

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

حمید بختیاری<sup>۱\*</sup>

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.

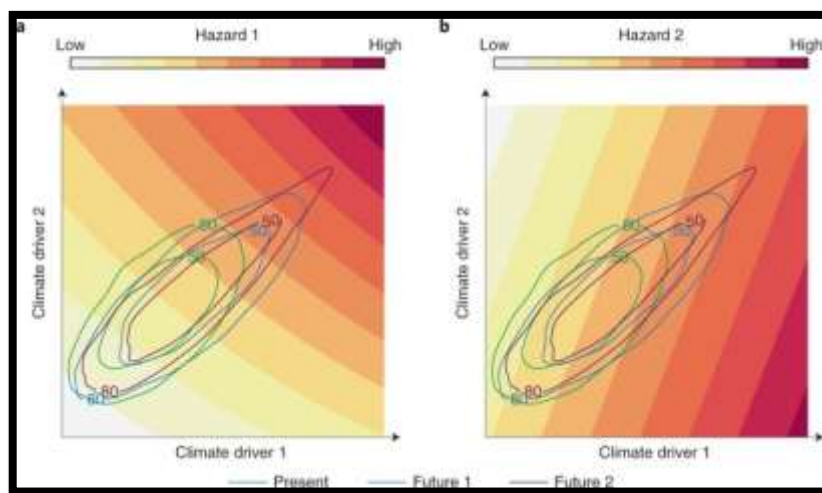
**واژگان کلیدی:** مخاطرات محیطی، هوش مصنوعی، شهر هوشمند، نوآوری سبز، صنعت و عدالت محیطی.

---

۱. \*کارشناسی ارشد بیوتکنولوژی، دانشکده و پژوهشکده آب، محیط زیست و منابع طبیعی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران kphbakhtia@ihu.ac.ir

## ۱. مقدمه

تشدید مخاطرات زیست محیطی در مقیاس های محلی، منطقه ای و جهانی، به یکی از برجسته ترین چالش های قرن حاضر بدل شده است؛ از یک سو، دگرگونی های اقلیمی با پدیدار شدن افزایش دما، دگرسانی الگوهای بارش و رویدادهای حدی جوی (شکل ۱) و از سوی دیگر، آلاینده های شیمیایی، زیستی و فیزیکی ناشی از گسترش صنایع و شهرنشینی، هم سلامت بشر و هم پایداری اکوسیستم ها را به شدت در معرض تهدید قرار داده اند.



شکل ۱) رویدادهای مرکب آب و هوایی (۱)

این جریان، به ویژه در کشورهای در حال گذار اقتصادی که با ترکیبی از رشد شتابان، برنامه ریزی ناکارآمد فضای و ظرفیت نهادی محدود دست به گریبانند، به شکل گیری منظر مخاطره آمیزی پیچیده و چندلایه انجامیده است. در همین دوران، انقلاب دیجیتال و دگرگونی های صنعتی نسل چهارم، افق های نوینی برای بهره گیری از فناوری های پیشرفته در پایش، تحلیل و مهار مخاطرات گشوده و مفاهیمی چون «شهر هوشمند پایدار»، «زنجیره تأمین سبز» و «صنعت انسان محور» را در کانون توجه پژوهشگران و سیاست گذاران نهاده است. پرسش محوری این پژوهش آن است که: چگونه و زیر چه شرایطی می توان از فناوری های نوظهور برای کاستن از مخاطرات زیست محیطی بهره جست، بدون آنکه خود به منشأ نوینی از ریسک و نابرابری بدل گردند؟ (1,2).

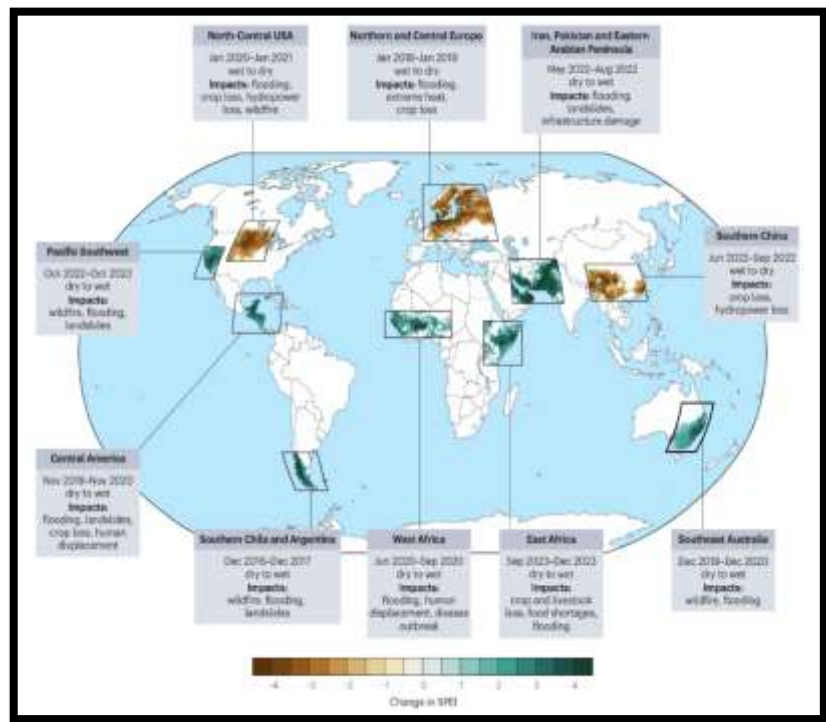
## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

### ۲-۱. تعریف و طبقه بندی مخاطرات زیست محیطی

مخاطره زیست محیطی به هر پدیده طبیعی، انسان ساخت یا ترکیبی اطلاق می گردد که از طریق دگرگونی در کیفیت هوا، آب، خاک یا ساختار اکوسیستم ها، احتمال وقوع آسیب به انسان، جانداران و زیرساخت ها را فزونی بخشد. پیشینه پژوهشی، این مخاطرات را عمدتاً در سه دسته اصلی جای می دهد: مخاطرات طبیعی همچون سیل، خشکسالی، امواج گرما، طوفان و زلزله که زیر تأثیر تغییرات اقلیمی، در فراوانی و شدت دگرگونی یافته اند؛ مخاطرات انسان ساخت شامل آلودگی های صنعتی هوا، آب و خاک، رهاسازی مواد شیمیایی خطرناک، تولید پسماندهای سمی، میکروپلاستیک ها و ترکیبات آلی پایدار؛ و مخاطرات ترکیبی که از تعامل مخاطرات طبیعی و فعالیت های انسانی زاده می شوند، مانند سیل های مرکب در نواحی ساحلی یا رانش زمین ناشی از جنگل زدایی و بارش های شدید. این طبقه بندی، پایه ای برای درک جامع از پیچیدگی های مخاطرات معاصر فراهم می آورد (3,4).

### ۲-۲. آسیب پذیری، تاب آوری و عدالت زیست محیطی

مفهوم «منظر مخاطرات سلامت زیست محیطی» آشکار می سازد که شدت تأثیر مخاطرات، نه تنها وابسته به ویژگی های فیزیکی آنهاست، بلکه به توزیع فضایی-اجتماعی آسیب پذیری و ظرفیت سازگاری گره خورده است. پژوهش های متعدد دلالت دارند که کودکان، سالمندان، زنان و جوامع کم درآمد، در برابر آلاینده ها و رویدادهای زیست محیطی آسیب پذیرترند و همزمان، دسترسی محدودتری به خدمات بهداشتی، زیرساخت های مقاوم و فناوری های حفاظتی دارند. شواهد قابل توجه و فزاینده ای وجود دارد که نشان می دهد نوسانات جهانی آب و هوا، که به روش های مختلف تعریف و کمی سازی شده اند، در طول دوره تاریخی افزایش یافته است (شکل ۲). عدالت زیست محیطی بر لزوم توزیع برابر منافع و هزینه های زیست محیطی و فناوریانه، و مشارکت مؤثر گروه های ذی نفع در فرآیندهای تصمیم گیری تأکید ورزد؛ این رویکرد، نه تنها نابرابری های موجود را کاهش می دهد، بلکه تاب آوری جمعی را در برابر مخاطرات فزونی می بخشد (5,6).



شکل ۲) فراوانی مخاطرات اقلیمی از (3)

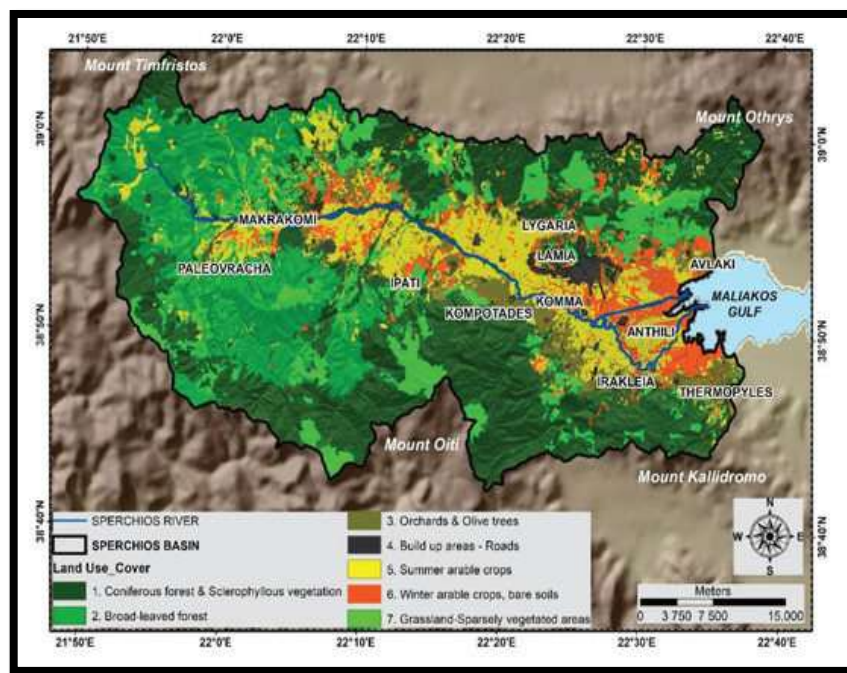
### ۳. فناوری های نوین در پایش و پیش بینی مخاطرات

#### ۳-۱. هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و داده های کلان

شهرهای هوشمند پایدار، با تکیه بر شبکه های حسگری متصل به اینترنت اشیا، پلتفرم های داده های کلان و الگوریتم های هوش مصنوعی، امکان نظارت لحظه ای بر کیفیت هوا، سرریز شبکه های آب و فاضلاب، ترافیک و مصرف انرژی را مهیا ساخته اند. این داده ها، پس از پردازش پیشرفته، الگوهای پیش بینی کننده آلودگی هوا تولید می کنند، نقاط کانونی آلودگی را شناسایی می نمایند و هشدارهای زودهنگام برای سیلاب ها و امواج گرما صادر می سازند؛ چنین ابزارهایی، پایه ای برای سیاست گذاری مدیریت تقاضا، محدودیت های ترافیکی یا بهینه سازی الگوهای مصرف فراهم می آورند. در قلمرو صنعتی نیز، داده های لحظه ای از فرآیندهای تولید و زنجیره تأمین، تشخیص زودهنگام نشت مواد خطرناک، مصرف غیرعادی انرژی و انحراف از استانداردهای زیست محیطی را ممکن می سازند و بدین سان، ریسک های عملیاتی را به حداقل می رسانند (7,8).

#### ۳-۲. سنجش از دور و سامانه های اطلاعات جغرافیایی در نقشه برداری 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).

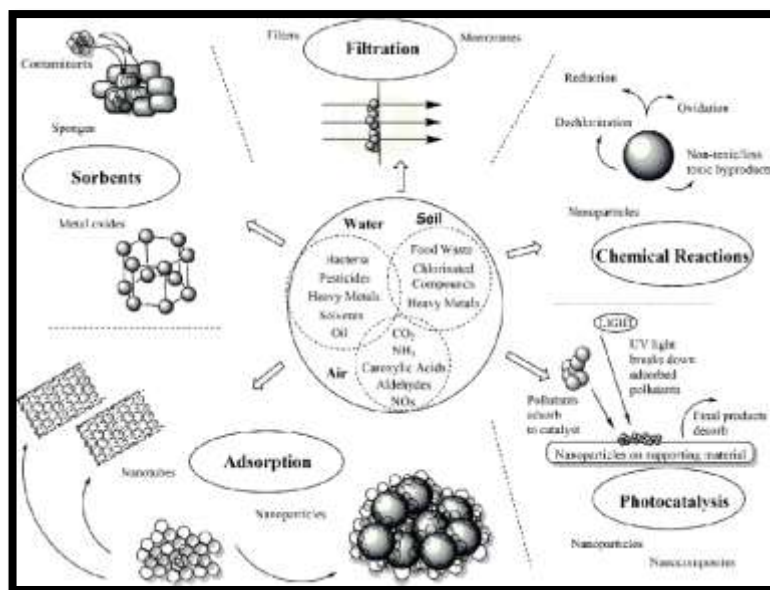


شکل ۳) استفاده از GIS برای مدل‌سازی سیلاب و بر نقشه‌برداری ریسک (۹ و ۱۰)

#### ۴. فناوری‌های نوین در کاهش و ترمیم مخاطرات

##### ۴-۱. نانو فناوری و فناوری‌های تصفیه سبز

پژوهش‌ها در قلمرو نانو فناوری زیست محیطی 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 بازرگانی 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 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 بینجامد. 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 پل‌زدن 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، پیش شرط 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 نانو فناوری 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.

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](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](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/>