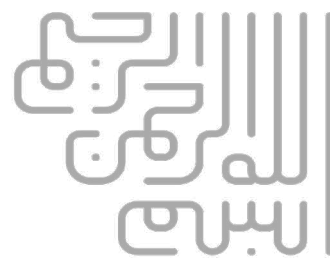


روش‌های نوین پایش کیفیت هوای محیطی در ایران



تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۶/۱۴
Publish Date :2026/09/05



عنوان: روش‌های نوین پایش کیفیت هوای محیطی در ایران
تهیه و تدوین کنندگان (Authors): رضا بیات، مسعود رضائی (گروه محیط زیست)
واژه‌های کلیدی: کیفیت هوا، شبکه ملی پایش، فناوری‌های نوین
ناشر: مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

DOI: <https://doi.org/10.22034/mrc.report.21825>

Permanent Link: <https://doi.org/10.22034/mrc.report.21825>

Publisher : Islamic Parliament Research Center of Iran

عنوان: روش های نوین پایش کیفیت هوای محیطی در ایران

نوع گزارش: طرح/لایحه □، راهبردی ■، نظارتی □، پیش نویس قانونی □

نام دفتر: مطالعات زیربنایی (گروه محیط زیست)

مدیر مطالعه: مسعود رضائی

اظهار نظر کنندگان: هادی عامری (دفتر مطالعات انرژی، صنعت و معدن (گروه صنعت)،

سید محسن علوی منش (معاونت پژوهش های زیربنایی و تولیدی)

اظهار نظر کننده خارج از مرکز: احمد طاهری (رئیس مرکز هوا و تغییر اقلیم سازمان حفاظت

محیط زیست)

ناظران علمی: میثم پیله فروش، حبیب اله ظفریان

ناظر علمی خارج از مرکز: محمد صادق حسنونند (عضو هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی تهران)

گرافیک و صفحه آرایی: حمیده سادات وفایی

ویراستار ادبی: زهرا کریمی

تاریخ شروع مطالعه: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵



فهرست مطالب

۷	چکیده
۸	خلاصه مدیریتی
۹	۱. مقدمه
۱۱	۲. پیشینه
۱۱	۲-۱. سوابق مطالعاتی در مرکز
۱۲	۲-۲. سوابق تقنینی
۱۳	۳. چالش‌های شبکه فعلی پایش محیطی هوا در کشور و ضرورت تحول
۱۴	۳-۱. ایستگاه‌های پایش ثابت زمینی و نقص داده
۱۵	۳-۲. توزیع مکانی ایستگاه‌ها و نابرابری پوشش شهری
۱۶	۳-۳. یکسان فرض شدن داده‌های انواع ایستگاه‌های پایش محیطی
۱۶	۳-۴. وضعیت کالیبراسیون، نگهداشت و کیفیت داده‌ها
۱۷	۳-۵. ناپایداری داده‌ها و قطع پیوستگی زمانی
۱۷	۳-۶. ضرورت بازنگری و بازطراحی علمی شبکه موجود ایستگاه‌های پایش
۱۷	۴. فناوری‌ها و روش‌های نوین پایش محیطی آلودگی هوا و کاربردهای عملی در ایران
۱۷	۴-۱. پایش ماهواره‌ای: چشم‌بی‌دریغ برای رصد منابع گسترده و غیرمتمرکز
۱۸	۴-۲. شبکه‌های حسگرهای کم‌هزینه: ایجاد تراکم مکانی و تمرکز بر عدالت محیطی
۱۹	۴-۳. فناوری‌های پیشرفته آنالیز برخط ذرات معلق: کلید منشأیابی سریع و هدف‌گیری سیاستی
۲۰	۴-۴. دوربین‌های پایش کیفیت هوا و تحلیل تصویر
۲۱	۴-۵. پهپادها: دقت بیشتر، دید گسترده‌تر
۲۱	۴-۶. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین: پیش‌بینی آلاینده‌ها و ادغام داده‌های چندمنبعی
۲۲	۴-۷. مدل‌سازی عددی: پایش، پیش‌بینی و تحلیل آلودگی هوا
۲۳	۴-۸. جمع‌بندی: ترسیم معماری یک اکوسیستم پایشی ترکیبی، هوشمند و عمل‌گرا
۲۵	۵. تجربیات موفق جهانی در پایش نوین محیطی آلودگی هوا
۲۵	۵-۱. اتحادیه اروپا: حکمرانی یکپارچه مبتنی بر داده و استانداردسازی فراملی
۲۷	۵-۲. ایالات متحده: اکوسیستم داده‌باز، مشارکت شهروندی و نوآوری محله‌محور
۲۹	۵-۳. چین: پایش گسترده، نظارت سختگیرانه و کنترل دیجیتال در مقیاس ملی
۳۰	۵-۴. هند: شبکه‌سازی نوین برای مواجهه با بحران ملموس
۳۰	۵-۵. ترکیه: شفافیت داده به عنوان موتور محرک بهبود حکمرانی
۳۱	۵-۶. کره جنوبی: پیوستگی سنجش دقیق، تحلیل هوشمند و تصمیم‌سازی
۳۲	۵-۷. پیوند پایش محیطی، سلامت عمومی و سیاست‌گذاری: نمونه‌های عملیاتی از حکمرانی سلامت‌محور
۳۲	۵-۸. جمع‌بندی نهایی و درس‌آموخته‌ها برای ایران: فراتر از خرید سخت‌افزار
۳۳	۶. جمع‌بندی و ارائه پیشنهاد‌های سیاستی
۳۹	منابع و مآخذ

فهرست جداول

جدول ۱. تحلیل پیشینه پژوهشی موضوع	۱۱
جدول ۲. تحلیل پیشینه تقنینی.....	۱۳
جدول ۳. روش های پایش نوین کیفیت هوا و کاربردهای عملی برای ایران	۲۳
جدول ۴. پیشنهادهای سیاستی.....	۳۷

فهرست اشکال

شکل ۱. توزیع مکانی ایستگاه های پایش آلاینده های محیطی در کشور.....	۱۴
شکل ۲. نمودار روند تعداد ایستگاه های معتبر پایش کیفیت هوای محیطی در ایران.....	۱۵
شکل ۳. معماری مفهومی اکوسیستم پایش نوین کیفیت هوا و تبدیل داده های چندمنبعی به تصمیم سازی، هشدار و سیاست گذاری.....	۲۴
شکل ۴. نمونه نقشه پایش کیفیت هوای اتحادیه اروپا (وابسته به آژانس محیط زیست اروپا)	۲۶
شکل ۵. سرویس پایش جوی کوپرنیکوس	۲۶
شکل ۶. سیستم پایش هوای ایالات متحده	۲۷
شکل ۷. نوآوری در ارزیابی حسگرهای کم هزینه توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا- نمونه هایی از نحوه استقرار حسگرهای هوا توسط کاربران	۲۸



روش‌های نوین پایش کیفیت هوای محیطی در ایران

چکیده



آلودگی هوا به یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط زیستی و سلامت عمومی ایران تبدیل شده است و مدیریت مؤثر این بحران، بدون دسترسی به داده‌های معتبر، پیوسته و دارای پوشش مکانی مناسب از وضعیت کیفیت هوای محیطی، امکان‌پذیر نیست. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شبکه فعلی پایش کشور، با وجود برخورداری از ایستگاه‌های مرجع، از نظر پوشش مکانی، تداوم داده، کالیبراسیون و پاسخ‌گویی به نیازهای نوین مدیریت کیفیت هوا با محدودیت‌های جدی مواجه است. در سطح جهانی، پایش کیفیت هوای طی دو دهه اخیر دستخوش تحول شده و از شبکه‌های محدود ایستگاه‌های مرجع به سمت رویکرد «پایش ترکیبی» حرکت کرده است. این رویکرد بر ادغام داده‌های ایستگاه‌های مرجع، حسگرهای کم‌هزینه، داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های پیشرفته تحلیلی استوار است و امکان افزایش پوشش مکانی، کاهش هزینه‌ها و تحلیل دقیق‌تر الگوهای آلودگی را فراهم می‌کند. در این چارچوب، ایستگاه‌های مرجع، نقش معیار دقت و کالیبراسیون را دارند، شبکه‌های متراکم حسگرها امکان پایش محله‌ای را فراهم می‌کنند، داده‌های ماهواره‌ای دید منطقه‌ای ارائه می‌دهند و ایستگاه‌های مرجع ارتقایافته برای اندازه‌گیری دقیق‌تر و تحلیل منابع آلاینده در مناطق دارای اولویت، به کار می‌روند. این گزارش با تحلیل وضعیت موجود ایران و مرور تجربیات جهانی، مجموعه‌ای از پیشنهاد‌های سیاستی برای ارتقای نظام پایش ارائه می‌کند که عبارت‌اند از ایجاد شبکه ملی یکپارچه داده با انتشار برخط، تدوین دستورالعمل استفاده از حسگرهای کم‌هزینه، اجرای پایلوت‌های پایش ترکیبی در کلان‌شهرهای آلوده، توسعه شبکه حسگرهای محله‌ای، بهره‌گیری ساختار یافته از داده‌های ماهواره‌ای، ایجاد قطب علمی تلفیق داده‌ها، توسعه مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی و تقویت پژوهش و آموزش نیروی انسانی.

بیان / شرح مسئله

آلودگی هوای محیطی در ایران به یک بحران ملی با پیامدهای گسترده سلامت، اجتماعی و اقتصادی تبدیل شده است. در چنین شرایطی، کیفیت نظام پایش هوا نقش تعیین کننده‌ای در شناسایی ابعاد بحران، اولویت‌بندی مداخلات و ارزیابی اثربخشی سیاست‌ها دارد. با وجود ایجاد شبکه‌ای از ایستگاه‌های پایش ثابت در کشور، نظام پایش محیطی ایران با چالش‌هایی نظیر توزیع نامتوازن ایستگاه‌ها، ضعف در کالیبراسیون و تضمین کیفیت داده‌ها، ناپایداری زمانی اطلاعات و محدودیت در پوشش ناهمگنی‌های مکانی آلودگی مواجه است. این ضعف‌ها موجب شده که داده‌های موجود، در بسیاری از موارد، پاسخگوی نیازهای تصمیم‌سازی سلامت‌محور و عدالت محیطی نباشند. گزارش حاضر با تمرکز بر پایش نوین کیفیت هوا، وضعیت موجود ایران را تحلیل کرده و ضمن مرور پیشینه قانونی و پژوهشی، فناوری‌ها و تجارب جهانی را معرفی می‌کند.

نقطه‌نظرات / یافته‌های کلیدی

پایش کیفیت هوا در جهان طی دو دهه اخیر دستخوش تحول اساسی شده است. تا پیش از دهه ۲۰۱۰، اغلب کشورها برای سنجش آلودگی هوا به شبکه‌ای محدود از ایستگاه‌های مرجع ثابت متکی بودند که اگرچه داده‌های بسیار دقیق تولید می‌کردند، اما به علت هزینه‌های بالای نصب و نگهداشت، پوشش مکانی کافی برای نشان دادن ناهمگنی آلودگی در مقیاس شهری فراهم نمی‌کردند. از دهه ۲۰۱۰ به بعد، با ظهور حسگرهای کم‌هزینه، گسترش داده‌های ماهواره‌ای و پیشرفت روش‌های داده‌محور و مدل‌سازی، رویکرد «پایش محیطی ترکیبی» شکل گرفت. این رویکرد بر ادغام هوشمندانه چندین منبع داده استوار است و امکان افزایش چشمگیر پوشش مکانی، کاهش هزینه‌ها و تقویت تصمیم‌سازی مبتنی بر شواهد را فراهم می‌کند.

تجربه‌های کشورهای پیشرو نشان می‌دهد که نظام‌های پایش مدرن به سمت اکوسیستم‌های چندلایه و داده‌محور حرکت کرده‌اند. در این الگو، ایستگاه‌های مرجع همچنان ستون فقرات دقت محسوب می‌شوند و برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی داده‌ها ضروری هستند، اما شبکه‌های گسترده حسگرهای کم‌هزینه، داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های پیچیده تحلیلی نقش حیاتی در پوشش مکانی، تکمیل اطلاعات و تحلیل الگوهای ریزمقیاس آلودگی ایفا می‌کنند. به موازات این تحول، در بسیاری از کشورها، مجموعه‌ای از تجهیزات پیشرفته و مکمل (با قابلیت منشأیابی و اندازه‌گیری دقیق تر ذرات و گازها) در مناطق بحرانی قانونی مستقر شده که وظیفه آنها اندازه‌گیری دقیق و منشأیابی پیشرفته آلاینده‌هاست. این ساختار جدید موجب شده پایش کیفیت هوا تنها یک فعالیت فنی نباشد، بلکه به «سیستم عصبی مرکزی حکمرانی هوشمند کیفیت هوا» تبدیل شود؛ سیستمی که داده‌های متنوع را جمع‌آوری، ادغام و به ابزار تصمیم‌گیری و مدیریت تبدیل می‌کند. در چنین الگوی پیشنهادی، ایستگاه‌های مرجع ارتقا یافته نقش معیار دقت را ایفا کرده، در حالی که شبکه‌های متراکم حسگرهای کم‌هزینه پوشش محله‌ای و امکان پایش عدالت محیطی را فراهم می‌کنند. داده‌های ماهواره‌ای نیز دید کلان منطقه‌ای و اطلاعات مکمل را ارائه می‌کنند و مدل‌های پیش‌بینی گر و روش‌های هوش مصنوعی وظیفه ادغام، تفسیر و استخراج الگوها را بر عهده می‌گیرند. در لایه‌های تخصصی‌تر، استقرار سوپر ایستگاه‌ها برای منشأیابی و تحلیل پیشرفته آلاینده‌ها اهمیت دارد.

پیشنهاد راهکارهای تقنینی، نظارتی یا سیاستی

الف) ارتقای شبکه ملی یکپارچه کیفیت هوا با انتشار بر خط داده‌ها و API عمومی: ایجاد یک شبکه ملی یکپارچه برای جمع‌آوری، پاکسازی و استانداردسازی داده‌های کیفیت هوا از همه نهادها شامل ایستگاه‌های مرجع، حسگرهای کم‌هزینه و داده‌های ماهواره‌ای ضروری است. این سامانه باید داده‌ها را به صورت بر خط از طریق داشبوردهای عمومی، نقشه‌های لحظه‌ای و API باز منتشر کند تا شفافیت، اعتماد

- عمومی و امکان نوآوری مبتنی بر داده تقویت شود. این شبکه عملاً ستون اصلی حکمرانی داده در حوزه آلودگی هوا خواهد بود.
- ب) تدوین دستورالعمل اجرایی استفاده از حسگرهای کم‌هزینه:** برای بهره‌گیری مطمئن از حسگرهای کم‌هزینه، لازم است دستورالعملی جامع شامل طبقه‌بندی حسگرها براساس کیفیت، الزامات کالیبراسیون و معیارهای پذیرش داده‌ها و قواعد اتصال آنها به شبکه ملی تدوین شود. این چارچوب با جلوگیری از انتشار داده‌های نادقیق، زمینه گسترش شبکه‌های متراکم حسگری و توسعه بازار شرکت‌های دانش‌بنیان را فراهم می‌کند.
- ج) اجرای پایلوت‌های ترکیبی در کلان‌شهرهای بحرانی:** برای آزمون عملی یک مدل پایش ترکیبی مبتنی بر ایستگاه‌های مرجع، حسگرها، ماهواره و مدل‌های تحلیلی، اجرای پایلوت در دو یا سه کلان‌شهر آلوده ضروری است. این پایلوت‌ها کیفیت ادغام داده‌ها، قابلیت اتکای حسگرها و نقش داده‌ها در تصمیم‌گیری مدیریتی را ارزیابی کرده و چالش‌های فنی و نهادی را پیش از اجرا در مقیاس ملی آشکار می‌کنند.
- د) توسعه شبکه‌های متراکم حسگرهای کم‌هزینه:** گسترش حسگرها در محله‌ها، مدارس، مسیرهای پر تردد و مناطق کم‌برخوردار، وضوح مکانی پایش را افزایش داده و امکان شناسایی نقاط داغ آلودگی و تحلیل عدالت محیطی را فراهم می‌کند. این شبکه‌ها نقشه‌ای محله‌محور از الگوهای آلودگی ارائه می‌دهند.
- ه) بهره‌گیری ساختار یافته از داده‌های ماهواره‌ای:** ادغام داده‌های سنجش از دور با داده‌های زمینی و مدل‌های جوی برای پر کردن شکاف‌های مکانی و بهبود پیش‌بینی رخدادهایی مانند گردوغبار، وارونگی دما و انتقال آلاینده‌ها ضروری است.
- و) ایجاد قطب علمی تلفیق داده‌ها:** یک مرکز تخصصی برای ادغام هوشمند داده‌های ایستگاه‌ها، حسگرها و ماهواره‌ها با استفاده از مدل‌های جوی و روش‌های یادگیری ماشین باید در سازمان حفاظت محیط زیست ایجاد شده تا خروجی‌هایی مانند نقشه‌های غلظت، منشأیابی و عدم قطعیت تولید و به نهادهای مدیریتی ارائه شود.
- ز) توسعه مدل‌های پیش‌بینی گر هوش مصنوعی:** به کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین توسط سازمان هواشناسی کشور برای پیش‌بینی ساعتی و روزانه آلودگی، امکان تصمیم‌گیری پیشگیرانه و واکنش سریع‌تر را فراهم می‌کند.
- ح) توسعه پژوهش و پایلوت فناوری‌های نوین:** حمایت از پژوهش مشترک دانشگاه‌ها و شرکت‌های دانش‌بنیان برای بومی‌سازی فناوری‌های نسل جدید پایش مانند آنالیز ترکیب ذرات و ابزارهای منشأیابی ضروری است.
- ط) توسعه و توانمندسازی نیروی انسانی:** آموزش کارکنان در حوزه کالیبراسیون، کار با حسگرها، تحلیل داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌سازی و نگهداشت تجهیزات، پیش‌شرط بهره‌برداری موفق از نظام پایش نوین است.

۱. مقدمه

آلودگی هوای محیطی طی دهه‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی، سلامت عمومی و حکمرانی شهری در جمهوری اسلامی ایران تبدیل شده است. رشد شتابان شهرنشینی، تمرکز جمعیت در کلان‌شهرها، افزایش مصرف انرژی‌های فسیلی، فرسودگی ناوگان حمل‌ونقل، توسعه نامتوازن صنعتی، عدم جایابی مناسب صنایع آلاینده و تشدید پدیده‌های اقلیمی نظیر خشکسالی و گردوغبار، موجب شده کیفیت هوای بسیاری از شهرهای کشور در بخش قابل توجهی از سال در شرایط ناسالم یا بسیار ناسالم قرار گیرد. پیامدهای این وضعیت، فراتر از یک مسئله محیط زیستی، به حوزه‌های سلامت، اقتصاد، عدالت اجتماعی و پایداری توسعه تسری یافته است.

مطالعات ملی و بین‌المللی نشان می‌دهد که آلودگی هوا، به‌ویژه ذرات معلق ریز ($PM_{2.5}$)، سهم قابل توجهی در بروز بیماری‌های قلبی-عروقی، تنفسی، سرطان‌ها و مرگ‌های زودرس دارد. براساس گزارش مشترک وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی و دانشگاه علوم پزشکی تهران با عنوان «کیفیت هوای آزاد در ایران و برآورد آثار بهداشتی-اقتصادی آن در سال ۱۴۰۳»، تعداد موارد



مرگ‌های زودرس منتسب به مواجهه با آلودگی هوای محیطی در کشور در سال ۱۴۰۳ در افراد بالای ۳۰ سال، برابر با ۵۸,۹۷۵ نفر برآورد شده است. براساس همین گزارش، خسارت اقتصادی منتسب به این مرگ‌ها و بیماری‌های ناشی از آلودگی هوا در سال ۱۴۰۳ حدود ۱۷,۲ میلیارد دلار برآورد شده که شامل هزینه‌های سلامت، کاهش بهره‌وری نیروی کار و افت رفاه اجتماعی می‌شود. در نتیجه، آلودگی هوا به یکی از مهم‌ترین ریسک‌های سلامت عمومی کشور تبدیل شده و نیازمند مداخله‌ای نظام‌مند، مبتنی بر شواهد و داده‌های معتبر است [۱].

در چنین شرایطی، پایش کیفیت هوای محیطی، نقشی بنیادین در مدیریت و کنترل آلودگی هوا ایفا می‌کند. پایش محیطی نه تنها ابزار سنجش وضعیت موجود بوده، بلکه زیربنای تشخیص مسئله، اولویت‌بندی مداخلات، ارزیابی اثربخشی سیاست‌ها و اطلاع‌رسانی به موقع به شهروندان و مدیران است. بدون نظام پایش کارآمد، شفاف و قابل اتکا، سیاست‌گذاری در حوزه کیفیت هوا ناگزیر بر حدس، تجربه‌های موردی یا واکنش‌های کوتاه‌مدت استوار خواهد بود و امکان حرکت به سوی مدیریت پیشگیرانه و سلامت‌محور فراهم نمی‌شود.

در ایران، طی حدود دو دهه گذشته شبکه‌ای از ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا با محوریت سازمان حفاظت محیط زیست و با مشارکت شهرداری‌ها، به‌ویژه در کلان‌شهرها، ایجاد شده است. در حال حاضر بیش از ۴۰۰ ایستگاه پایش در سطح کشور وجود دارد که بخش قابل توجهی از آنها مجهز به آنالایزهای اندازه‌گیری آلاینده‌های معیار هستند. با این حال، شواهد میدانی و نظر خبرگان نشان می‌دهد که چالش اصلی شبکه فعلی، بیش از آنکه کمبود تعداد ایستگاه باشد، ضعف در بهره‌برداری مؤثر، کالیبراسیون، نگهداشت، توزیع عادلانه مکانی و تضمین کیفیت داده‌هاست. فرسودگی بخشی از تجهیزات، کمبود بودجه تعمیر و نوسازی، قطعی برق، نبود زیرساخت‌های حفاظتی مناسب و کمبود نیروی انسانی متخصص، موجب شده که بخشی از ظرفیت بالقوه شبکه پایش کشور بالفعل نشود [۲].

از سوی دیگر، الگوهای مکانی و زمانی آلودگی هوا در شهرهای ایران، به‌ویژه کلان‌شهرها، به شدت ناهمگن است. تفاوت کاربری‌های شهری، تراکم جمعیت، ترافیک، شرایط توپوگرافی و الگوهای جوی سبب شده مواجهه شهروندان با آلودگی هوا در نقاط مختلف یک شهر به‌طور معناداری متفاوت باشد. در چنین شرایطی، اتکای صرف به شبکه‌های سنتی با تراکم محدود، توان پاسخ‌گویی به نیازهای نوین مدیریت کیفیت هوا و عدالت زیست‌محیطی را ندارد و ضرورت بهره‌گیری از رویکردهای مکمل بیش از پیش آشکار می‌شود [۳]. تحولات فناورانه سال‌های اخیر، افق‌های جدیدی را در حوزه پایش کیفیت هوای محیطی گشوده است. پایش ماهواره‌ای، حسگرهای کم‌هزینه، شبکه‌های پایش متراکم شهری، سامانه‌های گزارش‌دهی مردمی و ابزارهای نوین تحلیل داده، در بسیاری از کشورهای جهان به‌عنوان مکمل شبکه‌های مرجع به کار گرفته شده‌اند. این فناوری‌ها امکان پوشش مکانی گسترده‌تر، پایش پیوسته‌تر، شناسایی کانون‌های آلودگی، رصد پدیده‌های فرامرزی مانند گردوغبار و ارتقای شفافیت داده‌ها را فراهم کرده‌اند [۳ و ۴].

در این میان، ظرفیت‌های داخلی کشور نیز در حال شکل‌گیری و توسعه است. شرکت‌های دانش‌بنیان داخلی در حوزه تولید تجهیزات پایش، به‌ویژه حسگرهای کم‌هزینه، فعال شده‌اند و صنعت فضایی کشور نیز به توانمندی‌های قابل توجهی در حوزه تصویربرداری ماهواره‌ای دست یافته است. اظهارات مسئولان سازمان فضایی کشور نشان می‌دهد که ماهواره‌های سنجشی با دقت مناسب برای پایش آلاینده‌ها و شناسایی کانون‌های گردوغبار در دسترس یا در حال توسعه هستند. با این حال، بهره‌برداری مؤثر از این ظرفیت‌ها مستلزم رفع موانع نهادی، تعریف چارچوب‌های همکاری، دسترسی به داده‌ها و پیوند نظام‌مند میان داده‌های ماهواره‌ای و پایش زمینی است.

تجربه‌های جهانی نشان می‌دهد که موفقیت پایش‌های نوین، نه صرفاً در بهره‌گیری فناوری، بلکه در حکمرانی داده، استانداردسازی، تضمین کیفیت، شفافیت و پیوند پایش با تصمیم‌گیری سیاستی نهفته است. کشورهایی مانند چین، ایالات متحده و اعضای اتحادیه اروپا، پایش کیفیت هوا را بر مبنای سلامت انسان طراحی کرده و از ترکیب داده‌های زمینی، ماهواره‌ای و مدل‌سازی برای مدیریت فعال کیفیت هوا بهره می‌برند. این تجربه‌ها نشان می‌دهد که پایش مؤثر می‌تواند مستقیماً به کاهش آلودگی، بهبود سلامت عمومی و افزایش اعتماد اجتماعی منجر شود [۵].

این گزارش با تمرکز بر پایش‌های نوین کیفیت هوای محیطی و با پرهیز آگاهانه از ورود تفصیلی به پایش از منبع، تلاش دارد تصویری جامع، واقع‌بینانه و سیاست‌محور از وضعیت موجود پایش محیطی در ایران ارائه دهد. گزارش ضمن مرور پیشینه پژوهشی و تقنینی، به بررسی وضعیت فعلی شبکه پایش، معرفی فناوری‌ها و روش‌های نوین، تحلیل تجربیات موفق جهانی و در نهایت ارائه پیشنهاد‌های سیاستی متناسب با شرایط کشور می‌پردازد. هدف اصلی این گزارش، پشتیبانی از تصمیم‌سازی تقنینی و نظارتی و تقویت بنیان‌های داده‌محور مدیریت کیفیت هوا در راستای حفاظت از سلامت شهروندان است.

۲. پیشینه

۲-۱. سوابق مطالعاتی در مرکز

پیش از این در مرکز پژوهش‌های مجلس در گزارش‌های مختلف بر موضوعاتی نظیر ضرورت پایش نوین و فناوری‌های پیشرفته مانند تصویربرداری ماهواره‌ای، پایش هوایی و سامانه‌های هوشمند تأکید شده است. در جدول ۱ پیشینه پژوهشی مرکز ارائه شده است.

جدول ۱. تحلیل پیشینه پژوهشی موضوع

ردیف	عنوان گزارش	سال انتشار	شماره مسلسل	توضیحات
۱	بررسی مطالعات منشأیابی آلودگی هوا در کشور همراه با ارائه راهکارهای بهبود	۱۴۰۰	۱۷۹۹۹	این گزارش به وضوح نشان می‌دهد که داده‌های پایش محیطی با کیفیت و وضوح مکانی-زمانی مناسب، پیش شرط ضروری برای انجام مطالعات سهم‌بندی منابع قابل اتکا است. این گزارش تأکید می‌کند که اتکای صرف به سیاهه‌های انتشار بدون پشتیبانی از داده‌های محیطی دقیق می‌تواند به اولویت‌بندی نادرست سیاست‌های کنترلی منجر شود.
۲	پیامدها و هزینه‌های آلودگی هوا در ایران	۱۴۰۳	۲۰۶۷۶	با برآورد بار سلامت و اقتصادی سنگین ناشی از آلودگی هوا (به ویژه ذرات معلق ریز $(PM_{2.5})$)، این گزارش لزوم تقویت نظام پایش را به عنوان ابزار اصلی برای اندازه‌گیری دقیق این مخاطره، ارزیابی اثربخشی سیاست‌ها و تخصیص بهینه منابع در حوزه سلامت عمومی، پررنگ کرده است.
۳	گزارش نظارتی اجرایی شدن بند «س» ماده (۳۸) <u>قانون برنامه ششم توسعه</u> و بررسی عملکرد ستاد ملی مقابله با گردوغبار	۱۴۰۳	۲۰۰۵۱	این گزارش نظارتی بر ضرورت ایجاد یک سامانه ملی پایش یکپارچه گردوغبار تأکید دارد. پیشنهاد می‌کند این سامانه مبتنی بر ادغام داده‌های ماهواره‌ای (مانند سنجنده‌های Sentinel-5P، MODIS) با شبکه‌های زمینی پیشرفته (شامل ایستگاه‌های سینوپتیک، لیدار و حسگرهای کم‌هزینه) باشد تا دقت پایش، پیش‌بینی و هشدار این پدیده را به‌طور چشمگیری افزایش دهد.
۴	منابع، آثار و راهکارهای مقابله با سوزاندن پسماندها در فضای باز (Open Burning) در کشور	۱۴۰۴	۲۰۷۴۷	این گزارش به‌طور ویژه بر نقش کلیدی پایش نوین و فناوری‌های پیشرفته مانند تصویربرداری ماهواره‌ای (سنجنده‌های VIIRS/MODIS)، پایش هوایی و سامانه‌های هوشمند در شناسایی و مدیریت کانون‌های سوزاندن پسماند تأکید می‌کند. استدلال می‌کند که ادغام این ابزارها در سیستم نظارتی کشور نه تنها چالش شناسایی متخلفان را کاهش می‌دهد، بلکه گامی اساسی به‌سوی مدیریت هوشمند و پیشگیرانه محسوب می‌شود.

مأخذ: نگارندگان.

۲-۲. سوابق تقنینی

چارچوب حقوقی و مقرراتی پایش کیفیت هوای محیطی در ایران، در لایه‌های مختلفی از قانون تا دستورالعمل‌های فنی شکل گرفته است. بررسی این اسناد نشان می‌دهد که اگرچه **پشتوانه قانونی کلی** برای پایش وجود دارد، اما **اجرای کامل، یکپارچه و هماهنگ** این مقررات با چالش‌های جدی مواجه است.

الف) آیین‌نامه فنی در زمینه کنترل و کاهش آلودگی‌ها (موضوع ماده (۲) قانون هوای پاک) مصوب ۱۳۹۷/۰۶/۲۱ هیئت وزیران

ماده (۱۸): سازمان ملی استاندارد ایران موظف است ظرف شش ماه از تاریخ ابلاغ این تصویب‌نامه نسبت به تدوین استاندارد ملی راهبری و نگهداری ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا شامل همه آلاینده‌های معیار، آزمایشگاه مرجع برای صحت‌سنجی (کالیبراسیون) گازهای مرجع و تجهیزات مربوط اقدام و مراحل اجباری شدن آن را از طریق شورای عالی استاندارد پیگیری کند.

ماده (۱۹): سازمان ملی استاندارد ایران موظف است با همکاری سازمان [حفاظت محیط زیست] و سازمان هواشناسی کشور ظرف شش ماه از تاریخ ابلاغ این تصویب‌نامه نسبت به تهیه فهرست تجهیزات مورد تأیید برای پایش آلودگی هوا و اطلاع‌رسانی آن در درگاه اینترنتی سازمان ملی استاندارد ایران اقدام و فهرست مذکور را به صورت سالیانه به‌روزرسانی کند. تأمین هرگونه تجهیزات پایش آلاینده‌های هوا خارج از فهرست مذکور توسط دستگاه‌هایی که به نحوی از بودجه عمومی یا کمک‌های دولتی استفاده می‌کنند، ممنوع است.

ماده (۲۰): به منظور هم‌افزایی در بهره‌برداری از دستگاه‌های سنجش آلودگی هوا، کلیه دستگاه‌های اجرایی و شهرداری‌های دارای دستگاه‌های مذکور موظف‌اند ظرف شش ماه از تاریخ ابلاغ این تصویب‌نامه امکان دسترسی برخط اطلاعات و خروجی‌های دستگاه‌های مذکور را به صورت تعاملات الکترونیکی (وب سرویس) و از طریق **شبکه ملی پایش آلودگی هوا** فراهم کنند. سازمان [حفاظت محیط زیست] موظف است ظرف شش ماه از تاریخ ابلاغ این تصویب‌نامه شبکه ملی پایش موضوع این ماده را در آن سازمان ایجاد کند. کارگروهی با مسئولیت سازمان و عضویت وزارتخانه‌های ارتباطات و فناوری اطلاعات، بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، راه و شهرسازی (سازمان هواشناسی کشور) و کشور و مسئولیت هماهنگی‌های اجرایی لازم به منظور استفاده بهینه از امکانات موجود در کشور در خصوص موضوع این ماده را برعهده دارد.

ماده (۲۴): سازمان [حفاظت محیط زیست] موظف است نسبت به تولید سیاهه انتشار آلاینده‌های هوا در شهرهای دارای اولویت، اقدام و نتیجه را تا پایان شهریورماه سال ۱۳۹۸ به صورت سامانه پویا با قابلیت به‌روزرسانی ارائه کند.

تبصره: سازمان هواشناسی کشور موظف است الگو (مدل)‌های پیش‌بینی آلودگی هوا مبتنی بر استفاده از اطلاعات سامانه سیاهه انتشار موضوع این ماده و اطلاعات ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا را به نحوی تهیه کند که تا شش ماه پس از دریافت سیاهه انتشار امکان ارائه اطلاعات پیش‌بینی آلودگی هوا از طریق الگو (مدل)‌های مذکور به مراجع ذی‌ربط و هشدار و آگاهی‌بخشی عمومی در این خصوص فراهم شود.

ب) مصوبه شماره ۱ جلسه ۳۵۷ کمیسیون تنظیم مقررات ارتباطات در خصوص تعرفه تصاویر ماهواره «خیام»

این مصوبه با تعیین تعرفه‌های ترجیحی برای داده‌های ماهواره «خیام»، دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای را به عنوان یک ابزار مکمل و کلان‌نگر برای پایش رسمی تسهیل می‌کند. این اقدام نشان‌دهنده حرکت به سوی به رسمیت شناختن پایش ترکیبی (هیبرید) است که در آن داده‌های ماهواره‌ای برای ردیابی توده‌های آلاینده (مانند ریزگرد) و پر کردن شکاف‌های پوشش شبکه زمینی استفاده می‌شود.

ج) بند «پ» ماده (۲۲) قانون برنامه پنج‌ساله هفتم پیشرفت جمهوری اسلامی ایران

سازمان حفاظت محیط زیست مجاز است از طریق آزمایشگاه‌های معتمد و همکار، بر میزان آلاینده‌های و ارزیابی خوداظهاری واحدهای آلاینده و واسنجی (کالیبراسیون) تجهیزات پایش آلاینده‌های منابع زیستی نظارت نماید. پرداخت تعرفه خدمات مذکور برعهده واحدهای مشمول می‌باشد. آیین‌نامه اجرایی این بند مشتمل بر تعیین شاخص‌ها و معیارهای زیست‌محیطی و تعرفه‌های ارائه خدمات به واحدهای مشمول، توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست تهیه می‌شود و به تصویب هیئت وزیران می‌رسد.

جدول ۲. تحلیل پیشینه تقنینی

ردیف	سند قانونی	مرجع تصویب	تاریخ تصویب	بند قانونی	نکات برجسته
۱	آیین‌نامه فنی در زمینه کنترل و کاهش آلودگی‌ها (موضوع ماده (۲) قانون هوای پاک)	هیئت وزیران	۱۳۹۷/۰۶/۲۱	«۱۸»	- تدوین استاندارد ملی راهبری و نگهداری ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا (سازمان ملی استاندارد) - ایجاد آزمایشگاه مرجع برای صحت‌سنجی (کالیبراسیون) گازهای مرجع و تجهیزات مربوط (سازمان ملی استاندارد)
				«۱۹»	- تهیه فهرست تجهیزات مورد تأیید برای پایش آلودگی هوا (سازمان ملی استاندارد)
				«۲۰»	- ایجاد شبکه ملی پایش (سازمان حفاظت محیط زیست)
				«۲۴»	- تهیه الگو (مدل)‌های پایش‌بینی آلودگی (سازمان هواشناسی کشور)
۲	مصوبه شماره ۳۵۷ کمیسیون تنظیم مقررات ارتباطات در خصوص تعرفه‌تصاویر ماهواره «خیام»	کمیسیون تنظیم مقررات ارتباطات	۱۴۰۳/۰۵/۲۸	-	- تعیین سازوکار بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای
۳	قانون برنامه پنج‌ساله هفتم پیشرفت جمهوری اسلامی ایران	مجلس شورای اسلامی (با تأیید مجمع تشخیص مصلحت نظام)	۱۴۰۳/۰۳/۰۱	بند «پ» ماده (۲۲)	سازمان حفاظت محیط زیست مجاز است از طریق آزمایشگاه‌های معتمد و همکار بر میزان آلاینده‌گی، خوداظهاری واحدهای آلاینده و واسنجی (کالیبراسیون) تجهیزات پایش نظارت کند. این حکم مبنای قانونی توسعه نظام تضمین کیفیت داده‌های شبکه پایش، استقرار نظام خوداظهاری و تدوین آیین‌نامه اجرایی مربوطه است.

مأخذ: همان.

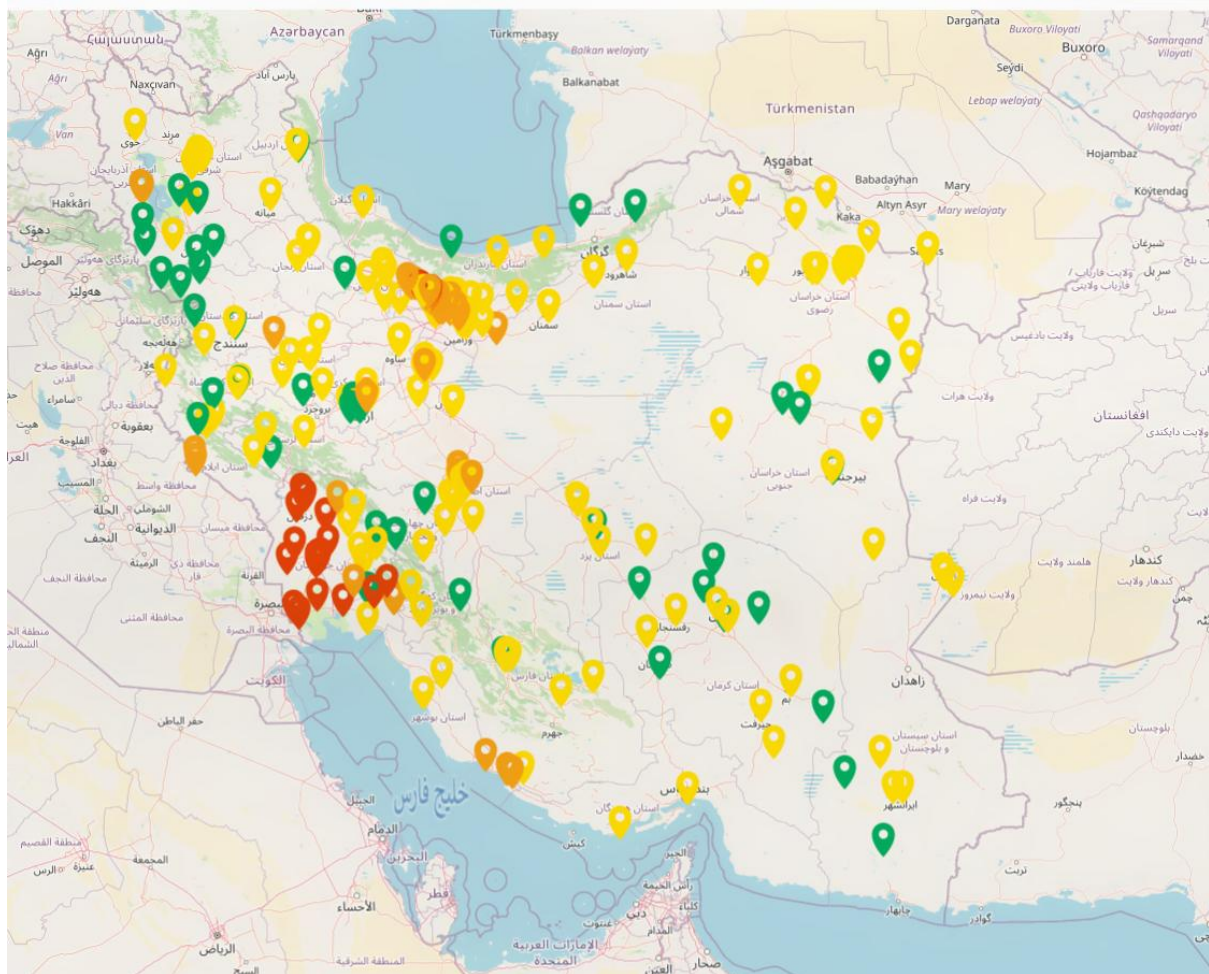
۳. چالش‌های شبکه فعلی پایش محیطی هوا در کشور و ضرورت تحول

شبکه پایش کیفیت هوا، زیربنای نظام مدیریت کیفیت هوا و مبنای تصمیم‌گیری، سیاست‌گذاری و ارزیابی اثربخشی اقدامات کنترلی است. با این حال، بررسی وضعیت موجود نشان می‌دهد که شبکه‌های پایش کشور با چالش‌هایی همچون محدودیت پوشش مکانی، نقص و ناپیوستگی داده‌ها، فرسودگی تجهیزات، محدودیت منابع مالی، نبود یکپارچگی سامانه‌های اطلاعاتی و بهره‌گیری محدود از فناوری‌های نوین مواجه هستند. از سوی دیگر، افزایش انتظارات از نظام پایش و ضرورت پاسخ‌گویی به نیازهای روز مدیریت محیط زیست، تحول در ساختار و رویکرد شبکه پایش را اجتناب‌ناپذیر کرده است. در ادامه، مهم‌ترین چالش‌های شبکه فعلی و محورهای اصلی این تحول بررسی می‌شود.

۳-۱. ایستگاه‌های پایش ثابت زمینی و نقص داده

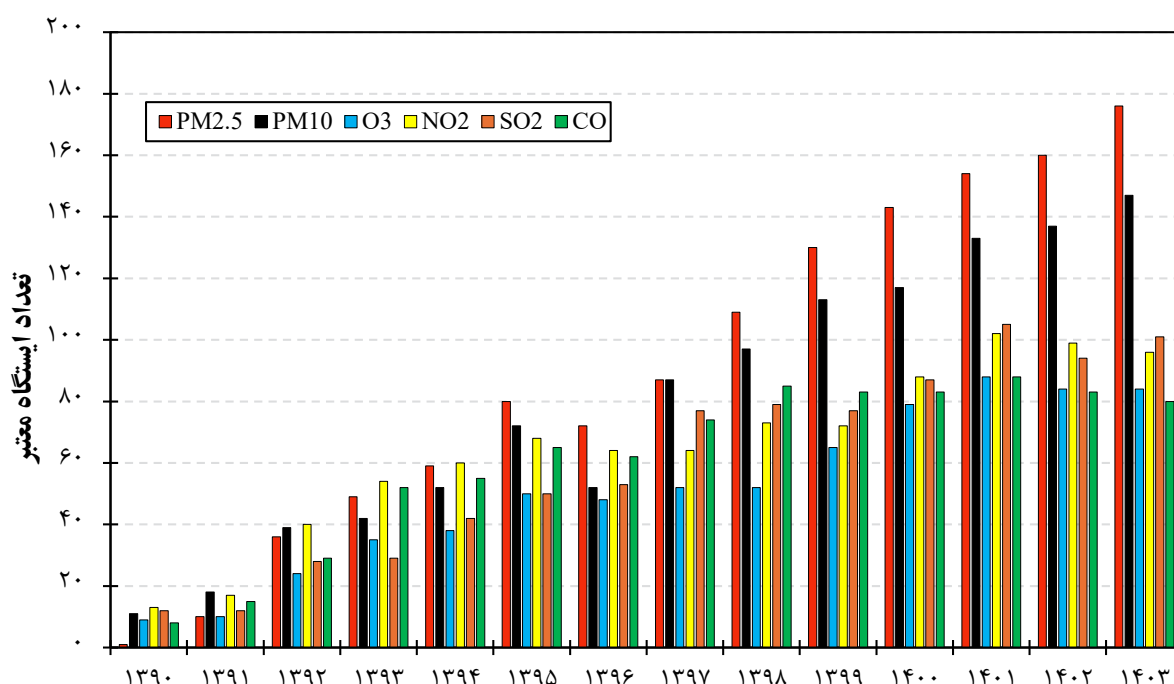
شبکه پایش محیطی آلودگی هوا در ایران عمدتاً متکی بر ایستگاه‌های پایش ثابت زمینی است که توسط سازمان حفاظت محیط زیست و شهرداری‌ها اداره می‌شوند. طی ۱۴ سال منتهی به ۱۴۰۳ حدود ۴۳۷ ایستگاه پایش کیفیت هوا در سراسر کشور نصب شده که داده‌های آنها در سامانه پایش کیفی کشور در دسترس بوده است. این ایستگاه‌ها عموماً آلاینده‌هایی نظیر PM_{10} ، $PM_{2.5}$ ، NO_2 ، SO_2 ، CO و O_3 را اندازه‌گیری می‌کنند و داده‌ها به صورت برخط یا شبیه‌برخط منتشر می‌شوند [۱].

شکل ۱. توزیع مکانی ایستگاه‌های پایش آلاینده‌های محیطی در کشور [۲]



از حدود ۴۳۷ ایستگاه فوق، ۱۷۶ ایستگاه (تنها حدود ۴۰ درصد) در سال ۱۴۰۳ دارای داده معتبر (حداقل ۵۰ درصد داده ساعتی معتبر برای یک سال) برای آلاینده $PM_{2.5}$ بوده است. در شکل زیر روند تعداد ایستگاه‌های معتبر پایش کیفیت هوا در کل کشور طی سال‌های ۱۳۹۰ الی ۱۴۰۳ به تفکیک آلاینده‌های هوا نمایش داده شده است [۱].

شکل ۲. نمودار روند تعداد ایستگاه‌های معتبر پایش کیفیت هوای محیطی در ایران [۱]



بر این اساس وزارت بهداشت در کنار سازمان حفاظت محیط زیست که مسئولیت پایش کیفیت هوا را برعهده دارد، اقدام به نصب حدود ۵۳ ایستگاه پایش ذرات معلق هوا، اغلب در نیمه دوم سال ۱۴۰۳ کرده؛ به سامانه پایش کیفیت هوا متصل شده و در مناطق مختلف کشور توزیع شده است [۱].

۳-۲. توزیع مکانی ایستگاه‌ها و نابرابری پوشش شهری

توزیع مکانی ایستگاه‌های پایش و موقعیت قرارگیری آنها در بسیاری از شهرهای ایران با الگوی توزیع جمعیت، کاربری زمین و منابع آلودگی همخوانی ندارد. این مسئله باعث شده که میانگین‌های شهری محاسبه شده لزوماً بیانگر مواجهه واقعی شهروندان با آلودگی هوا نباشد [۳]. از سوی دیگر، طراحی شبکه فعلی عمدتاً مبتنی بر رویکردهای سنتی بوده و پاسخگوی نیازهای نوین مانند تحلیل توزیع مکانی آلودگی، شناسایی نقاط داغ و منشأیابی دقیق نیست [۴].

بیشترین تعداد ایستگاه نصب شده، به ترتیب در استان تهران (۶۳)، خوزستان (۴۶)، خراسان رضوی (۴۰) و اصفهان (۳۱) بوده که مجموع تعداد ایستگاه‌های این ۴ استان حدود ۴۲ درصد از کل ایستگاه‌های کشور را به خود اختصاص داده است. تعداد ایستگاه‌ها به صورت نابرابری در استان‌های مختلف توزیع شده و در ۶ استان هرمزگان، کهگیلویه و بویراحمد، گلستان، لرستان، اردبیل و مازندران در سال ۱۴۰۳ هیچ ایستگاه معتبری برای $PM_{2.5}$ وجود نداشته است. با وجود توسعه نسبی تعداد ایستگاه‌ها در برخی کلان‌شهرها، این شبکه در سطح ملی ناهمگون و نامتوازن است. تمرکز ایستگاه‌ها در مراکز شهری و مناطق برخوردار، سبب شده که بسیاری از مناطق حاشیه‌ای، شهرهای متوسط، مناطق صنعتی و کانون‌های گردوغبار عملاً فاقد پوشش پایش مؤثر باشند [۱].

در کلان‌شهرهایی مانند تهران، اختلاف معناداری میان غلظت آلاینده‌ها در مناطق شمالی، مرکزی و جنوبی مشاهده می‌شود. اگرچه تعداد ایستگاه‌های پایش در تهران در مقایسه با بسیاری از شهرهای کشور قابل توجه است، اما چیدمان فضایی، نوع تجهیزات و وضوح مکانی و زمانی داده‌ها به گونه‌ای نیست که بتواند ناهمگنی‌های ریزمقیاس آلودگی هوا را به طور کامل ثبت کند و منابع ایجاد آلودگی‌ها را نشان دهد.



این محدودیت، کارایی داده‌ها در پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی هدفمند و تحقق عدالت زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد [۵ و ۳] و ضرورت بررسی و بازنگری علمی جانمایی ایستگاه‌های پایش و رعایت اصول نصب، راه‌اندازی و بهره‌برداری صحیح ایستگاه‌ها را نمایان می‌کند

۳-۳. یکسان فرض شدن داده‌های انواع ایستگاه‌های پایش محیطی

طبقه‌بندی‌های مختلفی در خصوص ایستگاه‌های ثابت سنجش آلودگی هوا بر حسب محل قرارگیری و آلاینده‌های مختلف ارائه شده که در آنها به موارد متعددی چون نوع کاربری ایستگاه (شهری،^۱ ترافیکی،^۲ صنعتی و ...)، فاصله از موانع (ساختمان‌ها، درختان و ...)، فاصله از خیابان، بزرگراه و تقاطع، فاصله از منابع آلودگی مانند دودکش و واحدهای صنعتی، ارتفاع از سطح زمین، نوع پوشش زمین، جهت وزش باد غالب و ... توجه شده است.

به‌طور کلی محل ایستگاه تا حد امکان باید نماینده مناطق اطراف خود باشد. به‌طور مثال ایستگاه‌های ترافیکی باید معرف وضعیت هوا برای بیش از ۲۰۰ متر مربع از سطح اطراف خود باشند و این میزان برای ایستگاه‌های واقع در حومه شهر به چندین برابر می‌رسد. هدف از استقرار ایستگاه‌های ترافیکی، بررسی آلودگی ناشی از خیابان‌های نزدیک به مناطق پرجمعیت است. این ایستگاه‌ها باید تحت تأثیر مستقیم خیابان و وسایل نقلیه باشند. ایستگاه‌های شهری برای بررسی تأثیر آلاینده‌ها بر جمعیت در معرض آلودگی، در شهرها احداث می‌شوند. فاصله ایستگاه‌های شهری از خیابان‌های پرتراфик بر حسب میزان متوسط ترافیک روزانه (تعداد وسیله نقلیه)، متفاوت بوده و از حدود ۱۰ تا ۲۰۰ متر متغیر است. همچنین ایستگاه‌های شهری باید از تعمیرگاه‌های اتومبیل و پارکینگ‌های بزرگ حداقل ۲۰۰ متر و از ایستگاه‌های اتوبوس و تاکسی در حدود ۱۰۰ متر فاصله داشته باشند [۳].

با توجه به موجود نبودن استاندارد و دستورالعمل مدون در خصوص طبقه‌بندی ایستگاه‌ها در کشور، گروه‌بندی برای کاربری ایستگاه‌ها براساس ضوابط و مقررات سایر کشورها انجام شده است. با توجه به تفاوت در توزیع منابع انتشار در سطح شهرها، بافت و طراحی شهری در کشورهای مختلف، ضرورت تدوین استاندارد جامع در این خصوص برای کشور وجود دارد. همچنین با توجه به اینکه از نصب و راه‌اندازی برخی از ایستگاه‌های سنجش آلودگی بیش از یک دهه می‌گذرد، تغییرات صورت گرفته در بافت و تراکم شهری، طبقه‌بندی دقیق آنها را مشکل کرده و استفاده از داده‌های خروجی انواع ایستگاه‌ها، به‌صورت یکسان انجام می‌شود. به‌عنوان مثال برای ترسیم توزیع مکانی غلظت آلودگی، از داده‌های همه انواع ایستگاه‌ها، بدون در نظر گرفتن تفاوت آنها استفاده می‌شود [۳].

۳-۴. وضعیت کالیبراسیون، نگهداشت و کیفیت داده‌ها

یکی از مهم‌ترین چالش‌های شبکه پایش محیطی ایران، مسئله کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری است. کالیبراسیون منظم و استاندارد شرط اساسی اعتبار داده‌های پایش محسوب می‌شود، اما شواهد میدانی و گزارش‌های رسمی نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از ایستگاه‌های فعال کشور فاقد کالیبراسیون معتبر و به‌روز هستند [۳]. هزینه بالای کالیبراسیون، نیاز به تجهیزات مرجع، وابستگی به خدمات تخصصی و کمبود نیروی انسانی آموزش دیده از عوامل اصلی این وضعیت به شمار می‌رود. در نتیجه، بخشی از داده‌های تولید شده قابلیت استفاده در تحلیل‌های سیاستی و علمی را ندارند یا با عدم قطعیت بالا همراه‌اند. این چالش به‌ویژه در مواجهه با فناوری‌های نوین مانند حسگرهای کم‌هزینه اهمیت دوچندان پیدا می‌کند، زیرا بدون چارچوب کالیبراسیون و کنترل کیفیت، افزایش حجم داده لزوماً به بهبود کیفیت تصمیم‌سازی منجر نمی‌شود [۴].

1. Stations
2. Traffic Stations

۵-۳. ناپایداری داده‌ها و قطع پیوستگی زمانی

پایش کیفیت هوا نیازمند داده‌های پیوسته و بلندمدت است تا امکان تحلیل روندها و ارزیابی اثر سیاست‌ها فراهم شود. با این حال، قطع برق، خرابی تجهیزات، مشکلات مخابراتی و ضعف نگهداشت موجب شده که بسیاری از ایستگاه‌ها با وقفه‌های طولانی در ثبت داده مواجه باشند [۲]. این ناپایداری داده‌ها، تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی را با خطا مواجه می‌کند و امکان مقایسه سالیانه و فصلی را کاهش می‌دهد. در نتیجه، تصمیم‌گیران ناچار به اتکا بر داده‌های ناقص یا تخمینی می‌شوند [۳].

۶-۳. ضرورت بازنگری و بازطراحی علمی شبکه موجود ایستگاه‌های پایش

گذشته از چالش‌های مرتبط با کیفیت داده و پوشش مکانی، یک مسئله بنیادی‌تر که کمتر به آن پرداخته شده، عدم بازنگری و بازطراحی علمی شبکه موجود ایستگاه‌های پایش است. شواهد میدانی و تحلیل‌های کارشناسی نشان می‌دهد که جانمایی برخی از ایستگاه‌های فعال کشور، به‌ویژه آنهایی که بیش از یک دهه از نصب آنها می‌گذرد، منطبق بر اصول استاندارد و ضوابط روز دنیا نیست؛ اصولی نظیر فاصله استاندارد از موانع (ساختمان‌ها، درختان)، فاصله مناسب از تقاطع‌ها و خیابان‌های پرترافیک، رعایت ارتفاع استاندارد از سطح زمین، توجه به جهت وزش باد غالب و همچنین تفکیک کاربری صحیح ایستگاه‌ها (شهری، ترافیکی، صنعتی، پس‌زمینه). در عمل، بخش قابل توجهی از ایستگاه‌ها بدون برخورداری از یک «نقشه راه استقرار علمی» و صرفاً براساس دسترسی فیزیکی یا ملاحظات غیرفنی نصب شده‌اند. با وجود این مسئله داده‌های خروجی این ایستگاه‌ها لزوماً معرف شرایط واقعی مواجهه جمعیت نبوده و در مواردی، حتی برای تحلیل الگوهای آلودگی نیز قابل استفاده نیستند [۳].

به همین علت، هرگونه برنامه برای توسعه پایش‌های نوین (اعم از حسگرهای کم‌هزینه، ماهواره یا مدل‌سازی) باید با یک گام اساسی و فوری یعنی «بازنگری و بازطراحی شبکه موجود» آغاز شود. این فرایند شامل ارزیابی جانمایی ایستگاه‌های فعلی براساس استانداردهای ملی به‌روزر شده (مطابق ماده (۱۸) [آیین‌نامه فنی](#))، تعیین تکلیف ایستگاه‌های فاقد داده معتبر یا دارای تجهیزات فرسوده، شناسایی شکاف‌های مکانی (به‌ویژه در مناطق حاشیه‌نشین، مجاور صنایع و کانون‌های گردوغبار) و در نهایت تدوین یک طرح جامع برای بهینه‌سازی شبکه موجود و تکمیل هدفمند آن است. تأکید می‌شود که این بازطراحی، پیش‌نیاز اساسی برای هرگونه سرمایه‌گذاری جدید در تجهیزات پایش است و بدون آن، حتی توسعه شبکه‌های متراکم حسگرهای کم‌هزینه یا بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای نیز نمی‌تواند تصویر درست و قابل‌اعتمادی از توزیع آلودگی و مواجهه واقعی جمعیت ارائه دهد [۳].

۴. فناوری‌ها و روش‌های نوین پایش محیطی آلودگی هوا و کاربردهای عملی در ایران

شبکه فعلی پایش محیطی اگرچه پایه‌ای ارزشمند ایجاد کرده، اما با چالش‌هایی نظیر عدم پوشش مکانی کافی، ضعف کالیبراسیون، ناپایداری داده و محدودیت در پاسخ‌گویی به نیازهای نوین مدیریت کیفیت هوا مواجه است. این وضعیت، ضرورت گذار به پایش‌های نوین محیطی را برجسته می‌کند؛ پایش‌هایی که بتوانند با هزینه معقول، پوشش گسترده، دقت قابل اتکا و قابلیت تحلیل پیشرفته، زیربنای تصمیم‌سازی مؤثر در حوزه کیفیت هوا را فراهم کنند [۴]. در ادامه فناوری‌های نوین پایش محیطی آلودگی هوا از منظر دامنه کاربرد، مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای عملی در ایران بررسی شده است.

۱-۴. پایش ماهواره‌ای: چشم‌بی‌دریغ برای رصد منابع گسترده و غیرمتمرکز

کاربرد ماهواره‌ها در پایش کیفیت هوا، امروزه بسیار گسترده و چندبُعدی است. یکی از مهم‌ترین کاربردها، پایش وسیع و یکپارچه آلاینده‌ها در مقیاس ملی، منطقه‌ای و جهانی است؛ قابلیتی که هیچ شبکه زمینی به تنهایی قادر به فراهم کردن آن نیست. داده‌های ماهواره‌ای برای



شناسایی ریزگردها، کانون‌های آلودگی صنعتی، آثار آتش‌سوزی جنگل‌ها، ردیابی انتقال بین مرزی آلاینده‌ها و تحلیل تغییرات بلندمدت استفاده می‌شوند [۷]. همچنین، ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با مدل‌های شیمی-انتقال و شبکه‌های پیش‌بینی، امکان ایجاد نقشه‌های همزمان کیفیت هوا و پیش‌بینی‌های دقیق برای مناطق فاقد ایستگاه زمینی را فراهم کرده است [۸]. از سوی دیگر، داده‌های ماهواره‌ای نقشی اساسی در اعتبارسنجی منابع آلاینده‌ها، مانند انتشار ناشی از ترافیک، صنایع بزرگ، معادن و نیروگاه‌ها ایفا می‌کنند.

مزایای فناوری ماهواره‌ای در پایش کیفیت هوا قابل توجه است. نخستین مزیت، پوشش وسیع جغرافیایی است که امکان پایش پیوسته مناطق دورافتاده، مرزی و فاقد زیرساخت زمینی را فراهم می‌کند. دوم، یکپارچگی داده‌هاست که امکان مقایسه عملکرد مناطق مختلف و تحلیل‌های مقیاس بزرگ را میسر می‌کند. سوم، ماهواره‌ها امکان تهیه داده‌های چندطیفی و چندزمانه را فراهم می‌کنند که می‌تواند در شناسایی الگوهای فصلی، بلندمدت و آثار تغییرات اقلیمی بر کیفیت هوا نقش به‌سزایی داشته باشد [۹]. افزون بر این، دسترسی آزاد به داده‌های مأموریت‌هایی مانند Sentinel، از نظر اقتصادی مزیت بزرگی به شمار می‌آید.

با وجود این مزایا، فناوری ماهواره‌ای محدودیت‌هایی نیز دارد که یکی از مهم‌ترین آنها، تفکیک مکانی نسبتاً پایین برای مطالعات محلی و درون‌شهری است. علاوه بر این، وابستگی داده‌ها به شرایط جوی مانند ابر، رطوبت و زاویه تابش خورشید است که می‌تواند کیفیت داده‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. از طرف دیگر، داده‌های ماهواره‌ای اغلب ستونی بوده و به‌طور مستقیم غلظت سطح زمین را نمایش نمی‌دهند؛ بنابراین نیازمند مدل‌سازی و داده‌های کمکی هستند [۱۰]. علاوه بر این، محدودیت در دفعات گذر ماهواره ممکن است مانع پایش لحظه‌ای آلودگی شود، مگر در ماهواره‌های مدار پایین با ظرفیت تصویربرداری روزانه.

وسعت جغرافیایی ایران، وجود کانون‌های داخلی و فرامرزی گردوغبار و شیوع منابع آلودگی غیرمتمرکز (مانند سوزاندن پسماند)، بهره‌گیری از پایش ماهواره‌ای را از یک گزینه به یک ضرورت راهبردی تبدیل کرده است. از جمله کاربردهای عملیاتی پایش ماهواره‌ای در ایران می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- **پیش‌بینی و ردیابی گردوغبار:** به‌ویژه در سیستان و بلوچستان، خوزستان و استان‌های غرب کشور با استفاده از مدل‌های ترکیبی زمین-ماهواره برای پیش‌بینی مسیر و شدت طوفان‌های گردوغبار با دقت زمانی ۴۸ تا ۷۲ ساعت جلوتر و ارائه هشدارهای عملیاتی به بخش‌های سلامت، کشاورزی و حمل‌ونقل.

- **برآورد سطحی آلودگی در مناطق فاقد پایش:** تولید نقشه‌های روزانه و ساعتی از توزیع $PM_{2.5}$ و دی‌اکسید نیتروژن با وضوح 1×1 کیلومتر برای کل کشور، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین که داده‌های ماهواره‌ای را با داده‌های زمینی محدود تلفیق می‌کنند. این نقشه‌ها می‌توانند شکاف اطلاعاتی در شهرهای کوچک، مناطق روستایی و حریم کلان‌شهرها را پر کند.

- **نظارت بر آلاینده‌های گازی خاص:** رصد انتشار دی‌اکسید گوگرد (SO_2) از مجتمع‌های صنعتی بزرگ (مانند پالایشگاه‌ها و نیروگاه‌ها) و متان (CH_4) از مراکز دفن زباله و خطوط انتقال نفت و گاز.

۴-۲. شبکه‌های حسگرهای کم‌هزینه: ایجاد تراکم مکانی و تمرکز بر عدالت محیطی

حسگرهای کم‌هزینه^۱ در دهه‌های اخیر به‌عنوان یکی از نوآورانه‌ترین فناوری‌ها در حوزه پایش کیفیت هوا مطرح شده‌اند. مهم‌ترین کاربرد آنها ایجاد شبکه‌های پایش پرشمار و با تفکیک مکانی بالا در مناطق شهری است؛ شبکه‌هایی که می‌توانند تغییرات کوتاه‌مدت و ریزمقیاس آلودگی را به‌ویژه در مجاورت خیابان‌ها، مدارس، مناطق صنعتی و نقاط داغ آلودگی ثبت کنند [۱۱]. ترکیب این داده‌ها با مدل‌های شیمی-انتقال و داده‌های ماهواره‌ای، امکان ارائه نقشه‌های چندمنبعی کیفیت هوا را فراهم می‌کند که در مطالعات مدیریت شهری، تحقیقات اپیدمیولوژیک و تحلیل آثار ترافیک کاربرد دارد [۱۲]. افزون بر این، نصب سنسورها در محیط‌های داخلی مانند منازل، مدارس و ادارات، دیدگاه جدیدی

1. Low-cost Sensors (LCS)

درباره تفاوت میان کیفیت هوای داخل و خارج ایجاد کرده و این داده‌ها به صورت فزاینده‌ای در مطالعات سلامت و پایش قرار گیری انسان در معرض آلودگی استفاده می‌شوند. در حوزه مشارکت عمومی نیز سنسورهای کم‌هزینه موجب افزایش آگاهی عمومی نسبت به آلودگی هوا شده‌اند [۱۳].

هزینه اندک، نصب و نگهداری آسان، مصرف انرژی پایین، قابلیت انتقال داده بلادرنگ و امکان ایجاد شبکه‌های گسترده، این سنسورها را به گزینه‌ای ایدئال برای پایش تکمیلی و پشتیبانی از ایستگاه‌های مرجع تبدیل کرده است. همچنین، به واسطه الگوریتم‌های تصحیح مبتنی بر یادگیری ماشین، دقت داده‌های آنها به‌طور چشمگیری بهبود یافته است [۱۴]. با این حال، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد. سنسورهای کم‌هزینه نسبت به تغییرات دما، رطوبت و سایر شرایط محیطی حساس‌اند و ممکن است در بلندمدت دچار رانش سیگنال^۱ شوند. دقت آنها همچنان کمتر از استانداردهای ایستگاه‌های مرجع بوده و برای کاربری‌های قانونی، مقرراتی و مطالعات حساس ممکن است نیاز به اعتبارسنجی مستمر و کالیبراسیون داشته باشند [۱۵]. علاوه بر این، تنوع زیاد در کیفیت ساخت و استانداردهای تولید میان برندها، چالش‌هایی در مقایسه و تلفیق داده‌ها ایجاد می‌کند. حسگرهای کم‌هزینه در کنار ایستگاه‌های مرجع سازمان حفاظت محیط زیست و شهرداری‌های کشور می‌تواند در موارد زیر در ایران به کار گرفته شود.

- پایش مواجهه جمعیت‌های حساس در داخل ساختمان‌ها، مدارس، بیمارستان‌ها و مهدکودک‌ها به‌ویژه در مناطق دارای آلودگی بالا؛
- شناسایی نقاط داغ آلودگی شهری در کلان‌شهرهایی مانند تهران، اصفهان و مشهد؛
- پایش آلودگی ناشی از منابع خاص نظیر صنایع، معادن، نیروگاه‌ها و کوره‌های آجرپزی.

۳-۴. فناوری‌های پیشرفته آنالیز برخط ذرات معلق: کلید منشأیابی سریع و هدف‌گیری سیاستی

پایش نوین فراتر از اندازه‌گیری غلظت کل ذرات (مانند $PM_{2.5}$) رفته و به سمت شناسایی ترکیب شیمیایی ذرات در لحظه (برخط) حرکت کرده است. این فناوری‌های پیشرفته، امکان سهم‌بندی لحظه‌ای منابع آلودگی را فراهم می‌کنند و به جای انتظار برای نتایج آزمایشگاه (که ممکن است هفته‌ها طول بکشد)، اطلاعاتی حیاتی برای پاسخ فوری و هدف‌گیری مؤثر سیاست‌ها ارائه می‌دهند [۱۶]. منشأیابی آلودگی هوا با استفاده از فناوری‌های آنالیز برخط، رویکردی نوین در شناسایی و تفکیک منابع آلاینده در محیط‌های شهری و صنعتی است. این فناوری‌ها با فراهم‌سازی داده‌های لحظه‌ای، پیوسته و دقیق از غلظت و خصوصیات ذرات معلق، امکان بررسی پویایی آلودگی هوا را در ابعاد زمانی و مکانی فراهم می‌کنند. برخلاف روش‌های سنتی مبتنی بر نمونه‌برداری دوره‌ای و تحلیل آزمایشگاهی، سامانه‌های برخط قادرند تغییرات سریع و ناگهانی آلودگی ناشی از فعالیت‌های ترافیکی، صنعتی، رویدادهای آتش‌سوزی یا ورود توده‌های گردوغبار را در لحظه ثبت کرده و الگوهای رفتاری هر منبع را با دقت بالاتری آشکار کنند.

الف) آنالیزهای برخط فلزات معلق در هوا:^۲ این دستگاه‌ها، با استفاده از تکنیک‌هایی مانند طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس^۳ یا طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی^۴، غلظت فلزات سنگین و عناصر کم‌مقدار (مانند سرب، آرسنیک، کادمیوم، روی، وانادیوم، نیکل) را در ذرات معلق به‌طور پیوسته اندازه‌گیری می‌کنند. از آنجاکه الگوی فلزات مانند اثر انگشت شیمیایی برای منابع مختلف است (مانند وانادیوم و نیکل شاخص سوخت کشتی، سرب می‌تواند شاخص صنایع خاص یا خاک باشد)، این داده‌ها امکان شناسایی سریع و کمی سهم منابع صنعتی، فرسایش خاک و گردوغبار را ممکن می‌کنند [۱۷].

ب) آنالیزهای برخط یون‌های معلق:^۵ این تجهیزات غلظت یون‌های مهم موجود در ذرات، مانند نیترات (NO_3)، سولفات (SO_4^{2-})،

1. Signal Drift

2. Online Ambient Air Metal Analyser

3. XRF

4. ICP-MS

5. Online Ambient Ions Analyzer



آمونیم (NH_4^+) و کلرید (Cl^-) را به صورت ساعتی یا با وضوح زمانی بالاتر اندازه می‌گیرند. نیتрат و سولفات، شاخص آلودگی ثانویه ناشی از واکنش‌های جوی گازهای NO_x و SO_2 هستند. پایش برخط این یون‌ها می‌تواند اثربخشی سیاست‌های کاهش انتشار این گازها از صنایع و حمل‌ونقل را با سرعت بی‌سابقه‌ای ارزیابی کند و نشان دهد که کاهش انتشار یک گاز چگونه مستقیماً بر غلظت ذرات معلق تأثیر می‌گذارد [۱۸].

ج) آنالیزهای برخط کربن آلی/کربن عنصری:^۱ این دستگاه‌ها باروش‌های حرارتی، کربن موجود در ذرات را به دو بخش کلیدی تفکیک می‌کنند: کربن عنصری (EC) که عمدتاً از احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی و زیست‌توده (مانند دوده) ناشی می‌شود و کربن آلی (OC) که منشأ گسترده‌تری شامل احتراق، واکنش‌های ثانویه و منابع طبیعی دارد. نسبت EC/OC یک شاخص قدرتمند برای تشخیص سهم نسبی منابع احتراقی (مانند ترافیک دیزلی، سوزاندن زباله) در آلودگی لحظه‌ای است [۱۹].

منشأیابی آلودگی هوا با استفاده از فناوری‌های پیشرفته آنالیز برخط در ایران، قابلیت به کارگیری در محورهای زیر را دارد:

- ارزیابی اثربخشی سیاست‌های ترافیکی بر کنترل کیفیت هوا و بهینه‌سازی طرح‌های ترافیکی در کلان‌شهرهای کشور از طریق تعیین هوشمند محدوده ترافیکی، اعمال محدودیت هوشمند وسایل نقلیه سبک و سنگین اعم از دیزلی، خودروهای سواری و موتورسیکلت.
- برنامه‌ریزی بلندمدت و سیاستگذاری مبتنی بر داده واقعی در خصوص گسترش حمل‌ونقل عمومی، ارتقای استاندارد خودرو، جابه‌جایی صنایع، ارتقای کیفیت سوخت یا نوسازی ناوگان.
- پایش محدوده شهرک‌های صنعتی و نیروگاه‌ها و کشف تخلفات به‌ویژه در زمان اوج آلودگی هوا.

۴-۴. دوربین‌های پایش کیفیت هوا و تحلیل تصویر

دوربین‌های پایش کیفیت هوا در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از ابزارهای نوین در شبکه‌های پایش کیفیت هوا مورد توجه قرار گرفته‌اند. این فناوری با اتکا به تحلیل تصاویر و الگوریتم‌های پردازش تصویر، امکان ارزیابی غیرمستقیم وضعیت آلودگی هوا را فراهم کرده و به‌ویژه برای پایش ذرات معلق، دود و کاهش دید کاربرد گسترده‌ای یافته است. ترکیب داده‌های تصویری با مدل‌های هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی و داده‌های ایستگاه‌های مرجع، دقت تحلیل و پیش‌بینی آلودگی را به‌طور قابل توجهی افزایش داده است. استفاده از دوربین‌های پایش کیفیت هوا در مقایسه با ایستگاه‌های مرجع سنجش کیفیت هوا، با هزینه کمتر، پوشش گسترده‌تر و پایش مستمری را فراهم می‌کند [۲۰].

با این حال، دقت این دوربین‌ها نسبت به ایستگاه‌های سنجش استاندارد پایین‌تر است و عواملی مانند نور، وضعیت جوی، ابر، باران، انعکاس و زاویه قرارگیری دوربین می‌تواند باعث خطا در تحلیل شود. این فناوری عمدتاً برای پایش ذرات و دود مناسب است و برای تحلیل مستقیم آلاینده‌های گازی کارایی محدودی دارد و برای ذرات معلق نیز نیازمند کالیبراسیون مداوم با داده‌های زمین پایه هستند [۲۱]. یک نمونه نوآورانه، پروژه‌ای است که توسط گوگل و شرکای تحقیقاتی آن در حال توسعه بوده و از دوربین‌های موجود در سطح شهر (مانند دوربین‌های ترافیکی یا دوربین‌های مخصوص نصب شده بر روی خودروهای سرویس) برای استنتاج کیفیت هوا استفاده می‌کند [۲۲]. داده‌های تصویری پردازش شده سپس با داده‌های ایستگاه‌های زمینی ثابت کالیبره می‌شوند تا مدل‌های یادگیری ماشین بتوانند با دقت قابل قبولی، نقشه‌های پراکنش مکانی آلودگی با وضوح بسیار بالا (در مقیاس خیابان) را استنتاج کنند [۲۳].

داده‌های تصویری می‌توانند به‌عنوان یک جریان داده مکمل ارزشمند در اکوسیستم پایش ترکیبی مورد توجه قرار گیرند. از جمله کاربردهای این روش برای پایش کیفیت هوا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- شناسایی لحظه‌ای شروع طوفان‌های گردوغبار به‌ویژه در مناطق غربی، جنوب غربی و جنوب شرقی کشور.
- شناسایی خودکار منابع نقطه‌ای آلودگی دیداری (دودکش‌ها، خودروهای دودزا) و تکمیل نقشه‌های آلودگی در مناطق فاقد ایستگاه یا

ایران توصیه نمی‌شود. پیشنهاد می‌شود این موضوع صرفاً در قالب پروژه‌های پژوهشی محدود توسط دانشگاه‌ها دنبال شود و تا زمان حصول نتایج قابل اتکا، در شبکه رسمی پایش کشور جایگاهی نداشته باشد.

۴-۵. پهپادها: دقت بیشتر، دید گسترده‌تر

پایش کیفیت هوا با استفاده از سامانه‌های هوابرد بدون سرنشین یا پهپادها طی دو دهه اخیر به یکی از حوزه‌های نوظهور و تحول‌آفرین در علوم محیطی تبدیل شده است. کاربردهای پهپادها در پایش نوین کیفیت هوا بسیار متنوع و منحصر به فرد است. یکی از مهم‌ترین کاربردها، اندازه‌گیری عمودی و سه‌بعدی آلاینده‌هاست. برخلاف ایستگاه‌های زمینی که تنها داده سطح زمین را ارائه می‌دهند، پهپادها قادرند نحوه تغییر غلظت آلاینده‌هایی مانند $PM_{2.5}$ ، NO_x و O_3 را در ارتفاعات مختلف تا چندصد متر ثبت کنند [۲۴]. همچنین، پهپادها ابزاری کارآمد برای پایش نزدیک منبع محسوب می‌شوند؛ به‌ویژه در صنایع نفت و گاز، پالایشگاه‌ها، کارخانه‌ها، دودکش‌ها و معادن که امکان نمونه‌برداری مستقیم از نقاط پرخطر یا دور از دسترس را فراهم می‌کنند. افزون بر این، پهپادها جایگاه مهمی در کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های شیمی-انتقال و داده‌های ماهواره‌ای پیدا کرده‌اند، زیرا قادرند اندازه‌گیری‌های دقیق را در ارتفاعات مختلف فراهم کنند که برای ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای بسیار ارزشمند است [۲۵].

این سامانه‌ها چابکی و انعطاف‌پذیری بالایی دارند؛ به‌نحوی که می‌توان آنها را در مناطق صعب‌العبور، صنعتی یا خطرناک استفاده کرد. علاوه بر این، پهپادها قادر به جمع‌آوری داده‌های بسیار دقیق در ارتفاعات مختلف هستند، چیزی که هیچ روش زمینی یا حتی بسیاری از روش‌های هوابرد سنتی قادر به انجام آن نیستند. همچنین، هزینه عملیاتی پایین‌تر نسبت به هواپیماهای سرنشین‌دار و تجهیزات سنجش هوایی کلاسیک به پژوهشگران و نهادهای نظارتی اجازه می‌دهد مطالعات میدانی مکرر و با بودجه محدود انجام دهند [۲۶]. همچنین، امکان نصب همزمان چند حسگر گازی، ذره‌ای و اپتیکی بر روی پهپاد، آن را به یک پلتفرم چندمنظوره و کارآمد برای مطالعات محیطی تبدیل می‌کند. با وجود این مزایا، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد که یکی از مهم‌ترین آنها، محدودیت باتری و زمان پرواز است که مانع از انجام عملیات طولانی‌مدت می‌شود. دوم، پهپادها تحت تأثیر شرایط نامساعد جوی مانند باد شدید، بارش و دما قرار می‌گیرند که می‌تواند ایمنی پرواز و دقت سنسورها را کاهش دهد. سوم، چالش‌های مقررات‌گذاری و نیاز به مجوزهای پروازی در بسیاری از کشورها مانع اجرای آزادانه مأموریت‌های میدانی می‌شود [۲۷]. از سوی دیگر، ارتعاش، جریان هوای ملخ‌ها و آثار حرارتی موتور می‌تواند در اندازه‌گیری برخی آلاینده‌ها خطا ایجاد کند، که نیازمند کالیبراسیون دقیق و طراحی مناسب جایگاه حسگر است. به‌علاوه، هزینه بالای برخی حسگرهای دقیق ممکن است مانع استفاده گسترده از پهپادها در پایش‌رفته در برخی پروژه‌ها شود.

پهپادها قابلیت به کارگیری در پایش کیفیت در حوزه‌های زیر را در کشور دارند.

- پایش آلودگی اطراف پالایشگاه‌ها و صنایع نفت و گاز در جنوب کشور به‌ویژه مشعل‌سوزی‌ها با پهپادهای مجهز به سنسورهای گازی.
- ردیابی انتشارات صنایع غیرمجاز آلاینده و پسماندسوزی در حاشیه شهرها به‌ویژه در اوج آلودگی هوا.

۴-۶. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین: پیش‌بینی آلاینده‌ها و ادغام داده‌های چندمنبعی

در سال‌های اخیر، با ظهور معماری‌های یادگیری عمیق-زمانی و مدل‌های ترکیبی، هوش مصنوعی در نقش ابزاری کلیدی برای تحلیل داده‌های چندمنبعی و مدل‌سازی پیچیدگی‌های شیمی-انتقال جوی نقش می‌کند [۲۸]. یکی از مهم‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی، پیش‌بینی کوتاه‌مدت و میان‌مدت آلاینده‌هاست؛ که شامل پیش‌بینی آلاینده‌هایی مانند $PM_{2.5}$ ، PM_{10} ، NO_2 و O_3 با استفاده از داده‌های هواشناسی، ترافیکی و اندازه‌گیری‌ها می‌شود. این مدل‌ها در شرایط هشدار آلودگی، نقش مهمی در مدیریت شهری دارند. دومین کاربرد مهم، ترکیب و ادغام داده‌های چندمنبعی است؛ به‌طوری که هوش مصنوعی می‌تواند داده‌های ماهواره‌ای، شبکه‌های سنسور کم‌هزینه و مدل‌های عددی را ادغام و نقشه‌های کیفیت هوای سطح زمین را با دقت بالا بازسازی کند [۲۹]. علاوه بر این، روش‌های یادگیری ماشین



به‌طور گسترده برای تصحیح داده‌های سنسورهای کم‌هزینه، کاهش نویز و رفع خطاهای محیطی به کار می‌روند و موجب ارتقای کیفیت داده‌های این سنسورها شده‌اند. در حوزه شناسایی منابع، هوش مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های دسته‌بندی و تحلیل الگو قادر است منابع آلاینده‌های شهری را شناسایی، تفکیک و مدل‌سازی کند؛ قابلیت‌هایی که پیش‌تر تنها با مدل‌های عددی پیچیده امکان‌پذیر بود [۳۰].

هوش مصنوعی قادر است روابط غیر خطی و پیچیده میان عوامل متعدد نظیر دما، رطوبت، ترافیک، باد و واکنش‌های شیمیایی را که در مدل‌های کلاسیک به‌سختی قابل توصیف‌اند، به‌طور دقیق مدل‌سازی کند. علاوه بر این، هوش مصنوعی توانایی استخراج اطلاعات از داده‌های ناقص، نویزی یا چندمنبعی را دارد و می‌تواند کیفیت داده‌ها را ارتقا دهد. از طرف دیگر، مدل‌های هوشمند معمولاً سرعت پردازش بسیار بالایی دارند و امکان پیش‌بینی‌های بلندمدت را فراهم می‌کنند، که در مدیریت شرایط اضطراری آلودگی اهمیت فراوان دارد. با وجود این مزایا، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد. عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی به شدت وابسته به کیفیت و حجم داده‌های آموزشی است و در صورت وجود داده‌های خطا یا عدم داده‌های کافی، دقت پیش‌بینی‌ها کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، بسیاری از مدل‌های یادگیری عمیق ماهیت «جعبه‌سیاه» دارند و قابلیت تفسیرپذیری کم آنها می‌تواند در کاربردهای مقررات‌گذاری و سیاست‌گذاری چالش ایجاد کند. همچنین، مدل‌های هوش مصنوعی ممکن است بدون داده‌های مناسب برای شرایط جدید، دچار بیش‌برازش و عملکرد ضعیف در رویدادهای نادر شوند [۳۱].

از جمله کاربردهای هوش مصنوعی در پایش کیفیت هوا در ایران می‌توان به محورهای عملی زیر اشاره کرد.

- مدل‌سازی و پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های مختلف به‌ویژه $PM_{2.5}$ در کلان‌شهرهای کشور با الگوریتم‌های مربوطه و ترکیب با داده‌های ماهواره‌ای.

■ تشخیص الگوهای انتشار ترافیکی در کلان‌شهرهای کشور با استفاده از داده‌های تردد و مدل‌های یادگیری عمیق.

■ پیش‌بینی وقوع طوفان‌های گردوغبار در جنوب غرب، غرب و جنوب شرق کشور از طریق مدل‌های هوشمند ترکیبی.

۷-۴. مدل‌سازی عددی: پایش، پیش‌بینی و تحلیل آلودگی هوا

مدل‌سازی عددی کیفیت هوای ۵ دهه گذشته به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای علمی برای درک، پایش و پیش‌بینی فرایندهای شیمی-فیزیکی جو تکامل یافته است. ورود مدل‌های هواشناسی-شیمیایی یکپارچه در دهه ۲۰۰۰ نقطه عطف بزرگی بود و امکان شبیه‌سازی همزمان پدیده‌های هواشناسی و واکنش‌های شیمیایی با دقتی بالا فراهم شد [۳۲]. در دهه اخیر نیز ادغام مدل‌های عددی با داده‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، ابعاد جدیدی به پایش نوین کیفیت هوا افزوده و دقت پیش‌بینی‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش داده است.

این مدل‌ها ابزار اصلی پیش‌بینی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت آلودگی هوا هستند و طیف وسیعی از آلاینده‌ها را شبیه‌سازی می‌کنند. علاوه بر این، مدل‌سازی عددی امکان تحلیل سناریوهای انتشار را فراهم می‌کند؛ به‌عنوان مثال بررسی اینکه کاهش ۳۰ درصدی انتشارهای صنعتی یا تغییرات ترافیکی چگونه بر سطح آلاینده‌ها اثر می‌گذارد [۳۳]. افزون بر این موارد، مدل‌های عددی نقشی اساسی در بررسی انتقال دوربرد آلاینده‌ها ایفا می‌کنند؛ مانند انتقال ریزگردهای صحراهای خاورمیانه، آتش‌سوزی‌های سیبری و آلودگی ناشی از نیروگاه‌های مناطق صنعتی. چهارم، مدل‌ها برای ادغام داده‌های مشاهداتی، از ماهواره، سنسورهای کم‌هزینه و ایستگاه‌های زمینی استفاده کرده تا نقشه‌های دقیق و فراگیر کیفیت هوا تولید کنند.

افزون بر این، مدل‌سازی عددی ابزاری کلیدی برای سیاست‌گذاری، ارزیابی اثربخشی قوانین کاهش آلودگی و طراحی برنامه‌های کنترل انتشار است. این مدل‌ها قادرند برهم‌کنش‌های پیچیده بین فرایندهای هواشناسی و شیمیایی را باز نمایند، موضوعی که با روش‌های ساده تجربی امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این، مدل‌ها قابلیت پیش‌بینی آینده را دارند و می‌توانند سناریوهای مختلف را شبیه‌سازی کنند؛ امکانی که برای برنامه‌ریزی شهری و تدوین سیاست‌های کاهش آلودگی حیاتی است. افزون بر این موارد، مدل‌های عددی با پوشش سه‌بعدی و منطقه‌ای خود امکان تحلیل دینامیک عمودی و افقی آلاینده‌ها را فراهم می‌کنند. چهارم، امکان ادغام داده‌های متنوع (هواشناسی، ماهواره، سنسورهای زمینی) باعث شده مدل‌های یکپارچه به ابزارهایی قدرتمند برای تولید نقشه‌های جامع کیفیت هوا تبدیل شوند [۳۴]. با وجود این مزایا، مدل‌سازی عددی محدودیت‌هایی نیز دارد که یکی از مهم‌ترین آنها، نیاز شدید به توان محاسباتی بوده؛ اجرای مدل‌ها برای بازه‌های زمانی

طولانی مستلزم زیرساخت‌های محاسباتی قدرتمند است. علاوه بر این، دقت مدل‌ها به شدت وابسته به کیفیت موجودی انتشار است و خطاهای موجود در تخمین منابع باعث بروز عدم قطعیت در نتایج می‌شود. افزون بر این موارد، مدل‌ها گاهی در بازتولید پدیده‌های پیچیده مانند تولید ازن در شرایط ناپایدار یا آلودگی ثانویه با محدودیت مواجه‌اند [۳۵]. و در نهایت، پیچیدگی زیاد و وابستگی به پارامترسازی‌ها ممکن است به حساسیت بالا به ورودی‌ها منجر شود و حتی تغییرات کوچک بتواند نتایج را تغییر دهد.

مدل‌سازی آلودگی هوا برای حوزه‌های زیر در ایران قابل بهره‌برداری است.

- پیش‌بینی روزانه آلودگی هوای کلان‌شهرهای کشور با مدل‌های محاسباتی؛
- مدل‌سازی ریزگردهای ورودی از کشورهای همسایه با مدل‌های شیمی-انتقال منطقه‌ای؛
- تحلیل سناریوهای کنترل انتشار در کلان‌شهرهای کشور (مانند محدودیت ترافیک، بهبود سوخت، نوسازی ناوگان، ارتقای معاینه فنی).

۸-۴. جمع‌بندی: ترسیم معماری یک اکوسیستم پایشی ترکیبی، هوشمند و عمل‌گرا

گذار ایران به پایش محیطی نوین، حرکت از شبکه متکی بر ایستگاه‌های ثابت به سمت یک اکوسیستم ترکیبی که در آن ایستگاه‌های مرجع ارتقایافته (ستون دقت)، شبکه‌های متراکم و هدفمند حسگرهای کم‌هزینه (ستون پوشش و عدالت)، پایش ماهواره‌ای فعال (ستون نگاه کلان) و مدل‌سازی پیش‌بینی‌گر به‌طور هوشمندانه‌ای در هم تنیده شده‌اند. لایه تکمیلی و پیشرفته این اکوسیستم می‌تواند شامل فناوری‌های تشخیصی پیشرفته (مانند آنالیزهای برخط ترکیب شیمیایی ذرات برای منشأیابی دقیق) و سامانه‌های پایش هوشمند مبتنی بر داده‌های تصویری شهری باشد که در مراحل بعدی توسعه و در مناطق خاص قابل پیاده‌سازی هستند. هوش مصنوعی نیز می‌تواند نقشی کلیدی در تلفیق و صحت‌سنجی داده‌های حاصله داشته باشد. در جدول، روش‌های مختلف پایش نوین به همراه مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای عملی آن در ایران به‌طور خلاصه ارائه شده است. طبعاً ایجاد این اکوسیستم ترکیبی زمانی کارا خواهد بود که از یک طرف بستر لازم برای دسترسی باز و شفاف شهروندان به داده‌ها به‌عنوان زیربنای اعتماد عمومی فراهم شده و از طرف دیگر خروجی این اکوسیستم به فرایندهای اجرایی و عملیاتی برای بهبود کیفیت هوا پیوند بخورد.

جدول ۳. روش‌های پایش نوین کیفیت هوا و کاربردهای عملی برای ایران

روش	مزایا	محدودیت‌ها	کاربردهای عملی در ایران
پایش ماهواره‌ای	پوشش وسیع جغرافیایی، داده‌های چندزمانه، دسترسی رایگان به برخی داده‌ها	تفکیک مکانی پایین، وابستگی به شرایط جوی، محدودیت در پایش لحظه‌ای، اندازه‌گیری ستونی آلاینده‌ها	شناسایی کانون‌های گردوغبار و مسیرهای حرکت، تحلیل روندهای بلندمدت آلودگی، برآورد آلاینده‌ها در مناطق فاقد ایستگاه
حسگرهای کم‌هزینه	هزینه کم، نصب آسان، داده بلادرنگ، شبکه‌سازی گسترده	حساسیت به دما/رطوبت، رانش سیگنال، دقت پایین‌تر	پایش محیط داخلی مدارس و بیمارستان‌ها، شناسایی نقاط کانونی آلودگی شهری، پایش صنایع محلی
آنالیز برخط (منشأیابی)	داده لحظه‌ای، تفکیک دقیق منابع، سرعت بالا نسبت به آزمایشگاه	تجهیزات گران، نیاز به نگهداری تخصصی	ارزیابی سیاست‌های ترافیکی، تشخیص رفتار منابع اصلی آلاینده، پایش مجاورت صنایع کلیدی
دوربین‌های پایش و تحلیل تصویر	هزینه کمتر، پوشش بالا، قابلیت استفاده از شبکه دوربین‌های موجود	تأثیرپذیری از نور/هوا، دقت کمتر برای گازها، نیاز به کالیبراسیون، عدم بلوغ کافی این روش	شناسایی طوفان‌های گردوغبار، شناسایی منابع آلودگی دیداری (خودرو و دودکش)



روش	مزایا	محدودیت‌ها	کاربردهای عملی در ایران
پهپادها	چابکی بالا، دسترسی به نقاط خطرناک، امکان نصب چند حسگر	محدودیت باتری، وابستگی به شرایط جوی	پایش مشعل‌سوزی، بررسی آلودگی صنایع غیرمجاز، پایش پسماندسوزی
هوش مصنوعی و یادگیری ماشین	مدل‌سازی روابط پیچیده، پردازش سریع، امکان کار با داده‌های ناقص	وابستگی به داده آموزشی، تفسیرپذیری کم، خطر بیش‌برازش	پیش‌بینی آلودگی، تشخیص الگوهای ترافیکی، پیش‌بینی طوفان گردوغبار
مدل‌سازی عددی	امکان تحلیل آینده، پوشش سب‌بعدی، ادغام داده‌های مختلف	نیاز به توان محاسباتی بالا، وابستگی به موجودی انتشار	پیش‌بینی آلودگی، مدل‌سازی گردوغبار ورودی به کشور، تحلیل سیاست‌های کنترل انتشار

مأخذ: همان.

بر اساس مباحث مطرح‌شده، پایش نوین کیفیت هوا دیگر متکی بر یک فناوری یا یک شبکه اندازه‌گیری نیست، بلکه از تعامل چندین لایه مکمل تشکیل می‌شود. شکل ۳ معماری مفهومی یک اکوسیستم پایش ترکیبی، هوشمند و عمل‌گرا را نشان می‌دهد که در آن داده‌های حاصل از منابع مختلف پس از تلفیق، کنترل کیفیت و تحلیل، به اطلاعات قابل استفاده برای مدیریت، هشدار، سیاست‌گذاری و ارزیابی عملکرد تبدیل می‌شوند.

شکل ۳. معماری مفهومی اکوسیستم پایش نوین کیفیت هوا و تبدیل داده‌های چندمنبعی به تصمیم‌سازی، هشدار و سیاست‌گذاری



مأخذ: نگارندگان



۵. تجربیات موفق جهانی در پایش نوین محیطی آلودگی هوا

تحول نظام‌های پایش محیطی آلودگی هوا در جهان عمدتاً در پاسخ به ناکارآمدی شبکه‌های سنتی، مشخص نبودن سهم منابع مختلف در ایجاد غلظت‌های آلودگی محیطی، افزایش بار بیماری‌های منتسب به آلودگی هوا و ضرورت پاسخ‌گویی شفاف به افکار عمومی شکل گرفته است. تجربه کشورها نشان می‌دهد که پایش محیطی، زمانی می‌تواند به ابزار مؤثر سیاست‌گذاری تبدیل شود که قادر به نمایش دقیق توزیع مکانی آلودگی، تغییرات زمانی و میزان مواجهه واقعی جمعیت باشد [۵]. برای ایران، که با چالش‌هایی نظیر تمرکز آلودگی در کلان‌شهرها، گسترش گردوغبار و محدودیت منابع مالی و نهادی مواجه است، بررسی تجربیات جهانی نه به‌عنوان الگوهای قابل تقلید، بلکه به‌عنوان منبع درس آموخته‌های سیاستی و اجرایی اهمیت دارد [۳۶].

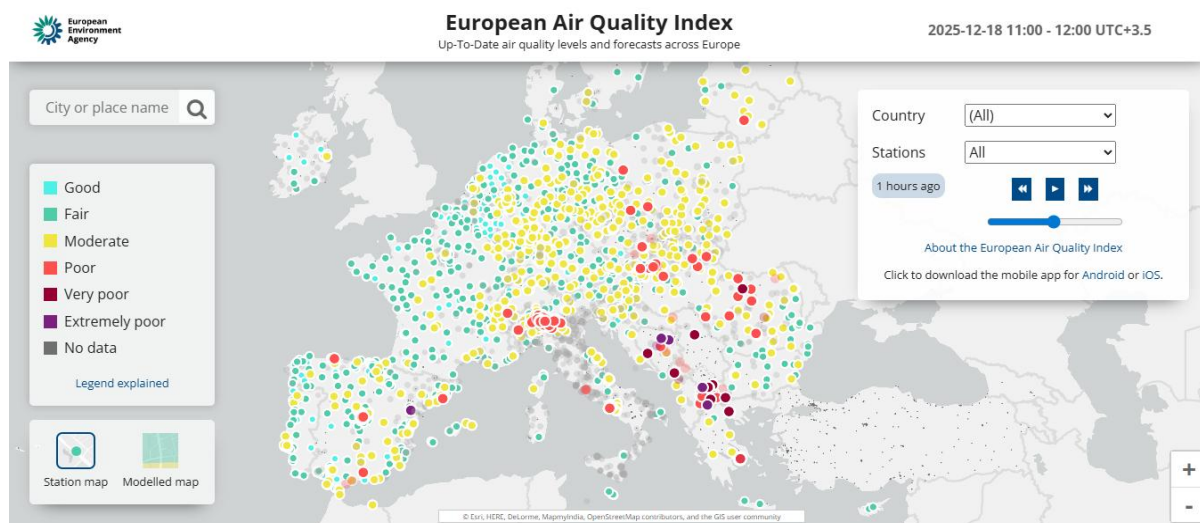
۵-۱. اتحادیه اروپا: حکمرانی یکپارچه مبتنی بر داده و استانداردسازی فراملی

اتحادیه اروپا با تدوین دستورالعمل کیفیت هوای پاک (EC/۵۰/۲۰۰۸) و ایجاد چارچوب نظارتی و استانداردسازی فراملی، یکی از پیشرفته‌ترین و منسجم‌ترین نظام‌های حکمرانی پایش کیفیت هوا را ایجاد کرده است. هسته فیزیکی این نظام، شبکه Eionet (شبکه اطلاعات و مشاهده محیط زیست اروپا) است که بیش از ۴۰۰۰ ایستگاه پایش مرجع در کشورهای عضو را به یکدیگر متصل می‌کند. داده‌های این شبکه به‌صورت کاملاً شفاف و بی‌درنگ از طریق پرتال «Air Quality e-Reporting» در دسترس عموم، پژوهشگران و نهادهای سیاستگذار قرار می‌گیرد [۳۷].

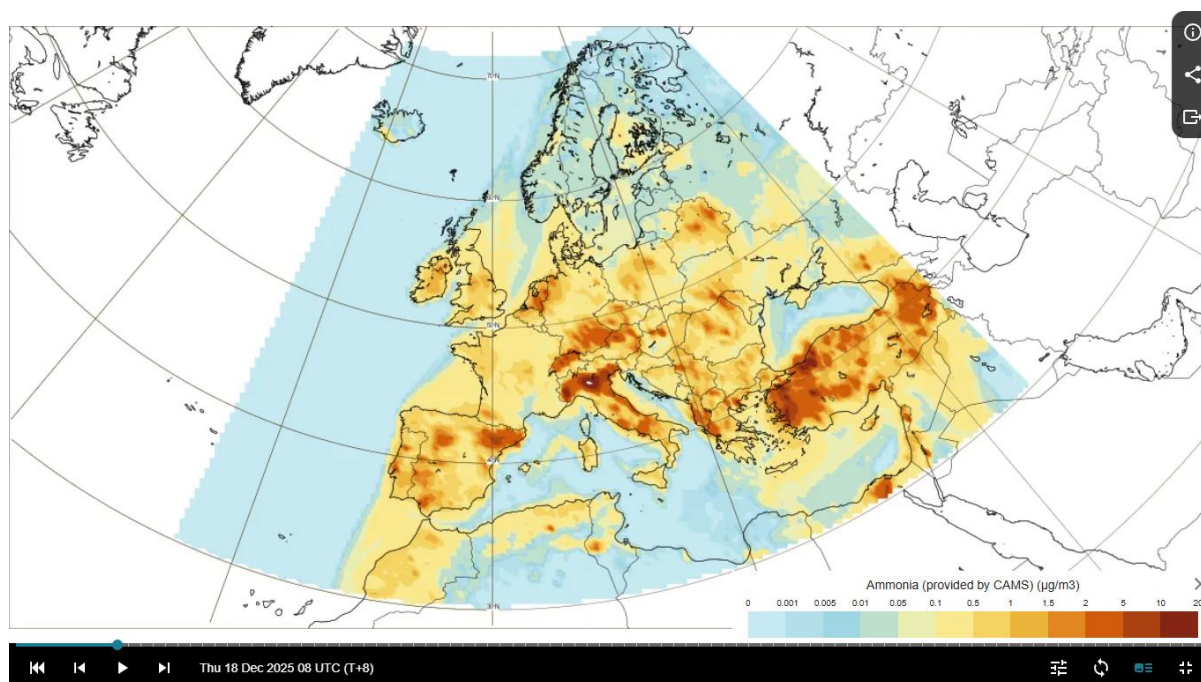
با این حال، سیاستگذاران اروپایی به‌خوبی دریافته‌اند که شبکه زمینی به‌تنهایی قادر به پاسخ‌گویی به نیازهای مدیریت کیفیت هوا در قرن ۲۱ نیست. از این‌رو، اتحادیه اروپا با سرمایه‌گذاری کلان در برنامه «کوپر نیکوس»، به‌ویژه سرویس پایش جوی کوپر نیکوس (CAMS)، داده‌های ماهواره‌ای را به‌عنوان مکمل رسمی و الزامی پایش محیطی معرفی کرده است. داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P که انتشار گازهایی مانند NO₂ و SO₂ را با وضوح مکانی حدود ۷×۷ کیلومتر رصد می‌کنند، برای پر کردن شکاف‌های پوشش ایستگاه‌های زمینی، ردیابی انتقال فرامرزی آلودگی و ارائه پیش‌بینی‌های باکیفیت در مقیاس قاره‌ای استفاده می‌شوند. این ادغام عمیق داده زمینی و فضایی، مبنای علمی قدرتمندی برای هشدارهای سلامت عمومی، ارزیابی اثربخشی سیاست‌ها (مانند محدودیت‌های انتشار صنایع) و مبارزه قضایی با تخلفات زیست‌محیطی فراهم آورده است [۳۸].

هم‌زمان، اتحادیه اروپا به‌خوبی دریافته است که ظهور حسگرهای کم‌هزینه نقش مهمی در توسعه پایش‌های محلی، تولید داده‌های پر شمار و ارتقای مشارکت شهروندان دارد. اما به علت کیفیت متغیر این حسگرها، پروژه‌هایی مانند EQUOL و FAIRMODE با هدف تدوین پروتکل‌های یکسان برای ارزیابی، کالیبراسیون و معتبرسازی داده‌های حسگرهای کم‌هزینه ایجاد شده‌اند. این استانداردسازی به شهرهای پیشرو، همچون آمستردام و هلسینکی، امکان داده که شبکه‌های حسگر کم‌هزینه را در کنار ایستگاه‌های مرجع کالیبره کرده و نقشه‌های آلودگی با وضوح بسیار بالا برای مدیریت هوشمند ترافیک، طراحی سیاست‌های شهری و تحلیل مواجهه ساکنان را تهیه کنند [۳۹]. افزون بر این، توسعه مدل‌های پیش‌بینی کیفیت هوا براساس یادگیری ماشین، تحلیل داده‌های بزرگ و مدل‌سازی شیمی-انتقال، از دیگر مسیرهای نوین اتحادیه اروپا برای ارتقای سامانه پایش است. این مدل‌ها به ایجاد سیستم‌های هشدار سریع، ارزیابی تأثیر سیاست‌های کاهش انتشار و تصمیم‌سازی مبتنی بر داده کمک می‌کنند [۲۹ و ۳۱ و ۳۹].

شکل ۴. نمونه نقشه پایش کیفیت هوای اتحادیه اروپا (وابسته به آژانس محیط زیست اروپا) [۴۰]



شکل ۵. سرویس پایش جوی کوپرنیکوس^۱ [۴۱]



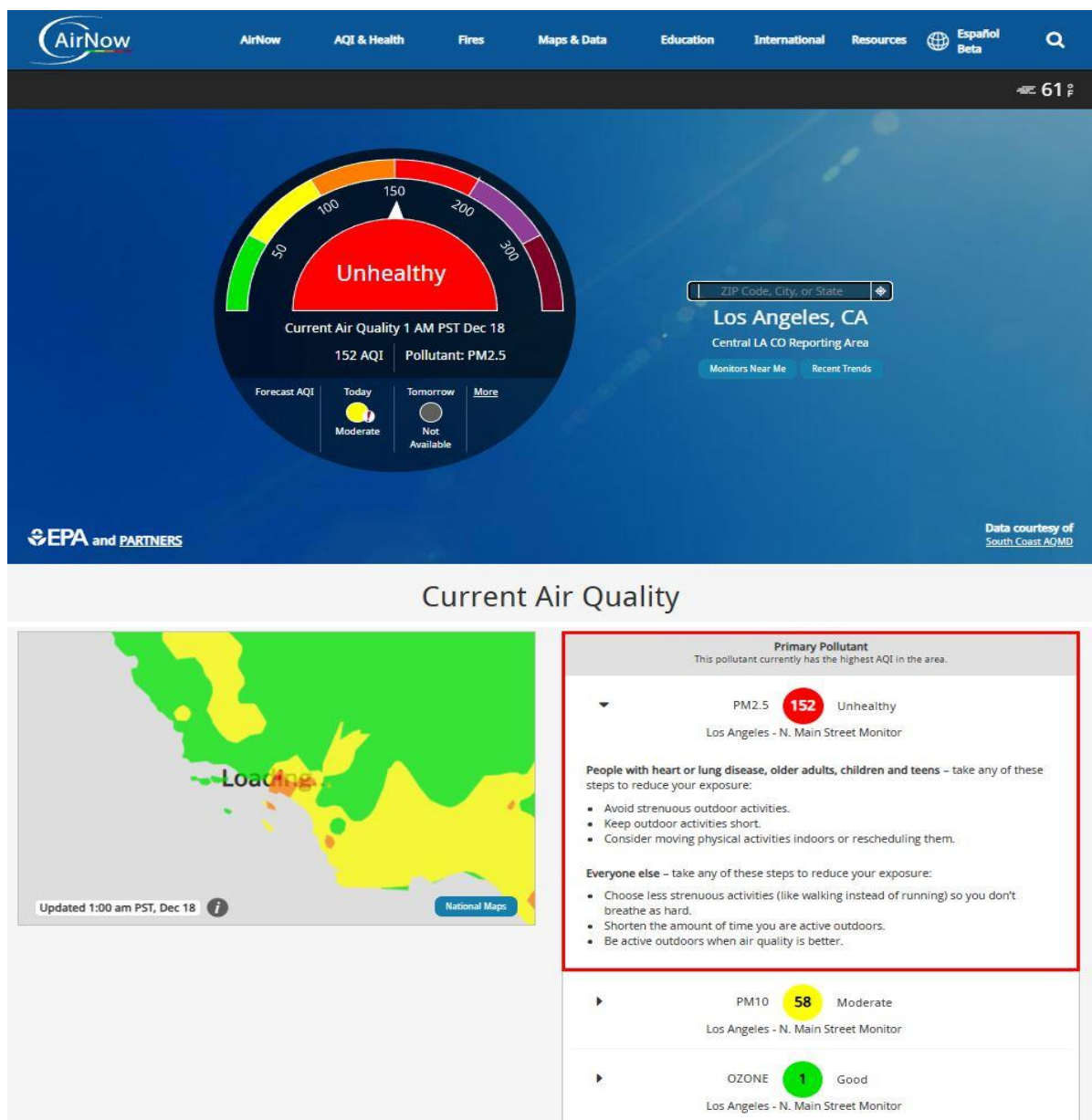
درس آموخته برای ایران: مهم‌ترین درس اتحادیه اروپا برای ایران، ایجاد یک سامانه ملی یکپارچه پایش کیفیت هواست که در آن داده‌های زمینی، ماهواره‌ای و حسگرهای کم‌هزینه با استانداردهای مشترک ادغام شده، به صورت شفاف منتشر می‌شوند و مبنای تصمیم‌گیری، پیش‌بینی و اعمال قوانین محیط زیستی قرار می‌گیرند.

1. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)

۲-۵. ایالات متحده: اکوسیستم داده‌باز، مشارکت شهروندی و نوآوری محله‌محور

ایالات متحده با شبکه گسترده‌ای شامل بیش از ۱۳۰۰۰ ایستگاه پایش مرجع تحت برنامه هوای پاک ملی^۱ و فلسفه «داده‌باز» قوی، نظام پایش شفاف و در دسترس را ایجاد کرده است. تمامی داده‌ها از طریق پلتفرم ملی «AirNow.gov» به صورت بی‌درنگ و با فرمت‌های استاندارد شده منتشر می‌شوند و بستری برای خلق صدها اپلیکیشن و سرویس ارزش افزوده توسط بخش خصوصی و جامعه مدنی فراهم کرده‌اند. نوآوری کلیدی EPA، موضع فعال و پیش‌دستانه آن در قبال فناوری‌های نو ظهور است.

شکل ۶. سیستم پایش هوای ایالات متحده [۴۲]

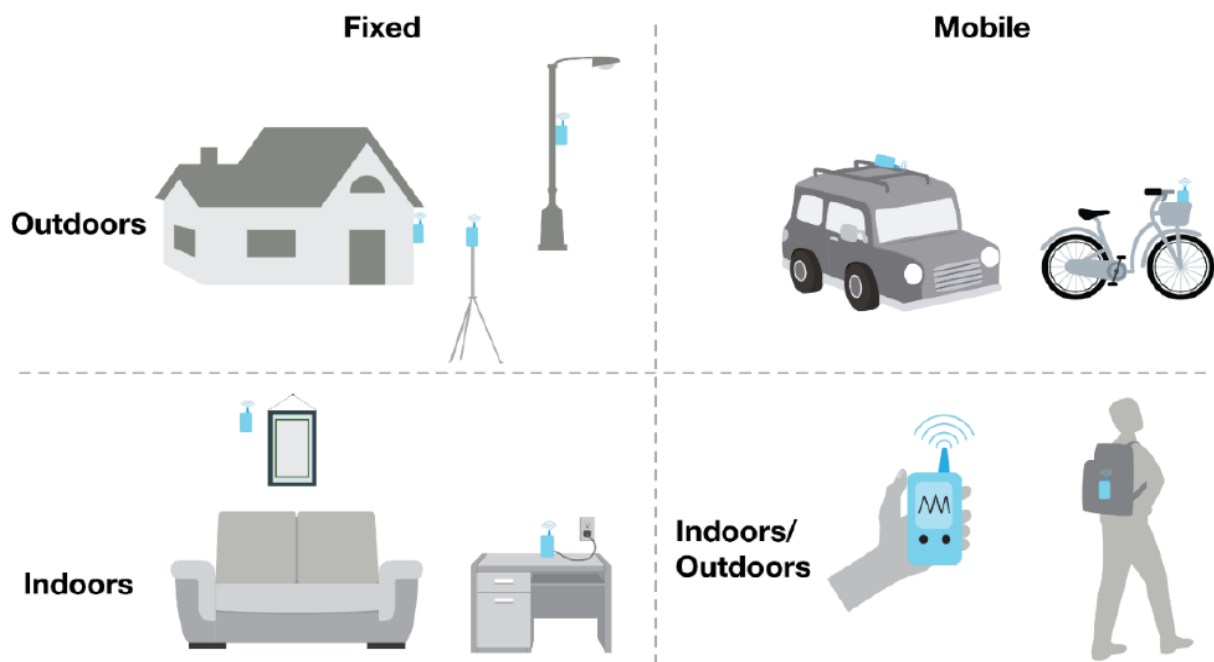


1. NAAQS

این آژانس با راه‌اندازی **جعبه ابزار حسگرهای هوا**،^۱ نه تنها به ارزیابی مستقل عملکرد تجهیزات کم‌هزینه می‌پردازد، بلکه راهنمای استفاده، محدودیت‌ها و روش‌های کالیبراسیون آنها را به‌طور شفاف منتشر می‌کند. این رویکرد، «مشارکت آگاهانه» شهرداری‌ها، دانشگاه‌ها و حتی شهروندان را در توسعه شبکه‌های مترکم پایش ممکن ساخته است [۴۳]. در سطح محلی، شهرهایی مانند لس‌آنجلس و نیویورک از پیشگامان به‌کارگیری این شبکه‌های حسگر محله‌محور هستند. در لس‌آنجلس، پروژه «سنس‌الای»^۲ با نصب هزاران حسگر، «نقاط داغ» آلودگی ناشی از ترافیک و صنایع را در مقیاس محلات کم‌درآمد شناسایی کرده و مستقیماً بر سیاست‌های عدالت محیطی و برنامه‌ریزی شهری تأثیر گذاشته است. در نیویورک، پروژه «پایش هوای جامعه‌محور»^۳ با نمونه‌برداری منظم از ۱۵۰ نقطه ثابت در سطح شهر، دقیق‌ترین نقشه‌های توزیع آلاینده‌ها (به‌ویژه $PM_{2.5}$ و NO_2) را تولید کرده و شکاف مواجهه سلامت بین محلات فقیر و ثروتمند را به‌وضوح آشکار ساخته است. این داده‌های ریزدانه، ابزاری قدرتمند را برای **تصمیم‌گیری محلی، اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌های زیرساختی و پاسخ‌گویی نهادها** فراهم می‌کند [۴۴ و ۴۵].

در کنار پایش زمینی، آمریکا به سرمایه‌گذاری گسترده‌ای در مدل‌سازی عددی و سامانه‌های تلفیق داده اقدام کرده است. مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت هوا مانند CMAQ، به همراه داده‌های ماهواره‌ها و شبکه‌های لیدار، امکان تحلیل منبع، پیش‌بینی کیفیت هوا و برآورد انتقال آلاینده‌ها را فراهم می‌کند [۴۶]. یکپارچگی میان پایش زمینی، سنجش از دور و مدل‌سازی، نقطه تمایز اصلی آمریکا با بسیاری از کشورهاست و نشان می‌دهد که کیفیت هوا تنها با افزایش تعداد ایستگاه‌ها مدیریت نمی‌شود، بلکه تلفیق داده‌ها نقش اساسی دارد.

شکل ۷. نوآوری در ارزیابی حسگرهای کم‌هزینه توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا - نمونه‌هایی از نحوه استقرار حسگرهای هوا توسط کاربران [۴۳]



1. Air Sensor Toolbox
2. SCAQMD's Sensor Network
3. NYCCAS

درس آموخته کلیدی آمریکا برای ایران: باید از نگاه «تجهیزات محور» فاصله گرفت و به سمت یک سیستم یکپارچه، قانون محور، چندلایه، مبتنی بر داده‌باز و پشتیبانی شده با مدل سازی پیشرفته حرکت کرد؛ سیستمی که در آن فناوری‌های نو به صورت استاندارد و کنترل شده ادغام می‌شوند و داده‌ها به موتور تصمیم‌سازی و اعتمادسازی عمومی تبدیل می‌شوند.

۳-۵. چین: پایش گسترده، نظارت سختگیرانه و کنترل دیجیتال در مقیاس ملی

تجربه چین در تحول نظام پایش خود، نمونه‌ای بارز از مقیاس عملیاتی، سرعت اجرا و ادغام عمیق فناوری دیجیتال در حکمرانی محیط زیست است. این کشور در پاسخ به بحران آلودگی اوایل قرن ۲۱، یک شبکه پایش ملی با بیش از ۵۰۰۰ ایستگاه دولتی ایجاد کرد که داده‌های آن به صورت ساعتی و با شفافیت نسبی بالا منتشر می‌شود. اما وجه تمایز چین، سیستم نظارت و کنترل یکپارچه صنایع است. هزاران صنعت بزرگ و متوسط مجهز به دستگاه‌های پایش بر خط (CEMS) شده‌اند که داده‌های انتشار آنها مستقیماً و بدون امکان دستکاری، به مراکز نظارت زیست‌محیطی استانی و ملی ارسال می‌شود. این داده‌ها با استفاده از هوش مصنوعی و تحلیل کلان داده، برای شناسایی خودکار تخلفات (مانند غیر فعال کردن دستگاه یا دستکاری داده)، اعمال جریمه‌های آنی و رتبه‌بندی عملکرد زیست‌محیطی صنایع استفاده می‌شوند.

علاوه بر این، چین به طور فزاینده‌ای از داده‌های ماهواره‌ای بومی (مانند ماهواره‌های سری GaoFen) و شبکه‌های پهبادی برای نظارت بر منابع غیر متمرکز آلودگی (مانند آتش سوزی مزارع، گردوغبار و آلاینده‌های کشتی‌ها) استفاده می‌کند. این رویکرد «نظارت همه جانبه و پاسخ سریع» اگرچه نقدهایی در مورد حریم خصوصی و تمرکزگرایی به همراه دارد، اما به وضوح در کاهش سریع غلظت آلاینده‌های کلیدی در کلان شهرهایی مانند پکن در دهه گذشته مؤثر بوده و نشان می‌دهد که چگونه پایش دقیق و سختگیرانه می‌تواند به ابزاری کارآمد برای اجرای سیاست‌های کلان کاهش آلودگی تبدیل شود [۴۷]. چین به طور گسترده از داده‌های ماهواره‌ای برای پوشش خلأهای مکانی پایش استفاده کرده است. داده‌های MODIS، MISR و TROPOMI امکان برآورد توزیع مکانی $PM_{2.5}$ ردیابی گردوغبار و تحلیل روندهای بلندمدت را فراهم کرده‌اند [۴۸]. مطالعات نشان می‌دهد که تلفیق داده‌های زمینی و ماهواره‌ای در چین موجب کاهش عدم قطعیت و ارتقای قابلیت اتکای تحلیل‌های سیاستی شده؛ رویکردی که برای ایران نیز قابل توجه است [۵].

در کنار این اقدام‌ها، استفاده از حسگرهای کم هزینه مبتنی بر اینترنت اشیا تحول دیگری در پوشش مکانی و زمانی داده‌ها ایجاد کرد. این حسگرها با اتصال به سامانه‌های ابری، داده‌ها را با دقت بالا و در مقیاس خرد جمع‌آوری می‌کنند و در ترکیب با روش‌های یادگیری ماشین، منابع انتشار ترافیکی و صنعتی شناسایی می‌شوند [۲۳]. در سطح شهری نیز انتشار عمومی داده‌های کیفیت هوا به صورت لحظه‌ای از طریق اپلیکیشن‌ها و وب‌پرتال‌ها، موجب افزایش آگاهی و مشارکت اجتماعی در کاهش رفتارهای آلاینده شد [۴۷ و ۴۹]. به موازات آن، بهره‌گیری از مدل‌های عددی مانند CMAQ-China امکان پیش‌بینی دقیق تغییرات کیفیت هوا در افق چندروزه را فراهم کرده است. حتی در سال‌های اخیر، کاربرد هوش مصنوعی در مدل‌سازی پیش‌بینی و مدیریت پیش‌دستانه آلودگی به دولت چین اجازه داده تا در برخی مناطق، پیش از وقوع بحران، فعالیت‌های صنعتی یا تردهای سنگین را محدود کند. افزون بر این، تلفیق داده‌های آلودگی با داده‌های سلامت و اطلاعات بیمارستانی، پایه‌گذار سامانه‌های ارزیابی ریسک و هشدار به گروه‌های آسیب‌پذیر شد و به کاهش آثار بهداشتی ناشی از آلودگی کمک کرد [۵۰].

یکی دیگر از ویژگی‌های قابل توجه تجربه چین، حرکت از پایش صرف به سمت «اجرای هوشمند مقررات» است. در این رویکرد، داده‌های پایش فقط برای تهیه گزارش‌های دوره‌ای استفاده نمی‌شوند، بلکه مستقیماً به سامانه‌های نظارتی، صدور اخطار، ارزیابی عملکرد صنایع و تصمیمات مدیریتی متصل هستند. این تجربه نشان می‌دهد که اثربخشی سرمایه‌گذاری در پایش، بیش از آنکه به تعداد تجهیزات وابسته باشد، به میزان اتصال داده‌ها به چرخه تصمیم‌گیری و اعمال قانون بستگی دارد.

درس آموخته چین برای ایران: موفقیت در پایش و کنترل آلودگی هوا از ترکیب ۳ عامل بنیادی حاصل شده است: نخست، ایجاد زیرساخت گسترده و استانداردهای ملی پایش؛ دوم، ادغام فناوری‌های نوین مانند حسگرهای هوشمند، ماهواره‌ها و سیستم‌های هوش مصنوعی؛ و



سوم، استفاده عملیاتی از داده‌ها در حکمرانی محیط زیست، اعمال قانون و ارتقای مشارکت عمومی. این ترکیب موجب شد غلظت آلاینده‌های کلیدی در کلان‌شهرهایی مانند پکن در کمتر از یک دهه به‌طور محسوسی کاهش یابد و الگویی عملی برای کشورهای با شرایط مشابه پدید آید.

۴-۵. هند: شبکه‌سازی نوین برای مواجهه با بحران ملموس

هند به‌عنوان کشوری که کلان‌شهرهایی مانند دهلی‌نو به‌طور مزمن در زمره آلوده‌ترین شهرهای جهان قرار دارند، با بحرانی ملموس و فوری در حوزه آلودگی هوا روبه‌رو است. شاخص کیفیت هوا در فصول سرد سال به‌طور مکرر به سطوح «خطرناک» (بالای ۴۰۰ و حتی ۵۰۰) می‌رسد که عملاً وضعیت اضطرار سلامت عمومی را اعلام می‌کند. این بحران آشکار، هند را وادار به تحولی سریع در نظام پایش خود کرده است. دولت مرکزی و دولت‌های ایالتی، ضمن توسعه شبکه ایستگاه‌های مرجع خود، به‌شدت بر سرمایه‌گذاری در شبکه‌های گسترده حسگرهای کم‌هزینه متکی شده‌اند. پروژه‌هایی مانند «NCAP» (برنامه عملی ملی برای آب و هوا و کیفیت هوا) با نصب هزاران حسگر در شهرهای بزرگ، امکان ردیابی «نقاط داغ» آلودگی را در مقیاس محلات فراهم کرده‌اند [۵۱].

هند با استفاده از داده‌های ماهواره‌های MODIS و Sentinel-5P و ترکیب آنها با داده‌های شبکه‌های حسگر زمینی، نقشه‌های پیوسته‌ای از توزیع آلاینده‌های کلیدی تولید کرده است. هند همچنین از سامانه‌های هوشمند بهره گرفته است تا پیش‌بینی کوتاه‌مدت اپیزودهای آلودگی شدید را با استفاده از مدل‌های عددی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین ممکن کند. داده‌های این سامانه مستقیماً در سیاست‌های واکنشی کوتاه‌مدت مانند محدودیت‌های ترافیکی، تعطیلی فعالیت‌های صنعتی و هشدارهای سلامت عمومی کاربرد دارند [۵۲]. نوآوری دیگر هند، اتحاد استراتژیک با پلتفرم‌های بین‌المللی داده باز (مانند IQAir و OpenAQ) و انتشار داده‌های ملی در این پلتفرم‌هاست. این کار نه تنها شفافیت و دسترسی جهانی را افزایش داده، بلکه با مقایسه داده‌های داخلی و خارجی، بر فشار افکار عمومی و پاسخ‌گویی نهادهای مسئول افزوده است. تجربه هند نشان می‌دهد که وجود یک بحران مشهود می‌تواند محرک قوی برای پذیرش فناوری‌های نوین و رویکردهای مشارکت‌محور باشد، حتی در بستری با چالش‌های نهادی پیچیده.

درس آموخته هند برای ایران: در شرایطی که پهنه جغرافیایی وسیع، تنوع اقلیمی و محدودیت منابع مالی وجود دارد، اتکال صرف به ایستگاه‌های مرجع گران‌قیمت نمی‌تواند تصویری کامل و قابل اتکا از وضعیت آلودگی هوا ارائه دهد. ایجاد یک شبکه ترکیبی پایش کیفیت هوا (شامل ایستگاه‌های مرجع دقیق با حسگرهای کم‌هزینه و داده‌های سنجش از دور) پوشش مکانی پایش را گسترش می‌دهد، امکان شناسایی سریع نقاط داغ آلودگی را فراهم کرده و با هزینه کمتر، داده‌های پیوسته و قابل اعتماد تولید می‌کند. ترکیب این داده‌ها با مدل‌های تصحیح خطا و انتشار عمومی آنها، شفافیت را افزایش داده و زمینه تصمیم‌گیری سیاستی مبتنی بر داده و ارزیابی اثربخشی برنامه‌های کاهش آلودگی در ایران را تقویت می‌کند.

۵-۵. ترکیه: شفافیت داده به‌عنوان موتور محرک بهبود حکمرانی

تجربه ترکیه به‌ویژه برای ایران آموزنده است، زیرا این کشور از نظر ساختار جمعیتی (شهرنشینی شتابان)، تنوع منابع آلودگی (ترافیک، صنعت، زغال سنگ) و چارچوب نهادی متمرکز تشابهات قابل توجهی دارد. نقطه عطف تحول پایشی ترکیه، تصمیم استراتژیک برای انتشار عمومی و آنلاین داده‌های کیفیت هوا از طریق پرتال ملی «HAVAIZLEME» بود. این پلتفرم که توسط وزارت محیط زیست، شهرسازی و تغییر اقلیم اداره می‌شود، داده‌های ساعتی بیش از ۳۵۰ ایستگاه پایش را در سراسر کشور به نمایش می‌گذارد. شفافیت اجباری، یک «اثر حلقه باز خورد مثبت» ایجاد کرد: دسترسی آزاد به داده، رسانه‌ها و سازمان‌های مردم‌نهاد را توانمند ساخت تا عملکرد شهرداری‌ها و صنایع را زیر نظر بگیرند و خواستار اقدام شوند. این فشار اجتماعی، به نوبه خود، مقامات محلی را مجبور کرد تا سیاست‌های مدیریت ترافیک و صنعت مبتنی بر شواهد را جدی‌تر پیگیری کنند.

یکی دیگر از جنبه‌های مهم تحول، گرایش به فناوری‌های نوین مانند حسگرهای کم‌هزینه همراه با الگوریتم‌های تصحیح مبتنی بر یادگیری

ماشین است. ترکیه از نیمه دهه ۲۰۱۰، پروژه‌هایی را برای استقرار حسگرهای کم‌هزینه در کنار ایستگاه‌های مرجع آغاز کرد تا امکان افزایش چگالی شبکه بدون تحمیل هزینه‌های سنگین فراهم شود. ارزیابی‌ها نشان داد که استفاده ترکیبی از داده‌های ایستگاه‌های مرجع و حسگرهای کم‌هزینه، زمانی که با مدل‌های تصحیح مناسب همراه باشد، می‌تواند با دقت مطلوب برای مدیریت شهری و هشداردهی استفاده شود. ترکیه همچنین نشان داد که پوشش مکانی مناسب، حتی با تعداد متوسط ایستگاه‌ها، کلید مدیریت مؤثر است. با استقرار ایستگاه‌ها نه فقط در مراکز شهر، بلکه در مناطق صنعتی و ورودی‌های شهری، تصویری واقعی‌تر از مواجهه جمعیت و منابع آلودگی ترسیم شد. درس اصلی ترکیه این است که اولین و ضروری‌ترین گام در اصلاح نظام پایش، تعهد راسخ به شفافیت داده است. این تعهد، خود به عنوان موتوری برای بهبود تدریجی کیفیت داده، توسعه شبکه و نهایتاً کارآمدی سیاست‌ها عمل می‌کند، بدون اینکه لزوماً نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه کلانی در پیشرفته‌ترین فناوری‌ها را داشته باشد.

درس آموخته ترکیه برای ایران: مسیر ترکیه ثابت می‌کند که اراده سیاسی برای شفاف‌سازی و انتشار عمومی داده‌های موجود، حتی در ابتدایی‌ترین شکل، می‌تواند چرخه بهبود حکمرانی را به حرکت درآورد. برای ایران، راه‌اندازی یک پلتفرم ملی شفاف و واحد برای انتشار تمامی داده‌های موجود (از سازمان محیط زیست، وزارت بهداشت و شهرداری‌ها) به عنوان سنگ بنای اعتماد عمومی خواهد بود.

۵-۶. کره جنوبی: پیوستگی سنجش دقیق، تحلیل هوشمند و تصمیم‌سازی

کره جنوبی طی دو دهه گذشته یکی از موفق‌ترین کشورها در توسعه و به کارگیری سامانه‌های پایش نوین کیفیت هوا بوده است. این کشور با ترکیب زیرساخت‌های پیشرفته سنجش زمینی، مدل‌سازی، سنجش از دور و سامانه‌های هوشمند مدیریت داده توانست شبکه‌ای یکپارچه، واکنش‌پذیر و مبتنی بر دانش برای مدیریت آلودگی هوا ایجاد کند [۵۳]. یکی از آموخته‌های کلیدی، یکپارچه‌سازی داده‌های چندمنبعی است؛ به طوری که وزارت محیط زیست کره داده‌های ایستگاه‌های مرجع، حسگرهای کم‌هزینه، داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های شیمی-انتقال را در یک پلتفرم ملی یکپارچه می‌کند تا دقت تخمین آلاینده‌ها و قابلیت پیش‌بینی تقویت شود. یکی از مهم‌ترین دستاوردهای کره جنوبی در حوزه پایش نوین، سرمایه‌گذاری استراتژیک در سنجش از دور زمین‌آهنگ است. این کشور با پرتاب ماهواره GEMS در سال ۲۰۲۰، نخستین سامانه سنجش گازهای آلاینده شهری را از مدار زمین‌آهنگ عملیاتی کرد [۵۴]. داده‌های GEMS امکان رصد ساعتی آلاینده‌ها را فراهم کرده و نقش مهمی در فهم انتقال فرامرزی آلاینده‌ها، به‌ویژه جریان ذرات ریز از شرق چین به کره، داشته است [۵۴]. درس مهم دیگر، پایش ترکیبی با شبکه‌های حسگرهای کم‌هزینه است. کره جنوبی به جای اتکا به داده خام این حسگرها، رویکرد پیشرفته‌ای برای کالیبراسیون، اعتبارسنجی و اصلاح داده بر پایه مدل‌های یادگیری ماشین اتخاذ کرده که دقت استفاده از این حسگرها را به‌طور چشمگیری افزایش داده است. این تجربه نشان می‌دهد که اجرای موفق شبکه‌های حسگر کم‌هزینه نیازمند سرمایه‌گذاری در تحلیل داده و الگوریتم‌های تصحیح خطاست. در زمینه توسعه مدل‌های پیش‌بینی و هشدار سریع کیفیت هوا، این کشور با ترکیب مدل‌های شیمی-انتقال مانند CMAQ و CAMx با داده‌های ماهواره GEMS توانسته پیش‌بینی کوتاه‌مدت و میان‌مدت کیفیت هوا را با دقت بالا ارائه دهد. این پیش‌بینی‌ها مبنای تصمیم‌گیری‌های فوری نظیر هشدارهای عمومی، محدودیت‌های موقت صنعتی یا مدیریت حمل‌ونقل هستند. نکته مهم دیگر، شفافیت و اشتراک عمومی داده‌هاست. در این زمینه سامانه AirKorea داده‌های لحظه‌ای آلودگی هوا، نقشه‌های تعاملی و هشدارهای سلامت محور را در اختیار مردم قرار می‌دهد که این اقدام به افزایش آگاهی عمومی و تقویت اعتماد به سیاست‌های محیط زیستی منجر شده است [۵۵].

درس آموخته کره جنوبی برای ایران: تجربه کره جنوبی نشان می‌دهد که ارتقای پایش تنها با ایجاد سامانه ملی یکپارچه، کالیبراسیون سنسورهای کم‌هزینه، به کارگیری داده‌های ماهواره‌ای و توسعه مدل‌های هشدار سریع امکان‌پذیر است. این رویکرد می‌تواند پایه تصمیم‌سازی علمی و مدیریت مؤثر آلودگی در کشور باشد.



۷-۵. پیوند پایش محیطی، سلامت عمومی و سیاستگذاری: نمونه‌های عملیاتی از حکمرانی سلامت محور

در کشورهای پیشرو، داده‌های پایش محیطی مستقیماً به موتور تصمیم‌گیری نهادهای بهداشتی، ترافیکی و برنامه‌ریزی شهری متصل شده‌اند و حکمرانی مبتنی بر شواهد را ممکن ساخته‌اند.

■ **فرانسه؛ هشدار سلامت عملیاتی و محدودیت ترافیک پویا:** در شهرهای بزرگی مانند پاریس و لیون، یک سامانه سلسله‌مراتبی هشدار سلامت فعال است. هنگامی که پیش‌بینی‌های کیفیت هوا (که خود مبتنی بر پایش ترکیبی هستند) عبور از یک آستانه را نشان می‌دهند، شهرداری به‌طور خودکار محدودیت‌های ترافیکی (مانند ممنوعیت تردد خودروهای دارای پلاک زوج یا فرد) را اجرا کرده، محدودیت سرعت را کاهش می‌دهد و استفاده از حمل‌ونقل عمومی را رایگان می‌کند. این تصمیمات به‌طور مستقیم از داده پایش نشأت می‌گیرند [۵۶].

■ **سنگاپور؛ برنامه‌ریزی شهری پیشگیرانه با داده پایش:** سنگاپور از داده‌های بلندمدت پایش کیفیت هوا و مدل‌های پراکنش، برای طراحی و مکان‌یابی زیرساخت‌های حساس استفاده می‌کند. موقعیت مدارس جدید، بیمارستان‌ها و مناطق مسکونی پرتراکم با در نظر گرفتن الگوهای آلودگی و با فاصله گرفتن از بزرگراه‌ها و مناطق صنعتی برنامه‌ریزی می‌شوند. این نقشه‌های حساسیت آلودگی مستقیماً در اسناد برنامه‌ریزی شهری گنجانده می‌شوند [۵۷].

■ **کالیفرنیا (ایالات متحده)؛ قانونگذاری مبتنی بر داده و عدالت محیطی:** ایالت کالیفرنیا با استفاده از داده‌های پایش دقیق محله‌محور، قانون «AB 617» را تصویب کرد. این قانون، مناطق کم‌درآمدی را که به‌طور نامتناسبی تحت تأثیر آلودگی قرار داشتند، شناسایی و مستقیماً منابع آلاینده در آن مناطق را ملزم به کاهش فوری انتشار کرده است. این یک نمونه کلاسیک از تبدیل داده پایش به اقدام قانونی هدفمند برای کاهش نابرابری سلامت است [۵۸].

درس آموخته کلیدی برای ایران: پیوند مؤثر پایش و سیاستگذاری، نیازمند تعریف نهادهای رابط و پروتکل‌های عملیاتی مشخص است. برای مثال، سازمان محیط زیست باید به‌طور قانونی موظف شود تا داده‌های هشدار خود را به وزارت بهداشت (برای اعلام وضعیت به بیمارستان‌ها و مدارس) و به پلیس راهور و شهرداری (برای اجرای محدودیت‌های ترافیکی) ارسال کند. ایجاد این زنجیره اقدام خودکار، تأثیر واقعی پایش را آشکار می‌کند.

۸-۵. جمع‌بندی نهایی و درس آموخته‌ها برای ایران: فراتر از خرید سخت‌افزار

تجربه جهانی نشان می‌دهد که موفقیت در مدیریت کیفیت هوا بدون پایش محیطی معتبر، شفاف و چندلایه امکان‌پذیر نیست. تجربه چین به‌ویژه نشان می‌دهد که حتی در شرایط بحران شدید، سرمایه‌گذاری هدفمند در پایش محیطی می‌تواند مبنای اصلاح سیاست‌ها و کاهش آلودگی باشد [۵].

تجربیات فوق، چند اصل کلیدی را برای ایران بر جسته می‌کند.

(الف) **معماری یکپارچه به جای سامانه‌های جزیره‌ای:** موفقیت در گرو ایجاد یک «پلتفرم ملی داده کیفیت هوا» است که داده‌های ایستگاه‌های مرجع (محیط زیست، بهداشت، شهرداری‌ها)، حسگرهای کم‌هزینه، ماهواره و صنایع (CEMS) را در یک قالب استاندارد ادغام کند.

(ب) **شفافیت به عنوان پایه اعتماد:** انتشار عمومی و کاربرپسند داده‌های خام و پردازش شده، نه تنها حق آگاهی مردم را تأمین می‌کند، بلکه موجب مشارکت جامعه علمی و بخش خصوصی در تحلیل و ارائه راه‌حل می‌شود.

(ج) **راهبرد ترکیبی (هیبرید):** باید از دوقطبی «ایستگاه گران‌قیمت در مقابل حسگر ارزان‌قیمت» پرهیز کرد. شبکه آینده باید از ایستگاه‌های مرجع کم‌تعداد اما با دقت بسیار بالا (به عنوان معیار کالیبراسیون) و شبکه‌های انبوه حسگرهای کم‌هزینه کالیبره شده (برای پوشش مکانی) به‌طور همزمان بهره‌برد.

(د) **پایش منبع محور مکمل پایش محیطی:** بدون نظارت دقیق، شفاف و مستمر بر منابع اصلی (صنایع، نیروگاه‌ها، خودروها)، داده‌های

محیطی صرفاً وضعیت را توصیف می‌کنند؛ بدون اینکه ابزاری برای کنترل آن ارائه دهند. نظام CEMS نیاز به اصلاحات جدی در راستای شفافیت و اعتبار داده دارد.

ه) **ظرفیت‌سازی نهادی و قانونی:** تحول فناورانه بدون تقویت نهادهای نظارتی، تدوین استانداردهای ملی برای فناوری‌های نوین (به‌عنوان مثال برای LCS) و ایجاد چارچوب‌های حقوقی برای استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در اثبات جرائم زیست‌محیطی محقق نخواهد شد.

و) **پذیرش فناوری‌های تحلیلی و هوشمند در مسیر بلوغ پایش:** تجربیات جهانی نشان می‌دهد که تکامل نظام پایش از سنجش غلظت به تشخیص منشأ و از اندازه‌گیری فیزیکی به استنتاج هوشمند در حال حرکت است. فناوری‌هایی مانند آنالایزهای برخط ترکیب شیمیایی ذرات و سامانه‌های پایش مبتنی بر بینایی ماشین، اگرچه در مراحل ابتدایی به کارگیری هستند، اما افق جدیدی از پایش تشخیصی-عامل محور و پوشش مکانی فوق‌متراکم با هزینه نسبتاً پایین را نمایان می‌کنند. درس‌آموخته ایران این است که در طراحی نقشه راه تحول پایش، باید ظرفیت‌سازی پژوهشی و آزمایشی برای این گونه فناوری‌های نسل بعد نیز دیده شود. این امر می‌تواند از طریق حمایت از پروژه‌های پایلوت مشترک بین دانشگاه‌های فنی، شرکت‌های دانش‌بنیان و شهرداری‌ها محقق شود. هدف، نه خرید فوری، بلکه کسب توانمندی و شناخت کاربرد عملیاتی این ابزارها در بستری ایرانی است تا در زمان مناسب، گزینه‌های مؤثرتری برای ادغام در شبکه ملی پایش ترکیبی فراهم باشد.

ز) **گذار از پایش به حکمرانی داده‌محور:** بررسی تجربه کشورهای مختلف نشان می‌دهد که تفاوت اصلی نظام‌های موفق پایش محیطی با سایر کشورها، صرفاً در برخورداری از تجهیزات پیشرفته نیست، بلکه در تبدیل داده به دانش، دانش به تصمیم و تصمیم به اقدام اجرایی است. در این کشورها، داده‌های پایش به‌صورت مستمر در چرخه سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی شهری، ارزیابی عملکرد دستگاه‌ها، اطلاع‌رسانی عمومی و نظام‌های هشدار سلامت مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این منظر، توسعه شبکه پایش باید همزمان با توسعه زیرساخت‌های تحلیل داده، مدل‌سازی، انتشار عمومی اطلاعات و سازوکارهای تصمیم‌سازی انجام شود؛ در غیر این صورت، افزایش حجم داده‌ها به‌تنهایی منجر به بهبود مدیریت کیفیت هوا نخواهد شد.

۶. جمع‌بندی و ارائه پیشنهاد‌های سیاستی

پایش کیفیت هوا در سطح جهانی طی دو دهه اخیر دچار تحول قابل توجهی شده است. تاد دهه ۲۰۰۰ میلادی، در اغلب کشورها پایش کیفیت هوا عمدتاً متکی بر ایستگاه‌های مرجع ثابت با دقت بالا اما تعداد محدود بود. اگرچه این ایستگاه‌ها داده‌هایی بسیار دقیق تولید می‌کردند، اما هزینه بالای ایجاد، نگهداشت و کالیبراسیون آنها موجب می‌شد حتی در کشورهای توسعه‌یافته نیز پوشش مکانی شبکه‌های پایش برای نمایش ناهمگنی آلودگی در مقیاس شهری کافی نباشد. از دهه ۲۰۱۰ به بعد، با پیشرفت فناوری‌های سنجش، داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های داده‌محور، رویکردی جدید با عنوان «پایش محیطی ترکیبی» شکل گرفت. این رویکرد بر استفاده همزمان از منابع مختلف داده شامل ایستگاه‌های مرجع، حسگرهای کم‌هزینه، سنجش از دور ماهواره‌ای و مدل‌سازی عددی استوار است و امکان افزایش پوشش مکانی پایش، کاهش هزینه‌ها و ارتقای کارآمدی تصمیم‌سازی را فراهم می‌کند.

بررسی تطبیقی تجربیات کشورهای پیشرو نشان می‌دهد که پایش کیفیت هوا در حال حرکت به سوی ایجاد اکوسیستم‌های داده‌محور و چندلایه است. در این الگو، پایش دیگر به چند ایستگاه ثابت گران‌قیمت محدود نیست، بلکه مبتنی بر ترکیب هوشمندانه داده‌های متنوع و تحلیل پیشرفته آنهاست. داده‌های دقیق ایستگاه‌های مرجع به‌عنوان مبنای کالیبراسیون و اعتبارسنجی استفاده می‌شوند، در حالی که شبکه‌های گسترده حسگرهای کم‌هزینه و داده‌های ماهواره‌ای پوشش مکانی وسیعی فراهم کرده که امکان مشاهده الگوهای آلودگی در مقیاس خیابان و محله را فراهم می‌کند. مدل‌سازی عددی و ابزارهای هوش مصنوعی نیز نقش مهمی در ادغام، تحلیل و تفسیر این داده‌ها ایفا می‌کنند. در چنین چارچوبی، پایش محیطی دیگر صرفاً یک فعالیت فنی یا آزمایشگاهی نیست، بلکه به نوعی «سیستم عصبی مرکزی

حکمرانی هوشمند کیفیت هوا» تبدیل شده است. تجربه‌های موفق جهانی نظیر شبکه یکپارچه اتحادیه اروپا یا شبکه‌های محله‌محور در ایالات متحده نشان می‌دهد که پایش مؤثر سه ویژگی کلیدی دارد: ترکیب‌پذیری داده‌ها از منابع مختلف، عمل‌گرایی در اتصال مستقیم داده‌ها به سازوکارهای تصمیم‌گیری و اجرا، و عدالت‌محوری در تمرکز بر جمعیت‌ها و مناطق در معرض بیشترین خطر آلودگی. در ایران، با وجود توسعه نسبی شبکه ایستگاه‌های ثابت در بسیاری از شهرها، ساختار فعلی پایش همچنان با چالش‌هایی اساسی مواجه است. مهم‌ترین این چالش‌ها شامل وضوح مکانی محدود برای نمایش ناهمگنی آلودگی در سطح شهر، ناتوانی در رصد منابع پراکنده آلودگی و همچنین ضعف در پیوند عملیاتی داده‌های پایش با فرایندهای تصمیم‌گیری و کنترل آلودگی است. علاوه بر این، پراکندگی نهادی، ناهمگنی استانداردهای فنی و ضعف در نظام تضمین کیفیت داده‌ها موجب شده تا ظرفیت واقعی شبکه موجود به‌طور کامل استفاده نشود.

گذار ایران به نظام پایش محیطی نوین مستلزم حرکت از شبکه‌ای متکی بر ایستگاه‌های ثابت به سمت یک اکوسیستم ترکیبی و یکپارچه پایش است. در چنین اکوسیستمی، ایستگاه‌های مرجع ارتقایافته نقش ستون دقت و معیار سنجش را ایفا می‌کنند، در حالی که شبکه‌های متراکم حسگرهای کم‌هزینه پوشش مکانی گسترده و امکان رصد عدالت محیطی را فراهم می‌آورند. داده‌های ماهواره‌ای نیز دید کلان منطقه‌ای را تکمیل کرده و مدل‌های پیش‌بینی گر و ابزارهای هوش مصنوعی امکان ادغام، صحت‌سنجی و استخراج بینش از داده‌های متنوع را فراهم می‌کنند. در لایه‌های پیشرفته‌تر این اکوسیستم، استفاده از فناوری‌های تشخیصی پیشرفته مانند آنالایزهای برخط ترکیب شیمیایی ذرات برای منشأیابی دقیق می‌تواند نقش مهمی در تحلیل دقیق منابع آلودگی ایفا کند. چنین تجهیزاتی در بسیاری از کشورها در قالب «سوپرایستگاه‌ها» یا ایستگاه‌های پیشرفته پایش در مناطق بحرانی مستقر می‌شوند و داده‌های آنها برای هشدار سریع، بهبود مدل‌های منشأیابی و ارزیابی اثربخشی سیاست‌های کنترل آلودگی استفاده می‌شوند.

تحقق این تحول نیازمند تقویت دو پایه کلیدی در نظام حکمرانی پایش است. نخست، پایه عملیاتی-نهادی که در آن خروجی سامانه پایش به‌طور مستقیم با سازوکارهای اجرایی و نظارتی پیوند می‌خورد؛ از سامانه‌های هشدار سریع برای شناسایی رویدادهایی مانند سوزاندن پسماند گرفته تا پایش الزام‌آور پیرامون صنایع و استفاده از گزارش‌های مردمی در شناسایی منابع آلودگی. دوم، پایه حکمرانی داده که بر تضمین کیفیت، استانداردسازی، شفافیت و دسترسی باز به داده‌های محیطی تأکید دارد و زمینه‌ساز اعتماد عمومی، مشارکت اجتماعی و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد است.

در ادامه راهکارهایی برای ارتقای شبکه پایش با تأکید بر بهره‌گیری از پایش‌های نوین ارائه شده است.

الف) بازنگری و بازطراحی علمی شبکه موجود ایستگاه‌های پایش: نخستین گام برای هر گونه اصلاح در نظام پایش، ارزیابی و بازنگری کامل شبکه موجود است. متأسفانه، شواهد میدانی و نظرات کارشناسی حاکی از آن است که جانمایی برخی از ایستگاه‌ها منطبق بر اصول علمی و استانداردهای روز نیست، طبقه‌بندی صحیحی از نوع کاربری ایستگاه‌ها (شهری، ترافیکی، صنعتی) وجود ندارد و برخی ایستگاه‌ها پس از یک دهه همچنان بدون بازبینی در بافت شهری تغییر یافته، به فعالیت خود ادامه می‌دهند. این بازنگری باید شامل ارزیابی جانمایی براساس توزیع جمعیت و کاربری اراضی، تعیین تکلیف ایستگاه‌های فاقد داده معتبر، شناسایی شکاف‌های مکانی (به‌ویژه در مناطق حاشیه‌نشین و مجاور صنایع) و به‌روزرسانی استانداردهای ملی جانمایی براساس موفق‌ترین تجارب جهانی (مانند دستورالعمل‌های EPA و Eionet) باشد. ضروری است سازمان حفاظت محیط زیست با همکاری سازمان ملی استاندارد و دانشگاه‌های علوم پزشکی، این بازنگری را ظرف حداکثر یک سال به پایان رسانده و نقشه راه نوسازی و بهینه‌سازی شبکه را تدوین کند.

ب) ارتقای شبکه ملی یکپارچه کیفیت هوا با انتشار برخط داده‌ها و API عمومی: ارتقای شبکه ملی پایش سراسری که همه داده‌های پایش کشور متعلق به همه نهاد‌های مرتبط (اعم از سازمان حفاظت محیط زیست، شهرداری‌ها، وزارت بهداشت و ...) مشتمل بر ایستگاه‌های مرجع، حسگرهای کم‌هزینه و حتی ماهواره را در یک نقطه جمع‌آوری، پاکسازی، استانداردسازی و به‌صورت برخط منتشر کند، توسط سازمان حفاظت محیط زیست ضروری است. این شبکه با ارائه داشبوردهای عمومی، نقشه‌های لحظه‌ای، شاخص کیفیت هوا، و API باز برای پژوهشگران، شرکت‌های دانش‌بنیان و نهاد‌های نظارتی، عملاً قلب اطلاعاتی نظام مدیریت آلودگی هوا می‌شود. چنین سامانه‌ای هم

شفافیت و اعتماد عمومی را افزایش می‌دهد، هم امکان پایش منسجم و واکنش سریع دستگاه‌ها را فراهم کرده، و هم بستر توسعه نوآوری‌های مبتنی بر داده از مدل‌های پیش‌بینی تا ابزارهای نظارتی هوشمند را ایجاد می‌کند. در همین راستا و به استناد ماده (۲۰) آیین‌نامه فنی، تأکید می‌شود که تمامی دستگاه‌های اجرایی و شهرداری‌های دارای ایستگاه پایش، موظف به اتصال برخط داده‌های خود به این شبکه ملی هستند و راهبری، نظارت فنی و تضمین کیفیت داده‌ها (QA/QC) صرفاً توسط سازمان حفاظت محیط زیست به‌عنوان متولی واحد شبکه ملی انجام می‌شود. سایر نهادها (مانند وزارت بهداشت و سازمان هواشناسی) صرفاً به‌عنوان بهره‌بردار داده و کاربر نهایی در این شبکه ایفای نقش خواهند کرد. این رویکرد از پراکندگی، موازی کاری و تولید داده‌های ناهم‌هنگ جلوگیری می‌کند.

ج) تدوین دستورالعمل اجرایی استفاده از حسگرهای کم‌هزینه (طبقه‌بندی، کالیبراسیون، نحوه اتصال به شبکه رسمی): برای بهره‌مندی از فناوری حسگرهای کم‌هزینه در کشور، ایجاد یک چارچوب رسمی و قابل اعتماد برای به کارگیری گسترده این حسگرها در کنار ایستگاه‌های مرجع، بدون آنکه دقت شبکه ملی پایش قربانی شود، ضروری است. این چارچوب باید ۳ مؤلفه اصلی را پوشش دهد: طبقه‌بندی حسگرها براساس سطح کیفیت و کاربرد (مانند سنجش همگانی، پژوهشی یا نظارتی)، الزامات کالیبراسیون شامل نحوه آزمون، دوره‌های هم‌ترازی با ایستگاه‌های مرجع و معیارهای پذیرش داده، و قواعد اتصال به شبکه رسمی که تعیین می‌کند چه نوع حسگرهایی با چه استانداردی می‌توانند داده‌های خود را به پلتفرم ملی ارسال کنند. نتیجه چنین چارچوبی، ایجاد یک اکوسیستم سالم و قابل اعتماد برای توسعه شبکه‌های متراکم، حمایت از نوآوری شرکت‌های دانش‌بنیان و جلوگیری از انتشار داده‌های نادقیق یا گمراه‌کننده است. در این راستا ضروری است سازمان ملی استاندارد با استفاده از ظرفیت مواد (۱۸) و (۱۹) آیین‌نامه فنی در زمینه کنترل و کاهش آلودگی‌ها با همکاری سازمان حفاظت محیط زیست و معاونت علمی، فناوری و اقتصاد دانش‌بنیان ریاست جمهوری دستورالعمل‌های اجرایی لازم را تدوین کند.

د) اجرای پیلوت‌های محدود پایش ترکیبی در ۲ تا ۳ کلان‌شهر بحرانی: برای ایجاد الگوی جدید پایش که ترکیبی از ایستگاه‌های مرجع، شبکه‌های متراکم حسگرهای کم‌هزینه، داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های تحلیلی است، پیشنهاد می‌شود ابتدا در مقیاس آزمایشی در چند کلان‌شهر با آلودگی بالا اجرا شود. در این پیلوت‌ها، هدف آزمون عملی نحوه ادغام داده‌ها، ارزیابی کیفیت و قابلیت اتکای حسگرها، بهبود مدل‌های پیش‌بینی و بررسی کاربرد داده‌ها در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی است. اجرای چنین پروژه‌هایی امکان می‌دهد پیش از گسترش ملی، چالش‌های فنی، نهادی و مدیریتی شناسایی و برطرف شوند و در عین حال تجربه عملی برای طراحی معماری نهایی نظام پایش ترکیبی کشور شکل بگیرد.

ه) توسعه شبکه‌های متراکم حسگرهای کم‌هزینه برای افزایش وضوح مکانی و پایش عدالت محیطی: استقرار تعداد زیادی حسگر در مقیاس محلی اعم از محله‌ها، مجاورت مدارس، بیمارستان‌ها، مجاورت صنایع، مسیرهای پرتردد و نقاط فاقد ایستگاه مرجع برای افزایش وضوح مکانی داده‌های کیفیت هوا امری ضروری است. از این طریق می‌توان الگوهای آلودگی را نه در سطح شهر، بلکه در سطح خیابان و محله نیز رصد و مشاهده کرد. این شبکه‌های متراکم، در کنار کالیبراسیون منظم با ایستگاه‌های مرجع، امکان شناسایی نقاط داغ آلودگی، ثبت تفاوت‌های مکانی بین مناطق برخوردار و کم‌برخوردار، و پایش عدالت محیطی را فراهم کرده؛ اینکه کدام گروه‌ها و محله‌ها بار بیشتری از آلودگی را تحمل می‌کنند و کدام اقدام‌های مدیریتی می‌تواند شکاف را کاهش دهد.

و) بهره‌گیری ساختار یافته از داده‌های ماهواره‌ای و ادغام آنها در مدل‌های پیش‌بینی گر: وارد کردن منظم و نظام‌مند داده‌های سنجش از دور مانند اندازه‌گیری ستون آلاینده‌ها، آئروسول‌ها و پارامترهای هواشناسی، به چرخه پایش و پیش‌بینی کیفیت هوا، باید در دستور کار قرار بگیرد. این داده‌ها با پوشش گسترده و یکنواخت خود، شکاف‌های مکانی ناشی از کمبود ایستگاه‌ها را جبران می‌کنند و زمانی که با اندازه‌گیری‌های زمینی و شبکه حسگرهای کم‌هزینه ادغام شوند، تصویر کامل‌تری از وضعیت آلودگی و تغییرات زمانی آن ارائه می‌دهند. ادغام ماهواره با مدل‌های پیش‌بینی گر و شبیه‌سازی‌های جوی، دقت برآورد غلظت آلاینده‌ها، پیش‌بینی ورود طوفان‌های فرامرزی گردوغبار به کشور، تحلیل انتقال بین شهری و پیش‌آگاهی چندساعته تا چندروزه را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. نتیجه این رویکرد، یک نظام پایش و پیش‌بینی قابل اتکا است که هم برای مدیریت بحران و هم برای برنامه‌ریزی سیاستی کاربرد دارد. در این راستا ضروری است سازمان



هواشناسی کشور با همکاری سازمان حفاظت محیط زیست و وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات به استناد ماده (۲۴) آیین‌نامه فنی در زمینه کنترل و کاهش آلودگی‌ها (موضوع ماده (۲) [قانون هوای پاک](#)) نسبت به بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و تقویت الگوهای پیش‌بینی آلودگی هوا اهتمام ورزد.

ز) تقویت هسته تلفیق داده در سازمان حفاظت محیط زیست: سازمان حفاظت محیط زیست به‌عنوان متولی اصلی شبکه ملی پایش، موظف است با همکاری دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی، هسته تخصصی تلفیق داده‌ها را درون سازمان خود ایجاد یا تقویت کند. وظیفه این هسته، ادغام هوشمندانه داده‌های ایستگاه‌های مرجع، شبکه‌های حسگرهای کم‌هزینه و داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از مدل‌های فیزیکی-جوی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین است تا خروجی‌های تحلیلی (مانند نقشه‌های غلظت یکپارچه) مستقیماً در اختیار نهادهای نظارتی و تصمیم‌گیر قرار گیرد. این رویکرد از پراکندگی و موازی‌کاری در این حوزه جلوگیری می‌کند.

ح) توسعه مدل‌های پیش‌بینی گر هوش مصنوعی توسط سازمان هواشناسی کشور (براساس تکلیف ماده (۲۴) [آیین‌نامه فنی](#)): سازمان هواشناسی کشور موظف است با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی پیشرفته، نسبت به پیش‌بینی چندساعته تا چندروزه وضعیت آلودگی هوا (شامل غلظت آلاینده‌ها، وقوع طوفان‌های گردوغبار و رخداد‌های وارونگی دما) اقدام کند. این پیش‌بینی‌ها باید با استفاده از تلفیق داده‌های ایستگاه‌های زمینی، حسگرهای کم‌هزینه، داده‌های ماهواره‌ای و خروجی مدل‌های جوی تهیه و در اختیار سامانه هشدار سریع و نهادهای تصمیم‌گیر قرار گیرد.

ط) توسعه پژوهش و پیلوت فناوری‌های پیشرفته و هوشمند پایش هوا: حمایت ساختار یافته از برنامه‌های پژوهشی و پروژه‌های پیلوت مشترک میان دانشگاه‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان، پژوهشگاه‌ها و نهادهای شهری با هدف بومی‌سازی و آزمودن فناوری‌های نسل جدید پایش کیفیت هوا، باید مورد توجه قرار گیرد. از جمله مهم‌ترین این فناوری‌ها می‌توان به سامانه‌های آنالیز برخط ترکیب شیمیایی ذرات، ابزارهای منشأیابی پیشرفته و الگوریتم‌های پایش مبتنی بر بینایی ماشین و داده‌های تصویری اشاره کرد. ایجاد زیرساخت دانشی و فنی لازم برای ادغام تدریجی این فناوری‌ها در معماری ملی پایش از جمله ثمره‌های این اقدام در افق بلندمدت خواهد بود.

ی) توسعه و توانمندسازی نیروی انسانی تخصصی در نظام ملی پایش کیفیت هوا: توسعه و توانمندسازی نیروی انسانی تخصصی مستلزم ایجاد یک برنامه جامع آموزش و ارتقای مهارت است که کارکنان دستگاه‌های محیط زیستی، بهره‌برداران ایستگاه‌ها و متخصصان داده را برای کار با فناوری‌های نوین پایش آماده کند. این برنامه باید شامل دوره‌هایی در حوزه‌های کالیبراسیون و کنترل کیفیت، کار با حسگرهای کم‌هزینه، تفسیر داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌سازی و پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی، ترکیب داده‌های چندمنبعی و نگهداشت تجهیزات پیشرفته باشد. همچنین ایجاد گواهی‌نامه‌های تخصصی، دوره‌های مهارت‌افزایی برای نهادهای محلی، همکاری با دانشگاه‌ها و مراکز بین‌المللی و طراحی نظام ارتقای شغلی بر پایه شایستگی‌های فنی ضروری است. این رویکرد می‌تواند ظرفیت ملی برای بهره‌برداری از سامانه‌های پایش نسل جدید را تقویت کرده و گذار ایران به اکوسیستم پایش ترکیبی و حکمرانی داده‌محور در حوزه کیفیت هوا را تسهیل کند.

جدول ۴. پیشنهاد‌های سیاستی

ردیف	نوع توصیه		توصیه سیاستی	الزامات و قیود اجرایی	دستگاه متولی	دستگاه معین	زمان‌بندی اجرا (کوتاه‌مدت، میان‌مدت، بلندمدت)
	تداوم*	اصلاح**					
۱		**	بازنگری و بازطراحی شبکه موجود ایستگاه‌های پایش بر اساس اصول علمی و استانداردهای روز دنیا	- ارزیابی جانمایی ایستگاه‌ها بر اساس توزیع جمعیت، کاربری اراضی و الگوی منابع آلاینده - تعیین تکلیف ایستگاه‌های فاقد داده معتبر و دارای تجهیزات فرسوده - شناسایی شکاف‌های مکانی (به ویژه در مناطق حاشیه‌نشین و مجاور صنایع) - رعایت اصول فنی استقرار (فاصله از موانع، ساختمان‌ها، درختان و تقاطع‌ها)	سازمان حفاظت محیط زیست	سازمان ملی شهرداری‌های کلان‌شهرها، علوم پزشکی	کوتاه‌مدت (۶ تا ۱۲ ماه)
۲		**	ارتقای شبکه ملی یکپارچه کیفیت هوا با انتشار برخط داده‌ها و API عمومی	- ارائه داشبوردهای عمومی، نقشه‌های لحظه‌ای و شاخص کیفیت هوا - تعریف سازوکار تبادل داده بین نهادهای مربوطه - API باز برای پژوهشگران، شرکت‌های دانش‌بنیان و نهادهای نظارتی	سازمان حفاظت محیط زیست	وزارت کشور، وزارت بهداشت، وزارت راه و شهرسازی	کوتاه‌مدت
۳		**	تدوین دستورالعمل اجرایی استفاده از حسگرهای کم‌هزینه	- طبقه‌بندی حسگرها بر اساس سطح کیفیت و کاربرد - الزامات کالیبراسیون - قواعد اتصال به شبکه رسمی	سازمان ملی استاندارد	سازمان حفاظت محیط زیست، معاونت علمی، فناوری و اقتصاد دانش‌بنیان	کوتاه‌مدت
۴		**	اجرای پایلوت‌های محدود پایش ترکیبی در چند کلان‌شهر بحرانی	آزمون عملی نحوه ادغام داده‌ها، ارزیابی کیفیت و قابلیت اتکای حسگرها، بهبود مدل‌های پیش‌بینی و بررسی کاربرد داده‌ها در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی	شهرداری‌های کلان‌شهرهای منتخب (تهران، اصفهان، مشهد، اهواز و تبریز)	سازمان حفاظت محیط زیست	کوتاه‌مدت



ردیف	نوع توصیه		توصیه سیاستی	الزامات و قیود اجرایی	دستگاه متولی	دستگاه معین	زمان بندی اجرا (کوتاه مدت، میان مدت، بلند مدت)
	اصلاح**	تداوم*					
۵	**		توسعه شبکه‌های متر اکم حسگرهای کم‌هزینه کالیبراسیون منظم با ایستگاه‌های مرجع	اولویت‌بندی جغرافیایی با تمرکز بر مسیرهای پر تردد و حساس نظیر مدارس و بیمارستان‌ها و نقاط فاقد ایستگاه مرجع	وزارت کشور (شهرداری‌های کلان‌شهرها)، سازمان حفاظت محیط زیست	وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، وزارت آموزش و پرورش	میان مدت
۶	**		بهره‌گیری ساختاریافته از داده‌های ماهواره‌ای و ادغام آنها در مدل‌های پیش‌بینی‌گر	ادغام داده‌های ماهواره‌ای با مدل‌های پیش‌بینی‌گر و شبیه‌سازی‌های جوی	سازمان هواشناسی کشور	سازمان حفاظت محیط زیست، وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات	میان مدت
۷	**		ایجاد قطب علمی تلفیق داده‌ها برای ادغام داده ایستگاه‌ها، حسگرها و ماهواره	بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته مانند مدل‌های فیزیکی-جوی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تکنیک‌های تلفیق چندمنبعی	وزارت علوم، تحقیقات و فناوری	سازمان حفاظت محیط زیست	میان مدت
۸	**		توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌گر هوش مصنوعی برای پیش‌آگاهی آلودگی و سیاستگذاری واکنشی-پیشگیرانه	استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی پیشرفت	سازمان هواشناسی کشور	سازمان حفاظت محیط زیست، وزارت ارتباطات و فناوری معاونت علمی، فناوری و اقتصاد دانش‌بنیان ریاست جمهوری	میان مدت
۹	**		توسعه پژوهش و پایلوت فناوری‌های پیشرفته و هوشمند پایش هوا	بومی‌سازی و آزمودن فناوری‌های نسل جدید پایش کیفیت هوا	معاونت علمی، فناوری و اقتصاد دانش‌بنیان ریاست جمهوری	سازمان حفاظت محیط زیست، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری	میان مدت

زمان‌بندی اجرا (کوتاه مدت، میان مدت، بلندمدت)	دستگاه معین	دستگاه متولی	الزامات و قیود اجرایی	توصیه سیاستی	نوع توصیه		ردیف
					اصلاح**	تداوم*	
میان مدت	-	وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، سازمان حفاظت محیط زیست، وزارت کشور (شهرداری‌ها)	ایجاد گواهی‌نامه‌های تخصصی، دوره‌های مهارت‌افزایی برای نهادهای محلی، همکاری با دانشگاه‌ها و مراکز بین‌المللی و طراحی نظام ارتقای شغلی	توسعه و توانمندسازی نیروی انسانی تخصصی در نظام ملی پایش کیفیت هوا	**		۱۰

* تداوم یا تقویت آیت‌ها یا اقدام‌ها.

** اصلاح رویه‌ها یا ایجاد سازوکار.

مأخذ: همان.

منابع و مأخذ



- [۱] وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی؛ دانشگاه علوم پزشکی تهران، پژوهشکده محیط زیست؛ مرکز تحقیقات آلودگی هوا. ۱۴۰۴. کیفیت هوای آزاد در ایران و برآورد آثار بهداشتی-اقتصادی آن در سال ۱۴۰۳. تهران.
- [۲] سامانه پایش کیفیت هوای کشور؛

<https://aqms.doe.ir>.

- [3] European Environment Agency. 2022. Air quality monitoring in Europe. Copenhagen.
- [4] United States Environmental Protection Agency. 2020. Air sensor technology and applications. Washington, DC.
- [5] World Health Organization. 2021. WHO global air quality guidelines. Geneva.
- [۶] شرکت کنترل کیفیت هوا، گزارش سالیانه کیفیت هوا و صدای تهران در سال ۱۴۰۳، ۱/۱۴۰۳ (U) ۱۴۰۴/۰۶/۰۱، شهر یورماه ۱۴۰۴.
- [7] Remer, L. A., Kaufman, Y. J., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, D. A., Martins, J. V., ... & Holben, B. N. (2005). The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *Journal of the atmospheric sciences*, 62(4), 947-973.
- [8] Xiao, Q., Geng, G., Cheng, J., Liang, F., Li, R., Meng, X., ... & He, K. (2021). Evaluation of gap-filling approaches in satellite-based daily PM_{2.5} prediction models. *Atmospheric Environment*, 244, 117921.
- [9] Zhao, S., Yang, Y., Ma, L., Bai, Z., Feng, Y., Liu, Q., ... & Xiong, Y. (2026). A review of satellite remote sensing for pollution control and carbon reduction in China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 146, 105109.
- [10] Hoff, R. M., & Christopher, S. A. (2009). Remote sensing of particulate pollution from space: have we reached the promised land?. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(6), 645-675.
- [11] Brienza, S., Galli, A., Anastasi, G., & Bruschi, P. (2015). A low-cost sensing system for cooperative air quality mon-

itoring in urban areas. *Sensors*, 15(6), 12242-12259.

[12] Schneider, P., Castell, N., Vogt, M., Dauge, F. R., Lahoz, W. A., & Bartonova, A. (2017). Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information. *Environment international*, 106, 234-247.

[13] Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., ... & Williams, R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?. *Environment international*, 116, 286-299.

[14] Zheng, T., Bergin, M. H., Johnson, K. K., Tripathi, S. N., Shirodkar, S., Landis, M. S., ... & Carlson, D. E. (2018). Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(8), 4823-4846.

[15] Dong, J., Goodman, N., Carre, A., & Rajagopalan, P. (2025). Calibration and validation-based assessment of low-cost air quality sensors. *Science of The Total Environment*, 977, 179364.

[16] Reyes-Villegas, E., Panda, U., & Darbyshire, E. (2022). Real-time source apportionment of fine particulate matter using online instruments: A review. *Current Pollution Reports*, 8(2), 123-139.

[17] Dall'Osto, M., Beddows, D. C., Gietl, J. K., Olatunbosun, O. A., Yang, X., & Harrison, R. M. (2019). Characteristics of tyre dust in polluted air: Studies by single particle mass spectrometry (ATOFMS). *Atmospheric Environment*, 207, 148-159.

[18] Sun, Y., Xu, W., Zhang, Q., Jiang, Q., & Wang, W. (2021). Real-time monitoring of water-soluble ions in PM_{2.5} and its application in source apportionment during haze episodes. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(1), 200316.

[19] Wu, C., Huang, X. H. H., & Ng, W. M. (2020). Characterization of carbonaceous aerosols in Hong Kong: A review of observation-based studies. *Atmospheric Environment*, 223, 117198.

[20] Vafa, M. P. (2026). Image-Based Air Quality Estimation with Deep Learning: A Systematic Review.

[21] Liu, X., Li, C., & Zhang, Y. (2021). Computer vision for air pollution monitoring: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(6), 5055-5068.

[22] Apte, J. S., Messier, K. P., Gani, S., Brauer, M., Kirchstetter, T. W., Lunden, M. M., ... & Hamburg, S. P. (2020). High-resolution air pollution mapping with Google Street View cars: Exploiting big data. *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6999-7008.

[23] Li, Z., Chen, L., & Kwan, M. P. (2022). Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations using street-view imagery and deep learning: A review. *Environmental Pollution*, 292, 118377.

[24] Villa, T. F., Gonzalez, F., Miljevic, B., Ristovski, Z. D., & Morawska, L. (2016). An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future perspectives. *Sensors*, 16(7), 1072.

[25] Motlagh, N. H., Kortoçi, P., Su, X., Lovén, L., Hoel, H. K., Haugsvær, S. B., ... & Tarkoma, S. (2023). Unmanned aerial vehicles for air pollution monitoring: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(24), 21687-21704.

- [26] Motlagh, N. H., Kortoçi, P., Su, X., Lovén, L., Hoel, H. K., Haugsvær, S. B., ... & Tarkoma, S. (2023). Unmanned aerial vehicles for air pollution monitoring: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(24), 21687-21704.
- [27] Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Y., Alsharif, M. H., & Khan, M. A. (2023). Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intelligent service robotics*, 16(1), 109-137.
- [28] Masood, A., & Ahmad, K. (2021). A review on emerging artificial intelligence (AI) techniques for air pollution forecasting: Fundamentals, application and performance. *Journal of cleaner production*, 322, 129072.
- [29] Xu, X., Zhang, C., & Liang, Y. (2021). Review of satellite-driven statistical models PM_{2.5} concentration estimation with comprehensive information. *Atmospheric Environment*, 256, 118302.
- [30] Masih, A. (2019). Machine learning algorithms in air quality modeling. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 5(4), 1-20.
- [31] Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J., Carvalhais, N., & Prabhat, F. (2019). Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 566(7743), 195-204.
- [32] Baklanov, A., Schlünzen, K., Suppan, P., Baldasano, J., Brunner, D., Aksoyoglu, S., ... & Zhang, Y. (2014). Online coupled regional meteorology chemistry models in Europe: current status and prospects. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(1), 317-398.
- [33] Mensink, C., & Kallos, G. (Eds.). (2018). *Air pollution modeling and its application XXVI* (Vol. 499). Cham: Springer International Publishing.
- [34] Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.
- [35] Zhang, Y. (2008). Online-coupled meteorology and chemistry models: history, current status, and outlook. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(11), 2895-2932.
- [36] OECD. 2022. *Air quality management: Policy instruments and monitoring approaches*. Paris.
- [37] European Environment Agency (EEA). 2023. *Air quality monitoring in Europe: design and operation of monitoring networks*. EEA Report No 15/2023. Copenhagen, Denmark.
- [38] Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). 2022. *European air quality information in support of the EU Clean Air Policy*. ECMWF, Reading, UK.
- [39] European Commission. 2021. *Air quality monitoring and data quality objectives*. Brussels.
- [40] <https://airindex.eea.europa.eu/>.
- [41] <https://atmosphere.copernicus.eu/charts/packages>.
- [42] <https://www.airnow.gov/>.
- [43] <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-use-and-study-design>.
- [44] South Coast Air Quality Management District (SCAQMD). 2023. *AB 617 Community Air Monitoring: Lessons from the South Coast Air Basin*. Diamond Bar, CA, USA.
- [45] New York City Department of Health and Mental Hygiene. 2022. *New York City Community Air Survey (NYC-*



CAS): Key Findings 2022. New York, USA.

[46] Byun, Daewon, and Kenneth L. Schere. "Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system." *Applied mechanics reviews* 59.2 (2006): 51-77.

[47] Ministry of Ecology and Environment (MEE), China. 2023. China Ecological and Environmental Status Bulletin 2022. Beijing, China.

[48] European Space Agency. 2022. Earth observation for air quality monitoring. Paris.

[49] Chan, C. K., & Yao, X. (2008). Air pollution in mega cities in China. *Atmospheric environment*, 42(1), 1-42.

[50] Zheng, Y., Yi, X., Li, M., Li, R., Shan, Z., Chang, E., & Li, T. (2015, August). Forecasting fine-grained air quality based on big data. In *Proceedings of the 21th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining* (pp. 2267-2276).

[51] Ministry of Environment, Forest and Climate Change (MoEFCC), India. 2023. National Clean Air Programme (NCAP): Progress Report 2022-23. New Delhi, India.

[52] Guttikunda, S. K., Nishadh, K. A., & Jawahar, P. (2019). Air pollution knowledge assessments (APnA) for 20 Indian cities. *Urban Climate*, 27, 124-141.

[53] <https://www.mcee.go.kr/eng/web/main.do>.

[54] Kim, J., Jeong, U., Ahn, M. H., Kim, J. H., Park, R. J., Lee, H., ... & Choi, Y. (2020). New era of air quality monitoring from space: Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(1), E1-E22.

[55] <https://www.airkorea.or.kr/eng/>.

[56] <https://www.airparif.fr/>.

[57] <https://www.nea.gov.sg/>.

[58] <https://ww2.arb.ca.gov/>.

عنوان: روش‌های نوین پایش کیفیت هوای محیطی در ایران



DOI: <https://doi.org/10.22034/mrc.report.21825>

Permanent Link: <https://doi.org/10.22034/mrc.report.21825>

Publisher : Islamic Parliament Research Center of Iran

گزیده سیاستی

ارتقای پایش کیفیت هوای محیطی در ایران مستلزم گذار از شبکه‌های پراکنده و کم‌کیفیت به نظامی یکپارچه، شفاف و سلامت‌محور است که با ترکیب ایستگاه‌های مرجع، حسگرهای کم‌هزینه، داده‌های ماهواره‌ای و هوش مصنوعی، مبنای تصمیم‌گیری عادلانه قرار گیرد.



مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

تهران، خیابان پاسداران، روبروی پارک نیاوران (ضلع جنوبی، پلاک ۸۰۲)

تلفن: ۷۵۱۸۳۰۰۰ صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۵۸۵۵ پست الکترونیک: mrc@majles.ir

وبسایت: rc.majles.ir