



## مروری بر فناوری های جدید کاهش آلودگی هوا

شقایق باطنی پور

مرکز تحقیقات و فناوری های نوین دماش سپاهان، اصفهان، ایران

Shaghayeghbateni.1@gmail.com

### چکیده

آلودگی هوا به عنوان یکی از بزرگ‌ترین بحران‌های زیست‌محیطی، سلامت انسان‌ها، اکوسیستم‌ها و تغییرات اقلیمی را تحت تأثیر قرار داده است. این مقاله به بررسی فناوری‌های نوین برای کاهش آلودگی هوا در حوزه‌های مختلف از جمله انرژی، حمل‌ونقل، صنعت و کشاورزی می‌پردازد. با توجه به منابع اصلی آلودگی هوا که ناشی از فعالیت‌های انسانی و طبیعی هستند، فناوری‌های مختلف برای کاهش انتشار آلاینده‌ها توسعه یافته‌اند. از جمله مهم‌ترین فناوری‌ها می‌توان به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشیدی، بادی و آبی، فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، خودروهای برقی و هیدروژنی، سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی پاک، و فیلترهای صنعتی پیشرفته اشاره کرد. همچنین، فناوری‌های جدید در بخش‌های کشاورزی و پاک‌سازی هوا از جمله سیستم‌های هوشمند مدیریت کیفیت هوا و استفاده از مواد فوتوکاتالیستی برای تجزیه آلاینده‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. به منظور بهره‌گیری مؤثر از این فناوری‌ها، سیاست‌گذاری‌های مناسب، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، و آگاهی‌بخشی عمومی ضروری است. این مقاله نشان می‌دهد که ترکیب نوآوری‌های فناورانه با همکاری‌های بین‌المللی می‌تواند راهی مؤثر برای کاهش آلودگی هوا و بهبود کیفیت زندگی در جوامع مختلف باشد.

کلمات کلیدی: آلودگی هوا، فناوری‌های نوین، انرژی پاک، سلامت محیط زیست، فناوری‌های پاک

### ۱. مقدمه:

آلودگی هوا به وجود مواد یا ترکیبات مضر در جو اطلاق می‌شود که می‌توانند سلامت انسان، سایر موجودات زنده و محیط‌زیست را تهدید کنند. این مواد ممکن است به صورت ذرات جامد، گازهای سمی یا مایعات معلق در هوا باشند. آلودگی هوا زمانی اتفاق می‌افتد که غلظت این مواد از سطح طبیعی خود بیشتر شود و به سلامت انسان یا محیط آسیب وارد کند یا بر رفاه عمومی تأثیر منفی بگذارد [۱].

منابع آلودگی هوا به دو دسته طبیعی و انسان‌ساخت تقسیم می‌شوند. منابع طبیعی شامل آتشفشان‌ها، گردوغبار و آتش‌سوزی جنگل‌ها هستند، در حالی که منابع انسان‌ساخت شامل انتشار گازها از کارخانه‌ها، خودروها، نیروگاه‌ها و فعالیت‌های کشاورزی می‌باشند. آلاینده‌های اصلی که موجب آلودگی هوا می‌شوند، شامل گازهای سمی (مثل دی‌اکسید کربن، هستند که می‌توانند به تشکیل مه‌دود فتوشیمیایی منجر شوند.

آلودگی هوا از زمانی که انسان شروع به استفاده از آتش کرد، وجود داشته است، اما با پیشرفت تمدن و صنعتی شدن، این پدیده به یک بحران جهانی تبدیل شده است. در دوره پیش‌صنعتی، منابع آلودگی محدود به فعالیت‌های طبیعی و سوختن چوب برای گرمایش و پخت‌وپز بود. در دوران انقلاب صنعتی، استفاده از زغال‌سنگ به عنوان منبع انرژی و



افزایش کارخانه‌ها باعث گسترش آلودگی هوا در شهرهای مختلف شد. در قرن بیستم، بحران آلودگی هوا به یک مسئله جهانی تبدیل شد، به‌ویژه با وقوع فاجعه‌های بزرگی مانند مه‌دود لندن و حادثه دونورا. این بحران موجب شد که کشورها قوانین و مقرراتی برای کنترل آلودگی وضع کنند. در قرن بیست‌ویکم، آلودگی هوا همچنان به عنوان یک چالش جهانی مطرح است، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مانند چین و هند [۲ و ۳].

آلودگی هوا نه تنها بر سلامت انسان‌ها تأثیر می‌گذارد، بلکه موجب تغییرات اقلیمی، گرم شدن زمین و تخریب اکوسیستم‌ها می‌شود. گازهای گلخانه‌ای منتشر شده از منابع آلاینده به تغییرات اقلیمی دامن می‌زنند و آلودگی هوا به خاک و آب آسیب می‌زند و زیستگاه‌های طبیعی را تخریب می‌کند. همچنین، آلودگی هوا باعث کاهش کیفیت هوا، ایجاد مه‌دود و کاهش دید محیطی می‌شود.

از نظر اجتماعی و اخلاقی، توجه به آلودگی هوا ضروری است، به‌ویژه برای جوامع کم‌درآمد که در نزدیکی منابع آلاینده زندگی می‌کنند و بیشتر از دیگران آسیب می‌بینند. آلودگی هوا همچنین باعث تخریب منابع طبیعی شده و بقای گونه‌های جانوری و گیاهی را به خطر می‌اندازد.

## ۲. علل و منابع آلودگی هوا

آلودگی هوا از ترکیب منابع طبیعی و انسانی ایجاد می‌شود. منابع طبیعی شامل گردوغبار ناشی از طوفان‌های شن، آتش‌فشان‌ها، آتش‌سوزی جنگل‌ها و انتشار متان از منابع زیستی است. اما منابع انسانی که عامل اصلی آلودگی هوا هستند، شامل صنایع و کارخانه‌ها که گازهای آلاینده و ذرات معلق تولید می‌کنند، حمل‌ونقل که گازهایی مانند مونوکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن منتشر می‌سازد، تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی که گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها تولید می‌کند، کشاورزی که با استفاده از کودهای شیمیایی و دامداری متان آزاد می‌کند، سوزاندن زباله‌ها که گازهای سمی تولید می‌کند و مصارف خانگی مانند استفاده از سوخت‌های جامد برای پخت‌وپز است. کنترل منابع انسانی از طریق استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، فناوری‌های پاک و حمل‌ونقل سبز می‌تواند به کاهش آلودگی هوا کمک کند. منابع انسانی عامل اصلی آلودگی هوا هستند و کنترل این منابع می‌تواند به کاهش قابل توجه آلودگی کمک کند. اقداماتی مانند استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، بهبود فناوری‌های صنعتی و ترویج حمل‌ونقل پاک می‌توانند تأثیر بسزایی در کاهش آلودگی هوا داشته باشند [۴].

## ۳. تأثیر آلودگی هوا بر سلامت انسان

آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی برای سلامت انسان به شمار می‌رود. ترکیبات مختلف آلاینده موجود در هوا مانند ذرات معلق، گازهای سمی و ترکیبات شیمیایی می‌توانند اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت مخربی بر سلامت افراد داشته باشند.

آلودگی هوا تأثیرات قابل توجهی بر سلامت انسان دارد که می‌تواند به صورت کوتاه‌مدت و بلندمدت خود را نشان دهد. در بخش اثرات کوتاه‌مدت، آلودگی هوا می‌تواند مشکلات تنفسی مختلفی مانند تحریک دستگاه تنفسی، سرفه، عطسه و تنگی نفس را به همراه داشته باشد. این علائم معمولاً موقت هستند، اما می‌توانند برای افرادی که از قبل مشکلات تنفسی دارند، مانند کسانی که آسم یا برونشیت دارند، شدت پیدا کنند. علاوه بر این، آلودگی هوا می‌تواند موجب التهاب در چشم‌ها، بینی و گلو شود. گازهایی مانند ازن و اکسیدهای نیتروژن به‌ویژه باعث تحریک مخاط این بخش‌ها می‌شوند. در کنار این موارد، افراد در معرض آلودگی هوا ممکن است دچار سردرد، خستگی و کاهش تمرکز شوند. این مشکلات به‌ویژه در شرایطی که کیفیت هوا به شدت پایین است، شدت بیشتری می‌یابند.



آلودگی هوا علاوه بر اثرات کوتاه‌مدت، اثرات بلندمدت و آسیب‌های جدی‌تری نیز بر سلامت دارد. یکی از مهم‌ترین تأثیرات بلندمدت، بروز بیماری‌های ریوی است. ذرات معلق و گازهای آلاینده موجود در هوا می‌توانند موجب تحریک طولانی‌مدت ریه‌ها شده و خطر ابتلا به بیماری‌هایی نظیر آسم و برونشیت مزمن را افزایش دهند. از طرفی، آلاینده‌هایی مانند بنزن و دی‌اکسین خطر ابتلا به سرطان ریه را بالا می‌برند. علاوه بر بیماری‌های ریوی، آلودگی هوا اثرات منفی بر سیستم قلبی-عروقی نیز دارد. این آلودگی‌ها می‌توانند باعث افزایش فشار خون شده و خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی، سکته مغزی و نارسایی قلبی را بیشتر کنند. همچنین تحقیقات نشان داده‌اند که قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض آلودگی هوا ممکن است خطر ابتلا به بیماری‌های عصبی مانند آلزایمر و پارکینسون را نیز افزایش دهد [۵].

آلودگی هوا تأثیرات جدی بر رشد کودکان نیز دارد. کودکانی که در معرض هوای آلوده قرار دارند، ممکن است دچار مشکلاتی مانند کاهش رشد ریه‌ها و اختلال در عملکرد شناختی شوند. علاوه بر این، این کودکان ممکن است در آینده بیشتر در معرض خطر بیماری‌های مزمن قرار گیرند. در نهایت، آلودگی هوا می‌تواند باعث تضعیف سیستم ایمنی بدن شود و افراد را به راحتی مستعد ابتلا به عفونت‌ها و بیماری‌های مختلف کند. این اثرات بلندمدت به‌ویژه در افرادی که در محیط‌های آلوده زندگی می‌کنند، بسیار خطرناک و نگران‌کننده است (جدول ۱).

جدول ۱. اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت آلودگی هوا بر سلامت آورده شده است:

| نوع اثر                | اثر                                                                                     |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>اثرات کوتاه‌مدت</b> |                                                                                         |
| مشکلات تنفسی           | تحریک دستگاه تنفسی، سرفه، عطسه و مشکلات تنفسی موقت                                      |
| التهاب چشم، بینی و گلو | تحریک مخاط چشم و بینی توسط گازهایی مانند اوزون ( $O_3$ ) و اکسیدهای نیتروژن ( $NO_x$ )  |
| تشدید بیماری‌های موجود | تشدید علائم بیماری‌هایی مانند آسم و برونشیت در افراد مبتلا به این بیماری‌ها             |
| خستگی و کاهش انرژی     | سررد، خستگی، کاهش تمرکز و انرژی ناشی از استنشاق هوای آلوده                              |
| <b>اثرات بلندمدت</b>   |                                                                                         |
| بیماری‌های ریوی        | آسم و برونشیت مزمن، سرطان ریه (افزایش خطر به دلیل آلاینده‌هایی مانند بنزن و دی‌اکسین)   |
| بیماری‌های قلبی-عروقی  | افزایش فشار خون و خطر بیماری‌های قلبی، سکته مغزی و نارسایی قلبی                         |
| اثرات بر سیستم عصبی    | افزایش خطر ابتلا به بیماری‌های عصبی مانند آلزایمر و پارکینسون در معرض آلودگی طولانی‌مدت |
| تأثیر بر رشد کودکان    | کاهش رشد ریه‌ها، اختلال در عملکرد شناختی و افزایش خطر بیماری‌های مزمن در آینده          |
| سیستم ایمنی            | تضعیف سیستم ایمنی و افزایش حساسیت به عفونت‌ها و بیماری‌های مزمن                         |

#### ۴. فناوری‌های جدید برای کاهش آلودگی هوا



در سال‌های اخیر، فناوری‌های نوین نقش مهمی در کاهش آلودگی هوا ایفا کرده‌اند. این فناوری‌ها در زمینه‌های مختلف از جمله انرژی، حمل‌ونقل، صنعت، و کشاورزی به کار گرفته می‌شوند. در ادامه، مهم‌ترین این فناوری‌ها به تفصیل توضیح داده شده است [۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰]:

فناوری‌های نوین در سال‌های اخیر نقش مهمی در کاهش آلودگی هوا و بهبود کیفیت محیط‌زیست ایفا کرده‌اند. این فناوری‌ها به ویژه در حوزه‌های مختلف انرژی، حمل‌ونقل، صنعت، کشاورزی و مدیریت شهری تأثیر زیادی در کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود وضعیت سلامت عمومی دارند. استفاده از این فناوری‌ها نه تنها می‌تواند به کاهش آلاینده‌های موجود در جو کمک کند، بلکه در بلندمدت تأثیرات مثبتی در کاهش تغییرات اقلیمی و حفظ منابع طبیعی خواهد داشت.

یکی از مهم‌ترین حوزه‌هایی که فناوری‌های جدید در آن نقش دارند، انرژی است. منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی، بادی، آبی و زمین‌گرمایی به عنوان منابع پاک شناخته می‌شوند که می‌توانند به کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و در نتیجه کاهش آلاینده‌های هوا کمک کنند. برای مثال، انرژی خورشیدی با استفاده از پنل‌های فتوولتائیک می‌تواند برق تولید کند بدون اینکه هیچ آلاینده‌ای به جو افزوده شود. این فناوری در بسیاری از کشورهای جهان به‌ویژه در مناطقی که تابش خورشید زیاد است، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. توربین‌های بادی نیز به عنوان یک منبع انرژی پاک در مناطق بادخیز نصب می‌شوند و برق تولید می‌کنند بدون آنکه گازهای گلخانه‌ای یا آلاینده‌های دیگری به جو وارد کنند. استفاده از انرژی‌های آبی و زمین‌گرمایی نیز از دیگر منابع تجدیدپذیر است که علاوه بر پاک بودن، می‌توانند تأمین‌کننده انرژی پایدار برای مناطق مختلف باشند.

فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی نیز یکی دیگر از فناوری‌های مهم در کاهش آلودگی هوا هستند. باتری‌های لیتیوم-یونی پیشرفته و فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژن این امکان را فراهم می‌آورند که انرژی تولیدشده توسط منابع تجدیدپذیر مانند خورشید و باد، ذخیره و در زمان‌های نیاز به شبکه انرژی تزریق شوند. این فناوری‌ها به کاهش وابستگی به منابع آلاینده مانند سوخت‌های فسیلی کمک می‌کنند و موجب می‌شوند تا انرژی تولیدی از منابع پاک به طور مؤثر و بدون کاهش کارایی در دسترس باشد.

یکی از چالش‌های بزرگ در تولید برق، آلودگی‌های ناشی از نیروگاه‌ها است. در این زمینه، نیروگاه‌های کربن‌زدایی شده به کار گرفته می‌شوند تا از انتشار دی‌اکسید کربن به جو جلوگیری کنند. فناوری جمع‌آوری و ذخیره‌سازی کربن (CCS) می‌تواند دی‌اکسید کربن تولیدشده در نیروگاه‌ها را جذب کرده و به طور ایمن در زیر زمین ذخیره کند. این فناوری نه تنها به کاهش آلاینده‌های گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند، بلکه به پایداری بلندمدت نیروگاه‌ها و صنایع مختلف نیز کمک می‌کند.

در حوزه حمل‌ونقل، خودروهای الکتریکی (EV) یکی از مؤثرترین راه‌ها برای کاهش آلودگی هوا به شمار می‌روند. این خودروها با استفاده از باتری‌های قابل شارژ به جای سوخت‌های فسیلی حرکت می‌کنند و به این ترتیب انتشار گازهای گلخانه‌ای و دیگر آلاینده‌ها را به حداقل می‌رسانند. علاوه بر این، خودروهای هیدروژنی که از سلول‌های سوختی هیدروژن برای تولید برق استفاده می‌کنند، تنها بخار آب تولید کرده و هیچ آلاینده‌ای به جو نمی‌فرستند. استفاده از این نوع خودروها در حمل‌ونقل می‌تواند به طرز چشمگیری آلودگی هوا در شهرهای بزرگ را کاهش دهد [۱۱].



حمل‌ونقل عمومی پاک نیز یکی دیگر از راهکارهای مؤثر برای کاهش آلودگی هواست. استفاده از اتوبوس‌های برقی و قطارهای برقی که با انرژی تجدیدپذیر تأمین می‌شوند، می‌تواند به کاهش آلودگی در شهرها کمک کند. همچنین، سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند که با استفاده از فناوری‌های مدرن مانند چراغ‌های راهنمایی هوشمند و مسیرهای دینامیک، جریان ترافیک را بهینه‌سازی می‌کنند، به کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش آلاینده‌ها کمک می‌کنند.

در بخش صنعت، فیلترهای پیشرفته و کاتالیست‌ها می‌توانند به کاهش انتشار آلاینده‌ها از دودکش‌های صنایع کمک کنند. استفاده از فیلترهای صنعتی باعث می‌شود تا ذرات معلق و گازهای آلاینده قبل از اینکه به جو وارد شوند، فیلتر شده و از بین بروند. همین‌طور، کاتالیست‌ها در صنایع مختلف برای کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن و گوگرد مورد استفاده قرار می‌گیرند که این امر به کاهش آلودگی هوا کمک زیادی می‌کند.

فناوری‌های کشاورزی پاک نیز به طور فزاینده‌ای در کاهش آلودگی هوا نقش دارند. استفاده از کودهای هوشمند که به تدریج مواد مغذی را آزاد می‌کنند، می‌تواند از انتشار گازهای آلاینده جلوگیری کند. همچنین، کشاورزی دقیق با استفاده از سنسورها و پهپادها برای بهینه‌سازی مصرف آب و کود، می‌تواند اثرات زیست‌محیطی کشاورزی را کاهش دهد.

در نهایت، فناوری‌های پاک‌سازی هوا نیز به عنوان یک ابزار مؤثر در بهبود کیفیت هوای شهری شناخته می‌شوند. برج‌های تصفیه هوا که در برخی از شهرهای بزرگ مانند چین و هند نصب شده‌اند، می‌توانند ذرات معلق و گازهای آلاینده را از هوا جذب کنند و هوای تمیزتری برای ساکنان این مناطق فراهم آورند. پوشش‌های فوتوکاتالیستی و جذب‌کننده‌های دی‌اکسید کربن نیز از جمله فناوری‌هایی هستند که می‌توانند به پاک‌سازی هوا و کاهش اثرات منفی آلودگی کمک کنند [۷ و ۱۱].

به طور کلی، فناوری‌های جدید در کاهش آلودگی هوا نقش حیاتی دارند و با استفاده از آن‌ها می‌توان به کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود کیفیت زندگی مردم در شهرهای بزرگ و صنعتی کمک کرد [۱۲ و ۱۳]. ترکیب این فناوری‌ها با سیاست‌گذاری‌های مناسب و همکاری‌های بین‌المللی می‌تواند به دستیابی به آینده‌ای پاک‌تر و سالم‌تر کمک کند (جدول ۲).

جدول ۲. اثرات کاهش آلودگی هوا بر اساس فناوری‌های جدید.

| موضوع                               | شرح                                                                                    |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| اثرات کوتاه‌مدت آلودگی هوا بر سلامت |                                                                                        |
| مشکلات تنفسی                        | تحریک دستگاه تنفسی، سرفه، عطسه و مشکلات تنفسی موقت                                     |
| التهاب چشم، بینی و گلو              | تحریک مخاط چشم و بینی توسط گازهایی مانند اوزون ( $O_3$ ) و اکسیدهای نیتروژن ( $NO_x$ ) |
| تشدید بیماری‌های موجود              | تشدید علائم بیماری‌هایی مانند آسم و برونشیت در افراد مبتلا                             |
| خستگی و کاهش انرژی                  | سررد، خستگی، کاهش تمرکز و انرژی ناشی از استنشاق هوای آلوده                             |



| اثرات بلندمدت آلودگی هوا بر سلامت     |                                                                                         |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| بیماری‌های ریوی                       | آسم و برونشیت مزمن، سرطان ریه (افزایش خطر به دلیل آلاینده‌هایی مانند بنزن و دی‌اکسین)   |
| بیماری‌های قلبی-عروقی                 | افزایش فشار خون و خطر بیماری‌های قلبی، سکته مغزی و نارسایی قلبی                         |
| اثرات بر سیستم عصبی                   | افزایش خطر ابتلا به بیماری‌های عصبی مانند آلزایمر و پارکینسون در معرض آلودگی طولانی‌مدت |
| تأثیر بر رشد کودکان                   | کاهش رشد ریه‌ها، اختلال در عملکرد شناختی و افزایش خطر بیماری‌های مزمن در آینده          |
| سیستم ایمنی                           | تضعیف سیستم ایمنی و افزایش حساسیت به عفونت‌ها و بیماری‌های مزمن                         |
| فناوری‌های جدید برای کاهش آلودگی هوا  |                                                                                         |
| فناوری‌های انرژی                      |                                                                                         |
| انرژی‌های تجدیدپذیر                   | استفاده از خورشید، باد، آبی و زمین‌گرمایی برای تولید برق بدون آلاینده                   |
| فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی           | باتری‌های لیتیوم-یونی پیشرفته و فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژن                           |
| نیروگاه‌های کربن‌زدایی شده            | جمع‌آوری و ذخیره‌سازی کربن (CCS) و استفاده از بیوگاز به جای سوخت‌های فسیلی              |
| فناوری‌های حمل‌ونقل پاک               |                                                                                         |
| خودروهای برقی                         | کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها با استفاده از باتری‌های قابل شارژ             |
| خودروهای هیدروژنی                     | استفاده از سلول‌های سوختی هیدروژن برای تولید برق و تولید تنها بخار آب                   |
| سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی پیشرفته      | اتوبوس‌ها و قطارهای برقی با انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های هوشمند مدیریت ترافیک            |
| فناوری اشتراک‌گذاری و خودروهای خودران | بهینه‌سازی استفاده از وسایل نقلیه و کاهش تعداد خودروها برای کاهش آلودگی شهری            |
| فناوری‌های صنعتی پاک                  |                                                                                         |
| فیلترهای پیشرفته                      | حذف ذرات معلق و گازهای آلاینده قبل از انتشار به هوا                                     |
| استفاده از کاتالیست‌ها                | کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن و گوگرد در صنایع                                           |
| بازیافت حرارتی و انرژی                | استفاده از انرژی تلف‌شده در فرایندهای صنعتی برای تولید برق یا گرمایش                    |
| هوش مصنوعی و یادگیری ماشین            | پیش‌بینی و مدیریت آلاینده‌ها در صنایع با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند                 |
| فناوری‌های کشاورزی پاک                |                                                                                         |
| کودهای هوشمند                         | کودهایی که به تدریج مواد مغذی را آزاد کرده و از انتشار گازهای آلاینده جلوگیری می‌کنند   |
| مدیریت پایدار دامداری                 | کنترل انتشار متان از دام‌ها و استفاده از بیوگاز تولیدی به عنوان انرژی پاک               |
| کشاورزی دقیق                          | استفاده از سنسورها و پهپادها برای بهینه‌سازی مصرف آب و کود                              |
| فناوری‌های پاک‌سازی هوا               |                                                                                         |
| برج‌های تصفیه هوا                     | برج‌های بزرگ برای جذب ذرات معلق و گازهای آلاینده از هوا                                 |
| رنگ‌ها و پوشش‌های                     | تجزیه آلاینده‌های هوا با استفاده از نور خورشید                                          |



|                                                      |                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| فوتوکاتالیستی                                        |                                                                                                                  |
| جذب‌کننده‌های دی‌اکسید کربن                          | جذب دی‌اکسید کربن موجود در هوا و ذخیره آن برای استفاده مجدد در فرایندهای صنعتی                                   |
| <b>فناوری‌های هوشمند و دیجیتال</b>                   |                                                                                                                  |
| سیستم‌های مانیتورینگ کیفیت هوا                       | استفاده از حسگرهای هوشمند برای اندازه‌گیری آلاینده‌ها و اطلاع‌رسانی به موقع به شهروندان                          |
| شهرهای هوشمند                                        | سیستم‌های مدیریتی پیشرفته برای کاهش آلودگی هوا از طریق بهینه‌سازی مصرف انرژی، مدیریت ترافیک و کنترل آلودگی صنعتی |
| <b>فناوری‌های نوین در حمل‌ونقل هوایی و دریایی</b>    |                                                                                                                  |
| هواپیماهای کم‌مصرف و پاک‌تر                          | استفاده از سوخت‌های زیستی هوانوردی و هواپیماهای برقی و هیبریدی برای کاهش آلاینده‌های هوا                         |
| کشتی‌های پاک                                         | استفاده از سوخت LNG و سیستم‌های بادبانی مدرن برای کاهش انتشار آلاینده‌ها در حمل‌ونقل دریایی                      |
| <b>فناوری‌های جذب و استفاده مجدد از کربن</b>         |                                                                                                                  |
| تولید مواد شیمیایی                                   | استفاده از CO <sub>2</sub> جذب‌شده برای تولید مواد شیمیایی مانند متانول و پلاستیک‌های زیستی                      |
| ساخت بتن کربن‌زدایی شده                              | استفاده از دی‌اکسید کربن در ساخت بتن برای ذخیره کربن                                                             |
| تبدیل به سوخت‌های مصنوعی                             | تبدیل CO <sub>2</sub> با هیدروژن به سوخت‌های مصنوعی برای استفاده در صنایع حمل‌ونقل و نیروگاه‌ها                  |
| <b>پالایشگاه‌های زیستی (Biorefineries)</b>           |                                                                                                                  |
| سوخت‌های زیستی نسل دوم                               | تولید سوخت‌های زیستی از مواد غیرغذایی مانند جلبک‌ها و پسماندهای زیستی                                            |
| بیوپلاستیک‌ها                                        | پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر که از مواد زیستی تولید می‌شوند                                                       |
| <b>مواد و فناوری‌های ساخت‌وساز پایدار</b>            |                                                                                                                  |
| بتن جذب‌کننده آلودگی                                 | بتن‌های فوتوکاتالیستی که آلاینده‌ها را از هوا جذب می‌کنند                                                        |
| عایق‌های پیشرفته                                     | استفاده از عایق‌های حرارتی و سیستم‌های هوشمند گرمایشی برای کاهش مصرف انرژی و گازهای گلخانه‌ای                    |
| ساختمان‌های سبز                                      | استفاده از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر، تهویه طبیعی و مدیریت پسماند برای کاهش اثرات زیست‌محیطی                    |
| <b>فناوری‌های زیستی و طبیعی برای کاهش آلودگی هوا</b> |                                                                                                                  |
| درخت‌کاری و فضای سبز شهری                            | درختان و گیاهان به عنوان فیلترهای طبیعی آلاینده‌ها را جذب می‌کنند                                                |
| استفاده از میکروارگانیسم‌ها                          | تجزیه گازهای آلاینده مانند متان و دی‌اکسید گوگرد با استفاده از باکتری‌ها و قارچ‌ها                               |
| <b>مدیریت پسماند برای کاهش آلودگی هوا</b>            |                                                                                                                  |
| بازیافت و مدیریت زباله‌های                           | تبدیل زباله‌ها به انرژی و استفاده از نیروگاه‌های زباله‌سوز پیشرفته با آلودگی کم                                  |



|                                 |                                                                                  |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| شهری                            |                                                                                  |
| کمپوست‌سازی                     | تبدیل زباله‌های آلی به کمپوست برای جلوگیری از انتشار متان                        |
| سیاست‌ها و فناوری‌های حمایتی    |                                                                                  |
| مالیات بر کربن و اعتبارات کربنی | ترغیب شرکت‌ها به استفاده از فناوری‌های پاک از طریق اعمال مالیات و اعتبارات کربنی |
| پایش و اعمال مقررات زیست‌محیطی  | استفاده از سنسورها و پهپادها برای پایش آلودگی و اعمال مقررات زیست‌محیطی          |

### نتیجه‌گیری:

آلودگی هوا یکی از چالش‌های بزرگ زیست‌محیطی و بهداشتی عصر حاضر است که تأثیرات منفی عمیقی بر سلامت انسان‌ها و اکوسیستم‌ها دارد. با توجه به سرعت رشد جمعیت، صنعتی‌سازی، و مصرف فزاینده سوخت‌های فسیلی، نیاز به راهکارهای نوین برای مقابله با این بحران ضروری است. فناوری‌های نوین، به ویژه در حوزه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر، خودروهای برقی، و سیستم‌های فیلتر و جذب کربن، می‌توانند نقش حیاتی در کاهش آلاینده‌ها و بهبود کیفیت هوا ایفا کنند.

استفاده از منابع انرژی پاک و بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی می‌تواند میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را به طور چشمگیری کاهش دهد. همچنین، حمل‌ونقل پایدار و توسعه زیرساخت‌های لازم برای خودروهای برقی از جمله راه‌های مؤثر در کاهش آلاینده‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی است. علاوه بر این، تحقیقات در زمینه فناوری‌های پاک و بهبود روش‌های مدیریت آلودگی به افزایش کارایی و کاهش هزینه‌ها در بلندمدت کمک خواهد کرد.

با این حال، برای دستیابی به نتایج مطلوب، لازم است که همکاری‌های بین‌المللی و اقدامات سیاست‌گذاران در سطح ملی و جهانی تقویت شود. آگاهی‌رسانی به عموم مردم و تشویق به تغییرات رفتاری نیز به عنوان یکی از ارکان کلیدی در مقابله با آلودگی هوا باید مدنظر قرار گیرد. در نهایت، تنها از طریق استفاده ترکیبی از فناوری‌های نوین، سیاست‌های مؤثر، و مشارکت همگانی می‌توان آینده‌ای پاک‌تر و سالم‌تر را برای نسل‌های آینده تضمین کرد.

### منابع

۱. Feng, T., Ma, J., Yang, Y., & Mi, Z. (۲۰۲۵). Synergistic effects of air pollution control policies: Evidence from China. *Journal of Environmental Management*, ۳۷۳, ۱۲۳۵۸۱.
۲. Li, W., Li, J., Ma, T., Chang, Z., Casuccio, G. S., Gao, J., & Li, H. (۲۰۲۴a). Physiochemistry and sources of individual particles in response to intensified controls during the ۲۰۲۲ Winter Olympics in Beijing. *Journal of Environmental Management*, ۳۵۲, ۱۱۹۹۴۶. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119946>
۳. Li, X., He, Z., Xia, S., & Yang, Y. (۲۰۲۴b). Greenness change associated with construction and operation of photovoltaic solar energy in China. *Renewable Energy*, ۲۲۶, ۱۲۰۴۶۱.



۴. Paulus, N., & Lemort, V. (۲۰۲۴). Experimental assessment of pollutant emissions from residential fuel cells and comparative benchmark analysis. *Journal of Environmental Management*, ۳۵۹, ۱۲۱۰۱۷. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121017>
۵. Feng, T., Ma, J., Yang, Y., & Mi, Z. (۲۰۲۵). Synergistic effects of air pollution control policies: Evidence from China. *Journal of Environmental Management*, ۳۷۳, ۱۲۳۵۸۱.
۶. Ren, Z., Zheng, J., Jiao, L., He, M., Hou, X., Coffman, D., & Wang, S. (۲۰۲۴). The synergic impacts of air pollution control policies on pollutants and carbon emissions. *Journal of Environmental Management*, ۳۷۰, ۱۲۲۷۳۰. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122730>
۷. Wei, X., Tong, Q., Magill, I., Vithayasrichareon, P., & Betz, R. (۲۰۲۰). Evaluation of potential co-benefits of air pollution control and climate mitigation policies for China's electricity sector. *Energy Economics*, ۹۲, ۱۰۴۹۱۷.
۸. National Development and Reform Commission. (۲۰۱۱). Notice on carrying out pilot work of carbon emission trading.
۹. National Development and Reform Commission. (۲۰۱۷). National carbon emission trading market construction scheme (Power generation industry).
۱۰. National Energy Administration. (۲۰۲۰). Analysis report on market prospect and investment strategic planning of China's photovoltaic power generation industry.
۱۱. National Environmental Monitoring Centre. (۲۰۲۰). Air quality daily report.
۱۲. National Statistics Bureau. (۲۰۱۸). China statistical yearbook ۲۰۱۷. China Statistic Press.
۱۳. Paulus, N., & Lemort, V. (۲۰۲۴). Experimental assessment of pollutant emissions from residential fuel cells and comparative benchmark analysis. *Journal of Environmental Management*, ۳۵۹, ۱۲۱۰۱۷. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121017>