

Environmental Hazards and the Role of Emerging Technologies in Monitoring, Forecasting, and Risk Mitigation: From Smart Cities to Green Innovation

Hamid Bakhtiari¹

5

Year 3
Spring 1405

Research paper

:Date received
1405/01/25
:Date accepted
1405/02/15
Pages: 159-175

Abstract

The acceleration of urbanization, expansion of industrial activities, and increasing consumption of resources during recent decades have led to the intensification of a set of environmental hazards such as air and water pollution, climate change, soil degradation, and an increase in the number and intensity of natural disasters. Simultaneously, the emergence and expansion of emerging technologies such as artificial intelligence, Internet of Things, big data, remote sensing, smart city, and nanotechnology have provided the possibility of continuous monitoring, more accurate forecasting, and more targeted intervention in the cycle of production and dissemination of hazards. The objective of this article is to explain the conceptual and practical linkage between environmental hazards and emerging technologies and to present a framework for the sustainable, equitable, and effective use of these technologies in the service of risk reduction, enhancement of resilience, and achievement of sustainable development goals. The research method is based on an analytical review of up-to-date scientific literature on sustainable smart cities, innovation, and environmental policy-making in transitioning economies. The results indicate that the integration of digital infrastructures with environmental policy-making, if attention is paid to environmental justice, digital divide, and the environmental footprint of the technologies themselves, can simultaneously lead to the reduction of pollutant emissions, optimization of resource consumption, and enhancement of social resilience.

Keywords : Environmental Hazards, Artificial Intelligence, Smart City, Green Innovation, Industry and Environmental Justice.

1.*Master of Science in Biotechnology, Faculty and Research Institute of Water, Environment and Natural Resources, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran
kphbakhtia@ihu.ac.ir.

"المخاطر البيئية ودور التقنيات الحديثة في الرصد والتنبؤ والحد من المخاطر:

من المدن الذكية إلى الابتكار الأخضر"

حميد بختياري^١*

٥

السنة الرابعة و خمسة

الربيع ١٤٠٥

ورقة بحثية

تاريخ الاستلام:

١٤٠٥/٠١/٢٥

تاريخ القبول:

١٤٠٥/٠٢/١٥

الصفحات: ١٧٥-١٥٩

ملخص

أدى التوسع الحضري المتسارع، وتوسع الأنشطة الصناعية، وتزايد استهلاك الموارد خلال العقود الأخيرة إلى تفاقم مجموعة من المخاطر البيئية، مثل تلوث الهواء والماء، وتغير المناخ، وتدهور التربة، وزيادة عدد الكوارث الطبيعية وشدها. في الوقت نفسه، مكن ظهور وانتشار التقنيات الحديثة، كالذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، والبيانات الضخمة، والاستشعار عن بُعد، والمدن الذكية، وتقنية النانو، من المراقبة المستمرة، والتنبؤ الأكثر دقة، والتدخل الأكثر استهدافاً في دورة إنتاج المخاطر وانتشارها. يهدف هذا المقال إلى شرح العلاقة المفاهيمية والعملية بين المخاطر البيئية والتقنيات الحديثة، وتقديم إطار عمل للاستخدام المستدام والعاقل والفعال لهذه التقنيات في خدمة الحد من المخاطر، وتعزيز القدرة على الصمود، وتحقيق أهداف التنمية المستدامة. تهدف هذه الورقة إلى شرح العلاقة المفاهيمية والعملية بين المخاطر البيئية والتقنيات الحديثة، وتقديم إطار عمل للاستخدام المستدام والعاقل والفعال لهذه التقنيات في سبيل الحد من المخاطر، وتعزيز القدرة على الصمود، وتحقيق أهداف التنمية المستدامة. ويعتمد منهج البحث على مراجعة تحليلية للأدبيات العلمية الحالية حول المدن الذكية المستدامة، والابتكار، وصنع السياسات البيئية في الاقتصادات الانتقالية. وتُظهر النتائج أن دمج البنية التحتية الرقمية مع صنع السياسات البيئية، مع مراعاة العدالة البيئية، والفجوة الرقمية، والأثر البيئي للتقنيات نفسها، يُمكن أن يُسهم في خفض انبعاثات الملوثات، وترشيد استهلاك الموارد، وتعزيز القدرة على الصمود الاجتماعي.

الكلمات المفتاحية: المخاطر البيئية، الذكاء الاصطناعي، المدينة الذكية، الابتكار الأخضر، الصناعة والعدالة البيئية.

١ . ماجستير العلوم في التقنية الحيوية، كلية ومعهد أبحاث المياه والبيئة والموارد الطبيعية، جامعة الإمام الحسين، طهران، إيران

kphbakhtia@ihu.ac.ir

مخاطرات محیطی و نقش فناوری‌های نوین در پایش، پیش‌بینی و کاهش ریسک: از شهرهای هوشمند تا نوآوری سبز

حمید بختیاری^{۱*}

چکیده

شتاب شهرنشینی، گسترش فعالیت‌های صنعتی و مصرف فزاینده منابع طی دهه‌های اخیر، به تشدید مجموعه‌ای از مخاطرات محیطی از قبیل آلودگی هوا و آب، تغییر اقلیم، تخریب خاک و افزایش تعداد و شدت بلایای طبیعی منجر شده است. هم‌زمان، ظهور و گسترش فناوری‌های نوین نظیر هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، داده‌های بزرگ، سنجش‌ازدور، شهر هوشمند و نانوفناوری، امکان پایش پیوسته، پیش‌بینی دقیق‌تر و مداخله هدفمندتر در چرخه تولید و انتشار مخاطرات را فراهم ساخته است. هدف این مقاله، تبیین پیوند مفهومی و کاربردی میان مخاطرات محیطی و فناوری‌های نوین و ارائه چارچوبی برای استفاده پایدار، عادلانه و اثربخش از این فناوری‌ها در خدمت کاهش ریسک، ارتقای تاب‌آوری و تحقق اهداف توسعه پایدار است. روش پژوهش مبتنی بر مرور تحلیلی ادبیات علمی به‌روز درباره شهر هوشمند پایدار، نوآوری و سیاست‌گذاری محیط‌زیستی در اقتصادهای در حال گذار است. نتایج نشان می‌دهد که ادغام زیرساخت‌های دیجیتال با سیاست‌گذاری محیط‌زیستی، در صورت توجه به عدالت محیطی، شکاف دیجیتال و ردپای زیست‌محیطی خود فناوری‌ها، می‌تواند هم‌زمان به کاهش انتشار آلاینده‌ها، بهینه‌سازی مصرف منابع و ارتقای تاب‌آوری اجتماعی منجر شود.

واژگان کلیدی: مخاطرات محیطی، هوش مصنوعی، شهر هوشمند، نوآوری سبز، صنعت و عدالت محیطی.

۵

سال سوم
بهار ۱۴۰۵

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۵/۰۱/۲۵

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۲/۱۵

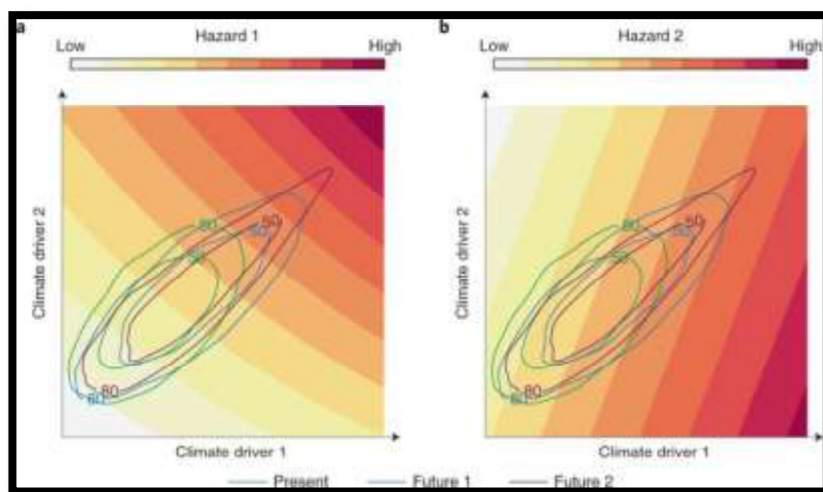
صص: ۱۷۵-۱۵۹

۱. *کارشناسی ارشد بیوتکنولوژی، دانشکده و پژوهشکده آب، محیط زیست و منابع طبیعی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)،

تهران، ایران kphbakhtia@ihu.ac.ir

مقدمه

تشدید مخاطرات زیست‌محیطی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی، به یکی از برجسته‌ترین چالش‌های قرن حاضر بدل شده است؛ از یک سو، دگرگونی‌های اقلیمی با پدیدار شدن افزایش دما، دگرسانی الگوهای بارش و رویدادهای حدی جوی (شکل ۱) و از سوی دیگر، آلاینده‌های شیمیایی، زیستی و فیزیکی ناشی از گسترش صنایع و شهرنشینی، هم سلامت بشر و هم پایداری اکوسیستم‌ها را به شدت در معرض تهدید قرار داده‌اند.



شکل ۱) رویدادهای مرکب آب‌وهوایی (۱)

این جریان، به ویژه در کشورهای در حال گذار اقتصادی که با ترکیبی از رشد شتابان، برنامه‌ریزی ناکارآمد فضای و ظرفیت نهادی محدود دست به گریبان‌اند، به شکل‌گیری منظر مخاطره‌آمیزی پیچیده و چندلایه انجامیده است. در همین دوران، انقلاب دیجیتال و دگرگونی‌های صنعتی نسل چهارم، افق‌های نوینی برای بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته در پایش، تحلیل و مهار مخاطرات گشوده و مفاهیمی چون «شهر هوشمند پایدار»، «زنجیره تأمین سبز» و «صنعت انسان‌محور» را در کانون توجه پژوهشگران و سیاست‌گذاران نهاده است. پرسش محوری این پژوهش آن است که: چگونه و زیر چه شرایطی می‌توان از فناوری‌های نوظهور برای کاستن از مخاطرات زیست‌محیطی بهره جست، بدون آنکه خود به منشأ نوینی از ریسک و نابرابری بدل گردند؟ (1,2).

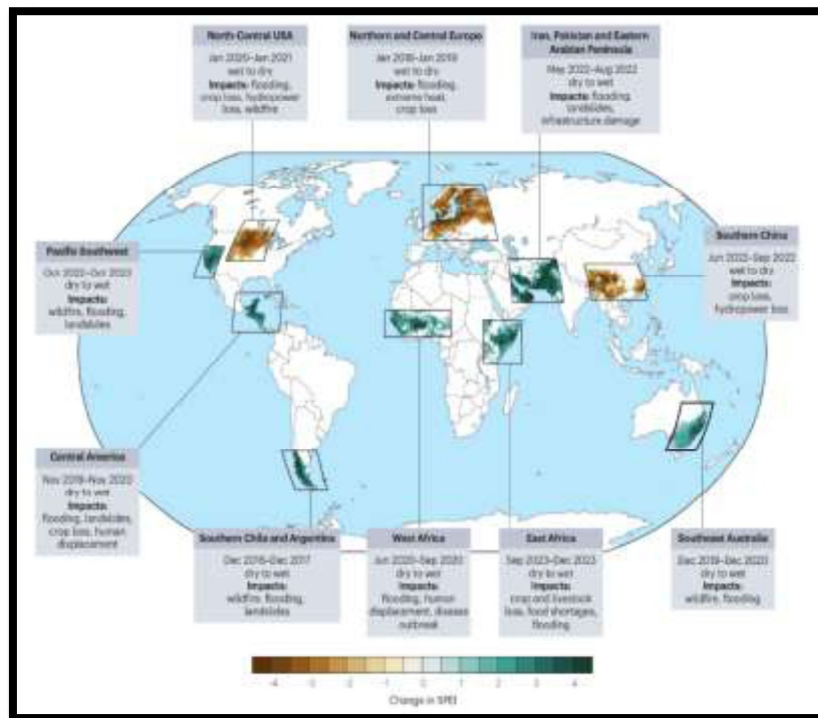
۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۱-۲. تعریف و طبقه‌بندی مخاطرات زیست‌محیطی

مخاطره زیست‌محیطی به هر پدیده طبیعی، انسان‌ساخت یا ترکیبی اطلاق می‌گردد که از طریق دگرگونی در کیفیت هوا، آب، خاک یا ساختار اکوسیستم‌ها، احتمال وقوع آسیب به انسان، جانداران و زیرساخت‌ها را فزونی بخشد. پیشینه پژوهشی، این مخاطرات را عمدتاً در سه دسته اصلی جای می‌دهد: مخاطرات طبیعی همچون سیل، خشکسالی، امواج گرما، طوفان و زلزله که زیر تأثیر تغییرات اقلیمی، در فراوانی و شدت دگرگونی یافته‌اند؛ مخاطرات انسان‌ساخت شامل آلودگی‌های صنعتی هوا، آب و خاک، رهاسازی مواد شیمیایی خطرناک، تولید پسماندهای سمی، میکروپلاستیک‌ها و ترکیبات آلی پایدار؛ و مخاطرات ترکیبی که از تعامل مخاطرات طبیعی و فعالیت‌های انسانی زاده می‌شوند، مانند سیل‌های مرکب در نواحی ساحلی یا رانش زمین ناشی از جنگل‌زدایی و بارش‌های شدید. این طبقه‌بندی، پایه‌ای برای درک جامع از پیچیدگی‌های مخاطرات معاصر فراهم می‌آورد (3,4).

۲-۲. آسیب‌پذیری، تاب‌آوری و عدالت زیست‌محیطی

مفهوم «منظر مخاطرات سلامت زیست‌محیطی» آشکار می‌سازد که شدت تأثیر مخاطرات، نه تنها وابسته به ویژگی‌های فیزیکی آنهاست، بلکه به توزیع فضایی-اجتماعی آسیب‌پذیری و ظرفیت سازگاری گره خورده است. پژوهش‌های متعدد دلالت دارند که کودکان، سالمندان، زنان و جوامع کم‌درآمد، در برابر آلاینده‌ها و رویدادهای زیست‌محیطی آسیب‌پذیرترند و همزمان، دسترسی محدودتری به خدمات بهداشتی، زیرساخت‌های مقاوم و فناوری‌های حفاظتی دارند. شواهد قابل توجه و فزاینده‌ای وجود دارد که نشان می‌دهد نوسانات جهانی آب و هوا، که به روش‌های مختلف تعریف و کمی‌سازی شده‌اند، در طول دوره تاریخی افزایش یافته است (شکل ۲). عدالت زیست‌محیطی بر لزوم توزیع برابر منافع و هزینه‌های زیست‌محیطی و فناوریانه، و مشارکت مؤثر گروه‌های ذی‌نفع در فرآیندهای تصمیم‌گیری تأکید ورزد؛ این رویکرد، نه تنها نابرابری‌های موجود را کاهش می‌دهد، بلکه تاب‌آوری جمعی را در برابر مخاطرات فزونی می‌بخشد (5,6).



شکل (۲) فراوانی مخاطرات اقلیمی از (۳)

۳. فناوری‌های نوین در پایش و پیش‌بینی مخاطرات

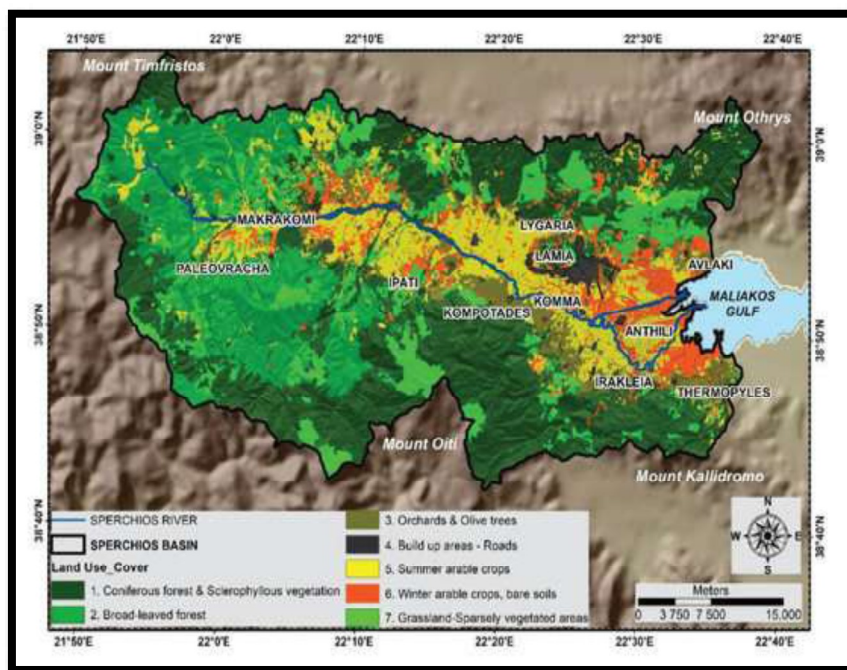
۳-۱. هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و داده‌های کلان

شهرهای هوشمند پایدار، با تکیه بر شبکه‌های حسگری متصل به اینترنت اشیا، پلتفرم‌های داده‌های کلان و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، امکان نظارت لحظه‌ای بر کیفیت هوا، سرریز شبکه‌های آب و فاضلاب، ترافیک و مصرف انرژی را مهیا ساخته‌اند. این داده‌ها، پس از پردازش پیشرفته، الگوهای پیش‌بینی‌کننده آلودگی هوا تولید می‌کنند، نقاط کانونی آلودگی را شناسایی می‌نمایند و هشدارهای زودهنگام برای سیلاب‌ها و امواج گرما صادر می‌سازند؛ چنین ابزارهایی، پایه‌ای برای سیاست‌گذاری مدیریت تقاضا، محدودیت‌های ترافیکی یا بهینه‌سازی الگوهای مصرف فراهم می‌آورند. در قلمرو صنعتی نیز، داده‌های لحظه‌ای از فرآیندهای تولید و زنجیره تأمین، تشخیص زودهنگام نشت مواد خطرناک، مصرف غیرعادی انرژی و انحراف از

استانداردهای زیست‌محیطی را ممکن می‌سازند و بدین‌سان، ریسک‌های عملیاتی را به حداقل می‌رسانند (7,8).

۳-۲. سنجش از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی در نقشه‌برداری ریسک

سنجش از دور ماهواره‌ای و پهپادی، همراه با تحلیل‌های مکانی در سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، ابزاری نیرومند برای شناسایی نواحی پرخطر، مدل‌سازی سیلاب، فرسایش، رانش زمین و پایش تغییرات کاربری اراضی ارائه داده است. این فناوری‌ها، با ادغام داده‌های توپوگرافی، بارش، کاربری اراضی و شاخص‌های اجتماعی-اقتصادی، نقشه‌های ریسک مرکب تولید می‌کنند و اولویت‌بندی مداخلات را در سطوح ملی و محلی تسهیل می‌نمایند. چنین نقشه‌هایی، در مکان‌یابی زیرساخت‌های حیاتی، برنامه‌ریزی توسعه شهری و تدوین طرح‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی، نقشی محوری ایفا کرده و دقت و کارایی تصمیم‌گیری را به طور چشمگیری ارتقا می‌بخشند (شکل ۳) (9,10).

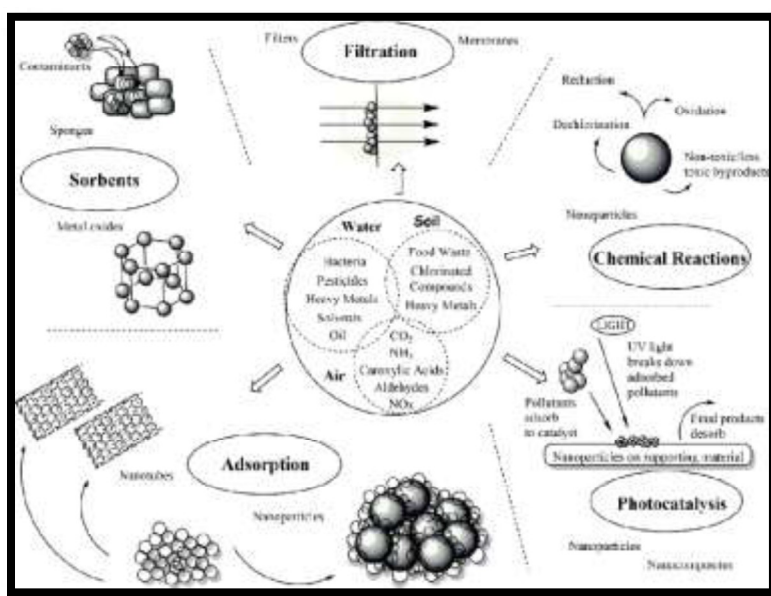


شکل ۳) استفاده از GIS برای مدل‌سازی سیلاب و بر نقشه‌برداری ریسک (۹ و ۱۰)

۴. فناوری‌های نوین در کاهش و ترمیم مخاطرات

۴-۱. نانوفناوری و فناوری‌های تصفیه سبز

پژوهش‌ها در قلمرو نانوفناوری زیست‌محیطی نشان داده‌اند که نانوذرات مغناطیسی، با جذب و حذف آلاینده‌های آلی پایدار و فلزات سنگین از آب و پساب، کارایی بالایی دارند (شکل ۴). این جاذب‌ها، با سطح ویژه گسترده و قابلیت بازیافت، در قیاس با مواد سنتی، ظرفیت بیشتری برای کاهش غلظت آلاینده‌ها در زمان کوتاه‌تر و با دوز کمتر عرضه می‌دارند. ادغام این فناوری‌ها با فرآیندهای زیست‌پالایی - بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌ها و گیاهان در ترمیم آلودگی - راهکارهایی کم‌هزینه و همخوان با محیط زیست برای بازسازی خاک‌ها و آب‌های آلوده فراهم می‌آورد و افق‌های نوینی در مدیریت پایدار پسماندها می‌گشاید (11,12).



شکل ۴) نانوفناوری ترمیم محیط (۱۲)

۳-۳. نوآوری سبز و دگرگونی زنجیره تأمین

در مقیاس کلان، مفهوم «نوآوری سبز» همراه با تحول دیجیتال، به عنوان راهبردی کلیدی برای کاهش انتشار آلاینده‌ها و مصرف مواد خام برجسته شده است. بنگاه‌هایی که از فناوری‌های دیجیتال برای ردیابی مواد، بهینه‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل، مدیریت موجودی و بازطراحی

محصولات بهره می‌جویند، همزمان هزینه‌ها را کاهش می‌دهند و ردپای کربنی و تولید پسماند را کمینه می‌سازند. مطالعات تجربی دلالت دارند که مقررات زیست‌محیطی شفاف و پایدار، می‌توانند محرک سرمایه‌گذاری در نوآوری سبز و فناوری‌های پاک باشند، نه آنکه صرفاً به عنوان هزینه‌ای تحمیلی نگریسته شوند؛ این رویکرد، نه تنها پایداری اقتصادی را تقویت می‌کند، بلکه به کاهش مخاطرات زیست‌محیطی در زنجیره‌های تأمین جهانی یاری می‌رساند (13,14).

۴. عصر فرصت‌ها و مخاطرات

۴-۱. شهر هوشمند پایدار

بررسی پیشینه پژوهشی شهر هوشمند حاکی از آن است که گذار از نگرشی صرفاً فناورمحور به رویکردی «انسان‌محور و زیست‌محیطی» در حال وقوع است؛ رویکردی که در آن، سیستم‌های مدیریت هوشمند انرژی، شبکه‌های برق پیشرفته، ناوگان حمل‌ونقل پاک، فضاهای سبز چندکارکردی و زیرساخت‌های آبی-سبز، همزمان برای کاهش آلودگی، تعدیل دمای شهری و کاستن از ریسک سیلاب‌ها طراحی و اجرا می‌گردند. این دگرگونی، نه تنها کارایی شهری را فزونی می‌بخشد، بلکه به تقویت تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی و ارتقای کیفیت زندگی شهروندان یاری می‌رساند. با این حال، غفلت از ابعاد اجتماعی و مشارکت فعال شهروندی می‌تواند به پروژه‌هایی بینجامد که عمدتاً به سود گروه‌های برخوردار تمام شود و شکاف عدالت زیست‌محیطی را عمیق‌تر سازد؛ شکافی که نه تنها نابرابری‌های موجود را تشدید می‌کند، بلکه پایداری بلندمدت توسعه شهری را نیز به مخاطره می‌اندازد (15,16,17).

۴-۲. صنعت انسان‌محور

پیشینه پژوهشی صنعت بر آن دلالت دارد که موج نوین اتوماسیون، رباتیک و هوش مصنوعی باید در راستای تکمیل نقش انسان و ارزش‌های انسانی به کار گرفته شود، نه صرفاً جایگزینی نیروی کار؛ رویکردی که انسان را در کانون فرآیندهای تولیدی قرار می‌دهد و فناوری را ابزاری برای تقویت خلاقیت و رفاه او می‌سازد. پیوند این نگرش با اهداف زیست‌محیطی، در قالب طراحی فرآیندهای تولید کم‌کربن، استفاده مجدد از مواد، اقتصاد چرخشی و طراحی برای بازیافت، می‌تواند همزمان به بهبود کیفیت محیط زیست، ارتقای مهارت‌های نیروی کار و کاهش آسیب‌پذیری اجتماعی بیانجامد. چنین هم‌افزایی، نه تنها ردپای کربنی صنایع را کمینه می‌سازد،

بلکه به ایجاد زنجیره‌های تأمین پایدار و تاب‌آور کمک می‌کند و افق‌های نوینی در توسعه صنعتی همخوان با اصول پایداری می‌گشاید (18,19,20).

۵. چالش‌ها و ملاحظات پیش رو

۵-۱. شکاف دیجیتال و نابرابری در دسترسی

یکی از موانع اصلی بهره‌گیری عادلانه از فناوری‌های نوین در مدیریت مخاطرات زیست‌محیطی، نابرابری در دسترسی به زیرساخت‌های ارتباطی، داده‌های باکیفیت و توانمندی‌های فنی است؛ نابرابری‌ای که جوامع را به دو دسته برخوردار و محروم تقسیم می‌کند. مناطق روستایی، حاشیه‌نشین و کشورهای کم‌درآمد، در حالی که در معرض مخاطرات بیشتری قرار دارند، اغلب از ابزارهای هشدار سریع، حسگرهای محیطی و سامانه‌های تصمیم‌یار محروم‌اند؛ این محرومیت می‌تواند چرخه آسیب‌پذیری را تشدید کند و نابرابری‌های اجتماعی-اقتصادی را پایدار سازد. بدین‌سان، بدون مداخلات هدفمند برای پل زدن بر این شکاف، فناوری‌های نوین به جای کاهش ریسک، خود به عامل تعمیق نابرابری‌ها بدل می‌گردند (21,22,23).

۵-۲. ردپای زیست‌محیطی خود فناوری

فناوری‌های دیجیتال و نوین، خود دارای اثرات زیست‌محیطی چشمگیری هستند، از جمله مصرف بالای انرژی مراکز داده، انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با زیرساخت‌های ارتباطی، و حجم فزاینده ضایعات الکترونیکی؛ اثراتی که چرخه عمر این فناوری‌ها را به چالش می‌کشد. در صورت غفلت از ارزیابی جامع چرخه عمر این فناوری‌ها، ممکن است بخشی از منافع حاصل از بهینه‌سازی مصرف در سایر حوزه‌ها، با افزایش مصرف منابع در بخش فناوری خنثی شود و حتی به تشدید بحران‌های زیست‌محیطی بینجامد. این پارادوکس، ضرورت ادغام اصول پایداری در طراحی و بهره‌برداری از فناوری‌های نوین را برجسته می‌سازد تا منافع زیست‌محیطی آن‌ها به طور خالص محقق گردد (24,25,26).

۶. راه‌حل‌های پیشنهادی علمی و سیاستی

۱-۶. حکمرانی داده و هم‌راستاسازی سیاست‌ها

طراحی چارچوب حکمرانی داده برای اشتراک‌گذاری امن، قابل اعتماد و شفاف داده‌های محیطی و شهری بین نهادهای دولتی، دانشگاه‌ها، بخش خصوصی و جامعه مدنی، پیش‌شرط استفاده اثربخش از هوش مصنوعی و داده‌های بزرگ در مدیریت مخاطرات است. هم‌راستا کردن راهبردهای تحول دیجیتال با برنامه‌های اقلیمی و محیط‌زیستی، و پرهیز از تدوین جداگانه و جزیره‌ای این اسناد، به افزایش هم‌افزایی و کاهش تعارض اهداف کمک می‌کند.

۲-۶. تقویت نوآوری سبز و مشوق‌های اقتصادی

ایجاد نظام‌های تنظیم‌گری هوشمند شامل ترکیبی از استانداردهای محیطی، مشوق‌های مالیاتی، حمایت از تحقیق و توسعه سبز، و سازوکارهای بازارمحور مانند قیمت‌گذاری کربن، می‌تواند انگیزه بنگاه‌ها برای به‌کارگیری فناوری‌های کاهش‌دهنده ریسک را تقویت کند. گنجاندن شاخص‌های عملکرد محیط‌زیستی و اجتماعی در ارزیابی عملکرد شرکت‌ها و گزارش‌دهی پایداری، سرمایه‌گذاران را به سمت پروژه‌های فناورانه با اثرات مثبت محیط‌زیستی هدایت می‌کند.

۳-۶. عدالت محیطی و توانمندسازی محلی

طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های هشدار سریع و پایش محیطی با مشارکت جوامع محلی، استفاده از حسگرهای کم‌هزینه و رویکرد «علم شهروندی»، می‌تواند شکاف دیجیتال را کاهش داده و احساس مالکیت و اعتماد را تقویت کند. لحاظ کردن شاخص‌های آسیب‌پذیری اجتماعی (فقر، سن، جنسیت، وضعیت سلامت، نوع سکونتگاه) در نقشه‌های ریسک و برنامه‌های فناورانه، شرط ضروری برای آن است که مزایای فناوری به گروه‌های در معرض خطر نیز برسد.

۴-۶. پژوهش میان‌رشته‌ای و ارزیابی چرخه عمر دیجیتال

تقویت پروژه‌های میان‌رشته‌ای که متخصصان محیط‌زیست، علوم داده، علوم اجتماعی و اقتصاد را گرد هم می‌آورد، برای درک اثرات واقعی فناوری‌های نوین بر مخاطرات و طراحی مداخلات اثربخش ضروری است. توسعه چارچوب‌های ارزیابی چرخه عمر دیجیتال برای سنجش

منافع و هزینه‌های محیط‌زیستی استفاده از فناوری‌ها، می‌تواند ابزار مهمی برای تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد در سطح ملی و سازمانی فراهم کند.

۷. نتیجه‌گیری

مقاله حاضر نشان داد که فناوری‌های نوین، از شهر هوشمند و اینترنت اشیا تا نانوفناوری و نوآوری سبز، در صورت تلفیق با سیاست‌گذاری محیط‌زیستی هوشمند و عدالت‌محور، می‌توانند نقشی کلیدی در کاهش مخاطرات محیطی و افزایش تاب‌آوری ایفا کنند. با این حال، شکاف دیجیتال، ردپای زیست‌محیطی خود فناوری‌ها و خطر تعمیق نابرابری‌ها، یادآور می‌شود که «فناوری» به‌خودی‌خود نه راه‌حل نهایی، بلکه ابزاری در چارچوبی گسترده‌تر از حکمرانی، مشارکت اجتماعی و اخلاق محیط‌زیستی است. جهت‌گیری آینده باید بر توسعه زیرساخت‌های داده‌ای باز و امن، مشوق‌های نوآوری سبز، توانمندسازی جوامع محلی و ارزیابی نظام‌مند اثرات واقعی فناوری بر چرخه مخاطرات محیطی متمرکز باشد.

منابع و مراجع

1. Zscheischler, J., Raymond, C., Chen, Y., Le Grix, N., Libonati, R., Rogers, C. D., ... & Wolski, P. (2025). Compound weather and climate events in 2024. *Nature Reviews Earth & Environment*, 6(4), 240-242.
2. Wen, J., Khalid, S., Mahmood, H., Alam, K., & Zakaria, M. (2025). Examining the influence of ICT on carbon emissions in emerging economies. *Structural Change and Economic Dynamics*, 74, 353-360.
3. Swain, D. L., Prein, A. F., Abatzoglou, J. T., Albano, C. M., Brunner, M., Diffenbaugh, N. S., ... & Touma, D. (2025). Hydroclimate volatility on a warming Earth. *Nature Reviews Earth & Environment*, 6(1), 35-50.
4. Osman et al. (2024). A comprehensive review on exposure to toxins and health risks from plastic-derived toxins. *Environmental Advances*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949750725000331>
5. Sander, B. (2025). Addressing climate change in the age of artificial intelligence: three registers of human rights struggles. *Transnational Legal Theory*, 1-41.
6. Harrington, J. M., Hawkins, S., Lang, M., Bodnar, W. M., Alberico, C., Rios-Colon, L., ... & Kumar, D. (2022). The Need for a Diverse Environmental Justice Workforce:: Using Applied Research to Understand the Impacts of Harmful Environmental Exposures in Vulnerable and Underserved Communities.
7. Khan, H. U., & Nazir, S. (2023). Assessing the role of AI-based smart sensors in smart cities using AHP and MOORA. *Sensors*, 23(1), 494.
8. Huang & Kuo (2018). Bibliometric Analysis on Smart Cities Research. *Sustainability*. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/13/3606>
9. Al-Omari, A. A., Shatnawi, N. N., Shbeeb, N. I., Istrati, D., Lagaros, N. D., & Abdalla, K. M. (2024). Utilizing remote sensing and GIS techniques for flood hazard mapping and risk assessment. *Civil Engineering Journal*, 10(5), 1423-1436.

- 10 . Psomiadis et al. (2020). Combining SAR and Optical Earth Observation with Hydraulic Simulation for Flood Mapping. Remote Sensing. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/23/3980>
- 11 . Guerra, F. D., Attia, M. F., Whitehead, D. C., & Alexis, F. (2018). Nanotechnology for environmental remediation: materials and applications. *Molecules*, 23(7), 1760.
- 12 . Debnath et al. (2024). Harnessing Magnetic Nanoparticles for the Effective Removal of Micro- and Nanoplastics. *Nanomaterials*. <https://www.mdpi.com/2079-4991/14/14/1179>
- 13 . Cherrafi et al. (2018). Lean, green practices and process innovation. *International Journal of Production Economics*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527318304018>
- 14 . Bergougui et al. (2024). Unveiling the impact of the digital economy on the interplay of environmental tax and renewable energy innovation. *Research in International Business and Finance*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0275531925000935>
- 15 . Sharifi et al. (2024). Human-centric, sustainability-driven approach to ranking smart cities worldwide. *Technology in Society*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160791X2300101X>
- 16 . Carnegie Endowment (2025). Reimagining People-Centered Smart Cities. Carnegie Endowment for International Peace. <https://carnegieendowment.org/research/2025/03/reimagining-people-centered-smart-cities-a-consultation-on-the-un-habitat-guidelines?lang=en>
- 17 . UN-Habitat (2024). World Smart Cities Outlook 2024. UN-Habitat. <https://unhabitat.org/world-smart-cities-outlook-2024>
- 18 . European Commission (2024). Industry 5.0. European Commission. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en
- 19 . De et al. (2024). Human-Centered AI for Industry 5.0 (HUMAI5.0): Design Framework and Case Studies. *arXiv*. https://www.researchgate.net/publication/377719779_Human-

- Centered_AI_for_Industry_50_HUMAI50_Design_Framework_and_Case_Studies
20. Ghobakhloo et al. (2024). From Industry 4.0 Digital Manufacturing to Industry 5.0 Digital Society. Information Systems Frontiers. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10796-024-10476-z>
 21. UNCTAD (2024). Digital Economy Report 2024. UNCTAD. <https://unctad.org/publication/digital-economy-report-2024>
 22. Rydzewski (2025). Digital Inequality and Sustainable Development. Publishing House. <https://ph.pollub.pl/index.php/preko/article/view/6691>
 23. Climate Policy Lab (2025). The Digital Divide in Climate Tech. Climate Policy Lab. <https://www.climatepolicylab.org/communityvoices/2025/3/6/the-digital-divide-in-climate-tech-unequal-access-to-ai-driven-solutions>
 24. Siddik et al. (2025). The environmental sustainability of digital content consumption. Nature Communications. <https://www.nature.com/articles/s41467-024-47621-w>
 25. UNEP (2024). Digital Transformations. UNEP. <https://www.unep.org/topics/digital-transformations>
 26. Park Place Technologies (2024). The Environmental Impact of Data Centers. Park Place Technologies. <https://www.parkplacetechnologies.com/blog/environmental-impact-data-centers/>