

Assessment of Air Pollution Control Strategies in the London Metropolitan Area and Their Potential for Local Adaptation to Mashhad

Saeedeh Fouladi

MSc in Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran.

Nayera Naimi

Student Research Committee, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran.

Maryam Sarkhosh

*Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran. **(Corresponding**

Author) SarkhoshM@mums.ac.ir

Abstract

Background and Objective: Urban air pollution is currently recognized as one of the most important environmental and public health challenges worldwide and is responsible for millions of premature deaths annually. Following the historical Great Smog of 1952, London has implemented comprehensive and effective policies that have resulted in substantial improvements in air quality. Given the effectiveness of these policies and the shared challenge of air pollution in the metropolitan city of Mashhad, this study aimed to analyze London's experience and propose a practical, locally adapted framework for reducing air pollution in Mashhad.

Materials and Methods: This descriptive-analytical study used population data, concentrations of air pollutants, including NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, and O₃, and transportation-related indicators for the period 1990–2022. Data were extracted from reliable sources, including the London Air Quality Network (LAQN), Transport for London (TfL), and the Greater London Authority (GLA). Pearson's correlation test was used to assess the relationships between population growth and pollutant concentrations.

Results: The population of London increased from 6.79 million in 1990 to 9.54 million in 2022. Despite population growth, the annual NO₂ concentration at the roadside station decreased from 95 µg/m³ in 1997 to 43 µg/m³ in 2021. At the same station, PM₁₀ concentration decreased from 50 µg/m³ in 1997 to 16 µg/m³ in 2021. PM_{2.5} concentration at the North Kensington station also decreased from approximately 20 µg/m³ in 2008 to 9 µg/m³ in 2021. The Pearson correlation test revealed a strong inverse correlation between population growth and the reduction in concentrations of NO₂, PM₁₀, and PM_{2.5}. In contrast, a positive correlation was observed between population growth and increased O₃ concentrations. Controlling pollutants led to a 44% reduction in NO₂ concentrations in central London.

Conclusion: London's success in reducing air pollutant concentrations despite population growth has resulted from an integrated approach involving emission-based vehicle zoning, modernization of the transportation fleet, development of green infrastructure, and promotion of active transportation. Given the structural similarities between London and Mashhad, targeted adaptation of London's experience to Iran's specific conditions could represent an effective step toward reducing air pollution and improving public health in Mashhad.

Keywords: Urban Air Pollution, Particulate Matter (PM₁₀ And PM_{2.5}), Nitrogen Dioxide(NO₂), Exposure Assessment, Policy Localization, Ultra Low Emission Zone (ULEZ)

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Received: 2026/02/20

Accepted: 2026/06/19

Doi:10.22038/jreh.2026.98546.1761

► **Citation:** Fouladi S, Naimi N, Sarkhosh M. Assessment of Air Pollution Control Strategies in the London Metropolitan Area and Their Potential for Local Adaptation to Mashhad. *Journal of Research in Environmental Health*. 12(2):30-45.

بررسی راهبردهای کنترل آلودگی هوای کلانشهر لندن و قابلیت بومی سازی آن برای شهر مشهد

چکیده

زمینه و هدف: آلودگی هوای شهری امروزه به عنوان یکی از مهم ترین چالش های زیست محیطی و بهداشت عمومی در سطح جهانی مطرح است که سالانه عامل میلیون ها مرگ زودرس می باشد. شهر لندن با تجربه تاریخی بحران مه دود ۱۹۵۲، با اجرای سیاست های جامع و مؤثر، موفق به بهبود چشمگیر کیفیت هوای خود شده است. با توجه به کارایی این سیاست ها و وجود معضل مشترک آلودگی هوا در کلانشهر مشهد، این پژوهش با هدف تحلیل تجربه لندن و ارائه الگویی بومی شده و عملیاتی برای کاهش آلودگی هوای مشهد انجام شده است.

مواد و روش ها: این مطالعه از نوع توصیفی-تحلیلی است. داده های جمعیتی، غلظت آلاینده ها PM_{10} ، $PM_{2.5}$ ، O_3 و شاخص های حمل و نقل طی سال های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۲ از پایگاه های معتبر شامل شبکه کیفیت هوای لندن (LAQN)، سازمان حمل و نقل لندن (TfL) و اداره لندن بزرگ (GLA) استخراج گردید. تحلیل همبستگی با استفاده از آزمون پیرسون انجام شد.

یافته ها: جمعیت لندن از ۶/۷۹ میلیون نفر در سال ۱۹۹۰ به ۹/۵۴ میلیون نفر در سال ۲۰۲۲ افزایش یافت. علیرغم افزایش جمعیت، غلظت سالانه NO_2 در ایستگاه کنار جاده ای از ۹۵ میکروگرم بر متر مکعب در سال ۱۹۹۷ به ۴۳ میکروگرم بر متر مکعب در سال ۲۰۲۱ کاهش یافت. غلظت PM_{10} در همین ایستگاه از ۵۰ میکروگرم بر متر مکعب در سال ۱۹۹۷ به ۱۶ میکروگرم بر متر مکعب در سال ۲۰۲۱ رسید. غلظت $PM_{2.5}$ در ایستگاه نورث کنزینگتون نیز از حدود ۲۰ میکروگرم بر متر مکعب در سال ۲۰۰۸ به ۹ میکروگرم بر متر مکعب در سال ۲۰۲۱ کاهش یافت. آزمون همبستگی پیرسون نشان دهنده همبستگی معکوس قوی بین افزایش جمعیت و کاهش غلظت NO_2 ، PM_{10} و $PM_{2.5}$ بود. در مقابل، همبستگی مثبت بین افزایش جمعیت و افزایش غلظت O_3 مشاهده شد. کنترل آلاینده ها منجر به کاهش ۴۴ درصدی غلظت NO_2 در مرکز لندن شد.

نتیجه گیری: موفقیت لندن در کاهش آلاینده ها علیرغم رشد جمعیت، حاصل رویکرد تلفیقی شامل منطقه بندی بر اساس سطح آلودگی خودروها، نوسازی ناوگان حمل و نقل، توسعه زیرساخت سبز و فرهنگ سازی حمل و نقل فعال بوده است. با توجه به اشتراکات ساختاری لندن و مشهد، الگوبرداری هدفمند از این تجربه با بومی سازی متناسب با شرایط ایران می تواند گام مؤثری در کاهش آلودگی هوا و ارتقای سلامت عمومی در مشهد باشد.

کلیدواژه ها: آلودگی هوای شهری، ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$)، دی اکسید نیتروژن (NO_2)، ارزیابی مواجهه، بومی سازی سیاست ها، منطقه فوق کم انتشار (ULEZ)

سعیده فولادی

کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران.

نیره نعیمی

کمیته تحقیقات دانشجویی، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران.

مریم سرخوش

* گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران. (نویسنده

مسئول)

SarkhoshM@mums.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۹

نوع مقاله: پژوهشی

◀ **استناد:** فولادی س، نعیمی ن، سرخوش م. بررسی راهبردهای کنترل آلودگی هوای کلانشهر لندن و قابلیت بومی سازی آن برای شهر مشهد. *فصلنامه ی پژوهش در بهداشت محیط*. تابستان ۱۴۰۵؛ ۱۲(۲): ۳۰-۴۵.

رشد سریع شهرنشینی و افزایش بی‌رویه تعداد خودروها در دهه‌های اخیر، کیفیت هوای بسیاری از کلانشهرهای جهان را به مخاطره انداخته است. سازمان بهداشت جهانی^۱ (WHO) تخمین زده است که حدود ۹۲ درصد از جمعیت جهان در مناطقی با هوای آلوده زندگی می‌کنند و حدود ۱۱/۶ درصد از کل مرگ‌های جهانی به آلودگی هوا نسبت داده می‌شود. آلودگی هوا سالانه موجب بیش از ۹ میلیون مرگ زودرس در جهان می‌شود که سهم عمده آن مربوط به بیماری‌های غیرواگیر از جمله بیماری‌های قلبی-عروقی و تنفسی است (۱، ۲). آلاینده‌هایی نظیر دی‌اکسیدنیترژن (NO_2)، ذرات معلق کوچک‌تر از $2.5/\mu\text{m}$ میکرون ($\text{PM}_{2.5}$) و ذرات معلق کوچک‌تر از $10/\mu\text{m}$ میکرون (PM_{10}) با بیماری‌های تنفسی، قلبی-عروقی و مرگومیر زودرس ارتباط مستقیم دارند. یک مطالعه مروری سیستماتیک و متاآنالیز در سال ۲۰۲۴ نشان داد که مواجهه با PM_{10} به ازای هر $10/\mu\text{m}$ میکروگرم بر مترمکعب افزایش، خطر سکته قلبی را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد (۳). هم‌چنین مواجهه طولانی‌مدت با $\text{PM}_{2.5}$ ، NO_2 و O_3 به‌طور معنی‌داری با افزایش مرگومیر ناشی از بیماری‌های قلبی-عروقی و تنفسی همراه است (۴). در ایران، کلانشهرهای بزرگ به‌ویژه مشهد، تهران، اصفهان و اهواز به‌طور مزمین با معضل آلودگی هوا مواجه هستند. مشهد با جمعیتی بالغ بر $3.5/\text{million}$ نفر (با احتساب زائران سالانه بیش از $25/\text{million}$ نفر) و قرارگیری در منطقه‌ای با شرایط اقلیمی خاص و پتانسیل بالای وقوع پدیده وارونگی دما، یکی از آلوده‌ترین شهرهای کشور محسوب می‌شود که این ویژگی‌ها همراه با تراکم بالای خودروها و وجود صنایع آلاینده، مدیریت کیفیت هوا در این کلانشهر را با چالش‌های مضاعفی مواجه ساخته است (۵). مطالعه‌ای در مشهد طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ نشان داد که میانگین غلظت $\text{PM}_{2.5}$ در این شهر از $28/30$ به $35/5$ میکروگرم بر مترمکعب افزایش یافته و در تمامی سال‌های مطالعه از رهنمودهای WHO (۱۵)

میکروگرم بر مترمکعب) فراتر رفته است و هم‌چنین نشان داد که افزایش $10/\mu\text{m}$ میکروگرم بر مترمکعب در غلظت $\text{PM}_{2.5}$ با افزایش خطر مرگ ناشی از بیماری‌های قلبی-عروقی (نسبت خطر $1/0.7$) و مرگ ناشی از سکته مغزی (نسبت خطر $1/0.6$) همراه است (۶). مطالعات اخیر نشان داده است که مواجهه کوتاه‌مدت با NO_2 در مشهد خطر مرگ ناشی از کووید-۱۹ را تا ۳۵ درصد افزایش می‌دهد (۷). در مطالعه‌ای دیگر در مشهد، بار بیماری‌های منتسب به $\text{PM}_{2.5}$ طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ با استفاده از نرم‌افزار $\text{AirQ}+$ برآورد شده است (۸). آلودگی هوا در ایران با افزایش بستری‌های بیمارستانی و مرگومیر ناشی از بیماری‌های قلبی و تنفسی ارتباط قوی دارد (۹). بر اساس جدیدترین یافته‌ها، مواجهه طولانی‌مدت با $\text{PM}_{2.5}$ در ایران با افزایش معنی‌دار مرگومیر ناشی از بیماری‌های قلبی-عروقی، تنفسی و سرطان ریه همراه است (۱۰). در چنین شرایطی، بررسی تجربیات موفق جهانی در کنترل آلودگی هوا ضروری است. شهر لندن با پیشینه تاریخی بحران «مه دود بزرگ ۱۹۵۲» که منجر به مرگ بیش از ۴۰۰۰ نفر در عرض چند روز شد، طی هفت دهه گذشته سیاست‌های متنوعی را به اجرا گذاشته است. مهم‌ترین این سیاست‌ها، منطقه فوق‌کم انتشار (ULEZ)^۲ است که در آوریل ۲۰۱۹ در مرکز لندن راه‌اندازی شد، سپس در اکتبر ۲۰۲۱ به داخل لندن و در آگوست ۲۰۲۳ به سراسر لندن بزرگ گسترش یافت و اکنون بزرگترین منطقه پاک هوای جهان محسوب می‌شود (۱۱). بر اساس مطالعه‌ای در لندن در سال ۲۰۲۶، غلظت NO_2 بین سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ به میزان ۴۱ درصد و غلظت $\text{PM}_{2.5}$ به میزان ۲۸ درصد کاهش یافته است، این بهبود کیفیت هوا منجر به کاهش حدود ۴۰ درصدی تعداد مرگ‌های منتسب به آلودگی هوا شده است؛ به‌طوری‌که تعداد مرگ‌های زودرس ناشی از آلودگی هوا در لندن از ۶۴۰۰ تا ۸۰۰۰ مورد در سال ۲۰۱۹ به ۳۸۰۰ تا ۵۱۰۰ مورد در سال ۲۰۲۴ کاهش یافته است (۱۲). شهرداری لندن نیز

² Ultra Low Emission Zone

¹ World Health Organization

یافته‌ها

روند تغییرات جمعیتی لندن

بر اساس داده‌های ارائه شده از سوی اداره لندن بزرگ، جمعیت این شهر در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۲ روندی صعودی داشته است. به‌طوری‌که جمعیت لندن از ۶/۷۹ میلیون نفر در سال ۱۹۹۰ به ۹/۵۴ میلیون نفر در سال ۲۰۲۲ افزایش یافته است (جدول ۱). نرخ رشد جمعیت در دهه اخیر بالاتر از میانگین ملی کشور انگلستان (که ۶/۳ درصد گزارش شده) بوده و همچنین میانگین سنی ساکنان آن ۴۰/۵ سال محاسبه شده است که نشان‌دهنده ساختار سنی نسبتاً جوان در مقایسه با سایر نقاط این کشور می‌باشد. این ویژگی‌های جمعیتی نقش مهمی در سیاست‌گذاری‌های شهری، به‌ویژه در حوزه حمل‌ونقل و کنترل آلودگی هوا داشته است.

روند تغییرات غلظت آلاینده‌های معیار در

ایستگاه‌های مختلف پایش لندن

بررسی روند تغییرات غلظت NO_2 در سه نوع ایستگاه پایش لندن نشان‌دهنده کاهش چشمگیر این آلاینده طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۱ است. بیش‌ترین غلظت مربوط به ایستگاه کنار جاده‌ای مریلبون با میانگین ۹۵ میکروگرم بر مترمکعب در سال ۱۹۹۷ و کم‌ترین غلظت مربوط به ایستگاه حومه‌ای هیلینگدون با میانگین ۵۹ میکروگرم بر مترمکعب در همان سال بوده است. روند کاهشی در هر سه ایستگاه مشهود است؛ به‌طوری‌که غلظت NO_2 در مریلبون ۵۴ درصد، در بلومزبری ۶۱ درصد و در هیلینگدون حدود ۵۷ درصد کاهش یافته است (نمودار ۱). اختلاف غلظت بین ایستگاه‌ها در سال‌های اخیر به میزان قابل توجهی کاهش یافته است که نشان‌دهنده موفقیت سیاست‌های کنترل آلودگی در مناطق پرتراфик می‌باشد. نتیجه مهم این‌که سیاست‌های کنترل ترافیک و جایگزینی خودروهای پاک، تأثیر مستقیم و مثبتی بر کاهش غلظت NO_2 در لندن داشته است.

در استراتژی محیط زیست خود، هدف دستیابی به کیفیت هوای هم‌تراز با رهنمودهای WHO را تا سال ۲۰۳۰ تعیین کرده است (۱۳). پژوهش حاضر با هدف تحلیل جامع سیاست‌های کنترل آلودگی هوای لندن با تأکید بر شواهد به‌روز و ارائه الگویی بومی‌شده برای کلانشهر مشهد انجام شده است. امید است که یافته‌های این پژوهش بتواند ضمن آگاهی‌بخشی به متولیان شهری و برنامه‌ریزان حوزه حمل‌ونقل و محیط‌زیست، زمینه‌ساز اتخاذ راهبردهای عملیاتی و اثربخش در راستای کاهش غلظت آلاینده‌ها و ارتقای سطح سلامت عمومی در مشهد گردد.

روش کار

نوع مطالعه و داده‌ها

پژوهش حاضر از نوع مطالعات توصیفی-تحلیلی بوده که داده‌های مورد نیاز در این مطالعه از چهار پایگاه معتبر بین‌المللی گردآوری گردید که عبارتند از: شبکه کیفیت هوای لندن LAQN^3 به منظور استخراج داده‌های غلظت لحظه‌ای و سالانه آلاینده‌ها، شبکه خودکار شهری و روستایی بریتانیا برای تأیید داده‌های کیفیت هوا، سازمان حمل‌ونقل لندن TfL^4 جهت دریافت آمار سفرها و ترکیب ناوگان حمل‌ونقل، و اداره لندن بزرگ GLA^5 به‌منظور دسترسی به داده‌های جمعیتی و سرشماری. اطلاعات مربوط به غلظت آلاینده‌های NO_2 ، O_3 ، PM_{10} و $\text{PM}_{2.5}$ در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۲ از ایستگاه‌های پایش مختلف شامل ایستگاه‌های کنار جاده‌ای، زمینه شهری و حومه استخراج گردید.

تحلیل آماری

برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک استفاده شد. با توجه به نرمال بودن توزیع داده‌ها از ضریب همبستگی پیرسون برای سنجش رابطه بین جمعیت و غلظت آلاینده‌ها بهره گرفته شد. سطح معنی‌داری ۰/۰۱ در نظر گرفته شد. کلیه تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام پذیرفت.

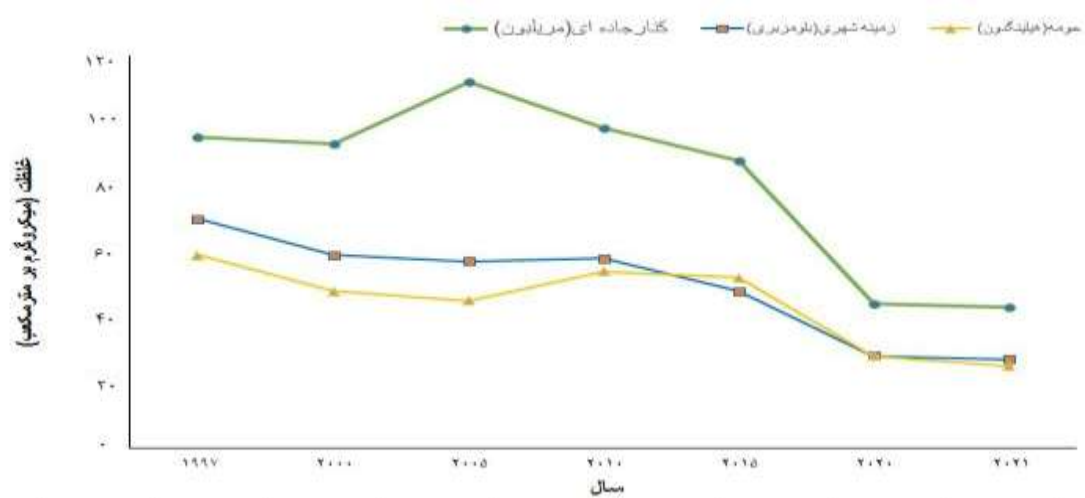
³ London Air Quality Network

⁴ Transport for London

⁵ Greater London Authority

جدول ۱. نرخ رشد جمعیت در مناطق شهری لندن طی سال‌های ۱۹۹۰-۲۰۲۲

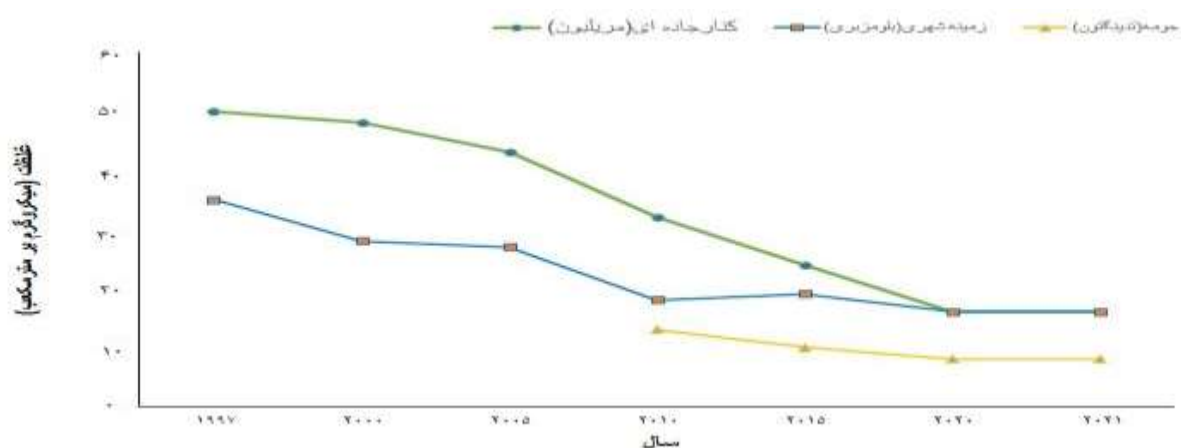
سال	جمعیت (نفر)	نرخ رشد (درصد)
۱۹۹۰	۶/۷۹۴/۴۰۰	۰/۱۶
۱۹۹۵	۷/۰۲۹/۵۰۸	۰/۶۸
۲۰۰۰	۷/۲۷۲/۸۱۹	۰/۶۸
۲۰۰۵	۷/۵۰۱/۲۱۷	۰/۶
۲۰۱۰	۸/۰۴۴/۴۳۳	۱/۶۱
۲۰۱۵	۸/۶۶۱/۳۸۱	۱/۴۶
۲۰۲۰	۹/۳۰۴/۰۱۶	۱/۳۹
۲۰۲۲	۹/۵۴۰/۵۷۶	۱/۲۲



نمودار ۱. روند تغییرات غلظت NO_2 در ایستگاه‌های کنار جاده‌ای (مریلبون)، زمینه شهری (بلومزبری) و حومه (تدینگتون) طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۱

آلاینده نسبت به NO_2 ملایم‌تر است که نشان می‌دهد کنترل PM_{10} نیازمند رویکردهای مکمل‌تری است (نمودار ۲). نتیجه مهم این‌که لندن در کاهش ذرات معلق ناشی از ترافیک موفق بوده، اما کنترل کامل آن نیازمند سیاست‌های تکمیلی است. داده‌های مربوط به ذرات ریزتر $PM_{2.5}$ نشان می‌دهد که غلظت این آلاینده در ایستگاه نورث کنزینگتون به‌عنوان نماینده مناطق شهری لندن از حدود ۲۰ میکروگرم بر مترمکعب در سال ۲۰۰۸ به ۹ میکروگرم بر مترمکعب در سال ۲۰۲۱ کاهش یافته است. در ایستگاه حومه‌ای بوشی پارک نیز غلظت $PM_{2.5}$ از ۱۰ میکروگرم بر مترمکعب در سال ۲۰۱۵ به ۸ میکروگرم بر مترمکعب در سال ۲۰۲۱ رسیده است (نمودار ۳).

الگوی کاهش غلظت ذرات معلق قابل استنشاق (PM_{10}) در هر سه نوع ایستگاه طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۱ نشان‌دهنده روندی مشابه با NO_2 است. در ایستگاه کنار جاده‌ای مریلبون، غلظت PM_{10} از ۵۰ به ۱۶ میکروگرم بر مترمکعب و در ایستگاه زمینه شهری بلومزبری از ۳۵ به ۱۶ میکروگرم بر مترمکعب کاهش یافته است. در ایستگاه حومه‌ای تدینگتون نیز غلظت این آلاینده از ۱۰ میکروگرم بر مترمکعب در سال ۲۰۱۵ به ۸ میکروگرم بر مترمکعب در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ رسیده است. نکته قابل توجه این‌که از سال ۲۰۱۵ به بعد، غلظت PM_{10} در هر سه نوع ایستگاه به هم نزدیک شده و در سال‌های اخیر اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نمی‌شود. شیب کاهشی این

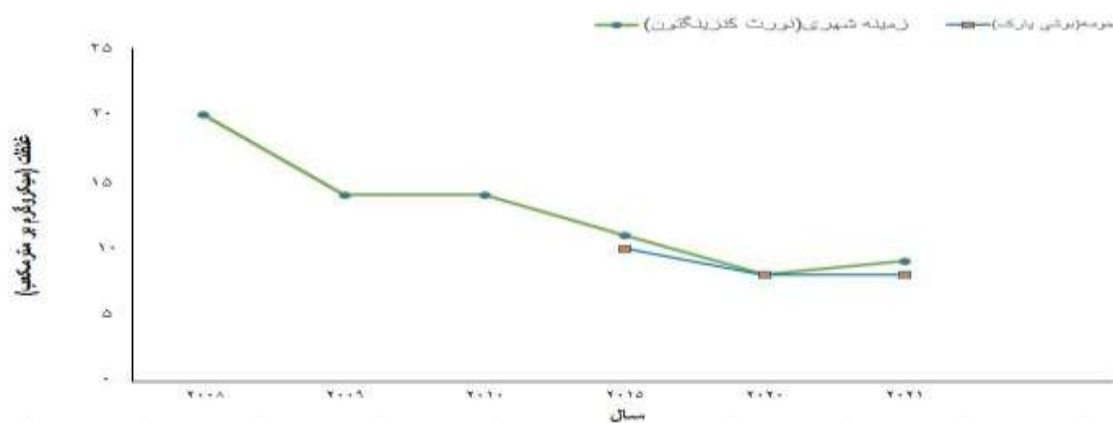


نمودار ۲. روند تغییرات غلظت ذرات معلق (PM₁₀) در ایستگاه‌های کنار جاده‌ای (مریلبون)، زمینه شهری (بلومزبری) و حومه (تدینگتون) طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۱

نتیجه مهم این‌که لندن در مسیر کاهش PM_{2.5} موفق بوده، اما برای رسیدن به اهداف بلندمدت WHO نیازمند اقدامات تکمیلی است.

به دلیل محدودیت در دسترس‌پذیری داده‌های PM_{2.5} در ایستگاه‌های کنار جاده‌ای و حومه، این آلاینده صرفاً بر اساس ایستگاه‌های دارای داده‌های تا حدی کامل و پیوسته (نورث کنزینگتون و بوشی پارک) تحلیل شده است.

این کاهش بیانگر تأثیر مثبت سیاست‌های کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق، از جمله محدودیت تردد خودروهای فرسوده و جایگزینی آن‌ها با خودروهای پاک می‌باشد. هرچند غلظت PM_{2.5} در این دوره بیش از ۵۰ درصد کاهش داشته، اما همچنان از رهنمود WHO (۵ میکروگرم بر مترمکعب) فراتر است. این موضوع نشان می‌دهد که برای دستیابی به استانداردهای ایمن‌تر، نیاز به تشدید سیاست‌های کنترلی در سطح شهر وجود دارد.



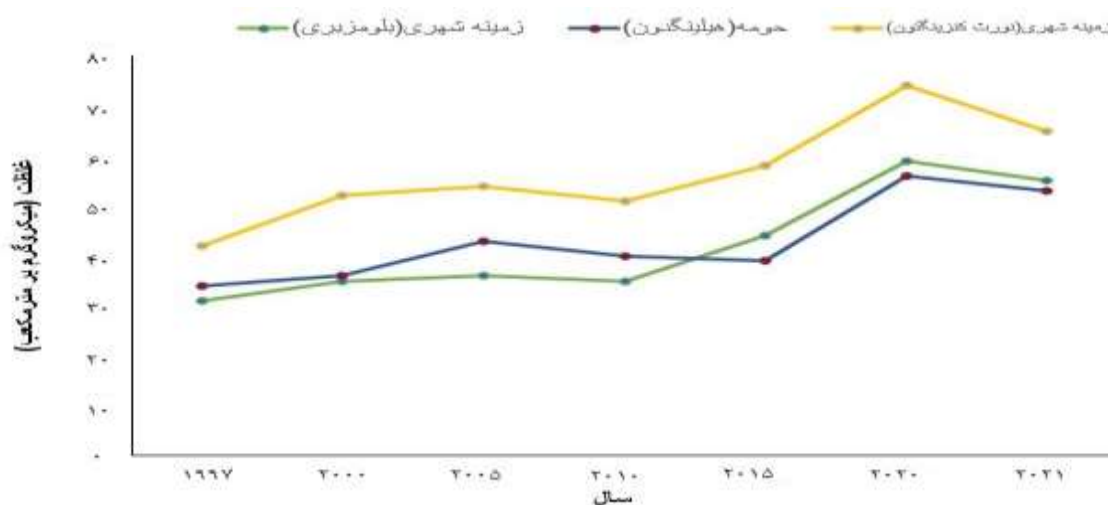
نمودار ۳. روند تغییرات غلظت ذرات ریز (PM_{2.5}) در ایستگاه‌های زمینه شهری (نورث کنزینگتون) و حومه (بوشی پارک) طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۱

و در نورث کنزینگتون (زمینه شهری) از ۴۲ به ۶۵ میکروگرم بر مترمکعب افزایش یافته است (نمودار ۴). این افزایش را می‌توان به ماهیت ثانویه ازن و کاهش غلظت نیتریک اکسید (به عنوان مصرف کننده ازن) در واکنش‌های

ازن سطح زمین (O₃) رفتاری متفاوت از سایر آلاینده‌ها داشته و غلظت آن در هر سه نوع ایستگاه روند افزایشی داشته است. غلظت O₃ در ایستگاه بومزبری (زمینه شهری) از ۳۱ به ۵۵، در هیلینگدون (حومه) از ۳۴ به ۵۳

لندن در کنترل آلاینده‌های اولیه موفق بوده، اما کنترل O_3 همچنان یک چالش باقی مانده است.

فتوشیمیایی نسبت داد. به عبارت دیگر، با کاهش NO_2 و NO ناشی از ترافیک، شرایط برای تولید و تجمع ازن در سطح زمین فراهم‌تر شده است. نتیجه مهم این‌که اگرچه



نمودار ۴. روند تغییرات غلظت ازن سطح زمین (O_3) در ایستگاه‌های زمینه شهری (بلومزبری، نورث کنزینگتون) و حومه (هیلینگدون) طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۱

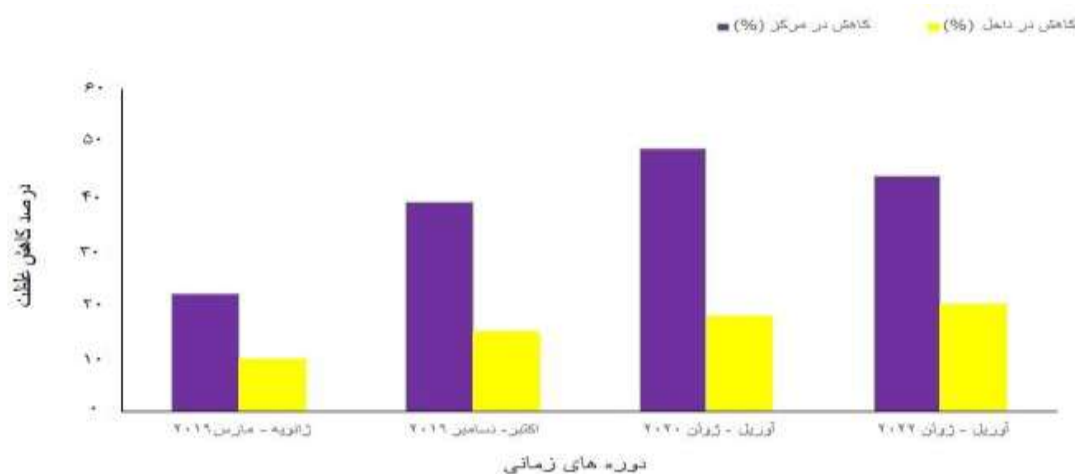
کاهش در طول چهار دوره نشان می‌دهد که اثرات مثبت ULEZ با گذشت زمان و افزایش آگاهی عمومی و جایگزینی خودروهای پاک، تشدید شده است. به‌طوری‌که شش ماه پس از گسترش این طرح به داخل لندن، حدود ۹۴ درصد از وسایل نقلیه ترددکننده در منطقه توسعه‌یافته با استانداردهای آلاینده‌ی مطابقت داشتند که در مقایسه با ۳۹ درصد در سال ۲۰۱۷، افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد. این موفقیت بیانگر نقش

تأثیر منطقه فوق‌کم انتشار بر غلظت NO_2

بررسی تأثیر اجرای منطقه فوق کم انتشار ULEZ بر غلظت دی‌اکسید نیتروژن در مرکز و داخل لندن نشان‌دهنده اثربخشی قابل‌توجه این سیاست در کاهش آلاینده‌های ناشی از ترافیک است. این طرح که از آوریل ۲۰۱۹ در مرکز لندن راه‌اندازی شد و سپس در اکتبر ۲۰۲۱ به مناطق داخلی گسترش یافت، با الزام وسایل نقلیه فاقد استانداردهای یورو ۴ (بنزینی) و یورو ۶ (دیزلی) به پرداخت عوارض روزانه، به‌طور مستقیم بر ترکیب ناوگان خودروهای ترددکننده در مناطق مرکزی تأثیر گذاشته است. در اولین دوره اجرا (ژانویه-مارس ۲۰۱۹)، این طرح منجر به کاهش ۲۲ درصدی غلظت NO_2 در مرکز لندن و ۱۰ درصدی در داخل لندن گردید. این تأثیر با گذشت زمان افزایش یافت؛ به‌طوری‌که در دوره آوریل-ژوئن ۲۰۲۲، کاهش غلظت NO_2 در مرکز لندن به ۴۴ درصد و در داخل لندن به ۲۰ درصد رسید (نمودار ۵). شتاب کاهش در مرکز لندن که هسته اولیه طرح بوده، به مراتب بیشتر از داخل لندن است که نشان‌دهنده نقش مستقیم این سیاست در کاهش آلودگی مناطق پرتراфик می‌باشد. روند افزایشی درصد

کلیدی منطقه‌بندی بر اساس سطح آلاینده‌گی خودروها در کاهش سریع و مؤثر غلظت NO_2 در مناطق پرترافیک شهری است و تأکید دارد که اعمال محدودیت‌های هوشمند بر خودروهای آلاینده، به همراه ارائه گزینه‌های حمل‌ونقل پاک، می‌تواند ظرف مدت کوتاهی کیفیت هوای کلانشهرها را بهبود بخشد.

بررسی تأثیر این سیاست بر سایر آلاینده‌ها به‌دلیل محدودیت داده‌های کمی در دسترس، نیازمند مطالعه‌ای مجزا با رویکرد تفکیک اثرات است؛ ازاین‌رو پژوهش حاضر با تأکید بر NO_2 به‌عنوان شاخص اصلی موفقیت ULEZ انجام شده است.



نمودار ۵. تأثیر منطقه فوق‌کم انتشار ULEZ بر کاهش غلظت NO_2 در مرکز و داخل لندن

نتایج آزمون همبستگی پیرسون

نتایج آزمون همبستگی پیرسون بر اساس داده‌های LAQN و GLA در جدول ۲ ارائه شده است که نشان می‌دهد بین افزایش جمعیت لندن و کاهش غلظت NO_2 همبستگی معکوس شدید با ضریب $-0/91$ و از نظر آماری معنی‌دار وجود دارد. همین الگو برای PM_{10} و $\text{PM}_{2.5}$ با ضریب $-0/92$ نیز مشاهده می‌شود. این یافته که در نگاه اول خلاف انتظار به‌نظر می‌رسد در واقع نشان‌دهنده‌ی اثربخشی قابل توجه سیاست‌های کنترل آلودگی در لندن است. در مقابل، همبستگی مثبت بین جمعیت و غلظت ازن سطح زمین (O_3) با ضریب $+0/78$

مشاهده می‌شود. این پدیده را می‌توان به‌دلایل فتوشیمیایی نسبت داد: کاهش غلظت NO (که به‌عنوان مصرف‌کننده O_3 عمل می‌کند) منجر به افزایش نسبی O_3 در واکنش‌های فتوشیمیایی می‌شود (جدول ۲).

هم‌چنین با توجه به این‌که در پژوهش حاضر داده‌های همبستگی به صورت ضریب عددی (r) خلاصه شده‌اند و داده‌های جفتی (سال به سال) برای رسم نمودار پراکندگی در دسترس نبود، ارائه نتایج در قالب جدول به‌عنوان روش معتبر و رایج در تحلیل‌های همبستگی انتخاب گردید.

جدول ۲. ماتریس همبستگی بین جمعیت و غلظت آلاینده‌ها

متغیرها	ضریب همبستگی (r)	سطح معنی داری (p-value)
جمعیت NO_2	$-0/91$	$0/01$
جمعیت O_3	$+0/78$	$0/01$
جمعیت PM_{10}	$-0/92$	$0/01$
جمعیت $\text{PM}_{2.5}$	$-0/92$	$0/01$

مقایسه شاخص‌های کیفیت هوای مشهد و لندن

مقایسه شاخص‌های کیفیت هوا نشان می‌دهد که میانگین غلظت $PM_{2.5}$ در مشهد طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ روندی صعودی داشته و در سال‌های اخیر به حدود ۳۵/۵ میکروگرم بر مترمکعب رسیده است (۶). این مقدار بیش از هفت برابر رهنمود سازمان جهانی بهداشت (۵ میکروگرم بر مترمکعب) است (۸). در مقابل، غلظت این آلاینده در لندن طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۱ از حدود ۲۰ به ۸ میکروگرم بر مترمکعب کاهش یافته است. همچنین مطالعات نشان می‌دهد که در مشهد گردوغبار ناشی از خشکسالی‌های اخیر و کانون‌های فرسایش بادی، عامل اصلی آلودگی در بسیاری از روزهای آلوده بوده است (۸). در حالی‌که در لندن، منابع آلودگی عمدتاً از حمل‌ونقل جاده‌ای و منابع ثابت شهری نشأت می‌گیرد (۲). این مقایسه نشان می‌دهد که اگرچه مشهد با چالش‌های متفاوت و بعضاً پیچیده‌تری مواجه است، تجربه لندن ثابت می‌کند که با اجرای سیاست‌های هدفمند و پایدار، کاهش قابل توجه آلاینده‌ها امکان‌پذیر است.

پیامدهای سلامت و گروه‌های آسیب‌پذیر

بر اساس رهنمودهای WHO، میانگین سالانه غلظت دی‌اکسید نیتروژن نباید از ۱۰ میکروگرم بر مترمکعب تجاوز کند (۱۴). با این حال، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در سال ۲۰۱۹، حدود ۹ میلیون نفر از ساکنان لندن (معادل بیش از ۹۸ درصد از کل جمعیت شهر) در مناطقی زندگی می‌کردند که غلظت این آلاینده به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از حد مجاز تعیین‌شده توسط WHO بود. گروه‌های آسیب‌پذیر جامعه بیش از سایرین در معرض تبعات این آلودگی قرار داشته‌اند. به‌گونه‌ای که در سال مذکور، ۹۹ درصد از مدارس لندن در مناطقی با غلظت NO_2 بالاتر از استانداردهای ایمن واقع شده بودند. این بدان معناست که تقریباً تمامی دانش‌آموزان لندنی در دوران حساس رشد ریوی، به‌طور مزمّن در معرض هوای آلوده تنفس می‌کرده‌اند. همچنین ۹۸ درصد از بیمارستان‌ها و به‌طور هشداردهنده‌ای ۱۰۰ درصد از خانه‌های سالمندان شهر نیز در چنین مناطقی قرار داشتند (۱۳)؛ یعنی سالمندانی که از پیش با ضعف

سیستم ایمنی و بیماری‌های زمینه‌ای دست‌وپنجه نرم می‌کنند، در معرض بالاترین سطح آلودگی هوا قرار داشته‌اند. این یافته‌ها نشان‌دهنده شکاف عمیق عدالت در سلامت شهری است (۱۵). با این حال، پیش‌بینی‌های مبتنی بر روند فعلی سیاست‌های کاهش آلودگی، ازجمله گسترش ULEZ، حاکی از بهبود تدریجی این وضعیت است. برآوردها نشان می‌دهد که در صورت ادامه اجرای مؤثر برنامه‌های کنترلی، سهم مدارس واقع در مناطق با آلودگی فراتر از حد مجاز تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۵ درصد کاهش خواهد یافت. با این وجود، تأکید بر این نکته ضروری است که بدون اتخاذ اقدامات تکمیلی و تشدید سیاست‌های موجود، دستیابی به استانداردهای ایمن WHO برای همه گروه‌های جمعیتی به‌ویژه در مناطق محروم و حاشیه‌نشین با تردید جدی مواجه خواهد بود (۱۶، ۱۷).

بحث

شباهت‌های ساختاری مشهد و لندن

انتخاب لندن به‌عنوان الگوی بومی‌سازی برای مشهد، بر پایه شباهت‌های ساختاری قابل‌توجهی استوار است. نخست، تراکم جمعیت و فشار جمعیتی: لندن با جمعیت ۹/۵۴ میلیون نفر و مشهد با جمعیت ۳/۵ میلیون نفر ثابت و بیش از ۲۵ میلیون زائر سالانه، هر دو با فشار بالای جمعیتی بر منابع شهری مواجه هستند. دوم، تمرکز منابع حمل‌ونقل: در لندن، حمل‌ونقل جاده‌ای مسئول ۵۷ درصد از انتشار NO_x و ۵۰ درصد از انتشار PM_{10} است، در حالی‌که در مشهد نیز منابع متحرک (خودروهای شخصی و تاکسی‌های فرسوده) عامل اصلی آلودگی هوا محسوب می‌شوند (۶، ۸). سوم، پدیده وارونگی دما: مشهد به‌دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود سالانه حدود ۲۶۴ روز وارونگی دما را تجربه می‌کند (۱۸)، در حالی‌که لندن نیز در فصول سرد سال با این پدیده مواجه است. چهارم، ساختار شهری متمرکز: در هر دو شهر، مناطق مرکزی بالاترین میزان ترافیک و آلودگی را تجربه می‌کنند؛ به‌طوری‌که در لندن، ایستگاه کنار جاده‌ای مریلبن

بالاترین غلظت NO_2 را دارد. در مشهد نیز محدوده اطراف حرم مطهر پرتراфик‌ترین و آلوده‌ترین منطقه شهر است (۶). این شباهت‌ها نشان می‌دهد که راهبردهای اجراشده در لندن، با بومی‌سازی مناسب، می‌تواند در مشهد نیز مؤثر واقع شود.

رهنمودهای برگرفته از تجربه لندن برای بهبود

کیفیت هوای مشهد

تجربه لندن در کنترل آلودگی هوا، رهنمودهای ارزشمندی برای بهبود کیفیت هوای مشهد به همراه دارد. منطقه‌بندی مبتنی بر استاندارد آلاینده‌گی که در قالب طرح ULEZ اجرا شد، نشان داد که اعمال محدودیت بر خودروهای آلاینده بسیار مؤثرتر از محدودیت‌های صرفاً زمانی-مکانی است؛ به گونه‌ای که این سیاست به کاهش ۴۴ درصدی غلظت NO_2 در مرکز لندن منجر شد. این تجربه برای مشهد حاکی از آن است که طرح ترافیک فعلی باید به سمت محدودیت بر اساس سطح آلاینده‌گی خودروها بازطراحی شود. در کنار این اقدام، نوسازی ناوگان حمل‌ونقل عمومی نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش انتشار آلاینده‌ها ایفا می‌کند. لندن با تعیین هدف دستیابی به آلاینده‌گی صفر تا سال ۲۰۳۰، گام‌های بلندی در جایگزینی اتوبوس‌ها و تاکسی‌های دیزلی با خودروهای برقی برداشته است. این الگو برای مشهد ضرورت تسریع در نوسازی ناوگان فرسوده اتوبوسرانی و تاکسیرانی را نمایان می‌سازد. تغییر رفتار سفر نیز از طریق توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل فعال و بهبود خدمات حمل‌ونقل عمومی قابل تحقق است. در لندن، سهم سفر با خودروی شخصی از ۴۷ درصد به ۳۷ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده تأثیر سرمایه‌گذاری در مسیرهای ایمن دوچرخه و ارتقای کیفیت حمل‌ونقل عمومی است. این رویکرد برای مشهد بر لزوم سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های دوچرخه‌سواری و بهبود خدمات حمل‌ونقل عمومی تأکید دارد. توسعه فضای سبز عمودی نیز به‌عنوان راهکاری مکمل در کاهش غلظت آلاینده‌ها در مناطق پرتراکم شناخته می‌شود. لندن با ایجاد بیش از ۱/۵ میلیون مترمربع بام سبز، موفق به کاهش ۴۰ درصدی NO_2 و ۶۰ درصدی PM_{10} در خیابان‌های دره‌ای شده است. این دستاورد برای مشهد به معنای ضرورت الزام

احداث بام سبز در ساختمان‌های جدید است. در نهایت، پایش مستمر و شفاف کیفیت هوا به‌عنوان پیش‌نیاز ارزیابی اثربخشی هر سیاست کنترلی محسوب می‌شود. لندن با استقرار شبکه‌ای متشکل از ۱۳۲ ایستگاه پایش و فراهم کردن دسترسی آنلاین عمومی، امکان ارزیابی دقیق اقدامات انجام‌شده را فراهم کرده است. این تجربه برای مشهد بر تقویت شبکه پایش و شفاف‌سازی داده‌ها برای عموم شهروندان تأکید دارد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که موفقیت لندن در کاهش NO_2 و ذرات معلق علی‌رغم افزایش جمعیت، حاصل رویکرد تلفیقی و چندوجهی این شهر است. مهم‌ترین عامل این موفقیت، اجرای ULEZ در سال ۲۰۱۹ و گسترش تدریجی آن تا کل لندن بزرگ بوده است. بر اساس جدیدترین مطالعات، اجرای ULEZ منجر به کاهش ۲۷ درصدی NO_2 در سطح شهر نسبت به سناریوی بدون این طرح شده است.

هم‌چنین غلظت NO_2 در لندن بین سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ به میزان ۴۱ درصد و غلظت $\text{PM}_{2.5}$ به میزان ۲۸ درصد کاهش یافته است که این کاهش‌ها با کاهش قابل‌توجه تعداد مرگ‌های منتسب به آلودگی هوا همراه بوده است (۱۹). این موفقیت با تغییر الگوی سفر شهروندان نیز همراه بوده است. بر اساس داده‌های سازمان حمل‌ونقل لندن، طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷، سهم سفر با خودروی شخصی از ۴۷ درصد به ۳۷ درصد کاهش و سهم حمل‌ونقل عمومی و فعال (پیاده و دوچرخه) به‌ترتیب از ۲۴ به ۲۸ درصد و از ۲۹ به ۳۵ درصد افزایش یافته است. مطالعه دیگری در همین راستا نیز نشان داده است که کاهش NO_2 ناشی از ULEZ با بهبود عملکرد ریه کودکان همراه بوده و باعث شده است کودکانی که قبلاً از کاهش رشد ریه رنج می‌بردند، به ریه‌هایی با اندازه طبیعی دست یابند (۲۰). علاوه بر این، مطالعه دیگری نشان داده است که اجرای طرح عوارض آلاینده‌گی و منطقه فوق‌کم انتشار در لندن با کاهش ۹/۳ درصدی در روند سالانه بستری‌های اورژانسی قلبی-عروقی و ۵/۱

درصدی در کل بستری‌های بیمارستانی همراه بوده است (۲۱).

یکی از یافته‌های قابل توجه این پژوهش، روند افزایشی غلظت ازن سطح زمین (O_3) در ایستگاه‌های مختلف لندن طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۱ است. این پدیده را می‌توان به ماهیت ثانویه ازن و کاهش غلظت نیتریک اکسید (NO) که به‌عنوان مصرف‌کننده O_3 در واکنش‌های فتوشیمیایی عمل می‌کند، نسبت داد. پژوهش‌های جدید نیز این یافته را تأیید کرده‌اند؛ به طوری که اگرچه ULEZ در کاهش NO_2 و $PM_{2.5}$ موفق بوده، اما کاهش NO_x منجر به افزایش غلظت ازن (O_3) در مرکز لندن شده است. همچنین این مطالعه هشدار داده است که کاهش ذرات بزرگ‌تر (PM_{10} , $PM_{2.5}$) با افزایش ذرات بسیار ریز همراه بوده که برای سلامتی بسیار مضر هستند (۱۷). بنابراین، اگرچه لندن در کنترل آلاینده‌های اولیه موفق بوده، اما کنترل آلاینده‌های ثانویه مانند O_3 و ذرات بسیار ریز همچنان یک چالش باقی مانده است و نیازمند رویکردهای تکمیلی می‌باشد.

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در کاهش آلودگی هوای لندن، نابرابری‌های قابل توجهی در مواجهه با آلودگی هوا در مناطق مختلف این شهر وجود دارد. مطالعات نشان داده است که مناطق بیرونی لندن از جمله یکسلی، هیورینگ و ساتن بالاترین میزان مرگ منتسب به آلودگی هوا به ازای هر ۱۰۰/۰۰۰ نفر را دارند که نشان‌دهنده نابرابری در توزیع بار سلامت آلودگی هواست. همچنین گزارش برنامه حسابرسی کیفیت هوای مهدکودک‌های شهرداری لندن نشان داده است که با وجود کاهش $PM_{2.5}$ در اطراف مراکز نگهداری از کودکان، نابرابری‌ها در مواجهه با آلودگی هوا همچنان پابرجاست؛ به طوری که مراکز واقع در مناطق محروم‌تر و با جمعیت غیرسفید بیشتر، همچنان در معرض آلودگی بالاتری هستند (۱۶).

تجربه اجرای سیاست‌های کاهش آلودگی هوا در تهران: درس‌آموخته‌ها برای مشهد

برخی از سیاست‌های پیشنهادی برای مشهد، پیشتر در تهران و سایر کلانشهرهای ایران اجرا شده است. طرح ترافیک تهران که از سال ۱۳۵۸ آغاز شد و بعدها به طرح زوج و فرد گسترش یافت، نمونه‌ای از این تجربیات است. مطالعات نشان می‌دهد که طرح زوج و فرد در تهران توانست به‌طور موقت حجم ترافیک را کاهش دهد، اما به دلیل نبود زیرساخت‌های حمل‌ونقل عمومی کافی، عدم اجرای دقیق معاینه فنی و رشد سریع خودروهای شخصی، اثربخشی آن در بلندمدت کاهش یافت. همچنین طرح اسقاط خودروهای فرسوده که از سال ۱۳۸۴ در تهران اجرا شد، به دلیل کمبود منابع مالی، نبود مشوق‌های کافی و عدم نظارت دقیق، نتوانست به‌طور کامل به اهداف خود برسد. تجربه تهران نشان می‌دهد که اجرای موفق سیاست‌های کاهش آلودگی هوا در مشهد نیازمند تلفیق چند سیاست همزمان، تأمین منابع پایدار، نظارت مستمر و جلب مشارکت عمومی است. بنابراین، الگوبرداری از لندن باید با در نظر گرفتن درس‌آموخته‌های تهران و با رویکردی بومی‌سازی شده انجام شود.

چالش‌ها و محدودیت‌های پژوهش

با وجود موفقیت‌های چشمگیر سیاست‌های کاهش آلودگی در لندن، چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز در این مسیر وجود دارد که اشاره به آن‌ها می‌تواند مسیر را برای پژوهش‌های آینده روشن‌تر نماید. ازجمله مهم‌ترین محدودیت‌های روش‌شناختی این پژوهش، دسترسی ناقص به داده‌های $PM_{2.5}$ در ایستگاه‌های کنار جاده‌ای و حومه است که تحلیل این آلاینده را به ایستگاه نورث کنزینگتون (به‌عنوان نماینده مناطق شهری) محدود نموده است. همچنین تمرکز بر آلاینده‌های معیار (NO_2 ، PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و O_3) باعث شد سایر آلاینده‌های سمی مانند ترکیبات آلی فرار^۶ (VOCs)، فلزات سنگین و ذرات بسیار ریز^۷ (UFPs) که اثرات بهداشتی قابل توجهی دارند، در این پژوهش گنجانده نشوند. از سوی دیگر، همپوشانی اثرات ULEZ با سایر سیاست‌ها و رویدادها (مانند محدودیت‌های کرونا و بهبود استانداردهای خودروهای جدید) امکان تفکیک دقیق تأثیر هر یک را دشوار ساخته

^۶ Volatile Organic Compounds

^۷ Ultrafine Particles

است. این موضوع در پژوهش‌های پیشین نیز به‌عنوان یک چالش مطرح شده است؛ به‌گونه‌ای که ارزیابی تأثیر یک سیاست خاص در میان مجموعه‌ای از اقدامات همزمان با دشواری همراه است (۲۲). افزون بر این، اثر سرریز^۸ یکی از چالش‌های اساسی است که به موجب آن، کاهش ترافیک در مناطق مشمول طرح‌هایی مانند ULEZ ممکن

است منجر به افزایش ترافیک و آلودگی در مناطق بلافصل مجاور شود که شامل این طرح‌ها نیستند. همچنین با کاهش سهم حمل‌ونقل، سهم نسبی منابع ثابت آلودگی (هم‌چون گرمایش خانگی با سوخت‌های فسیلی، صنایع کوچک و سوزاندن چوب) افزایش یافته است که ضرورت توجه به این منابع را در کنار سیاست‌های کاهش ترافیک دوچندان می‌سازد (۱۷). علاوه بر این، دوره زمانی مطالعه (تا سال ۲۰۲۱) امکان ارزیابی اثرات کامل گسترش ULEZ به کل لندن بزرگ را فراهم نمی‌سازد و تفاوت‌های ساختاری و اقلیمی میان لندن و سایر شهرها، تعمیم‌پذیری کامل یافته‌ها را با چالش مواجه می‌سازد. با وجود این محدودیت‌ها، یافته‌های پژوهش از اعتبار لازم برای استخراج درس‌های کلیدی در زمینه مدیریت کیفیت هوای شهری برخوردار است و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای پژوهش‌های آینده و الگوبرداری در سایر کلانشهرها مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش به روشنی نشان می‌دهد که کاهش پایدار آلودگی هوا در کلانشهرها، علیرغم رشد جمعیت، یک هدف دست‌یافتنی است. تجربه لندن ثابت می‌کند که اجرای همزمان و هماهنگ مجموعه‌ای از سیاست‌های مکمل شامل منطقه‌بندی بر اساس سطح آلودگی خودروها، نوسازی ناوگان حمل‌ونقل عمومی با خودروهای پاک، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های حمل‌ونقل فعال (دوچرخه و پیاده‌روی)، توسعه فضای سبز عمودی (بام و دیوار سبز) و پایش مستمر و شفاف کیفیت هوا، می‌تواند ظرف مدت کوتاهی کیفیت هوای شهری را به‌طور

چشمگیری بهبود بخشد. کاهش ۴۴ درصدی NO₂ در مرکز لندن طی تنها سه سال پس از اجرای ULEZ و کاهش ۴۰ درصدی مرگ‌های منتسب به آلودگی هوا طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴، گواه روشنی بر اثربخشی این رویکرد تلفیقی است. با این حال، افزایش غلظت ازن سطح زمین در پی کاهش سایر آلاینده‌ها، نشان‌دهنده پیچیدگی سیستم‌های شیمیایی جو شهری و ضرورت رویکردهای تکمیلی برای کنترل آلاینده‌های ثانویه است. این یافته مهم نشان می‌دهد که مدیریت کیفیت هوا نباید صرفاً بر کاهش یک یا دو آلاینده خاص متمرکز شود، بلکه باید به‌عنوان یک سیستم پیچیده و پویا در نظر گرفته شود که در آن کاهش یک آلاینده ممکن است منجر به افزایش آلاینده دیگر شود. بنابراین، سیاست‌های آینده باید با نگاهی جامع‌تر و با در نظر گرفتن تمام واکنش‌های شیمیایی جو طراحی شوند.

هم‌چنین، یافته‌های این پژوهش نشان داد که علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه در کاهش آلودگی هوای لندن، نابرابری‌های چشمگیری در مواجهه با آلودگی هوا در مناطق مختلف این شهر وجود دارد. مناطق بیرونی لندن مانند بکسلی، هیورینگ و ساتن، بالاترین میزان مرگ منتسب به آلودگی هوا را تجربه می‌کنند که نشان‌دهنده لزوم توجه ویژه در سلامت و حمایت از گروه‌های آسیب‌پذیر در طراحی سیاست‌های کاهش آلودگی است. هم‌چنین تأثیرات مثبت ULEZ بر سلامت کودکان و کاهش بستری‌های قلبی-عروقی، نشان‌دهنده پیامدهای فراتر از بهبود کیفیت هوا است که بر ضرورت تداوم و تشدید این سیاست‌ها تأکید دارد (۲۰، ۲۱).

با توجه به اشتراکات ساختاری میان لندن و مشهد (هم‌چون تراکم جمعیت، تمرکز حمل‌ونقل و معضل وارونگی دما) و با عنایت به روند صعودی غلظت PM_{2.5} در مشهد (افزایش از ۲۸/۳۰ به ۳۵/۵ میکروگرم بر مترمکعب طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴) و بار قابل توجه بیماری‌های منتسب به آن که سالانه هزاران مرگ را در این کلانشهر به دنبال دارد، الگوبرداری هدفمند از تجربه لندن با بومی‌سازی متناسب با شرایط فرهنگی، اجتماعی و

^۸ Spillover Effect

اقتصادی ایران، نه تنها امکان پذیر، بلکه ضروری به نظر می‌رسد. پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با رویکرد مدل سازی، تأثیر سناریوهای مختلف سیاستی بر کیفیت هوای مشهد را کمی سازی کنند و به ویژه بر پیامدهای عدالت در سلامت و حفاظت از گروه های آسیب پذیر متمرکز شوند. هم چنین انجام پژوهش های مشابه در سایر کلانشهرهای ایران از جمله تهران، اصفهان و اهواز می تواند به درک بهتر الگوهای آلودگی و ارائه راهکارهای متناسب با شرایط هر شهر کمک شایانی نماید.

تطبيق سیاست های لندن با وضعیت مشهد و پیشنهادهای عملیاتی (قابلیت بومی سازی برای شهر مشهد)

با توجه به موفقیت های چشمگیر سیاست های کنترل آلودگی در لندن و وجود معضل مشترک آلودگی هوا در کلانشهر مشهد، الگوبرداری هدفمند از تجربه لندن با بومی سازی مناسب می تواند گام مؤثری در کاهش آلودگی هوای مشهد باشد. مشهد با جمعیت ثابت ۳/۵ میلیون نفر و جمعیت شناور زائران (بیش از ۲۵ میلیون نفر در سال) و قرارگیری در منطقه ای با شرایط اقلیمی خاص و پتانسیل بالای وارونگی دما، یکی از آلوده ترین کلانشهرهای ایران است که سالانه هزاران مرگ منتسب به آلودگی هوا در آن رخ می دهد (۶، ۲۳). بر اساس یافته های این پژوهش و با توجه به مطالعات داخلی، پیشنهادات عملیاتی زیر برای مشهد قابل ارائه است:

در حوزه منطقه بندی مبتنی بر آلاینده، در حالی که لندن با اجرای منطقه فوق کم انتشار ULEZ مبتنی بر استانداردهای یورو ۴ برای خودروهای بنزینی و یورو ۶ برای خودروهای دیزلی موفق به کاهش ۴۴ درصدی NO₂ در مرکز شهر شده است، طرح ترافیک مشهد صرفاً بر اساس محدودیت زمانی- مکانی (زوج و فرد) بدون توجه به استاندارد آلایندهی خودروها عمل می کند. بنابراین پیشنهاد می شود منطقه پایلوت در محدوده ی حرم مطهر با معیار معاینه فنی بروز (خودروهای سال ۱۴۰۰ به بعد) ایجاد و عوارض پلکانی بر اساس سطح آلایندهی خودروها اعمال گردد.

در زمینه نوسازی ناوگان حمل و نقل عمومی، لندن با هدف آلایندهی صفر تا سال ۲۰۳۰، برقی سازی تدریجی اتوبوس ها و تاکسی ها را در دستور کار دارد، در حالی که میانگین سن ناوگان اتوبوسرانی مشهد بالای ۱۰ سال بوده و تعداد اتوبوس های برقی بسیار محدود است. هم چنین تاکسی های فرسوده با موتورهای کاربراتوری همچنان در سطح شهر تردد دارند. استفاده از ظرفیت تهاثر آلایندهی صنایع بزرگ مانند فولاد خراسان و پالایشگاه برای تأمین اتوبوس های برقی و گاز طبیعی فشرده جدید می تواند راهگشا باشد.

در حوزه زیرساخت دوچرخه و پیاده روی، با الهام از تجربه لندن در احداث بیش از ۴۰۰ کیلومتر مسیر دوچرخه سواری ایمن و پیوسته، پیشنهاد می شود مسیرهای پراکنده و نایمن موجود در مشهد (وکیل آباد، احمدآباد، دانشگاه) به یک شبکه منسجم با اولویت اطراف حرم مطهر و پارکینگ های طبقاتی متصل گردند.

در حوزه پایش کیفیت هوا، لندن با شبکه گسترده ۱۳۲ ایستگاه شامل ایستگاه های کنار جاده ای، زمینه شهری و حومه با دسترسی آنلاین عمومی، الگوی مناسبی برای مشهد است که در حال حاضر تنها حدود ۱۲ ایستگاه فعال با پراکندگی نامناسب و عدم شفافیت کامل داده ها دارد. افزایش تعداد ایستگاه های سنجش به حداقل ۳۰ ایستگاه با توزیع مناسب و راه اندازی سامانه آنلاین و رایگان اطلاع رسانی لحظه ای کیفیت هوا برای عموم شهروندان ضروری به نظر می رسد.

در زمینه حمایت از اقشار آسیب پذیر، در حالی که لندن طرح اسقاط خودروی فرسوده با پرداخت تسهیلات و ارائه یارانه حمل و نقل عمومی به ساکنان مناطق مشمول را اجرا می کند، در مشهد برنامه حمایتی مشخصی برای ساکنان کم درآمد مناطق مشمول طرح ترافیک وجود ندارد. اختصاص تسهیلات کم بهره برای جایگزینی خودروهای فرسوده ساکنان محدوده و ارائه خدمات حمل و نقل عمومی رایگان یا یارانه ای در روزهای دارای شاخص آلودگی بالا پیشنهاد می گردد.

اجرای موفق پیشنهادات فوق نیازمند مشخص کردن سازمان‌های متولی و هماهنگی بین‌بخشی است. بر اساس گزارش‌های منتشرشده توسط شهرداری مشهد، در حوزه حمل‌ونقل و ترافیک، سازمان مدیریت و مهندسی شبکه حمل‌ونقل و سازمان توسعه ارتباطات ترافیکی متولی توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل پاک هستند. طبق مصوبات شورای اسلامی شهر مشهد، در زمینه نوسازی

ناوگان، شرکت واحد اتوبوسرانی مشهد متولی ورود اتوبوس‌ها و تاکسی‌های برقی است. بر اساس مصوبه شورای اسلامی شهر مشهد در خصوص باغبانم، سازمان پارک‌ها و فضای سبز، شهرداری تسهیلات تشویقی برای احداث بام سبز اعطا می‌کند و ضوابط طرح تفصیلی مشهد نیز الزامات مربوط به بام سبز را تعیین کرده است. طبق گزارش مرکز پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی شهرداری مشهد، در زمینه پایش کیفیت هوا، این مرکز با همکاری اداره کل حفاظت محیط‌زیست خراسان‌رضوی شبکه‌ای متشکل از ایستگاه‌های پایش را مدیریت می‌کند. بر اساس اطلاعات ستاد نوسازی ناوگان و اسقاط خودروهای فرسوده، در حوزه اسقاط خودروهای فرسوده، این ستاد وابسته به وزارت صنعت، معدن و تجارت، مرجع رسمی ثبت‌نام و ارائه تسهیلات است. در نهایت، حمایت از اقشار آسیب‌پذیر نیازمند همکاری شهرداری مشهد و سازمان بهزیستی خراسان‌رضوی است.

در نهایت، در حوزه فرهنگ‌سازی و آموزش عمومی، لندن با اجرای کمپین‌های گسترده «هوای پاک» در مدارس و

3. Strobl K, Irfan SA, Masood H, Latif N, Kurmi O. Association between PM10 exposure and risk of myocardial infarction in adults: A systematic review and meta-analysis. PLoS One. 2024;19(5):e0301374. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301374> PMID:38691568 PMCID:PMC11062553

4. Orellano P, Reynoso J, Quaranta N, Bardach A, Ciapponi A. Short-term exposure to particulate matter (PM10 and PM2. 5), nitrogen dioxide (NO2), and ozone (O3) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. Environment international. 2020;142:105876.

رسانه‌ها و مشارکت شهروندان در تصمیم‌گیری‌ها، موفق به تغییر رفتار سفر شهروندان شده است؛ به‌طوری‌که سهم سفر با خودروی شخصی از ۴۷ درصد در سال ۲۰۰۲ به ۳۷ درصد در سال ۲۰۱۷ کاهش یافته است. در مشهد اما آموزش‌ها محدود و عمدتاً در روزهای اضطرار آلودگی خلاصه می‌شود. گنجاندن مبحث آلودگی هوا و حمل‌ونقل پایدار در کتب درسی مدارس مشهد و اجرای برنامه‌های تشویقی برای استفاده از حمل‌ونقل عمومی و دوچرخه در ایام غیرتعطیل می‌تواند زمینه‌ساز تغییرات پایدار در رفتار شهروندان باشد.

تشکر و قدردانی: از کلیه اساتید و همکارانی که در تهیه این مقاله همکاری نمودند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

تعارض منافع: نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی: این مقاله کاملاً مستقل نوشته شده و بدون دریافت حمایت مالی از هیچ سازمان یا نهاد خاصی انجام شده است. **ملاحظات اخلاقی:** این مطالعه از نوع مروری-تحلیلی بوده و بر اساس داده‌های ثانویه منتشرشده انجام شده است و نویسندگان تمامی نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه و تحریف داده‌ها را در این مقاله رعایت نموده‌اند.

سهم نویسندگان: مشارکت نویسندگان محترم در این مقاله بدین صورت می‌باشد: خانم سعیده فولادی: نگارش و ویرایش نهایی مقاله، خانم نیره نعیمی: جمع‌آوری داده‌ها و خانم دکتر مریم سرخوش: ارائه ایده پژوهشی، طراحی مطالعه، بازبینی و مرور را انجام داده‌اند.

References

1. Alliance N. State of Global Air 2025: A report on air pollution and its role in the world's leading causes of death. Boston, MA: Health Effects Institute. 2025.
2. Murage P, Milner J, Fitch A, Macintyre HL, Vieno M, Maji KJ, et al. A novel approach using synthetic population models to assess how urban vegetation alters health inequalities in PM2. 5 exposure. Urban Forestry & Urban Greening. 2026;129665. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2026.129665>

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876>

PMid:32590284

5. Mansouri Daneshvar MR, Khatami R, Ebrahimi M. An analysis of urban heat island based on the temperature inversion across the atmospheric boundary layer in Mashhad, Iran (2018-2022). *Spatial Information Research*. 2024;32(5):607-22.

<https://doi.org/10.1007/s41324-024-00585-x>

6. Kermani M, Farkhani EM, Joulaei F, Jafari AJ, Shahsavani A. A time-series analysis of the short-term effects of daily PM_{2.5} exposure on cause-specific mortality in Mashhad, Iran (2019-2024). *Scientific Reports*. 2026. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-48267-y> PMid:41965437 PMCID:PMC13230966

7. Hadei M, Hopke PK, Shahsavani A, Raeisi A, Jafari AJ, Yarahmadi M, et al. Effect of short-term exposure to air pollution on COVID-19 mortality and morbidity in Iranian cities. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2021;19(2):1807-16. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00736-4> PMid:34729185 PMCID:PMC8553398

8. Naimi N, Sarkhosh M, Nabavi BF, Najafpoor A, Musa Farkhani E. Estimating the burden of diseases attributed to PM_{2.5} using the AirQ+ software in Mashhad during 2016-2021. *Scientific reports*. 2024;14(1):24462. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74328-1> PMid:39424839 PMCID:PMC11489694

9. Karimi B, Samadi S. Mortality and hospitalizations due to cardiovascular and respiratory diseases associated with air pollution in Iran: A systematic review and meta-analysis. *Atmospheric environment*. 2019;198:438-47.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.063>

10. Karimi B, Samadi S. Long-term exposure to air pollution on cardio-respiratory, and lung cancer mortality: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2024;22(1):75-95.

<https://doi.org/10.1007/s40201-024-00900-6>

PMid:38887768 PMCID:PMC11180069

11. Werner L, Roche R, Aletta F, Ma D, Singal H, John H, et al. London Assembly Call for Evidence on Progress on priorities: London's Environmental temperature check. 2026.

12. Saleem Khan M, Barratt B, Davies B, Simmonds NJ, Piel FB. Impact of air pollution on lung function in cystic fibrosis over a decade in London: a UK CF Registry study. *thorax*. 2026;81(9):845-52.

<https://doi.org/10.1136/thorax-2024-222710>

PMid:41644139 PMCID:PMC13479626

13. Klapsa D, Wilton T, Zealand A, Bujaki E, Saxentoff E, Troman C, et al. Sustained detection of type 2 poliovirus in London sewage between February and July, 2022, by enhanced environmental surveillance. *The Lancet*. 2022;400(10362):1531-8.

[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)01804-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01804-9) PMid:36243024 PMCID:PMC9627700

14. Organization WH. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: executive summary: World Health Organization; 2021.

15. Khomenko S, Cirach M, Pereira-Barboza E, Mueller N, Barrera-Gómez J, Rojas-Rueda D, et al. Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment. *The Lancet Planetary Health*. 2021;5(3):e121-e34.

[https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30272-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30272-2) PMid:33482109

16. Sugarman GL. How the policy making process for air pollution reduction with particular reference to nitrogen dioxide can be improved to more effectively reduce school children's exposure in London: University of Surrey; 2024.

17. Gregg DJ, Tompkins J, Cordell RL, Brown AS, Smallbone KL, Vande Hey JD, et al. The impacts of the Ultra Low Emission Zone (ULEZ) and COVID-19 restrictions on air quality in central London-evidence for an increase in small particles. *Atmospheric*

Environment. 2025;121668.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2025.121668>

18. Zoqi MJ, Dehqanpour Aliaqa A, Rasouli SJ, Mansouri Daneshvar MR. Daily PM2. 5 Prediction and Pollution Episode Detection Using MLP Neural Networks Across Urban Monitoring Sites with Varied Land Uses. Environmental Resources Research. 2026.

19. Khreis H, Williams M, Lad C, Fevyer D, Lavery AA, Jinks D, et al. The modelled impact of low traffic neighbourhoods (LTNs) on air pollution: findings from 5 schemes in London. Environmental Research. 2026;125093.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2026.125093>
 PMid:42342017

20. Wood HE, Hajmohammadi H, Dove RE, Scales J, Tsocheva I, Chavda J, et al. Impact of the Ultra Low Emission Zone on lung function growth in children in London, UK: a prospective parallel cohort study. The Lancet Public Health. 2026.

21. Chamberlain RC, Hodsoll J, Cai C, Griffiths C, Kelly F, Beevers S, et al.

Association of vehicle emission charging zones with adult emergency hospital

admissions: an interrupted time series analysis of the toxicity charge and Ultra Low Emission Zone in London, UK. Environment International. 2026;110324.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2026.110324>
 PMid:42214233

22. Font A, Guiseppin L, Blangiardo M, Ghersi V, Fuller GW. A tale of two cities: is air pollution improving in Paris and London? Environmental Pollution. 2019;249:1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.040>
 PMid:30875529

23. Angali KA, Farhadi M, Neisi A, Cheraghian B, Ahmadi M, Takdastan A, et al. The effect of consuming bread contaminated with heavy metals on cardiovascular disease and calculating its risk assessment. Scientific reports. 2025;15(1):2710.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-86240-3>
 PMid:39837925 PMCID:PMC11751297