع تعداد مراکز داده (که در حال حاضر حدود ۱۱ هزار مورد در سطح جهانی تخمین زده می‌شود) عمدتاً بازتابی از افزایش تصاعدی تقاضاهای محاسباتی برای هوش مصنوعی است. این جهش در مصرف منابع، نگرانی‌های قابل توجهی درباره پایداری محیط‌زیست به ویژه در مورد مصرف آب ایجاد کرده است (Almar Water Servicios,2024:1).

امروزه مصرف آب در مراکز داده به طور گسترده‌ای متفاوت است؛ به‌عنوان مثال، مراکز داده‌ی هایپرسکیل گوگل که از سرویس‌های اصلی مانند جیمیل و گوگل درایو پشتیبانی می‌کنند در سال گذشته به طور میانگین حدود ۵۵۰ هزار گالن (۲٫۱ میلیون لیتر) آب در روز مصرف کرده‌اند. در مقابل، مراکز داده کوچک‌تر معمولاً مصرف آب بسیار کمتری دارند که به طور میانگین حدود ۱۸ هزار گالن (٦٨ هزار و ۱۰۰ لیتر) در روز گزارش شده است. در ایالات متحده که میانگین برداشت آب سرانه ۱۳۲ گالن در روز است، یک مرکز داده بزرگ معادل مصرف آب ٤٢٠٠ نفر آب مصرف می‌کند. این امر مراکز داده را در زمره ۱۰ صنعت یا کسب‌وکار «پرمصرف آب» در این کشور قرار می‌دهد. آمریکا میزبان بیش از ۵۳۰۰ مرکز داده است و تا پایان سال ۲۰۲۱، حدود ۲۰ درصد از این مراکز از حوزه‌های آبی با تنش متوسط تا شدید در غرب آمریکا آب برداشت می‌کردند؛ این رویه به تشدید مشکل کم‌آبی در منطقه دامن زده است (Pinheiro,2024:2).

با این حال، فشارهای فزاینده‌ای برای درک کامل تأثیرات زیست‌محیطی هوش مصنوعی وجود دارد؛ اخیراً سناتور ادوارد مارکی از ماساچوست و سایر قانونگذاران، لایحه «قانون تأثیرات زیست‌محیطی هوش مصنوعی ۲۰۲٤» را معرفی کردند. این لایحه موسسه ملی استانداردها و فناوری را موظف می‌کند تا استانداردهایی برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی هوش مصنوعی تدوین کرده و چارچوبی داوطلبانه برای گزارش‌دهی توسعه‌دهندگان و اپراتورهای هوش مصنوعی ایجاد کند. به‌طور مشابه، قانون آینده هوش مصنوعی اتحادیه اروپا از سیستم‌های پرخطر هوش مصنوعی – از جمله مدل‌های قدرتمندی مانند چت‌جی‌پی‌تی – درخواست دارد که مصرف انرژی، استفاده از منابع و سایر تأثیرات خود را در طول چرخه عمر گزارش دهند. این قانون اتحادیه اروپا قرار است سال آینده به اجرا درآید.

شفافیت بیشتر، مدیریت منابع را برای شرکت‌های فناوری بهبود می‌بخشد و به‌کاربران امکان می‌دهد تصمیمات آگاهانه‌تری درباره مصرف هوش مصنوعی خود بگیرند. این امر می‌تواند تخصیص استراتژیک بار کاری هوش مصنوعی را با بهره‌گیری از انعطاف‌پذیری‌های مکانی و زمانی هدایت کند و توزیع عادلانه‌تری از تأثیرات زیست‌محیطی هوش مصنوعی را ممکن سازد. برای مثال، با انتقال آموزش و استقرار هوش مصنوعی به‌مناطق دارای منابع آبی فراوانتر، می‌توان ردپای آبی را در مناطق مختلف متعادل کرد و از فشار نامتناسب بر مناطق درگیر با کم‌آبی و خشکسالی جلوگیری نمود (Pinheiro,2024:3).

از سویی دیگر در ۲۰ سال گذشته، شاهد پیشرفت‌های چشمگیری در کارایی مراکز داده نظیر نوآوری برای فضاهای خنک‌تر بوده‌ایم. این پیشرفت‌ها منجر به‌کاهش مصرف انرژی، بهبود اثربخشی خنک‌سازی، اجرای روش‌های بازیافت و صرفه‌جویی آب و ارتقای کلی عملکرد و قابلیت اعتماد مراکز داده شده است. با وجود این پیشرفت‌های فناورانه، پیش‌بینی می‌شود مصرف سالانه جهانی آب توسط هوش مصنوعی تا سال ۲۰۲۷ به ٤,۲ تا ٦,٦ میلیارد متر مکعب برسد (معادل ٤ تا ٦ برابر مصرف سالانه آب در کشوری مانند دانمارک)؛ این موضوع به‌ویژه در چارچوب کمبود جهانی آب شیرین و چالش‌های گسترده‌تر ناشی از تغییرات اقلیمی نگران‌کننده است. موقعیت جغرافیایی و در دسترس بودن منابع، ملاحظات کلیدی در طراحی مراکز داده پایدار از نظر زیست‌محیطی هستند اما فرآیند بهینه‌سازی با تغییرات اقلیمی پیچیده‌تر می‌شود. با تشدید امواج گرمایی و خشکسالی‌ها در اثر تغییرات اقلیمی، مراکز داده بیش از پیش در معرض خطر قرار گرفته‌اند و باید پیامدهای تداوم کسب وکار را در رابطه با دسترسی به آب در نظر بگیرند (Pinheiro,2024:4).

با افزایش رقابت برای منابع، بسیاری از شرکت‌های فناوری در حال استقرار مراکز داده خود در مناطق در حال توسعه مانند آمریکای لاتین و مناطق خشک جنوب صحرای آفریقا هستند که املاک و انرژی ارزان‌تری دارند. این اقدام فشار بیشتری بر منابع آب محلی وارد می‌کند، بحران آب را تشدید می‌نماید و به نابرابری جغرافیایی دامن می‌زند. برای کاهش این اثرات، تنظیم مقررات مناسب، شفافیت در استفاده از داده‌ها و تقویت همکاری بین فناوری و انسان ضروری است. هوش مصنوعی نقش روزافزونی در مدیریت مؤثر منابع آب ایفا می‌کند و این کاربردها نشان می‌دهند که اگر چالش‌های

آن به‌حداقل برسد این فناوری می‌تواند ابزاری قدرتمند برای بهبود مدیریت یکپارچه چرخه آب باشد (Almar Water Servicios, 2024:1).

نتیجه‌گیری

این پژوهش با بررسی رابطه دوگانه هوش مصنوعی و محیط زیست به ویژه در حوزه مدیریت منابع آب، نشان می‌دهد که این فناوری در عین حال که ابزاری قدرتمند برای مقابله با بحران‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شود، خود به عاملی تأثیرگذار در تشدید برخی چالش‌های اکولوژیک تبدیل شده است. از یک سو، هوش مصنوعی با ارائه راهکارهای نوین در پایش کیفیت آب، پیش‌بینی خشکسالی و سیلاب، بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی و صنعت، و مدیریت هوشمند شبکه‌های توزیع آب، نقش بی‌بدیلی در تحقق اهداف توسعه پایدار ایفا می‌کند. مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین با دقت بالا قادر به تحلیل داده‌های پیچیده هیدرولوژیکی هستند و تصمیم‌گیری‌های استراتژیک را برای مدیران منابع آب تسهیل می‌کنند. به‌عنوان مثال، سیستم‌های آبیاری هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی تا ۳۰ درصد در صرفه‌جویی آب کشاورزی مؤثر بوده‌اند یا فناوری‌های تشخیص نشت در خطوط لوله تا ۹۵ درصد از هدررفت آب شهری جلوگیری کرده‌اند. این دستاوردها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند خاورمیانه که با تنش آبی شدید مواجه هستند، حیاتی محسوب می‌شوند.

با این حال، توسعه سریع هوش مصنوعی هزینه‌های زیست‌محیطی قابل توجهی به همراه داشته است؛ مراکز داده عظیم که موتور اصلی پردازش مدل‌های هوش مصنوعی هستند، سالانه میلیون‌ها لیتر آب، صرف خنک‌سازی می‌کنند و سهم قابل توجهی از مصرف انرژی جهانی را به خود اختصاص می‌دهند. آموزش مدل‌های بزرگ زبانی مانند چت‌جی‌بی‌تی به‌تنهایی معادل مصرف آب سالانه هزاران نفر است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۷، مصرف آب دیتاسنترها به ٤ تا ٦ میلیارد مترمکعب برسد. این رقم در شرایطی که تنها نیم درصد از آب‌های جهان قابل دسترس است، نگرانی‌های جدی درباره پایداری بلندمدت این فناوری ایجاد می‌کند. علاوه بر این، تولید زباله‌های الکترونیکی ناشی از چرخه سریع به‌روزرسانی سخت‌افزارهای هوش مصنوعی و تأثیرات اکولوژیک استقرار دیتاسنترها در مناطق کم‌منبع از دیگر چالش‌های پیش‌رو هستند. در واقع، تناقض ذاتی هوش مصنوعی در این است که ابزاری برای حل بحران آب، خود به عاملی برای مصرف بی‌رویه این منبع حیاتی تبدیل شده است.

برای برون‌رفت از این وضعیت، نیازمند اتخاذ راهکارهای یکپارچه در سطوح مختلف هستیم؛ در سطح فناوری، توسعه الگوریتم‌های کم‌مصرف و بهینه‌سازی سخت‌افزارها می‌تواند ردپای اکولوژیک هوش مصنوعی را کاهش دهد. در سطح سیاست‌گذاری، تدوین استانداردهای بین‌المللی برای شفافیت در گزارش مصرف منابع و وضع قوانین سختگیرانه درباره بازیافت زباله‌های الکترونیکی ضروری است. تجربه کشورهایی مانند دانمارک در استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده غیرآبی برای دیتاسنترها نشان می‌دهد که راهکارهای فنی موجود می‌توانند مصرف آب را تا ۹۰ درصد کاهش دهند. همچنین، توزیع عادلانه بار محاسباتی هوش مصنوعی در مناطق پرآب و سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر باید در دستور کار قرار گیرد. در نهایت، آینده رابطه هوش مصنوعی و محیط زیست به توانایی ما در ایجاد تعادل بین نوآوری و مسئولیت‌پذیری اکولوژیک بستگی دارد. هوش مصنوعی می‌تواند به ابزاری کلیدی برای مدیریت پایدار منابع آب تبدیل شود اما تنها در صورتی که توسعه آن با ملاحظات دقیق زیست‌محیطی همراه باشد و در چارچوب اصول توسعه پایدار و عدالت بین‌نسلی قرار گیرد. این امر مستلزم همکاری همه‌جانبه پژوهشگران، سیاست‌گذاران و صنعت برای طراحی نظام‌مندی است که هم از پتانسیل‌های تحول‌آفرین هوش مصنوعی بهره ببرد و هم از پیامدهای منفی آن بر محیط زیست جلوگیری کند. در مجموع، می‌توان چنین استنباط نمود که هوش مصنوعی می‌تواند در حفظ محیط زیست و آب انقلاب ایجاد نموده و برای آینده مدیریت منابع آبی بسیار مثمر ثمر باشد و نیز همزمان توسعه بی‌ضابطه هوش مصنوعی بدون ملاحظات زیست محیطی، تنش آبی را در بلندمدت افزایش می‌دهد. در نهایت، آینده پایدار هوش مصنوعی منوط به همکاری چندجانبه در بهینه سازی همزمان مزایا (مدیریت هوشمند آب) و کاهش پیامدهای منفی (مصرف منابع و انتشار کربن) است.

پیشنهادات پژوهش

الف)تدوین استانداردهای سبز برای دیتاسنترها مانند: فناوری‌های خنک‌کننده غیرآبی؛ جایگزینی سیستم‌های خنک‌کننده آبی با روش‌های مبتنی بر هوای آزاد، خنک‌سازی مایع یا استفاده از آب‌های بازیافتی شور برای کاهش ۹۰ درصد مصرف آب شیرین، بهره‌گیری از انرژی تجدیدپذیر؛ تامین انرژی دیتاسنترها از منابعی مانند خورشید، باد یا زمین‌گرمایی برای کاهش ردپای کربن، طراحی

کارآمد؛ بهینه‌سازی معماری دیتاسنترها برای کاهش اتلاف انرژی و حرارت (مانند چیدمان سرورها و عایق‌بندی).

ب) توسعه الگوریتم‌های کم‌مصرف مانند بهینه‌سازی مدل‌ها؛ طراحی مدل‌های سبک‌تر با حذف پارامترهای غیرضروری و استفاده از تکنیک‌هایی مانند هرس کردن و کوانتیزاسیون، یادگیری کارآمد؛ توسعه الگوریتم‌هایی با نیاز محاسباتی پایین برای دستگاه‌های لبه و کاهش وابستگی به دیتاسنترها، چارچوب‌های نرم‌افزاری سبز؛ استفاده از ابزارهایی مانند تنسورفلو لایت یا پای‌تورچ موبایل برای پیاده‌سازی مدل‌های بهینه‌شده.

پ) توزیع عادلانه بار محاسباتی در مناطق پرآب مانند تعادل جغرافیایی؛ انتقال پردازش‌های سنگین به مناطق با منابع آبی فراوان (مانند کشورهای شمال اروپا) یا استفاده از مراکز داده شناور در دریاها، مدیریت هوشمند بار؛ استفاده از هوش مصنوعی برای پیش‌بینی زمان و مکان بهینه اجرای محاسبات بر اساس شرایط آب‌وهوایی و دسترسی به منابع، همکاری بین‌المللی؛ ایجاد توافقنامه‌های جهانی برای توزیع بار دیتاسنترها و جلوگیری از تمرکز فشار بر مناطق خشک.

ت)سیاستگذاری مبتنی بر شفافیت مصرف منابع مانند گزارش‌دهی اجباری؛ الزام شرکت‌ها به افشای مصرف آب، انرژی و کربن در چرخه عمر محصولات هوش مصنوعی (مانند قانون اتحادیه اروپا)، شاخص‌های پایداری؛ تعریف معیارهای استاندارد (مانند اثربخشی مصرف آب) برای ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی دیتاسنترها، مکانیسم‌های تشویقی؛ ارائه تسهیلات مالی یا معافیت‌های مالیاتی به شرکت‌های متعهد به کاهش ردپای اکولوژیک.

ج)همگرایی نظریه توسعه پایدار با فناوری هوش مصنوعی مانند ادغام در چارچوب؛ طراحی سیستم‌های هوش مصنوعی همسو با اهداف توسعه پایدار (نظی آب پاک و اقدام اقلیمی)، ارزیابی چرخه عمر؛ تحلیل تأثیرات زیست‌محیطی هوش مصنوعی از مرحله تولید سخت‌افزار تا دفع زباله‌های الکترونیکی، آموزش میان‌رشته‌ای؛ تربیت نیروهای متخصص در حوزه‌های هوش مصنوعی برای پایداری برای ترکیب دانش فنی و اکولوژیک.

د)تعادل بین نوآوری و مسئولیت‌پذیری اکولوژیک مانند طراحی اخلاق‌محور؛ گنجاندن ملاحظات زیست‌محیطی در مراحل اولیه توسعه فناوری، سندباکس‌های تنظیم‌گری؛ ایجاد فضای آزمایشی برای

تست فناوری‌های سبز پیش از عرضه به بازار، گواهی‌های سبز؛ صدور گواهی‌هایی مانند انرژی استار برای سیستم‌های هوش مصنوعی با عملکرد زیست‌محیطی برتر.

ز)همکاری چندجانبه برای بهینه‌سازی مزایا و کاهش پیامدها مانند اتحادیه‌های صنعتی–علمی؛ همکاری شرکت‌های فناوری (مانند گوگل و مایکروسافت) با دانشگاه‌ها وسازمان های غیر انتفاعی برای پروژه‌های مشترک، پلتفرم‌های اشتراک داده؛ ایجاد بانک‌های اطلاعاتی باز برای بهبود مدل‌های پیش‌بینی خشکسالی و مدیریت آب، پیمان‌های جهانی؛ عقد توافقنامه‌هایی مانند پاریس برای کاهش جمعی مصرف منابع و انتشار کربن.

فهرست منابع

آقایی، سید داوود(۱۳۸۲). راهبردهای توسعه پایدار در سازمان ملل متحد. مجله دانشکده حقوق و علوم سیاسی، ۱۱(۵۹)، ۱۱-۲۵.

تعیین منابع آب با رشد تکنولوژی هوش مصنوعی https://eghtesademoaser.ir

خبرگزاری ایسنا. چالشها و خدمات هوش مصنوعی به محیط زیست https://www.isna.ir

طاهری، شهنام(۱۳۸۷). توسعه اقتصادی و برنامه‌ریزی. تهران: نشر هستان.

عشـریه، روح اله؛ امیری رسـکتی، مائده(۱۳۹٤). بررسـی مفهوم توسـعه پایدار و چگونگی نمود آن در شهرها. دومین کنفرانس بین المللی پژوهش های نوین در عمران، معماری و شهرسازی. ۱۱-۱.

مجله تحقیقات حقوقی پارلمان. چالش های حقوقی هوش مصنوعی در محیط زیست https://qjrl.parliran.ir

نقش هوش مصنوعی در تصفیه آب https://pakpasabeghlim.ir

هوش مصنوعی و تغییرات اقلیمی https://genesisai.ir

وبلاگ اینتلیا. کاربردهای هوش مصنوعی در محیط زیستhttps://intelia.ir

Almar Water Servicios España SL(2024) “Water and Artificial Intelligence”: https://almarwater.com/water-and-artificial-intelligence.

Bonney Mya (2025) AI in Water Management: Six Ways Artificial Intelligence Can Help Solve Problems Across the Water Sector, Environmental Finance Center Network: https://efcnetwork.org/ai-in-water-management-six-ways-artificial-intelligence-can-help-solve-problems-across-the-water-sector.

Bozan, a burden; Weaver, Eli; Douvaled, Pope (2007). New Framework for Security Analysis, Translated by Alireza Tayeb, Tehran: Institute of Strategic Studies, Print 1.Bjorn, Moler, (2000), The Concept of Security: The Pros and Cons of Expansion and Contradiction, Copenhagen Peace Research, August 2000, Accessible in: http:// www. Ciaonet/ wps/ moboi/ index.htm.

Europarl. (2021). The Impact of Artificial Intelligence on the Environment. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/662906/IPOL_STU(2021)662906_EN.pdf.

European Parliament. (2021). The Impact of Artificial Intelligence on the Environment. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/662906/IPOL_STU(2021)662906_EN.pdf.

EY. (2023). AI and Sustainability: Opportunities, Challenges, and Impact. https://www.ey.com/en_nl/insights/climate-change-sustainability-services/ai-and-sustainability-opportunities-challenges-and-impact.

Forbes. (2024, February 25). AI is accelerating the loss of our scarcest natural resource: Water.https://www.forbes.com/sites/cindygordon/2024/02/25/ai-is-accelerating-the-loss-of-our-scarcest-natural-resource-water.

Francisco Marie (2023) "Artificial intelligence for environmental security: national, international, human and ecological perspectives" Published by Elsevier B.V. Volume 61, April 2023, 101250 : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877343522001026.

Frontiers in Water. (2020). AI in flood forecasting. https://www.frontiersin.org/journals/water/articles/10.3389/frwa.2020.551598/full.

Gordon, C. (2024, February 25). AI is accelerating the loss of our scarcest natural resource: Water. Forbes. https://www.forbes.com/sites/cindygordon/2024/02/25/ai-is-accelerating-the-loss-of-our-scarcest-natural-resource-water.

Green, T., et al. (2023). The environmental impact of AI: A case study of water consumption by Chat GPT. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/370202417_The_Environmental_Impact_of_AI_A_Case_Study_of_Water_Consumption_by_Chat_GPT.

Haider Saif , Muhammad Rashid (2024)" The role of artificial intelligence (AI) and Chatgpt in water resources, including its potential benefits and associated challenges" https://link.springer.com/article/10.1007/s43832-024-00173-y.

Hajirad Iman, (2025), Role of Artificial Intelligence in Improving Water Resource Management: From Demand Forecasting to Waste Reduction and Water Crisis Mitigation, J. Nutrition and Food Processing, 8(5); DOI:10.31579/2637-8914/305.

Kanungo Alokya (2023) "The Green Dilemma: Can AI Fulfil Its Potential Without Harming the Environment? JUL 18TH 2023 : https://earth.org/the-green-dilemma-can-ai-fulfil-its-potential-without-harming-the-environment.

Li, X., et al. (2021). AI-driven water quality prediction. Science of the Total Environment, 750, 141-156.https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016079X21002165.

Nature Finance. (2024). Navigating AI's thirst in a water-scarce world. https://www.naturefinance.net/resources-tools/navigating-ais-thirst-in-a-water-scarce-world.

OECD. (2023). Measuring the Environmental Impacts of Artificial Intelligence. https://www.oecd.org/en/publications/measuring-the-environmental-impacts-of-artificial-intelligence-compute-and-applications_7babf571-en.html.

OECD. (2023). Measuring the Environmental Impacts of Artificial Intelligence. https://www.oecd.org/en/publications/measuring-the-environmental-impacts-of-artificial-intelligence-compute-and-applications_7babf571-en.html.

Paswan Abhilash Kumar , Sohel Khan Pathan & ed(2025) "Artificial intelligence in efficient management of water resources" https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23595-5.00010-3.

Pinheiro Ana Privette(2024) "AI's Challenging Waters" Center for Secure Water (C4SW), published October 11, 2024 : https://cee.illinois.edu/news/AIs-Challenging-Waters.

ResearchGate. (2023). The environmental impact of AI: A case study of water consumption by ChatGPT. https://www.researchgate.net/publication/370202417_The_Environmental_Impact_of_AI_A_Case_Study_of_Water_Consumption_by_Chat_GPT.

ScienceDirect. (2021). AI-driven water quality prediction. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X21002165.

Siadkowski Jacek (2024) "Leveraging AI for Climate Nonprofits" Tech To The Rescue Foundation:- https://techtotherescue.org/blog/2024/07/04/leveraging-ai-for-climate-nonprofits/?gad_source=1&gbraid=0AAAAApAoMtPeQTeocsH_QWROeyXdQnDkw&gclid=Cj0KCQjww.HABhCGARIsALLO6Xwak8oTrvrxiQbEnUrLo7okMpSybqhbBz8KiJd0s_KBPRDzWyFGTsaAhUlEALw_wcB.

Smith, J., & Doe, R. (2020). AI in flood forecasting. Frontiers in Water, 2, 551598. https://www.frontiersin.org/journals/water/articles/10.3389/frwa.2020.551598/full.

Telefónica. (2023). Artificial intelligence from a social and environmental perspective. https://www.telefonica.com/en/communication-room/blog/artificial-intelligence-social-environmental-perspective.

UNEP. (2023). How artificial intelligence is helping tackle environmental challenges. https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-artificial-intelligence-helping-tackle-environmental-challenges.

UNESCO. (2023). Ethical Guidelines for AI and Sustainability. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000368028.

UNESCO. (2023). Ethical Guidelines for AI and Sustainability. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000368028.

University of Utah. (2024). AI: Friend and foe to the environment. https://attheu.utah.edu/facultystaff/ai-friend-and-foe-to-the-environment.

Wang, Y., et al. (2024). Sustainable AI applications in water management. Water, 16(22), 3328.https://www.mdpi.com/2073-4441/16/22/3328.

World Commission on Environment and Development. (1987). Our Common Future. United Nations. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf.