



Assessing the Impact of Urban Green Cover on Air Pollution and Mortality Rates in Tehran

ARTICLE INFO

Article Type

Applied research

Authors

Kamyab Kiani¹
Mahdi Zandieh*²
Hossein Medi³
Mohammad Mehdi Zarrabi⁴
Maryam Azmoodeh⁵

How to cite this article

Ma
URL: <http://>

ABSTRACT

Aims: This study aims to investigate and analyze the impact of urban green cover, particularly trees, on reducing air pollution and mortality rates associated with atmospheric pollutants across Tehran's 22 districts.

Methods: The research methodology employed advanced simulations utilizing the i-Tree Canopy tool and air pollution dispersion models. Key pollutants assessed included fine particulate matter (PM_{2.5}), coarse particulate matter (PM₁₀), carbon monoxide, nitrogen dioxide, ozone, and sulfur dioxide. Data on green cover, including per capita green space, area, and number of green spaces, alongside pollutant concentrations and their health impacts, were analyzed across Tehran's districts.

Findings: District 22, with a per capita green space of 62.92 m² and substantial pollutant removal capacities, contributed a 60.80% impact on reducing mortality in Tehran. Districts 1 and 4 also demonstrated favorable performance, with 13.24% and 12.82% impacts, respectively, attributed to their high per capita green spaces. Conversely, districts 7, 8, 9, 10, and 12, with low per capita green spaces, exhibited negligible impacts (below 0.1%), highlighting significant environmental inequities. Green cover effectively reduced PM_{2.5} and SO₂, which are associated with 2.9% and 2.8% increases in respiratory mortality per unit increase in concentration, respectively.

Conclusion: Targeted development of green spaces in underserved districts, especially central and southern areas, coupled with strategies to reduce pollutant emissions from mobile and stationary sources, is essential for urban sustainability and public health. Integrating green technologies, such as green roofs and walls, and continuous air quality monitoring are recommended to address environmental disparities and enhance community well-being.

Keywords: Urban green cover, air pollution, mortality, Tehran, particulate matter, air quality, urban sustainability.

CITATION LINKS

1- Ph.D. student in Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University (IKIU), Iran.

2. Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University (IKIU), Iran.
Email: zandieh@arc.ikiu.ac.ir

3. Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University (IKIU), Iran.

4. Associate Professor, Department of Horticulture Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University (IKIU), Iran.

5- Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University (IKIU), Iran.

Article History

Received:

Accepted:

Published:

[1]. Ghorbankhani Z, Zarrabi MM, Ghorbankhani M. The significance and benefits of green.... [2]. Aghazadeh F, Hejazi S, Jafari M, Delavar MR. Spatial-temporal analysis of day-night time.... [3]. Venter ZS, Aunan K, Chowdhury S, Lelieveld J. Reassessing the role of urban green space in.... [4]. Vatani M, Kiani K, Mahdaviinejad M, [6]. Kermani M, Naddafi K, Yunesian M, Rastkari N, Nabizadeh R, Farhadi M, et al. Effect of air.... [7]. BBC News. Tehran's air pollution [8]. Iran Front Page. Iran Health Ministry: Tehran 19th most polluted capital in world. 2024 [cited.... [9]. Karimi B, Shokrinezhad B. Air pollution and the number.... [10]. Karimi Moshaver M, Mansouri SA, Adibi A. Relationship Between.... [11]. Hoek G, Krishnan RM, Beelen R, Peters A, Ostro.... [12]. Nafstad P, Håland E, Lund E, Magnus P. Urban air pollution and mortality.... [13]. Dong GH, Chen H, Wang B, Wang Y, Jin Y, Sun L, et al. Long-term exposure to ambient air.... [14]. Zhou M, Liu Y, He Y, Li J, Liang F, Kinney PL, et al. The associations.... [15]. Diener A, Mudu P. How can vegetation protect us from air pollution?.... [16]. Bayat R, Hassanzadeh A, Naddafi K, Yunesian M, Rastkari.... [17]. Jaafari S, Malakoutikhah S, Sadr M, Yunesian M,.... [18]. Venter ZS, Aunan K, Chowdhury S, Lelieveld.... [19]. Rojas-Rueda D, de Nazelle A, Teixidó O,.... [20]. Barboza EP, Vermeulen R, Strak M, de Hoogh.... [21]. Bauwelinck M, Dendoncker K, Van Poppel F, De Vlieger I,.... [22]. Twohig-Bennett C, Jones A. The health benefits of the...



ارزیابی اثرگذاری پوشش سبز بر آلودگی هوا و نرخ مرگ و میر در شهر تهران

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: تحقیق کاربردی

نویسندگان

کامیاب کیانی^۱
مهدی زندیه^{۲*}
حسین مدی^۳
محمد مهدی ضرابی^۴
مریم آزموده^۵

اهداف: این پژوهش با هدف بررسی و تحلیل تأثیر پوشش سبز شهری، به‌ویژه درختان، بر کاهش آلودگی هوا و نرخ مرگ‌ومیر ناشی از آلودگی هوا در مناطق ۲۲ گانه تهران انجام شد. مطالعه به‌دنبال شناسایی نابرابری‌های زیست‌محیطی در توزیع پوشش سبز و ارائه راهکارهایی برای بهبود کیفیت هوا و سلامت عمومی ساکنان تهران بود، با تأکید بر نقش پوشش گیاهی در کاهش اثرات مخرب آلاینده‌ها بر بیماری‌های تنفسی و قلبی‌عروقی.

روش‌ها: روش پژوهش مبتنی بر شبیه‌سازی‌های پیشرفته با استفاده از ابزار کنوپی و مدل پراکنش آلودگی بود. آلاینده‌های مورد بررسی شامل ذرات معلق ریز ($PM_{2.5}$)، ذرات معلق درشت (PM_{10})، مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، اوزون (O_3) و دی‌اکسید گوگرد (SO_2) بودند. داده‌های پوشش سبز، غلظت آلاینده‌ها و اثرات آن‌ها بر سلامت عمومی در مناطق مختلف تحلیل شد و همبستگی داده‌ها مورد سنجش قرار گرفت است.

یافته‌ها: منطقه ۲۲ با سرانه فضای سبز ۶۲.۹۲ مترمربع و تصفیه مقادیر بالای آلاینده‌ها، تأثیر ۶۰.۸۰ درصدی در کاهش مرگ‌ومیر شهر تهران داشت. مناطق ۱ و ۴ نیز با تأثیرات ۱۳.۲۴ و ۱۲.۸۲ درصد عملکرد مطلوبی نشان دادند. در مقابل، مناطق ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۲ با سرانه فضای سبز پایین (۰.۷۶ تا ۲.۵۸ مترمربع) تأثیر زیر ۰.۱ درصد داشتند.

نتیجه‌گیری: پوشش سبز، به‌ویژه در مناطق با سرانه بالا، نقش کلیدی در کاهش آلودگی هوا و مرگ و میر دارد. توسعه هدفمند فضاهای سبز در مناطق کم‌برخوردار، به‌ویژه مناطق مرکزی و جنوبی، همراه با کاهش انتشار آلاینده‌ها، برای پایداری شهری و سلامت عمومی ضروری است.

کلیدواژه‌ها: پوشش سبز، آلودگی هوا، مرگ و میر، تهران، ذرات معلق، کیفیت هوا، پایداری شهری.

۱. پژوهشگر دکتری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
۲. * استاد گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران (نویسنده مسئول).
۳. دانشیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
۴. دانشیار گروه مهندسی علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
۵. استادیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

نویسنده مسئول *

zandieh@arc.ikiu.ac.ir

تاریخ مقاله

تاریخ دریافت:

تاریخ پذیرش:

تاریخ انتشار:

ارجاع‌دهی

پ

URL: <http://>

مقدمه

شهرنشینی رشد و توسعه بی سابقه‌ای را برای شهرهای سراسر جهان به ارمغان آورده و آن‌ها را به مراکز پرجنب‌وجوش صنعت، تجارت و فرهنگ تبدیل کرده است. با این حال، این گسترش سریع شهری همچنین به افزایش قابل توجه سطح آلودگی منجر شده و کلان‌شهرهای پرجمعیت با شدت بیشتری با تخریب محیط زیست مواجه شده‌اند [۱].

کلان‌شهر تهران، با مساحتی جغرافیایی بالغ بر ۷۳۰ کیلومتر مربع، مجموعه‌ای از عناصر متضاد در مناطق ۲۲ گانه خود است. کوه‌های باشکوهی که در مرز شمالی شهر قرار دارند، تأثیر قابل توجهی بر پویایی گردش هوا در شهر دارند. این کوه‌ها، با وجود ارائه مناظر زیبا و فرصت‌های تفریحی، با به دام انداختن آلاینده‌ها به مشکلات بدنام کیفیت هوای تهران دامن می‌زنند. رودخانه‌هایی که از میان دره‌های طبیعی این کوه‌ها جاری هستند، به عنوان شریان حیاتی اکوسیستم‌ها در میان آشوب شهری عمل می‌کنند. این رودخانه‌ها که آب ضروری برای مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی را تأمین می‌کند، از معیشت، تنوع زیستی و تعادل اکولوژیکی در مناطق مختلف پشتیبانی می‌کند و یادآور رابطه ظریف بین طبیعت و شهر است [۲].

این پژوهش به بررسی رابطه بین پوشش سبز شهری، به‌ویژه درختان، و کیفیت هوا در مناطق ۲۲ گانه تهران می‌پردازد و بر میزان متفاوت تأثیر پوشش سبز بر آلاینده‌ها و فواید مادی آنها در هر منطقه تمرکز دارد. فضاهای سبز که زمانی در بسیاری از مناطق فراوان بودند، اکنون با رشد تهران برای سلامت شهروندان حیاتی هستند. مطالعات نشان می‌دهند که فضاهای سبز استرس، خطر بیماری‌های مزمن و سلامت روان را بهبود می‌بخشند. با این حال، با وجود نیاز روزافزون جمعیت به فضاهای سبز، گسترش شهری این فضاها را در چندین منطقه کاهش داده و نیاز به حفظ این مناطق سبز برای مزایای زیست‌محیطی و سلامتی آن‌ها را برجسته کرده است [۳] - [۴].

تبعیض در فضای سبز در مناطق ۲۲ گانه تهران نمادی تأثیرگذار از چالش‌های پیش روی مناطق سبز شهری این شهر است. بررسی تبعیض در میزان پوشش سبز، به‌ویژه درختان، علل و پیامدهای احتمالی برای ساکنان و اکوسیستم

هر منطقه شهر تهران را روشن می‌کند. این فضاهای سبز، فراتر از جذابیت بصری، نمایانگر مسائل زیست‌محیطی بزرگ‌تر تهران هستند و تعادل ضروری بین شهرنشینی و پایداری را نشان می‌دهند. این مطالعه بر اهمیت اقدامات پیشگیرانه برای حفظ این دارایی‌های طبیعی ارزشمند و عدم تبعیض در تمام مناطق تأکید دارد. در واقع، همان‌طور که در اینجا نشان داده شده، حفظ پوشش سبز تنها به حفظ مناظر زیبا محدود نمی‌شود، بلکه به تضمین رفاه مردم تهران برای نسل‌های آینده مربوط است.

تأثیر حیاتی آلودگی بر سلامت عمومی، به‌ویژه بیماری‌های تنفسی و قلبی‌عروقی، اهمیت این پژوهش را برجسته می‌کند. آمارهای اخیر از تهران ارتباط نگران‌کننده‌ای بین سطح آلودگی شهر و افزایش مشکلات قلبی و تنفسی در میان ساکنان نشان می‌دهد. در دهه‌های اخیر، موارد بیماری انسدادی مزمن ریه و آسم به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و نیاز فوری به مداخله را نشان می‌دهد. علاوه بر این، اختلالات قلبی‌عروقی تشدید شده توسط آلودگی هوا افزایش یافته و منجر به افزایش حملات قلبی و عوارض مرتبط شده است [۵]. بحران آلودگی هوای تهران به‌وضوح توسط داده‌های منتشر شده در روز هوای پاک توسط وزارت بهداشت ایران نشان‌دهنده از دست رفتن ۴۵,۰۰۰ سال عمر ساکنان در سال ۲۰۱۹ است [۶].

ایران از نظر آلودگی هوا در خاورمیانه رتبه ششم و در میان ۱۳۱ کشور جهان رتبه ۲۱ را دارد، و تهران از نظر غلظت ذرات معلق در میان پایتخت‌ها رتبه ۱۹ را داراست [۷]. طبق داده‌های اورژانس تهران، مأموریت‌های مرتبط با مشکلات تنفسی و قلبی در ۱۴ سال گذشته حدود ۱۵ درصد افزایش یافته است. این ارقام اهمیت توجه بیشتر به سلامت عمومی و نیاز به گسترش خدمات اورژانس پزشکی در تهران را نشان می‌دهد.

در تهران، میانگین غلظت روزانه ذرات معلق در فضای باز 299.8 ± 5.9 میکروگرم بر متر مکعب برای $PM_{2.5}$ و 78.7 ± 14.1 میکروگرم بر متر مکعب برای PM_{10} به ترتیب ۱.۶ و ۱.۲ برابر رهنمودهای کیفیت هوای سازمان بهداشت جهانی (WHO) را که به ترتیب ۲۵ میکروگرم بر متر مکعب برای $PM_{2.5}$ و ۵۰ میکروگرم بر متر مکعب برای PM_{10} تعیین

گزارش شده توسط [۱۱] و افزایش ۱۶۷ درصدی گزارش شده توسط [۱۲] در مورد آلاینده‌های گازی، SO₂ قوی‌ترین ارتباط را با مرگ‌ومیر تنفسی نشان داد [۱۱، ۱۲]. افزایش ۱ ppb در SO₂ به‌طور قابل‌توجهی نرخ مرگ‌ومیر را افزایش داد، با یافته‌هایی که در مطالعات آسیایی سازگار بود اما در اروپا و آمریکای شمالی به دلیل سطوح پایین‌تر SO₂ در فصول گرم کمتر برجسته بود. به‌طور مشابه، افزایش ۱ ppm در CO با افزایش ۲۰۱ درصدی در مرگ‌ومیر تنفسی (فاصله اطمینان ۹۵٪: ۱۵۵-۳۳٪) مرتبط بود، در حالی که افزایش ۱ ppb در NO₂ با افزایش ۱۵ درصدی (فاصله اطمینان ۹۵٪: ۰۸-۱۵٪) مرتبط بود. قرار گرفتن در معرض O₃ با افزایش ۰۶ درصدی در مرگ‌ومیر (فاصله اطمینان ۹۵٪: ۰۱-۱۱٪) مرتبط بود، به‌ویژه در فصول گرم، اگرچه ناسازگاری‌هایی در مطالعات مختلف وجود دارد [۸-۱۳].

از نظر مکانیکی، مرگ‌ومیر تنفسی مشاهده‌شده به اختلال عملکرد اندوتلیال، استرس اکسیداتیو و التهاب ناشی از ذرات معلق در هوا که حاوی عناصر سمی مانند مس (Cu)، روی (Zn)، نیکل (Ni) و کروم (Cr) هستند، نسبت داده می‌شود.

شده، نقض کرده است. بالاترین غلظت‌های PM_{2.5} در مناطق جنوبی و غربی تهران، به‌ویژه در مناطق ۱۰، ۱۱ و ۱۵، ثبت شده که عمدتاً ناشی از انتشارات انسانی مانند احتراق سوخت‌های فسیلی و تشدیدشده توسط وارونگی دمایی است که آلاینده‌های هوا را به دام می‌اندازد. منابع متحرک، عمدتاً وسایل نقلیه، ۸۵ تا ۹۰ درصد از کل انتشارات را تشکیل می‌دهند، در حالی که منابع ثابت، از جمله تأسیسات صنعتی و نیروگاه‌ها، ۱۰ تا ۱۵ درصد باقی‌مانده را تشکیل می‌دهند. طوفان‌های گردوغبار نیز سطح ذرات معلق، به‌ویژه PM₁₀ و PM_{2.5}، را در مناطقی مانند ۱۸ و ۲۱ تشدید کرده‌اند [۸، ۹]

یافته‌های کلیدی پیامدهای شدید بهداشتی سطوح بالای آلاینده‌ها را نشان می‌دهند (جدول ۱). افزایش ۱۰ میکروگرم بر متر مکعب در PM_{2.5} با افزایش ۲۰۹ درصدی در مرگ‌ومیر تنفسی مرتبط بود [10]، و افزایش مشابه در PM₁₀ خطر مرگ‌ومیر را ۱۶۲ درصد افزایش داد. نتایج مشابه در مطالعات دیگر گزارش شده است، مانند افزایش ۱۰۱۶ درصدی به ازای ۱۰ میکروگرم بر متر مکعب PM_{2.5}

جدول ۱: اثر گذاری آلاینده ها در شهر تهران بر نرخ مرگ و میر (منبع: [۸])

متغیرهای آلودگی	افزایش در غلظت	تأثیر بر مرگ‌ومیر	گروه آسیب‌پذیر	مکانیسم کلیدی
ذرات معلق با قطر کمتر از ۲.۵ میکرومتر	PM _{2.5}	۱۰+ میکروگرم بر مترمکعب +10 µg/m ³	+۲.۹٪ (فاصله اطمینان ۹۵٪: ۵.۹-۱۲.۶٪)	نقص عملکرد ایمنی
ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر	PM ₁₀	۱۰+ میکروگرم بر مترمکعب +10 µg/m ³	+۱.۶۳٪ (فاصله اطمینان ۹۵٪: ۰.۲۲-۳.۴۶٪)	التهاب، استرس و نقص عملکرد ایمنی
دی‌اکسید گوگرد	SO ₂	۱+ قسمت در میلیارد +1 ppb	قوی‌ترین ارتباط با مرگ‌ومیر تنفسی (+۲.۸٪) افزایش به ازای هر ۱ ppb (افزایش)	آسیب به عملکرد ریه، تحریک راه‌های هوایی
مونوکسید کربن	CO	۱+ قسمت در میلیون +1 ppm	+۲.۱٪ (فاصله اطمینان ۹۵٪: ۱۵۵-۳۳٪)	مهار انتقال اکسیژن
دی‌اکسید نیتروژن	NO ₂	۱+ قسمت در میلیارد +1 ppb	۱.۵٪ (فاصله اطمینان ۹۵٪: ۰.۸-۱۵٪)	عفونت راه‌های هوایی، آسیب به عملکرد ریه
اوزن (تری‌اکسید اکسیژن)	O ₃	۱+ قسمت در میلیارد +1 ppb	+۰.۶٪ (فاصله اطمینان ۹۵٪: ۰.۱-۱.۱٪) (در فصول گرم)	استرس اکسیداتیو، تحریک دستگاه تنفسی

می‌تواند غلظت آلاینده‌هایی مانند نیتروژن دی اکسید و پی ام ۲.۵ را کاهش دهد، اما در مقیاس‌های کوچک‌تر (مانند خیابان‌ها)، ممکن است به دلیل کاهش تهویه، اثرات معکوس داشته باشد [17].

این موضوع برای تهران، با توپوگرافی پیچیده و تأثیر کوه‌های شمالی بر جریان هوا، اهمیت دارد، زیرا مناطق مختلف ممکن است از پوشش سبز به صورت متفاوتی بهره‌مند شوند. مطالعه‌ای در آسیا نشان داد که مناطق با شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) بالاتر، کیفیت هوای بهتری دارند، که برای تهران، به‌ویژه در مناطق آلوده‌تر مانند مناطق جنوبی، کاربرد دارد [۱۴-۱۷].

فضاهای سبز از طریق کاهش آلودگی هوا، بهبود سلامت روان و کاهش اثرات جزیره گرمایی شهری بر سلامت عمومی تأثیر می‌گذارند. روجسا و همکاران (۲۰۱۹) در یک متاآنالیز نشان دادند که دسترسی به فضاهای سبز با کاهش خطر مرگ‌ومیر کلی و بیماری‌های قلبی عروقی مرتبط است، به‌ویژه از طریق کاهش استرس و بهبود فعالیت بدنی [۱۸]. در تهران، که مشکلات تنفسی و قلبی عروقی به دلیل آلودگی هوا افزایش یافته است، این یافته‌ها بر اهمیت پوشش سبز تأکید دارند [۱۵، ۱۶].

مطالعه بایوولینک و همکاران (۲۰۲۱) و همچنین باربوزا و همکاران (۲۰۲۱) نشان می‌دهد که دسترسی به فضاهای سبز عمومی با کاهش مرگ‌ومیر قلبی عروقی مرتبط است، به‌ویژه در شهرهایی با پوشش سبز مناسب [19, 20]. در تهران، مناطق با پوشش سبز متراکم‌تر، مانند مناطق ۱ و ۳، از نظر سلامت عمومی وضعیت بهتری دارند، در حالی که مناطق جنوبی مانند ۱۰ و ۱۵ با کمبود پوشش سبز مواجه‌اند [۱۵، ۱۶]. علاوه بر این، تیوهیگ بنت و جونز (2018) و همچنین روجاس و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که فضاهای سبز از طریق کاهش استرس روانی و بهبود سلامت روان، به کاهش فشار خون و بیماری‌های مزمن کمک می‌کنند، که برای تهران با افزایش مشکلات سلامتی مرتبط با آلودگی اهمیت دارد [۱۸، ۲۱]. نابرابری در دسترسی به فضاهای سبز یکی از چالش‌های اصلی در شهرهای بزرگ است. میلر و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که مناطق با درآمد پایین‌تر معمولاً پوشش سبز کمتری دارند، که با افزایش مشکلات سلامتی

هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) موجود بر سطح ذرات نیز با تولید گونه‌های اکسیژن واکنشی (ROS) استرس اکسیداتیو را تشدید می‌کنند. جمعیت‌های آسیب‌پذیر، به‌ویژه افراد بالای ۶۵ سال، در مقایسه با گروه‌های سنی جوان‌تر، به‌طور نامتناسبی تحت تأثیر قرار گرفتن در معرض PM_{2.5}، PM₁₀ و SO₂ قرار دارند [۸، ۱۳]. مکانیزم‌های فیزیولوژیکی شامل اختلال در سلول‌های اندوتلیال، منجر به تولید اکسید نیتریک، و فعال‌سازی مسیرهای اکسیداتیو است که بیماری‌های تنفسی را تشدید می‌کنند. این یافته‌ها پیامدهای قابل توجهی برای مدیریت کیفیت هوا دارند و بر لزوم تمرکز دوگانه بر کاهش انتشار آلاینده‌ها و حفاظت از فضاهای سبز حیاتی برای کاهش آلودگی در مناطق ۲۲گانه تهران تأکید دارند [۸، ۱۰].

۱. پیشینه و نوآوری پژوهش

بررسی تأثیر پوشش سبز شهری بر کیفیت هوا و سلامت عمومی در کلان‌شهرهایی مانند تهران، که با چالش‌های جدی آلودگی هوا و پیامدهای آن بر سلامت مواجه هستند، به موضوعی کلیدی در تحقیقات زیست‌محیطی و سلامت عمومی تبدیل شده است. این بخش با رویکردی تفسیری - تحلیلی، به بررسی نقش پوشش سبز در کاهش آلودگی هوا، بهبود سلامت عمومی و کاهش نابرابری‌های زیست‌محیطی مبتنی بر مطالعات پژوهشگران می‌پردازد.

فضاهای سبز شهری، به‌ویژه درختان، از طریق مکانیسم‌های رسوب‌گذاری ذرات معلق، جذب گازهای آلاینده و بهبود جریان هوا به کاهش آلودگی هوا کمک می‌کنند. دینر و میودیو (۲۰۲۱) نشان دادند که درختان با برگ‌های پهن می‌توانند ذرات معلق (PM_{2.5} و PM₁₀) را از طریق سطح برگ‌ها جذب کنند، که این فرآیند به نوع گونه گیاهی و چگالی پوشش بستگی دارد [۱۴]. در تهران، که کیفیت هوا تحت تأثیر منابع متحرک مانند وسایل نقلیه و وارونگی دمایی قرار دارد، این مکانیسم می‌تواند نقش مهمی ایفا کند [۱۵، ۱۶].

مطالعات نشان داده‌اند که اثربخشی پوشش سبز به مقیاس فضایی وابسته است. ونتر و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که در مقیاس‌های بزرگ‌تر (مانند سطح شهر)، پوشش درختی

وابسته بوده و تحلیل‌های بلندمدت یا مدل‌سازی‌های پیشرفته برای بررسی اثرات محلی پوشش سبز را در نظر نگرفته‌اند [۱۴]. علاوه بر این، تأثیر نابرابری‌های منطقه‌ای در توزیع پوشش سبز بر سلامت عمومی و کیفیت هوا به صورت جامع بررسی نشده است، به‌ویژه در زمینه ارائه راهکارهای سیاستی برای کاهش این نابرابری‌ها [۱۷، ۲۰، ۲۲]. این پژوهش با استفاده از تحلیل‌های فضایی پیشرفته و تلفیق داده‌های زیست‌محیطی، بهداشتی و اجتماعی، این شکاف‌ها را پر کرده و با تمرکز بر تفاوت‌های منطقه‌ای، راهکارهایی برای توسعه پایدار شهری در تهران ارائه می‌دهد.

این مطالعه، کمک به درک دقیق‌تر از تعامل پیچیده بین سلامت شهروندان، فضاهای سبز شهری و کیفیت هوا در مناطق ۲۲گانه تهران و نمایش وضعیت این مناطق در ارتقاء کیفیت زندگی شهروندان می‌باشد. این پژوهش به دنبال آغاز گفت‌وگو علمی و ارائه بینش‌هایی است که بحث‌های علمی را غنی‌تر کرده و راهنمایی‌های سیاستی برای توسعه شهری پایدار در مواجهه با چالش‌های قرن بیست‌ویکم فراهم می‌کند. با تأکید بر کاهش نابرابری‌های زیست‌محیطی و بهبود سلامت عمومی، این مطالعه به دنبال ارائه راهکارهایی است که نه تنها مناظر طبیعی تهران را حفظ کند، بلکه رفاه نسل‌های آینده را تضمین نماید.

مواد و روش‌ها

روش این پژوهش (شکل ۱)، مبتنی بر بهره‌گیری از نرم‌افزار تخصصی و شبیه‌سازی‌های پیشرفته برای ارزیابی دقیق و جامع تأثیر پوشش سبز، به‌ویژه درختان، بر کیفیت هوا و سلامت عمومی در مناطق ۲۲گانه تهران است. این رویکرد چندوجهی با استفاده از ابزار کنوپی و مدل پراکنش آلودگی، امکان تحلیل دقیق داده‌های پوشش سبز، غلظت آلاینده‌ها و اثرات آن‌ها بر سلامت ساکنان را فراهم می‌کند. در این پژوهش، مولفه‌های آلودگی هوا که مورد سنجش قرار می‌گیرند شامل ذرات معلق ریز با قطر کمتر از ۲.۵ میکرون (PM2.5)، ذرات معلق درشت با قطر کمتر از ۱۰ میکرون (PM10)، مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO2)، اوزون (O3) و دی‌اکسید گوگرد (SO2) هستند. این مولفه‌ها به دلیل تأثیرات قابل توجه‌شان بر سلامت انسان و طول عمر، به عنوان شاخص‌های کلیدی انتخاب شده‌اند. ذرات

مرتبط است [۲۲]. در تهران، مناطق شمالی مانند ۱ و ۳ پوشش درختی بیشتری نسبت به مناطق جنوبی مانند ۱۰ و ۱۵ دارند، که این نابرابری با افزایش آلودگی در مناطق محروم تشدید می‌شود [۱۵-۱۶]. مطالعه بایوک و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که افزایش دسترسی به فضاهای سبز عمومی می‌تواند نابرابری‌های سلامت را کاهش دهد، که برای تهران، با تفاوت‌های منطقه‌ای قابل توجه، راهنمایی مهمی ارائه می‌دهد [۲۰].

تحقیقات موجود با محدودیت‌هایی مانند وابستگی به داده‌های مقطعی، تفاوت در روش‌های اندازه‌گیری پوشش سبز و تأثیرات منفی احتمالی مانند گرده‌های آلرژی‌زا مواجه هستند [۱۴، ۲۳]. در تهران، غلظت بالای آلاینده‌ها ممکن است اثربخشی پوشش سبز را محدود کند [۱۵، ۱۶]. همچنین، کمبود داده‌های بلندمدت در مورد تغییرات پوشش سبز در مناطق ۲۲گانه تحلیل‌های دقیق را دشوار می‌کند [۱۶، ۲۴]. این مطالعه با تمرکز بر تفاوت‌های منطقه‌ای در مناطق ۲۲گانه تهران و استفاده از تحلیل‌های فضایی پیشرفته، رویکردی نوآورانه ارائه می‌دهد. با تلفیق داده‌های زیست‌محیطی، بهداشتی و اجتماعی و بررسی اثرات محلی، این پژوهش از مطالعات کلی پیشین متمایز است و راهکارهای سیاستی برای کاهش نابرابری‌های زیست‌محیطی و بهبود سلامت عمومی در تهران ارائه می‌دهد.

با کمک به درک دقیق‌تر از تعامل پیچیده بین سلامت شهروندان، فضاهای سبز شهری و کیفیت هوا در مناطق ۲۲گانه تهران، هدف نهایی این مطالعه آغاز گفت‌وگو علمی و اطلاع‌رسانی به تصمیم‌گیری‌های سیاستی است که توسعه شهری پایدار را در میان چالش‌های قرن بیست‌ویکم ترویج می‌دهند. به عبارت دیگر، این پژوهش به دنبال کشف بینش‌هایی است که بحث‌های علمی را غنی‌تر کرده و راهنمایی برای سیاست‌گذاری در حمایت از توسعه شهری پایدار در تهران ارائه دهد.

با وجود مطالعات گسترده در زمینه تأثیر پوشش سبز بر کیفیت هوا و سلامت عمومی، بیشتر پژوهش‌های پیشین در تهران بر مقیاس شهری کلی تمرکز داشته و تفاوت‌های منطقه‌ای در مناطق ۲۲گانه را کمتر بررسی کرده‌اند [۱۵، ۱۶]. همچنین، بسیاری از این مطالعات به داده‌های مقطعی

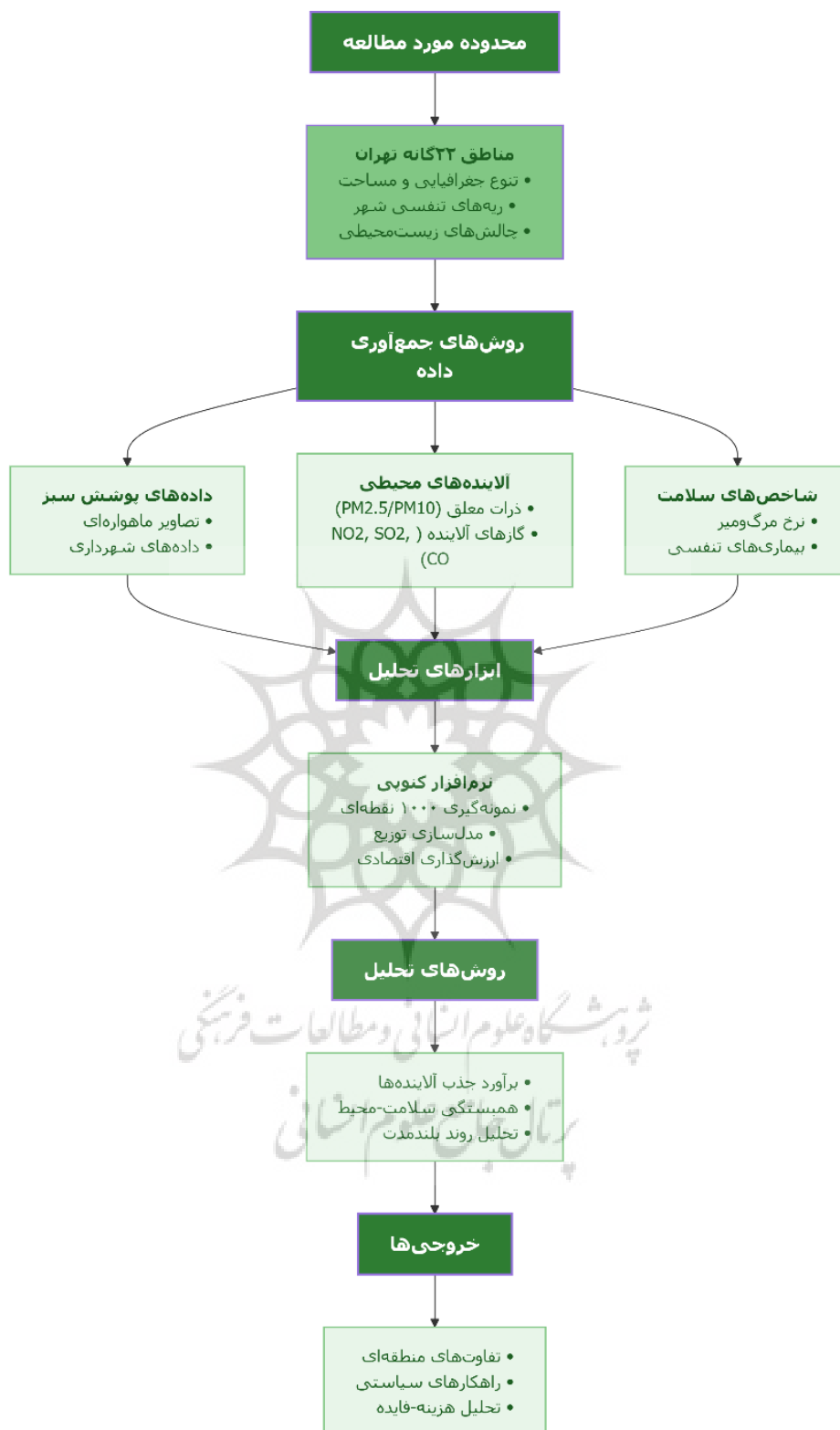
نوآوری پژوهش

این پژوهش از یک رویکرد ترکیبی و نوآورانه بهره می برد که برای اولین بار در مقیاس کلان شهر تهران، تحلیل همبستگی بین پوشش سبز، آلودگی هوا و نرخ مرگ و میر را با استفاده از نرم افزار کنوپی و مدل سازی پیشرفته پراکنش آلاینده ها در سطح مناطق ۲۲ گانه انجام داده است. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر یک یا چند منطقه خاص یا آلاینده های محدود تمرکز داشتند، این مطالعه با تلفیق داده های ماهواره ای با وضوح بالا، داده های میدانی و مدل سازی کامپیوتری، یک تحلیل جامع و یکپارچه ارائه می دهد که نه تنها تأثیر پوشش سبز بر کاهش آلاینده های کلیدی (PM2.5, PM10, CO, NO2, O3, SO2) را در مقیاس شهری بررسی می کند، بلکه ارتباط این تأثیرات را با نرخ مرگ و میر در هر منطقه به صورت کمی و منطقه محور ارزیابی می کند. این رویکرد، با ارائه یک چارچوب چندوجهی برای تحلیل داده ها، امکان شناسایی الگوهای منطقه ای و ارائه توصیه های سیاستی دقیق تر برای توسعه پایدار شهری را فراهم می سازد. همچنین، استفاده از نسخه ۷.۱ نرم افزار کنوپی با نمونه گیری منظم ۱۰۰۰ نقطه ای و کاهش خطای استاندارد، دقت تحلیل را به طور قابل توجهی افزایش داده و به عنوان یک روش پیشرو در ارزیابی خدمات اکوسیستمی در کلان شهرهای با چالش های زیست محیطی پیچیده مانند تهران مطرح است.

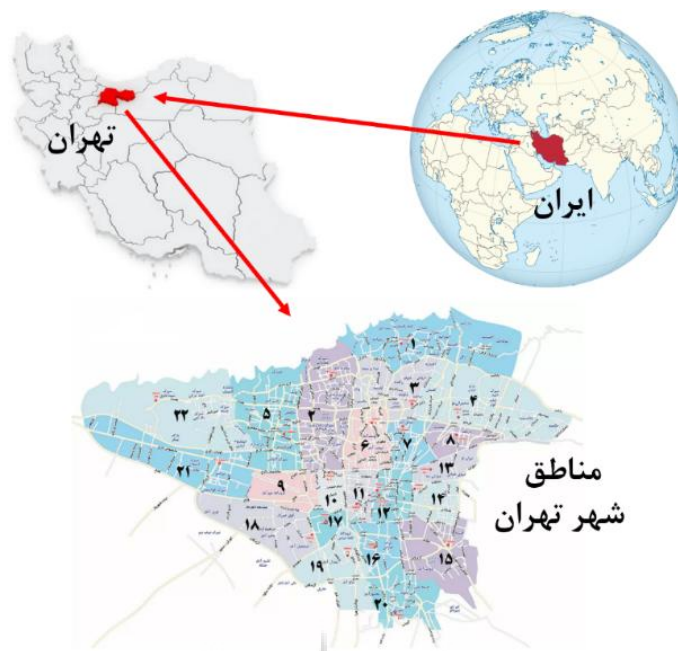
محدوده مطالعه: پوشش های سبز در مناطق ۲۲ گانه تهران، با تنوع جغرافیایی و مساحت های متفاوت، به عنوان یکی از مهم ترین سیستم های سبز شهری در کلان شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته اند. این مناطق، که در نقاط مختلف شهر پراکنده اند، نقش حیاتی به عنوان ریه های تنفسی تهران ایفا می کنند و در حفظ تعادل اکولوژیکی شهر تأثیرگذار هستند. انتخاب این مناطق به دلیل اهمیت آن ها در ارائه خدمات اکوسیستمی، به ویژه کاهش آلودگی هوا، و تأثیر قابل توجه آن ها بر سلامت ساکنان شهر تهران صورت گرفته است. با این حال، گسترش بی رویه شهری، ساخت و سازهای غیر اصولی و کاهش پوشش سبز، این مناطق (مطابق شکل ۲) را از هویت طبیعی اولیه خود دور کرده و چالش های زیست محیطی متعددی را به همراه داشته است.

معلق ریز (PM2.5) و ذرات معلق درشت (PM10) به ترتیب در محدوده ابعادی کمتر از ۲.۵ میکرون و ۱۰ میکرون قرار دارند و به دلیل توانایی نفوذ به سیستم تنفسی و حتی جریان خون، اثرات مخربی بر سلامت قلب و ریه دارند. مونوکسید کربن (CO) گازی بی رنگ و بی بو است که با کاهش ظرفیت حمل اکسیژن خون، به ویژه در گروه های حساس مانند سالمندان و بیماران قلبی-ریوی، خطرناک است. دی اکسید نیتروژن (NO2) و دی اکسید گوگرد (SO2) که به ترتیب در گروه های اکسیدهای نیتروژن (NOx) و اکسیدهای گوگرد (SOx) قرار می گیرند، به دلیل نقش شان در ایجاد مشکلات تنفسی و تشدید بیماری های مزمن تنفسی مانند آسم مورد توجه هستند. اوزون (O3) نیز به عنوان یک آلاینده ثانویه که از واکنش های فتوشیمیایی اکسیدهای نیتروژن (NOx) و ترکیبات آلی فرار (VOCs) تشکیل می شود، به سلامت ریه ها آسیب می رساند و در غلظت های بالا با افزایش نرخ مرگ و میر مرتبط است.

کربن به صورت کلی در این پژوهش به عنوان یک شاخص کلی از آلاینده های کربنی مدنظر است که شامل ترکیبات مختلف کربنی با تأثیرات زیست محیطی و سلامتی است. این مولفه ها به دلیل ارتباط مستقیم شان با گروه های آلاینده اکسیدهای نیتروژن (NOx)، اکسیدهای گوگرد (SOx) و اکسیدهای کربن (COx) انتخاب شده اند، زیرا این گروه ها از مهم ترین عوامل آلودگی هوای شهری هستند و اثرات شناخته شده ای بر بیماری های تنفسی، قلبی-عروقی و افزایش نرخ مرگ و میر دارند. سایر مولفه های آلودگی هوا مانند ترکیبات آلی فرار یا فلزات سنگین در این پژوهش مورد بررسی قرار نگرفته اند، زیرا تأثیرات ذرات معلق ریز (PM2.5)، ذرات معلق درشت (PM10)، مونوکسید کربن (CO)، دی اکسید نیتروژن (NO2)، اوزون (O3) و دی اکسید گوگرد (SO2) بر سلامت عمومی و طول عمر انسان از نظر علمی برجسته تر و مستندتر است و داده های مرتبط با آن ها در تهران به طور گسترده تری در دسترس است. این روش شناسی نه تنها به شناسایی تفاوت های منطقه ای در تأثیر پوشش سبز کمک می کند، بلکه با تحلیل داده های حاصل از شبیه سازی ها و اندازه گیری های میدانی، بینش های نوآورانه ای برای سیاست گذاری پایدار شهری ارائه می دهد.



شکل ۱. روند پژوهش



شکل ۲. محدوده مورد مطالعه

این تحلیل شامل برآورد میزان جذب آلاینده‌ها، مدل‌سازی توزیع پوشش درختی و ارزیابی تأثیرات آن بر سلامت عمومی، به‌ویژه کاهش نرخ مرگ‌ومیر تنفسی و قلبی عروقی، است [۱۴]. این رویکرد ترکیبی، امکان بررسی رابطه بین کاهش پوشش سبز، افزایش آلودگی هوا و اثرات آن بر سلامت عمومی را در مناطق مختلف تهران فراهم کرده و به شناسایی مناطق با نیاز بیشتر به مداخلات زیست‌محیطی کمک می‌کند.

ابزارها و روش‌های تحلیل

برای ارزیابی دقیق تأثیر پوشش سبز بر کیفیت هوا و سلامت عمومی در مناطق ۲۲گانه تهران، این مطالعه از ابزار «آی-تری کنوپی» (i-Tree Canopy) استفاده کرده است که در سال ۲۰۰۶ توسط سرویس جنگل‌داری ایالات متحده و با همکاری وزارت کشاورزی این کشور توسعه یافته است [۲۷]. این پلتفرم مبتنی بر جی‌آی‌اس به‌طور گسترده برای برآورد پوشش سبز شهری و ارزیابی خدمات اکوسیستمی، به‌ویژه حذف آلاینده‌های هوا مانند ذرات معلق ($PM_{2.5}$ و PM_{10})، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، دی‌اکسید کربن (CO_2) و مونوکسید کربن (CO)، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ژئورفرنس‌شده به کار می‌رود [۲۷-۲۹]. اگرچه این ابزار ابتدا برای شرایط ایالات متحده

خدمات اکوسیستمی و اهمیت پوشش سبز

خدمات اکوسیستمی شامل مزایای متعددی است که طبیعت به انسان ارائه می‌دهد، از جمله کاهش آلودگی هوا، تنظیم دما و بهبود سلامت روان و جسم. در تهران، پوشش سبز، به‌ویژه درختان موجود در مناطق ۲۲گانه، به‌عنوان کریدورهای سبز عمل می‌کنند که در برابر آلودگی‌های ناشی از منابع متحرک (مانند وسایل نقلیه) و ثابت (مانند تأسیسات صنعتی) مقاومت می‌کنند. منابع اصلی آلودگی هوا در تهران شامل سیستم حمل‌ونقل، با سهمی حدود ۹۰-۸۵٪ از کل انتشارات، و گسترش بی‌رویه شهری است که کیفیت محیط‌زیست شهر را به شدت تحت تأثیر قرار داده است [۲۵].

ساخت‌وسازهای بلندمرتبه در جهت مخالف بادهای غالب در مناطق غربی و گسترش شهر به سمت دامنه‌های کوهستانی در ارتفاعات بیش از ۱۸۰۰ متر از سطح دریا، به تشدید آلودگی هوا، به‌ویژه از طریق انباشت ذرات معلق، مونوکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن و کربن سیاه، منجر شده است [۹]. مطالعات نشان داده‌اند که افزایش پوشش سبز می‌تواند به کاهش بیماری‌های تنفسی، قلبی عروقی و سایر مشکلات سلامتی مرتبط با آلودگی کمک کند و محیط زندگی سالم‌تری را برای ساکنان فراهم آورد.

به صورت تصادفی در محدوده مطالعاتی تعریف شده توسط فایل شیب جی ای اس توزیع شدند تا نماینده فضایی کل مجموعه باشند [۲۷، ۲۸]. این روش امکان تحلیل دقیق توزیع پوشش درختی و برآورد میزان جذب آلاینده‌ها در مناطق ۲۲ گانه تهران را فراهم کرد.

همبستگی داده های سرانه فضای سبز و کاهش نرخ مرگ و میر

برای بررسی رابطه بین دو متغیر کمی (سرانه فضای سبز و تأثیر در کاهش مرگ و میر)، ابتدا، ضریب همبستگی پیرسون محاسبه گردید. سپس، مدل رگرسیون خطی ساده به صورت $y = a + bx$ (که در آن y درصد تأثیر در کاهش مرگ و میر، x سرانه فضای سبز، a عرض از مبدا و b شیب خط است) استفاده شده است. داده‌ها با استفاده از روش حداقل مربعات تحلیل شدند تا معادله رگرسیون به دست آید. این مدل امکان پیش‌بینی تأثیر کاهش مرگ و میر بر اساس سرانه فضای سبز و ارزیابی اهمیت متغیر مستقل را فراهم کرد.

اعتبارسنجی داده‌ها

داده‌های پوشش سبز در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث با رزولوشن بالا (حداقل ۰.۵ متر) استخراج شده‌اند که از طریق ابزار آی-تری کنوپی پردازش شدند [۲۸]. این تصاویر با استفاده از داده‌های آرشویی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۴ شمسی، امکان تحلیل تغییرات بلندمدت پوشش سبز را فراهم کردند. برای اطمینان از دقت، تصاویر ماهواره‌ای با داده‌های زمینی محدود (مانند نقشه‌های پوشش گیاهی شهرداری تهران) کالیبره شدند، که خطای طبقه‌بندی پوشش درختی را به کمتر از ۵٪ کاهش داد. داده‌های آلودگی هوا از ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای تهران، وابسته به سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران، جمع‌آوری شدند که غلظت آلاینده‌های ($PM_{2.5}$ ، PM_{10} ، NO_2 ، SO_2 ، CO_2 و CO) را با دقت $\pm 10\%$ گزارش می‌کنند. این داده‌ها با استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO) مقایسه شده و با استفاده از مدل‌های آماری (مانند رگرسیون فضایی) اعتبارسنجی شدند تا تأثیر پوشش سبز بر میزان کاهش مرگ و میر به صورت دقیق برآورد شود.

روش جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها

داده‌های این مطالعه از منابع متعددی گردآوری شده‌اند:

طراحی شده بود، اما با تطبیق‌های روش‌شناختی و استفاده از آنالوگ‌های زیست‌اقلیمی، در سطح بین‌المللی، از جمله در تهران، کاربرد داشته است [۱، ۳۰].

آی-تری کنوپی با استفاده از نمونه‌برداری تصادفی نقاط روی تصاویر گوگل ارث، برای ارزیابی‌های گسترده پوشش سبز شهری مناسب است و امکان برآورد خدمات اکوسیستمی کلیدی مانند حذف آلودگی هوا و ذخیره کربن را به همراه ارزش‌های اقتصادی مرتبط فراهم می‌کند [۱۴، ۳۰]. این خروجی‌ها با استفاده از مدل ارزش‌گذاری داخلی ابزار تولید شده و به برنامه‌ریزی شهری مبتنی بر شواهد و تصمیم‌گیری محیط‌زیستی کمک می‌کنند [۱، ۲۷، ۲۸]. برخلاف ابزارهای دیگر مانند آی-تری اکو که نیازمند فهرست‌برداری میدانی دقیق هستند، آی-تری کنوپی به دلیل کارایی و مقیاس‌پذیری، برای تحلیل شهر تهران مناسب‌تر است [۲۷، ۲۸].

برای تحلیل تغییرات بلندمدت پوشش گیاهی در مناطق ۲۲ گانه تهران، این مطالعه از قابلیت تصاویر تاریخی گوگل ارث در آی-تری کنوپی بهره برده است. با نمایش داده‌های نقاط نمونه‌برداری به صورت فایل‌های کی ام زد (kmz)، امکان بررسی مجدد نقاط نمونه‌برداری تصادفی یکسان در تصاویر ماهواره‌ای آرشویی فراهم شد. این روش با استفاده از «محاسبه‌گر تغییرات درختی» (Tree Change Calculator) مقایسه آماری پوشش درختی در دوره‌های زمانی مختلف را با حفظ ثبات در نمونه‌برداری تضمین می‌کند [۲۷، ۲۸]. این رویکرد امکان مدل‌سازی توزیع پوشش درختی و بررسی روندهای کاهش پوشش سبز در سال ۱۴۰۴ شمسی و ارتباط آن با افزایش آلودگی هوا و نرخ مرگ و میر را فراهم کرده است.

روش نمونه‌برداری و دقت آماری

برای اطمینان از دقت آماری، در هر دوره مطالعاتی ۱۰۰۰ نقطه نمونه‌برداری تصادفی سیستماتیک تولید شد که خطای استاندارد (SE) حدود ۱-۲٪ را تضمین می‌کند، مطابق با بهترین شیوه‌های توصیه‌شده توسط آی-تری [۲۷، ۲۸]. این تعداد نقاط تعادلی بهینه بین دقت آماری و حجم کاری طبقه‌بندی دستی فراهم می‌کند (ضریب خطا $\approx 1.5\%$ برای نسبت احتمال ۰.۳۳ با حجم نمونه ۱۰۰۰). نقاط نمونه‌برداری

سطوح غیرقابل نفوذ شامل ساختمان‌ها، خیابان‌ها، آسفالت، خاک و زمین بایر. از میان این دسته‌ها، درختان به دلیل اثر گذاری قابل توجه بر آلاینده‌های هوا در مناطق مورد مطالعه، به عنوان اجزای اصلی در نظر گرفته شدند. تمامی اندازه‌گیری‌ها بر اساس سیستم متریک و ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی بر حسب دلار آمریکا انجام شد. ارزش‌گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستمی برای درک تأثیر آن‌ها بر جامعه و هدایت برنامه‌ریزی شهری و تلاش‌های حفاظتی ضروری است. این داده‌ها به سیاست‌گذاران و محیط‌زیست‌شناسان کمک می‌کند تا مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی حفظ و گسترش فضاهای سبز شهری را کمی‌سازی کرده و از زیرساخت‌های سبز برای توسعه پایدار حمایت کنند.

وضعیت پوشش سبز شهر تهران

وضعیت پوشش سبز مناطق ۲۲ گانه تهران (مطابق جدول ۲) از نظر سرانه فضای سبز، مساحت و تعداد فضاهای سبز تفاوت‌های قابل توجهی را نشان می‌دهد [۳۲]. منطقه ۲۲ با سرانه ۶۲.۹۲ متر مربع و مساحت بیش از ۱۳ میلیون متر مربع، به مراتب بالاترین پوشش سبز را دارد و از نظر تعداد فضاها (۹۷) نیز وضعیت متوسطی دارد، که نشان‌دهنده تمرکز بر فضاهای سبز وسیع است. منطقه ۱ با سرانه ۱۵.۴۸ و مساحت حدود ۷.۸ میلیون متر مربع و ۲۱۲ فضای سبز، در رتبه بعدی قرار دارد و تعادل خوبی بین تعداد و مساحت فضاها نشان می‌دهد. منطقه ۴ نیز با سرانه ۱۴.۷۲ و مساحت بیش از ۱۴ میلیون متر مربع، از نظر وسعت پیشرو است، اما تعداد فضاهای سبز آن (۲۶۳) نشان‌دهنده پراکندگی بیشتر این فضاها است.

در مقابل، مناطق مرکزی و جنوبی مانند مناطق ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ سرانه بسیار پایینی (بین ۰.۷۶ تا ۱.۹۱ متر مربع) و مساحت محدودی دارند، که نشان‌دهنده کمبود شدید فضای سبز در این مناطق پرتراکم است. به‌ویژه منطقه ۱۰ با سرانه ۰.۷۶ و مساحت تنها ۲۵۹,۶۳۶ متر مربع ضعیف‌ترین وضعیت را دارد. مناطق ۶، ۱۲، ۱۳ و ۱۷ نیز با سرانه زیر ۳ متر مربع و تعداد فضاهای سبز نسبتاً کم، از نظر پوشش سبز در وضعیت نامناسبی هستند.

مناطق ۱۵، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ با سرانه‌های متوسط (بین ۵.۸۳ تا ۱۳.۵۷) و مساحت‌های قابل قبول، وضعیت متوسطی دارند،

۱. داده‌های پوشش سبز: با استفاده از داده‌های شهرداری تهران و تصاویر ماهواره‌ای، میزان پوشش درختی در هر یک از مناطق ۲۲ گانه تهران محاسبه شده است. این داده‌ها شامل مساحت پوشش سبز، سرانه پوشش سبز هر منطقه و تراکم آن‌ها در هر منطقه است.

۲. تأثیر پوشش سبز بر آلاینده‌های محیطی: با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا و ابزار کنوپی، درصد اثر گذاری پوشش درختی در هر منطقه بر آلاینده‌های محیطی محاسبه شده است. ۳. همبستگی: سنجش تأثیر پوشش‌های سبز و آلودگی هوا بر نرخ مرگ و میر هر منطقه.

مطالعات پیشین

مطالعات متعددی از ابزارهای مشابه برای ارزیابی پوشش سبز و تأثیر آن بر کیفیت هوا استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، قربان‌خانی و همکاران نقش زیرساخت‌های سبز در کاهش آلودگی هوا در پارک‌های شهری را بررسی کردند [۱]. کیم و همکاران نشان دادند که نسبت بالاتر درختان در مناطق شهری به بهبود شرایط زیست‌محیطی کمک می‌کند [۳۱]. همچنین، ویزمن و همکاران با بررسی پوشش درختی در امتداد یادبود جورج واشنگتن، بهبود کیفیت هوا و خدمات اکوسیستمی را تأیید کردند [۳۰]. این مطالعه با تمرکز بر روند کاهش پوشش سبز در مناطق ۲۲ گانه تهران و استفاده از ابزارهای پیشرفته مانند کنوپی، به ادبیات موجود می‌افزاید و درک جامع‌تری از تأثیر شهرنشینی بر سلامت شهروندان ارائه می‌دهد.

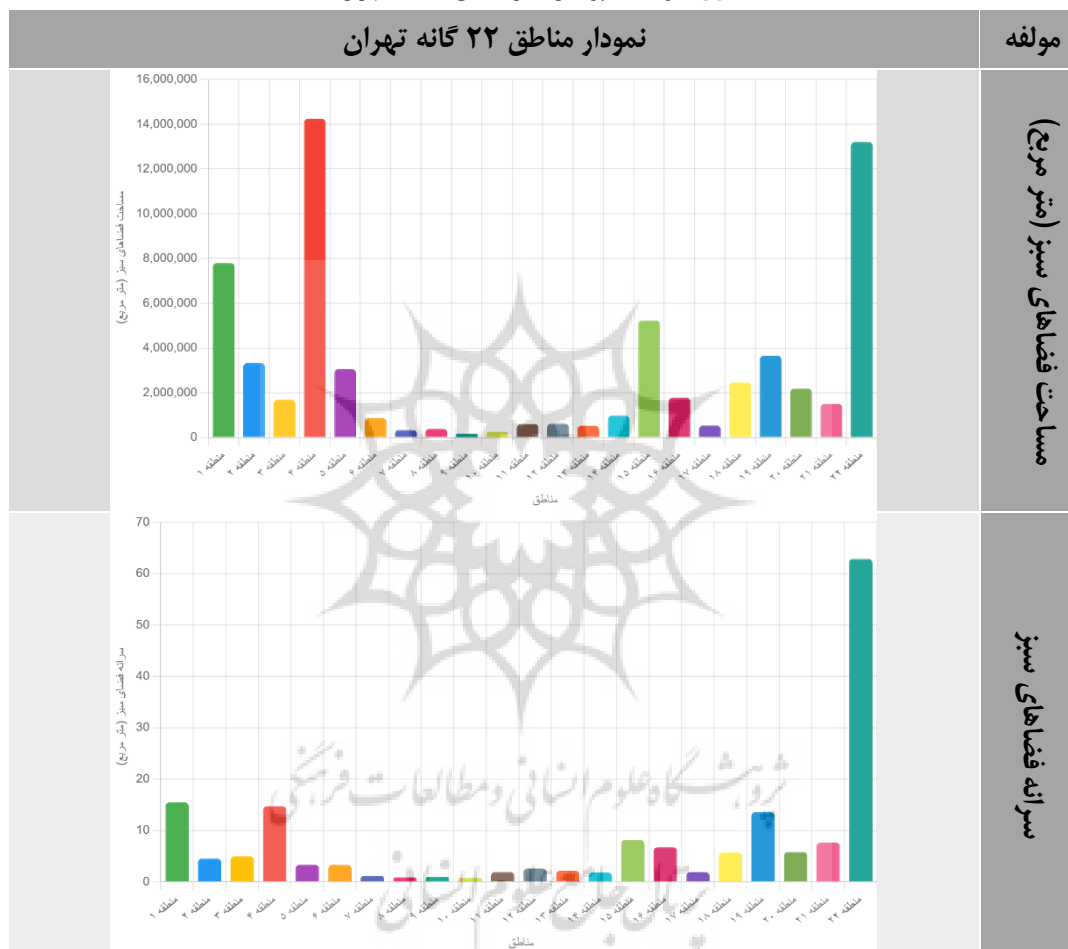
استفاده از ابزار کنوپی (i-Tree Canopy)

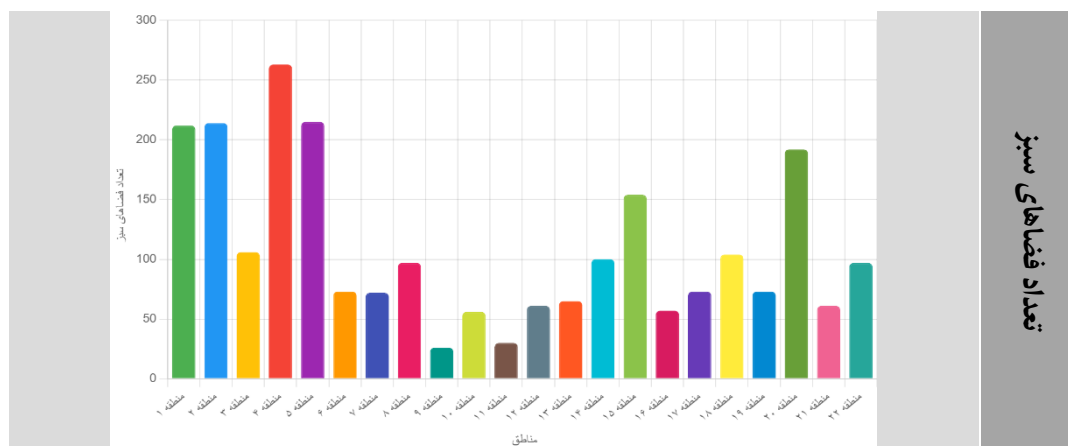
در این پژوهش، از نسخه ۷.۱ نرم افزار کنوپی برای ارزیابی پوشش گیاهی و سطوح غیرقابل نفوذ در مناطق سبز شهری ۲۲ گانه تهران استفاده شد. نمونه‌گیری منظم با ۱۰۰۰ نقطه بر اساس تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا انجام شد تا خطای استاندارد به حداقل برسد. افزایش تعداد نقاط نمونه‌گیری برای بهبود دقت تحلیل و کاهش خطا طراحی شد. داده‌های سال ۱۴۰۴ وضعیت پوشش سبز در مناطق مختلف تهران بررسی شود. پنج دسته سطح شناسایی شد: درختان و بوته‌ها (به دلیل دشواری تفکیک در تصاویر ماهواره‌ای، یکپارچه در نظر گرفته شدند)، گیاهان علفی، سطوح نفوذپذیر آبی، و

پوشش سبز بهتری برخوردارند، در حالی که مناطق مرکزی و جنوبی (۷، ۸، ۹، ۱۰) به دلیل محدودیت زمین و تراکم بالای شهری، با کمبود شدید فضای سبز مواجه‌اند. این نابرابری نشان‌دهنده نیاز به برنامه‌ریزی متمرکز برای افزایش سرانه فضای سبز در مناطق محروم و توزیع عادلانه‌تر فضاهای سبز در کلان‌شهر تهران است. (جدول ۲)

اما تعداد فضاهای سبز در این مناطق متفاوت است؛ برای مثال، منطقه ۲۰ با ۱۹۲ فضای سبز پراکندگی بیشتری نسبت به منطقه ۱۹ با ۷۳ فضا دارد. منطقه ۵ با وجود مساحت قابل توجه (حدود ۳ میلیون متر مربع) به دلیل تراکم جمعیتی بالا، سرانه پایینی (۳.۳۳) دارد. به‌طور کلی، مناطق شمالی و حومه‌ای (۱، ۴، ۲۲) به دلیل مساحت بیشتر و تراکم کمتر، از

جدول ۲. وضعیت پوشش سبز مناطق ۲۲ گانه تهران





منطقه ۱ با ۳۸۱۹۲ واحد کربن تصفیه شده و ۳۰۹۳۱۸ واحد کربن ذخیره شده، و منطقه ۴ با ۶۶۳۲۰ واحد کربن تصفیه شده و ۵۳۷۰۰۰ واحد کربن ذخیره شده، در رتبه های بعدی قرار دارند. این مناطق با سرانه فضای سبز بالا (۱۵.۴۸ و ۱۴.۷۲ مترمربع) و مساحت قابل توجه فضاهای سبز، توانایی خوبی در جذب و ذخیره کربن دارند، اما همچنان فاصله زیادی با منطقه ۲۲ دارند. این تفاوت ها نشان می دهد که مناطق با زیرساخت های سبز قوی تر، مانند منطقه ۲۲، نه تنها در تصفیه کربن بلکه در ذخیره سازی طولانی مدت آن نیز عملکرد بهتری دارند، که این امر به کاهش اثرات آلودگی هوا و بهبود کیفیت هوای شهر کمک می کند.

در مقابل، مناطقی مانند ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۲ با مقادیر بسیار پایین کربن تصفیه شده (۱۱۹ تا ۴۱۲ واحد) و کربن ذخیره شده در درختان (۹۶۵ تا ۴۱۲ واحد) و سرانه فضای سبز محدود (۰.۷۶ تا ۲.۵۸ مترمربع)، عملکرد ضعیفی در مدیریت آلودگی کربنی دارند. برای مثال، منطقه ۱۰ با تنها ۶۱ واحد کربن تصفیه شده و ۴۹۴ واحد کربن ذخیره شده، و منطقه ۹ با ۵۹.۷ واحد کربن تصفیه شده و ۴۸۳.۹ واحد کربن ذخیره شده، در مقایسه با منطقه ۲۲، شکاف عمیقی را نشان می دهند. این مناطق به دلیل کمبود فضاهای سبز و زیرساخت های زیست محیطی، توانایی محدودی در جذب و ذخیره کربن دارند، که این امر آن ها را در برابر اثرات منفی آلودگی هوا آسیب پذیرتر می کند. مناطق میانی مانند ۱۵، ۱۶ و ۱۹ با کربن تصفیه شده (۳۸۱۴ تا ۱۵۶۹۷ واحد) و کربن ذخیره شده (۳۰۸۸۵ تا ۱۲۷۱۱۰ واحد) عملکرد بهتری نسبت به مناطق بحرانی دارند، اما همچنان از نظر ظرفیت با مناطق

یافته ها

یافته های حاصل از تجزیه و تحلیل کاهش آلاینده ها مناطق ۲۲ گانه تهران نکات مهمی را نشان می دهد که عبارتند از:

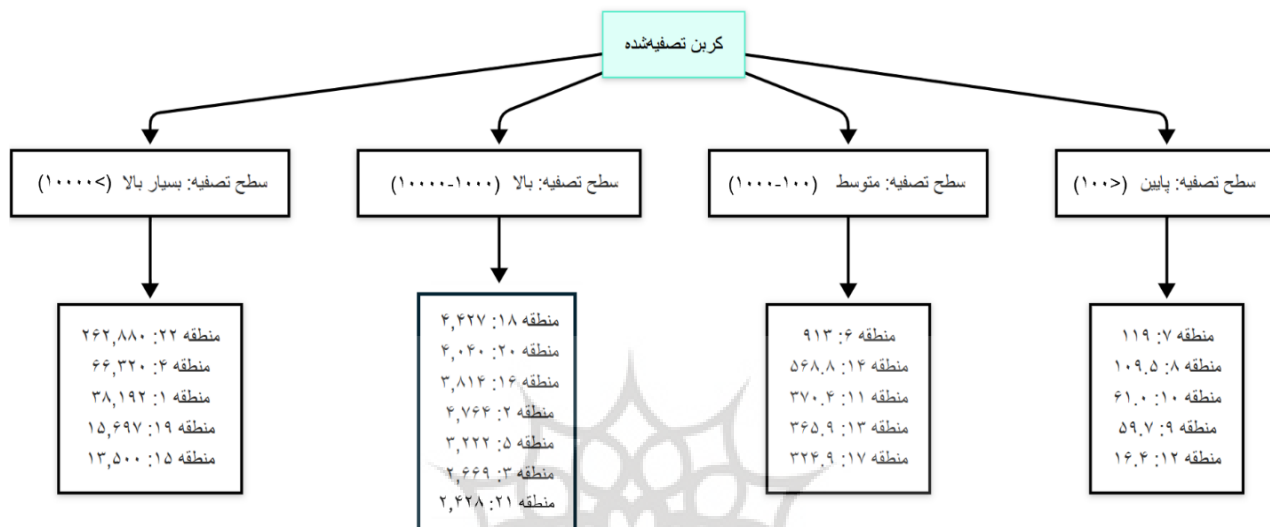
• کربن ذخیره و تصویه شده

ذخیره سازی کربن به فرآیند انباشت دی اکسید کربن در اکوسیستم اشاره دارد، که در آن درختان و گیاهان موجود در مناطق ۲۲ گانه تهران دی اکسید کربن را در زیست توده خود، شامل تنه، برگ ها و ریشه ها، ذخیره می کنند. این کربن ذخیره شده با کاهش سطوح دی اکسید کربن جوی، به تعدیل گرمایش جهانی کمک می کند و نقش مهمی در بهبود کیفیت هوای مناطق شهری تهران ایفا می نماید [33].

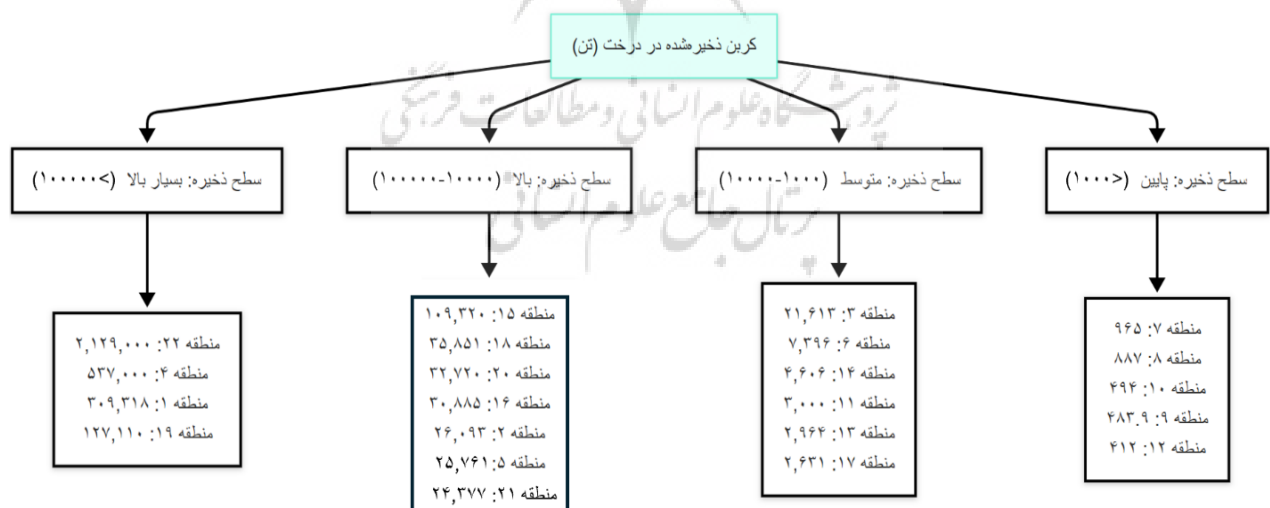
در بررسی نقش مناطق تهران (مطابق شکل ۳ و ۴) در مدیریت آلودگی هوا، متغیرهای کربن تصفیه شده و کربن ذخیره شده در درختان به عنوان شاخص های کلیدی عملکرد فضاهای سبز در کاهش اثرات آلاینده ها مورد توجه قرار می گیرند. کربن تصفیه شده نشان دهنده ظرفیت مناطق در حذف دی اکسید کربن از جو از طریق فرآیندهای طبیعی و مصنوعی است، در حالی که کربن ذخیره شده در درختان بیانگر توانایی درختان در جذب و نگهداری طولانی مدت کربن است که به کاهش غلظت گازهای گلخانه ای کمک می کند. منطقه ۲۲ با ۲۶۲۸۸۰ واحد کربن تصفیه شده و ۲۱۲۹۰۰۰ واحد کربن ذخیره شده در درختان، به وضوح پیشرو است. این مقادیر بالا، همراه با سرانه فضای سبز ۶۲.۹۲ مترمربع و مساحت ۱۳.۲ میلیون مترمربع فضاهای سبز، نشان دهنده ظرفیت بی نظیر این منطقه در مدیریت آلودگی کربنی است. در مقایسه،

کربن کمک کند، که نه تنها اثرات آلودگی هوا را کاهش می‌دهد، بلکه به پایداری زیست‌محیطی شهر نیز کمک می‌کند. (شکل ۴)

برتر فاصله دارند. این تحلیل تطبیقی نشان‌دهنده نابرابری‌های قابل‌توجه در توزیع منابع سبز و ظرفیت مدیریت کربن در تهران است. تقویت فضاهای سبز و افزایش تعداد درختان در مناطق کم‌عملکرد می‌تواند به بهبود ظرفیت تصفیه و ذخیره



شکل ۳: میزان کربن تصفیه شده در مناطق ۲۲ گانه تهران



شکل ۴: میزان کربن سالانه ذخیره شده در درخت در مناطق ۲۲ گانه تهران

کربن مونوکسید (CO)

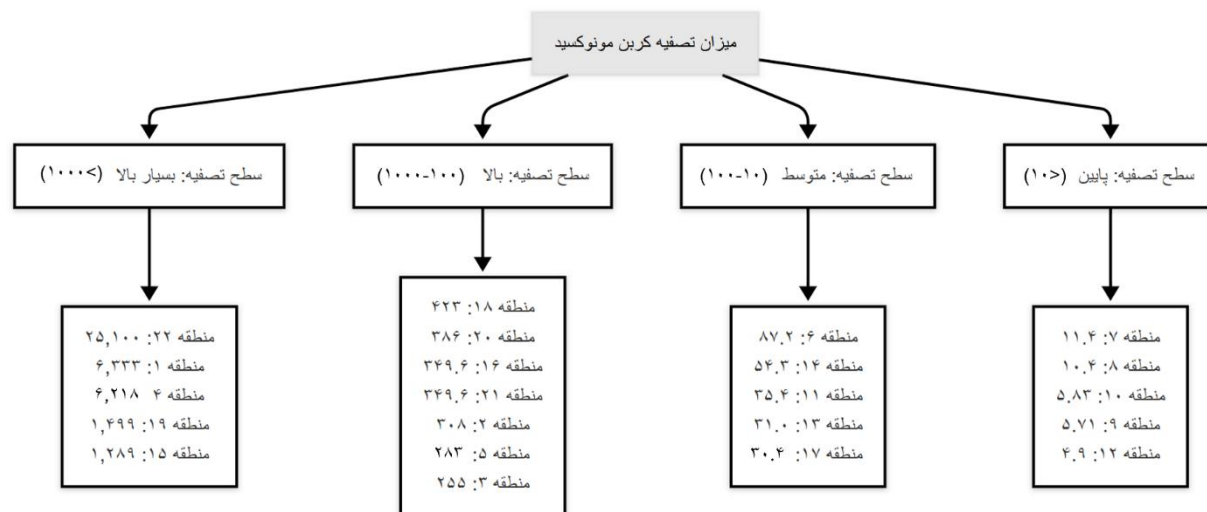
مونوکسید کربن (CO) یکی از آلاینده‌های مهم در سطح جهانی است و درختان نقش کلیدی در کاهش اثرات آن ایفا می‌کنند. سازمان بهداشت جهانی (WHO) و آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) به ترتیب غلظت مجاز این گاز را کمتر از ۲۶ ppm و ۳۵ ppm تعیین کرده‌اند (WHO, 1979). در مناطق ۲۲ گانه تهران، پوشش سبز، به‌ویژه درختان، با جذب مونوکسید کربن از طریق فرآیندهای بیولوژیکی مانند فتوسنتز و رسوب‌گذاری، به بهبود کیفیت هوا کمک می‌کند. این مطالعه با استفاده از ابزارهایی مانند Tree Canopy، تأثیر پوشش درختی در کاهش غلظت CO را در مناطق مختلف تهران بررسی کرده و نشان می‌دهد که حفظ و گسترش پوشش سبز در این مناطق می‌تواند به کاهش این آلاینده و بهبود سلامت عمومی ساکنان کمک کند [34]. بررسی نقش مناطق تهران در کاهش مرگ‌ومیر ناشی از مونوکسید کربن (CO) نشان می‌دهد (مطابق شکل ۵) که ظرفیت تصفیه این آلاینده و زیرساخت‌های سبز، به‌ویژه کربن تصفیه‌شده و کربن ذخیره‌شده در درختان، در مناطق مختلف به شدت نابرابر است. منطقه ۲۲ با تصفیه ۲۵۱۰۰ ppm مونوکسید کربن، تأثیر ۴۵.۴۶٪ در کاهش مرگ‌ومیر ناشی از مونوکسید کربن دارد که به دلیل مساحت عظیم فضاهای سبز (۱۳.۲ میلیون مترمربع) و سرانه فضای سبز بسیار بالا (۶۲.۹۲ مترمربع) است. این منطقه با ۲۶۲۸۸۰ واحد کربن تصفیه‌شده و ۲۱۲۹۰۰۰ واحد کربن ذخیره‌شده در درختان، توانایی قابل توجهی در مدیریت آلودگی کربنی دارد، که به‌طور غیرمستقیم به کاهش غلظت مونوکسید کربن از طریق جذب توسط پوشش گیاهی و بهبود کیفیت هوا کمک می‌کند. مناطق ۱ و ۴ نیز با تصفیه ۶۳۳۳ و ۶۲۱۸ ppm CO (تأثیرات ۱۱.۴۷٪ و ۱۱.۲۶٪) و مقادیر بالای کربن تصفیه‌شده (۳۸۱۹۲ و ۶۶۳۲۰ واحد) و کربن ذخیره‌شده (۳۰۹۳۱۸ و ۵۳۷۰۰۰ واحد)، عملکرد قوی‌ای دارند. این مناطق با سرانه فضای سبز بالا (۱۵.۴۸ و ۱۴.۷۲ مترمربع) از زیرساخت‌های سبز مناسبی برخوردارند که به جذب آلاینده‌های کربنی و کاهش اثرات مونوکسید کربن کمک می‌کند. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که مناطق با فضاهای سبز گسترده‌تر، مانند

منطقه ۲۲، نه تنها در تصفیه مونوکسید کربن بلکه در مدیریت کلی آلودگی کربنی کارآمدتر عمل می‌کنند.

در مقابل، مناطقی مانند ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۲ با مقادیر بسیار پایین تصفیه مونوکسید کربن (۱۱.۴ تا ۳۴۹.۶ ppm) و تأثیرات ناچیز (۰.۰۲٪ تا ۰.۶۳٪)، به دلیل سرانه فضای سبز پایین (۰.۷۶ تا ۲.۵۸ مترمربع) و مقادیر محدود کربن تصفیه‌شده (۱۶.۴ تا ۱۱۹ واحد) و کربن ذخیره‌شده (۴۱۲ تا ۹۶۵ واحد)، عملکرد ضعیفی دارند. برای مثال، منطقه ۱۰ با تصفیه تنها ۵.۸۳ ppm مونوکسید کربن و تأثیر ۰.۰۱٪، و منطقه ۹ با ۵.۷۱ ppm و تأثیر ۰.۰۱٪، در مقایسه با منطقه ۲۲، شکاف عمیقی را نشان می‌دهند. مناطق میانی مانند ۱۵، ۱۶ و ۱۹ با تصفیه ۱۲۸۹ تا ۵۹۰۷ ppm مونوکسید کربن (تأثیرات ۲.۳۳٪ تا ۱۰.۷۰٪) و کربن تصفیه‌شده (۳۸۱۴ تا ۱۵۶۹۷ واحد) و کربن ذخیره‌شده (۳۰۸۸۵ تا ۱۲۷۱۱۰ واحد)، عملکرد بهتری دارند، اما همچنان از مناطق برتر عقب هستند. این نابرابری‌ها نشان‌دهنده توزیع نامتوازن منابع سبز در تهران است که مناطق با ظرفیت پایین‌تر در معرض آسیب‌های بیشتری از آلودگی مونوکسید کربن قرار دارند. تقویت فضاهای سبز و افزایش تعداد درختان در این مناطق می‌تواند ظرفیت تصفیه مونوکسید کربن و ذخیره کربن را بهبود بخشد، که نه تنها اثرات مرگ‌ومیر ناشی از مونوکسید کربن را کاهش می‌دهد، بلکه به پایداری زیست‌محیطی شهر کمک می‌کند. (شکل ۵)

نیتروژن دی‌اکسید (NO2)

دی‌اکسید نیتروژن (NO2)، پیش‌ساز آلاینده‌هایی مانند ازن و ذرات معلق، اثرات مخربی بر سلامت انسان، زیرساخت‌های شهری و اکوسیستم‌های زیستی دارد و به پدیده‌هایی نظیر باران اسیدی، تخریب لایه ازن و گرمایش جهانی دامن می‌زند. مطالعات انجام‌شده در ایالات متحده نشان می‌دهد که درختان و بوته‌ها قادر به حذف حدود ۹٪ از دی‌اکسید نیتروژن در این کشور هستند، در حالی که این رقم در شهرهای کانادا حدود ۳٪ است. در مناطق ۲۲ گانه تهران، پوشش سبز، به‌ویژه درختان، از طریق فرآیندهای بیولوژیکی مانند جذب سطحی و متابولیسم گیاهی، به کاهش غلظت دی‌اکسید نیتروژن کمک می‌کند [35, 36].



شکل ۵. میزان کربن مونوکسید تصویه شده در مناطق ۲۲ گانه تهران

کاهش مرگ و میر ناشی از این آلاینده، به دلیل سرانه فضای سبز بالای ۶۲.۹۲ مترمربع و مقادیر قابل توجه کربن تصفیه شده (۲۶۲۸۸۰ واحد) و کربن ذخیره شده در درختان (۲۱۲۹۰۰۰ واحد)، عملکرد برجسته ای در مدیریت آلودگی اوزون دارد. مناطق ۱ و ۴ با تصفیه به ترتیب ۳۰۱۹۸۰ و ۳۰۷۶۶ ppb اوزون (سهم های ۱۸.۲۲٪ و ۱۸.۱۴٪) و سرانه فضای سبز مناسب (۱۵.۴۸ و ۱۴.۷۲ مترمربع)، نقش مؤثری در کاهش اثرات سوء اوزون ایفا می کنند. در مقابل، مناطق ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۲ با تصفیه محدود ۲۳۱ تا ۵۴۱ ppb و سرانه فضای سبز پایین (۰.۷۶ تا ۲.۵۸ مترمربع)، تأثیر ۰.۰۱٪ تا ۰.۰۳٪ بر کاهش مرگ و میر دارند. مناطق ۱۵، ۱۶ و ۱۹ با تصفیه ۱۸۳۲۰ تا ۷۱۲۵۹ ppb (سهم های ۱.۱۱٪ تا ۴.۳۰٪) در سطح متوسط قرار دارند. این نابرابری های ساختاری، لزوم سرمایه گذاری در توسعه پوشش گیاهی و زیرساخت های سبز در مناطق با عملکرد ضعیف را برای بهبود ظرفیت تصفیه اوزون و کاهش مخاطرات بهداشتی آن برجسته می سازد. (شکل ۷)

سولفور دی اکسید (SO₂)

سولفور دی اکسید (SO₂) به دلیل پراکنش سریع تر نسبت به سایر آلاینده ها و تولید آن در نتیجه استفاده از سوخت های با محتوای گوگرد بالا، یکی از آلاینده های مهم جوی است. در مناطق ۲۲ گانه تهران، پوشش سبز، به ویژه درختان، از طریق

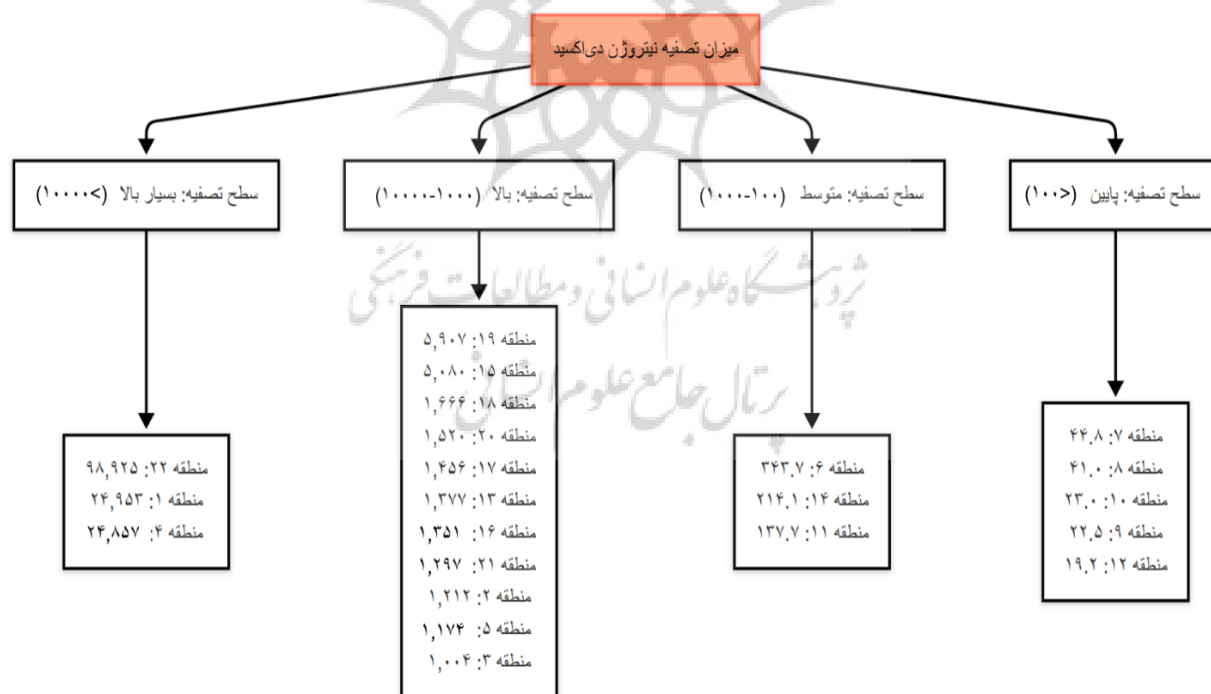
مطابق شکل ۶، منطقه ۲۲ با تصفیه ۹۸۹۲۵ ppb نیتروژن دی اکسید (NO₂) و تأثیر ۸.۹۶٪، به دلیل سرانه فضای سبز بالا (۶۲.۹۲ مترمربع) و مقادیر بالای کربن تصفیه شده (۲۶۲۸۸۰ واحد) و ذخیره شده (۲۱۲۹۰۰۰ واحد)، پیشرو در کاهش مرگ و میر ناشی از دی اکسید نیتروژن است. مناطق ۱ و ۴ با تصفیه ۲۴۹۵۳ و ۲۴۸۵۷ ppb (تأثیرات ۲.۲۶٪ و ۲.۲۵٪) و سرانه فضای سبز مناسب (۱۵.۴۸ و ۱۴.۷۲ مترمربع)، عملکرد خوبی دارند. در مقابل، مناطق ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۲ با تصفیه ۱۹.۲ تا ۴۴.۸ ppb و سرانه فضای سبز پایین (۰.۷۶ تا ۲.۵۸ مترمربع)، تأثیرات ۰.۰۰۲٪ تا ۰.۰۰۴٪ دارند. مناطق ۱۵، ۱۶ و ۱۹ با تصفیه ۱۳۵۱ تا ۵۹۰۷ ppb (تأثیرات ۰.۱۲٪ تا ۰.۵۴٪) در میانه قرار دارند. این نابرابری نشان دهنده نیاز به تقویت فضاهای سبز در مناطق کم عملکرد برای بهبود تصفیه دی اکسید نیتروژن و کاهش اثرات آن بر سلامت عمومی است. (شکل ۶)

اوزون (O₃)

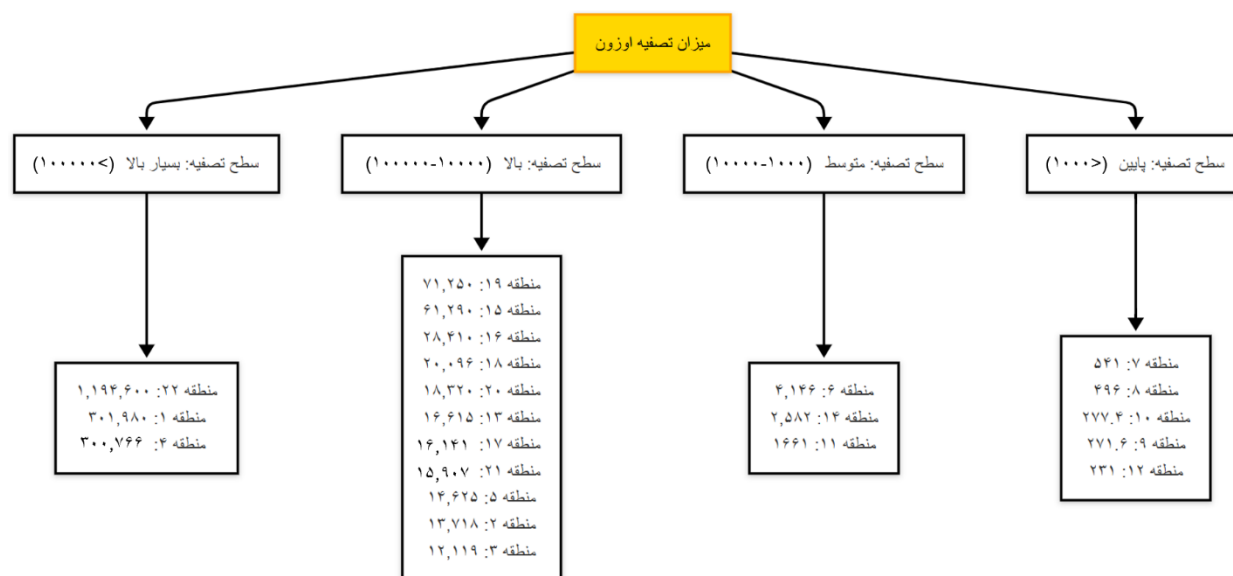
قرار گرفتن در معرض ازن (O₃) می تواند منجر به بیماری های تنفسی، مشکلات قلبی و حتی مرگ شود. در مناطق ۲۲ گانه تهران، پوشش سبز، به ویژه درختان، با جذب ازن از طریق فرآیندهای بیولوژیکی مانند فتوسنتز و رسوب گذاری روی برگ ها، به کاهش غلظت این آلاینده در هوا کمک می کند [۳۷]. مطابق شکل ۷، منطقه ۲۲ با ظرفیت تصفیه ۱۱۹۴۶۰۰ ppb اوزون (O₃) و سهم ۷۲.۰۳ درصدی در

در مقابل، مناطق ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۲ با تصفیه محدود ۴۱.۴ تا ۹۶.۸ ppb (سهام‌های ۰.۰۰۲٪ تا ۰.۰۰۵٪) و سرانه فضای سبز پایین (۰.۷۶ تا ۲.۵۸ مترمربع)، تأثیر ۰.۰۰۲٪ تا ۰.۰۰۵٪ در کاهش مرگ‌ومیر ناشی از سولفور دی‌اکسید دارند. این مناطق با کربن تصفیه‌شده (۱۶.۴ تا ۱۱۹ واحد) و ذخیره‌شده (۴۱۲ تا ۹۶۵ واحد) بسیار پایین، در برابر اثرات زیان‌بار سولفور دی‌اکسید آسیب‌پذیرند. مناطق ۱۵، ۱۶ و ۱۹ با تصفیه ۲۷۶۵ تا ۱۲۷۵۷ ppb (سهام‌های ۰.۱۳٪ تا ۰.۶۰٪) و سرانه فضای سبز متوسط (۶.۷۵ تا ۱۳.۵۷ مترمربع)، عملکرد متوسطی دارند، اما همچنان با مناطق برتر فاصله دارند. این نابرابری ساختاری، ضرورت توسعه پوشش گیاهی و زیرساخت‌های سبز در مناطق کم‌عملکرد را برای بهبود ظرفیت تصفیه سولفور دی‌اکسید و کاهش مخاطرات بهداشتی، به‌ویژه در برابر بیماری‌های تنفسی، برجسته می‌سازد.

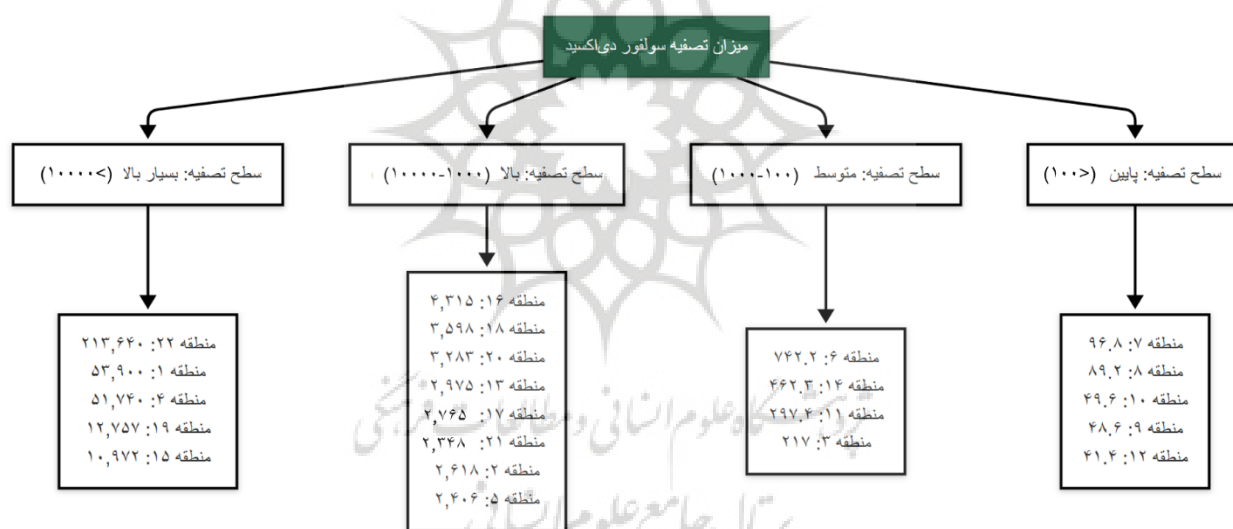
فرآیندهای بیولوژیکی مانند جذب سطحی و متابولیسم گیاهی، به کاهش غلظت SO_2 در هوا کمک می‌کند [۱]. مطابق شکل ۸، منطقه ۲۲ با ظرفیت تصفیه ۲۱۳۶۴۰ ppb سولفور دی‌اکسید (SO_2) و سهم ۹.۹۹٪ در کاهش مرگ‌ومیر ناشی از این آلاینده، به دلیل سرانه فضای سبز بالای ۶۲.۹۲ مترمربع و مقادیر قابل‌توجه کربن تصفیه‌شده (۲۶۲۸۸۰ واحد) و کربن ذخیره‌شده در درختان (۲۱۲۹۰۰۰ واحد)، عملکردی برجسته دارد. این منطقه با زیرساخت‌های سبز گسترده، به‌ویژه در جذب SO_2 که با بیماری‌های تنفسی و قلبی‌عروقی مرتبط است، نقش کلیدی ایفا می‌کند. مناطق ۱ و ۴ با تصفیه به‌ترتیب ۵۳۹۰۰ و ۵۱۷۴۰ ppb (سهام‌های ۲.۵۲٪ و ۲.۴۲٪) و سرانه فضای سبز مناسب (۱۵.۴۸ و ۱۴.۷۲ مترمربع)، توانایی قابل‌توجهی در کاهش اثرات سوء SO_2 دارند. این مناطق با مقادیر بالای کربن تصفیه‌شده (۳۸۱۹۲ و ۶۶۳۲۰ واحد) و ذخیره‌شده (۳۰۹۳۱۸ و ۵۳۷۰۰۰ واحد)، از زیرساخت‌های سبز مؤثری برخوردارند که به مدیریت آلودگی کمک می‌کند.



شکل ۶: میزان نیتروژن دی‌اکسید تصفیه شده در مناطق ۲۲ گانه تهران



شکل ۷. میزان اوزون تصفیه شده در مناطق ۲۲ گانه تهران



شکل ۸. میزان سولفور دی اکسید تصفیه شده در مناطق ۲۲ گانه تهران

کمتر از ۱۰ میکرون. ذرات معلق با قطر ۲.۵ میکرون یا کمتر به راحتی به سیستم تنفسی نفوذ کرده و اثرات منفی بر سلامت انسان، از جمله مشکلات تنفسی، حملات قلبی، آسم مزمن، کاهش عملکرد ریه و مرگ و میر زودرس، به همراه دارند [۳۸]. بر اساس برآوردها، در سال ۲۰۱۵، حدود ۸.۹ میلیون مرگ زودرس در جهان به این آلاینده‌ها نسبت داده شده است [۳۹]. کارایی حذف این آلاینده‌ها به عواملی مانند

ذرات کوچکتر از ۲.۵ میکرون (PM 2.5) و ذرات بزرگتر از ۲.۵ میکرون و کوچکتر از ۱۰ میکرون (PM 10)

ذرات معلق (PM 2.5 و PM 10) با اندازه‌ها و اشکال مختلف پراکنده می‌شوند و ساختارهای پیچیده‌ای ایجاد می‌کنند. این ذرات بر اساس اندازه به سه دسته تقسیم می‌شوند: ذرات کوچکتر از ۲.۵ میکرون، ذرات بین ۲.۵ تا ۱۰ میکرون و ذرات

سطح برگ، تاج درخت، غلظت ذرات معلق و شرایط آب‌وهوایی غالب بستگی دارد.

درختان و گیاهان به‌عنوان فیلترهای طبیعی عمل کرده و آلاینده‌ها و ذرات معلق را از هوا جذب می‌کنند. این فرآیند منجر به کاهش غلظت مواد مضر مانند دی‌اکسید نیتروژن و ذرات ریز ($PM_{2.5}$) می‌شود [۴۰]. در مناطق ۲۲ گانه تهران، پوشش سبز، به‌ویژه درختان، از طریق رسوب‌گذاری ذرات روی برگ‌ها و فرآیندهای بیولوژیکی، به کاهش غلظت پی‌ام ۲.۵ و پی‌ام ۱۰ کمک می‌کند.

بررسی تفسیری میزان ذرات معلق ($PM_{2.5}$ و PM_{10}) تصفیه‌شده (مطابق شکل ۹ و ۱۰) توسط پوشش سبز (به کیلوگرم) در مناطق ۲۲ گانه تهران، نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل‌ملاحظه‌ای در ظرفیت مناطق برای کاهش این آلاینده‌های مضر است که می‌تواند به مساحت پوشش سبز، تراکم درختان و شرایط محلی آلودگی وابسته باشد. منطقه ۲۲ با تصفیه ۶۲۳۴۸ کیلوگرم پی‌ام ۲.۵ و ۴۷۸۵۰۰ کیلوگرم پی‌ام ۱۰، بالاترین میزان را در هر دو شاخص داراست که این امر احتمالاً به وسعت عظیم فضاهای سبز، تنوع گونه‌های گیاهی و موقعیت جغرافیایی مناسب، مانند نزدیکی به مناطق با جریان هوای طبیعی، مرتبط است و نقش مهمی در کاهش اثرات مخرب این ذرات بر سلامت عمومی ایفا می‌کند. منطقه ۱ با تصفیه ۱۵۷۲۷ کیلوگرم پی‌ام ۲.۵ و ۱۲۰۷۰۰ کیلوگرم پی‌ام ۱۰، و منطقه ۴ با ۱۴۳۷۱ کیلوگرم پی‌ام ۲.۵ و ۱۱۶۸۲۰ کیلوگرم پی‌ام ۱۰، سطوح بالایی را نشان می‌دهند که ممکن است به تراکم درختان و قرارگیری در مناطق شهری با آلودگی بالا، ناشی از ترافیک یا فعالیت‌های صنعتی، مرتبط باشد. منطقه ۱۹ با تصفیه ۳۷۲۳ کیلوگرم پی‌ام ۲.۵ و ۲۸۵۷۰ کیلوگرم پی‌ام ۱۰، و منطقه ۱۵ با ۳۲۰۲ کیلوگرم پی‌ام ۲.۵ و ۲۴۵۷۵ کیلوگرم پی‌ام ۱۰، ظرفیت‌های قابل‌توجهی را به نمایش می‌گذارند که می‌تواند به وجود فضاهای سبز متنوع و مدیریت مناسب مرتبط باشد. در مقابل، منطقه ۱۲ با تصفیه ۱۲۰۱ کیلوگرم پی‌ام ۲.۵ و ۹۲۰۷ کیلوگرم پی‌ام ۱۰، کمترین میزان را دارد که به احتمال زیاد به کمبود پوشش سبز و فشار توسعه شهری برمی‌گردد. مناطق ۷ با ۲۸۰۲ کیلوگرم پی‌ام ۲.۵ و ۲۱۷ کیلوگرم پی‌ام ۱۰، ۸ با ۲۶۰۱ کیلوگرم پی‌ام ۲.۵ و ۲۰۰ کیلوگرم پی‌ام ۱۰، ۹ با

۱۴۰۲ کیلوگرم پی‌ام ۲.۵ و ۱۰۸۰۷ کیلوگرم پی‌ام ۱۰، و ۱۰ با ۱۴۰۵ کیلوگرم پی‌ام ۲.۵ و ۱۱۱۰۴ کیلوگرم پی‌ام ۱۰، سطوح بسیار پایینی را نشان می‌دهند که ممکن است به کاهش تعداد درختان یا شرایط محیطی نامطلوب مرتبط باشد. منطقه ۱۶ با ۲۳۱۷ کیلوگرم پی‌ام ۲.۵ و ۱۷۹۳۶ کیلوگرم پی‌ام ۱۰، و منطقه ۱۸ با ۱۰۵۰ کیلوگرم پی‌ام ۲.۵ و ۸۰۵۸ کیلوگرم پی‌ام ۱۰، عملکرد متوسطی دارند که می‌تواند به تعادل بین توسعه شهری و حفظ پوشش گیاهی وابسته باشد، در حالی که منطقه ۱۱ با ۸۶۰۸ کیلوگرم پی‌ام ۲.۵ و ۶۶۶۰۱ کیلوگرم پی‌ام ۱۰، ظرفیت محدودی را نشان می‌دهد. این داده‌ها آشکار می‌سازند که مناطق با ظرفیت بالای تصفیه ذرات معلق، مانند مناطق ۲۲، ۱ و ۴، نقش اساسی در کاهش خطرات سلامتی، از جمله بیماری‌های تنفسی و قلبی‌عروقی، ایفا می‌کنند، اما حفظ این توان در برابر فشارهای شهری نیازمند برنامه‌ریزی دقیق است، در حالی که مناطق با تصفیه پایین، مانند منطقه ۱۲، با گسترش پوشش سبز می‌توانند به بهبود کیفیت هوا کمک کنند. (شکل‌های ۹ و ۱۰)

صرفه‌جویی سالانه

مطابق شکل ۱۰ در بررسی تطبیقی میزان صرفه‌جویی سالانه ناشی از تصویه آلودگی هوا توسط پوشش سبز درختی در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران، داده‌ها نشان‌دهنده تفاوت‌های چشمگیری بین مناطق از لحاظ بازدهی اکولوژیکی و اقتصادی است. منطقه ۲۲ با مبلغ قابل توجه ۹۰۰ میلیون دلار صرفه‌جویی سالانه، بالاترین میزان را در بین تمام مناطق دارد. این عدد نشان‌دهنده ظرفیت برجسته این منطقه در جذب و تصفیه آلاینده‌های هوایی است که احتمالاً به دلیل وجود فضاهای سبز وسیع، تنوع گونه‌های گیاهی، موقعیت طبیعی و ارتفاع نسبی آن در کوهپایه‌های البرز است. این منطقه نقش یک "مغز سبز" شهری را برای تهران ایفا می‌کند و می‌تواند الگویی برای توسعه پایدار در سایر مناطق باشد.

منطقه ۴ نیز با حدود ۲۲۶ میلیون دلار صرفه‌جویی، در جایگاه دوم قرار دارد. این منطقه که شامل بخش‌هایی از غرب تهران است، علیرغم فشار توسعه شهری و تراکم بالای جمعیتی، هنوز از ظرفیت بالایی برخوردار است که نشان‌دهنده مؤثر بودن مدیریت موجود در این منطقه در حفظ و بهره‌برداری از فضاهای سبز است. منطقه ۱ نیز با ۱۳۰ میلیون دلار

در مجموع، این داده‌ها به‌خوبی ارزش افزوده اکولوژیکی و اقتصادی درختان و فضاهای سبز را برجسته می‌کنند. صرفه‌جویی‌های گزارش شده، نشان می‌دهند که سرمایه‌گذاری در طبیعت و حفاظت از فضاهای سبز شهری، بازدهی انسانی، اجتماعی و اقتصادی بسیار بالایی دارد. این رویکرد نه تنها به بهبود کیفیت هوای شهری کمک می‌کند، بلکه بار بهداشتی و اقتصادی ناشی از آلودگی را نیز کاهش می‌دهد. بنابراین، برنامه‌ریزان شهری و تصمیم‌گیرندگان باید در توسعه شهری، این ظرفیت‌های طبیعی را به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی مدیریت آلودگی هوا در نظر بگیرند. (شکل ۱۱)

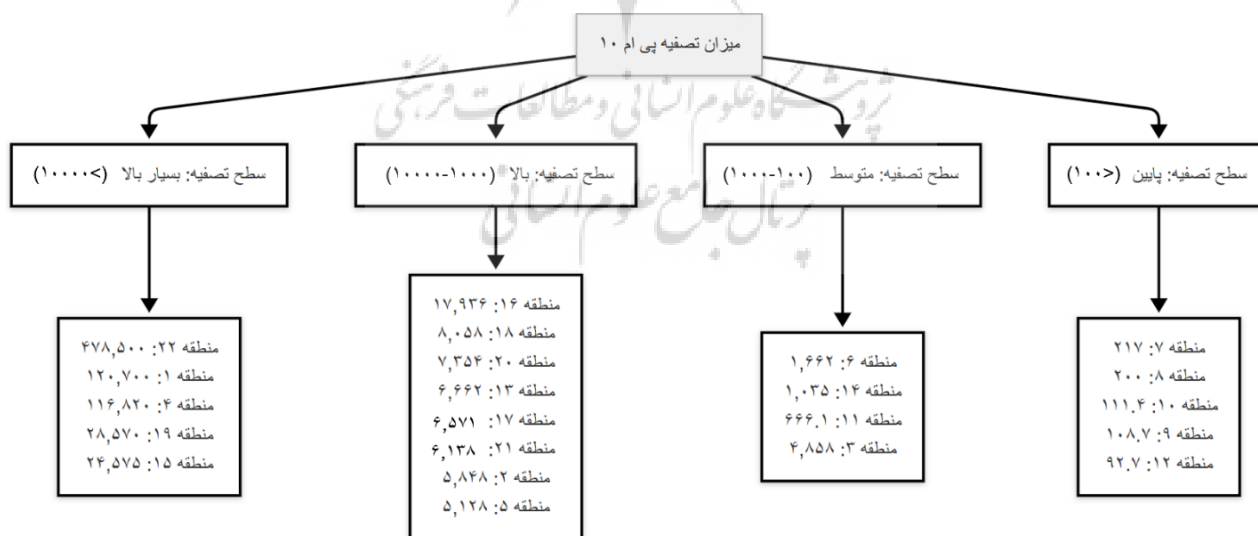
تحلیل و بررسی داده‌های به دست آمده

آلودگی هوا یکی از چالش‌های اصلی شهر تهران است که تأثیرات منفی قابل توجهی بر سلامت عمومی و نرخ مرگ‌ومیر دارد. با توجه به داده‌های ارائه‌شده درباره تأثیر آلاینده‌ها بر مرگ‌ومیر و میزان تصفیه آلاینده‌ها در مناطق مختلف تهران، تحلیل تطبیقی نقش هر منطقه در کاهش مرگ‌ومیر ناشی از آلودگی هوا می‌تواند به درک بهتر نابرابری‌های زیست‌محیطی و ارائه راهکارهای مؤثر برای بهبود کیفیت زندگی کمک کند. در ادامه، پس از خلاصه‌ای از روش محاسبه، تأثیر هر منطقه به‌صورت تطبیقی در دو پاراگراف بررسی می‌شود.

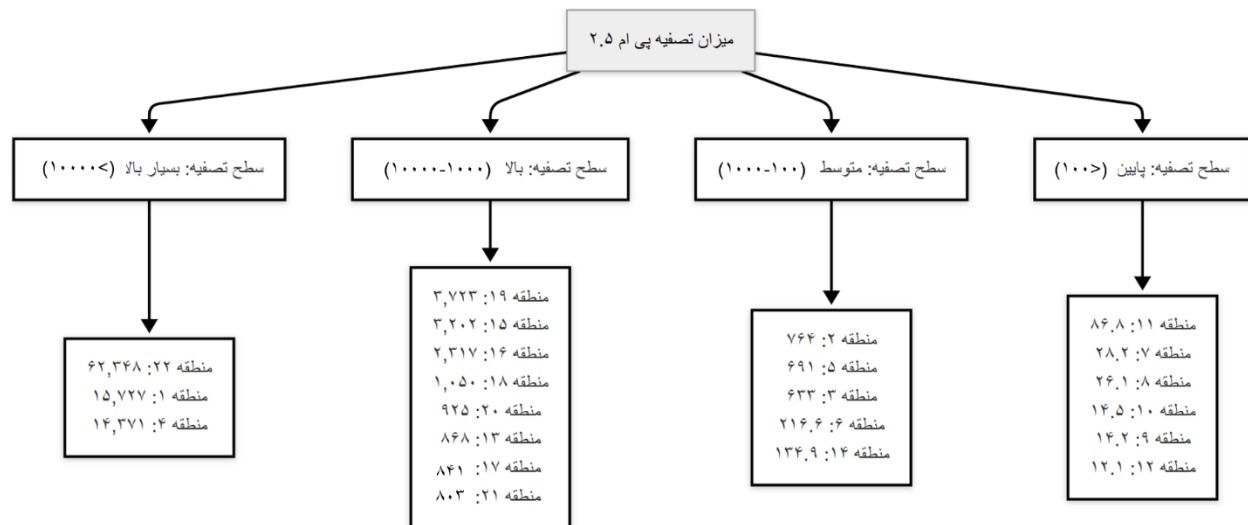
صرفه‌جویی، به عنوان یکی از مناطق مرکزی و پرجمعیت، نشان می‌دهد که حتی در شرایطی با آلودگی بالا، وجود پوشش گیاهی مناسب می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش خسارات زیست‌محیطی داشته باشد.

مناطق ۱۵، ۱۹، ۱۸، ۲۰ و ۲۱ نیز مبالغی در بازه ۱۲ تا ۵۳ میلیون دلار را به خود اختصاص داده‌اند که نشان از عملکرد مطلوب تا متوسط آن‌ها دارد. این مناطق اغلب دارای تعادل مناسبی بین توسعه شهری و حفظ فضای سبز هستند و می‌توانند با کمی تقویت مدیریت زیست‌محیطی، بهره‌وری بیشتری کسب کنند. مناطق ۲، ۳، ۵، ۱۶ و ۱۷ نیز با صرفه‌جویی‌هایی در حدود ۹ تا ۱۳ میلیون دلار، وضعیت نسبتاً متوسطی دارند که نشان‌دهنده این است که این مناطق هنوز پتانسیل افزایش کارایی خود را از طریق گسترش پوشش گیاهی دارند.

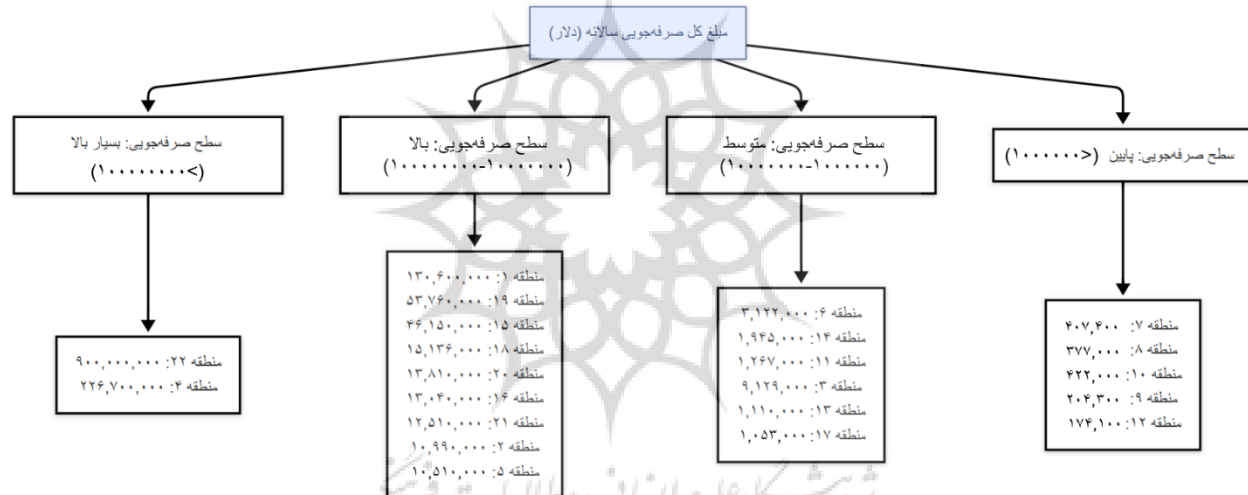
اما بیشترین ضعف از نظر بازدهی اکولوژیکی در مناطق ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۲ مشهود است که مبالغی بین ۱۷۴ هزار تا ۴۲۲ هزار دلار را به خود اختصاص داده‌اند. این مناطق اغلب دارای کمبود فضای سبز، تراکم بالای ساختمانی و شرایط محیطی نامساعد هستند. بنابراین، این مناطق بیشترین نیاز را به برنامه‌های توسعه سبز شهری دارند تا بتوانند از ظرفیت طبیعی درختان در کاهش آلودگی هوا استفاده کنند.



شکل ۹. میزان پی ام ۱۰ تصویه شده در مناطق ۲۲ گانه تهران



شکل ۱۰. میزان پی ام ۲.۵ تصویه شده در مناطق ۲۲ گانه تهران



شکل ۱۱. میزان کل صرفه جویی سالانه در مناطق ۲۲ گانه تهران

برای محاسبه درصد تأثیر هر منطقه در کاهش نرخ مرگ و میر (مطابق جدول ۳)، از داده‌های پرسش اول درباره تأثیر افزایش آلاینده‌ها (O₃, NO₂, CO, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5}) بر مرگ و میر استفاده شد. فرض شد که تصفیه هر واحد آلاینده به همان نسبت که افزایش آن مرگ و میر را بالا می‌برد، مرگ و میر را کاهش می‌دهد. میزان تصفیه هر آلاینده در هر منطقه در نرخ کاهش مرگ و میر مربوطه ضرب شد تا تأثیر کلی منطقه محاسبه شود. سپس، مجموع تأثیرات همه مناطق (۲۹۳۷۵۵۰.۹۸۶٪) به دست آمد و سهم هر منطقه به صورت درصد از این کل محاسبه شد. نتایج نشان داد که منطقه ۲۲ با ۶۰.۸۰٪ بیشترین تأثیر را دارد، در حالی که مناطق ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۲ کمترین تأثیر (زیر ۰.۱٪) را دارند. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که مناطق تهران از نظر تأثیر بر کاهش مرگ و میر ناشی از آلودگی هوا به شدت نابرابر هستند. منطقه ۲۲ با ۶۰.۸۰ درصد تأثیر، به دلیل مساحت عظیم فضاها (۱۳.۲ میلیون مترمربع) و سرانه فضای سبز بسیار بالا (۶۲.۹۲ مترمربع)، به عنوان منطقه‌ای مطلوب برجسته است. این منطقه با ظرفیت بالای تصفیه آلاینده‌هایی مانند ذرات معلق و ازن، نقش کلیدی در کاهش مرگ و میر ایفا می‌کند. مناطق ۱ و ۴ با تأثیرات ۱۳.۲۴ درصد و ۱۲.۸۲ درصد

نیازمند بهبود قرار دارند، اما همچنان فاصله زیادی با مناطق برتر دارند. مناطقی مانند ۲، ۳، ۵، ۱۳، ۱۷، ۱۸، ۲۰ و ۲۱ با تأثیرات زیر ۱ درصد و سرانه فضای سبز پایین یا متوسط (۱.۸۹ تا ۷.۶۶ مترمربع)، در وضعیت بحرانی هستند و ظرفیت تصفیه محدودی دارند. برای مثال، منطقه ۱۰ با سرانه فضای سبز ۰.۷۶ مترمربع و تأثیر ۰.۰۱ درصد، در مقایسه با منطقه ۲۲، شکاف عمیقی را نشان می‌دهد. این نابرابری‌ها ضرورت سرمایه‌گذاری در توسعه فضاهای سبز و زیرساخت‌های تصفیه در مناطق بحرانی را برجسته می‌کند. تقویت این مناطق می‌تواند به کاهش نابرابری‌های زیست‌محیطی و بهبود سلامت عمومی در کل شهر کمک کند، به‌ویژه در مناطقی که در حال حاضر از نظر منابع سبز و ظرفیت تصفیه در مضیقه هستند. (جدول ۳)

نیز به دلیل سرانه فضای سبز بالا (۱۵.۴۸ و ۱۴.۷۲ مترمربع) و حجم قابل‌توجه تصفیه دی‌اکسید گوگرد و نیتروژن دی‌اکسید، در دسته مناطق مطلوب قرار می‌گیرند. این مناطق با زیرساخت‌های زیست‌محیطی قوی، به طور مؤثری به بهبود سلامت عمومی کمک می‌کنند. در مقابل، مناطقی مانند ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۲ با تأثیرات ناچیز (زیر ۰.۱ درصد) و سرانه فضای سبز بسیار پایین (۰.۷۶ تا ۲.۵۸ مترمربع)، در وضعیت بحرانی قرار دارند. این مناطق به دلیل ظرفیت محدود تصفیه آلاینده‌ها، نشان‌دهنده توزیع نامتوازن منابع سبز در شهر هستند. مناطق با تأثیر متوسط مانند ۱۵، ۱۶ و ۱۹ (با تأثیرات ۳.۱۲، ۲.۲۵ و ۳.۶۳ درصد) به دلیل سرانه فضای سبز متوسط (۶.۷۵ تا ۱۳.۵۷ مترمربع) و ظرفیت تصفیه قابل‌قبول، در وضعیت

جدول ۳. میزان اثر گذاری مناطق تهران بر کاهش نرخ مرگ و میر

منطقه	درصد تأثیر در کاهش مرگ‌ومیر	طبقه بندی اثر گذاری	وضعیت منطقه	توضیحات
۲۲	۶۰.۸	بسیار بالا	مطلوب	سرانه فضای سبز بسیار بالا و ظرفیت تصفیه آلاینده‌ها بسیار زیاد، نشان‌دهنده شرایط ایده‌آل برای کاهش مرگ‌ومیر.
۱	۱۳.۲۴	بالا	مطلوب	سرانه فضای سبز بالا و مساحت زیاد فضاهای سبز، شرایط مناسب برای کاهش مرگ‌ومیر.
۴	۱۲.۸۲	بالا	مطلوب	سرانه فضای سبز بالا و ظرفیت بالای تصفیه، نشان‌دهنده وضعیت مطلوب.
۱۹	۳.۶۳	متوسط	نیازمند بهبود	سرانه فضای سبز خوب، اما ظرفیت تصفیه کمتر از مناطق برتر، نیازمند تقویت زیرساخت‌های سبز.
۱۵	۳.۱۲	متوسط	نیازمند بهبود	سرانه فضای سبز متوسط، ظرفیت تصفیه قابل‌قبول اما نیاز به توسعه فضای سبز.
۱۶	۲.۲۵	متوسط	نیازمند بهبود	سرانه فضای سبز متوسط، نیاز به افزایش ظرفیت تصفیه و فضای سبز.
۱۸	۰.۸۱	پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز متوسط، اما ظرفیت تصفیه پایین، نیازمند توجه فوری به زیرساخت‌های سبز.
۲۰	۰.۷۲	پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز متوسط، اما ظرفیت تصفیه بسیار پایین، وضعیت بحرانی.
۱۳	۰.۶۸	پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز پایین، ظرفیت تصفیه محدود، وضعیت بحرانی.
۱۷	۰.۶۵	پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز بسیار پایین، ظرفیت تصفیه ناکافی، وضعیت بحرانی.
۲۱	۰.۶۲	پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز متوسط، اما ظرفیت تصفیه پایین، نیازمند بهبود فوری.
۲	۰.۵۹	پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز پایین، ظرفیت تصفیه ناکافی، وضعیت بحرانی.

۵	۰.۵۶	پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز بسیار پایین، ظرفیت تصفیه پایین، وضعیت بحرانی.
۳	۰.۴۹	پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز پایین، ظرفیت تصفیه بسیار پایین، وضعیت بحرانی.
۱۴	۰.۱۱	بسیار پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز بسیار پایین، ظرفیت تصفیه ناچیز، وضعیت بسیار بحرانی.
۱۱	۰.۰۷	بسیار پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز بسیار پایین، ظرفیت تصفیه بسیار محدود، وضعیت بسیار بحرانی.
۶	۰.۱۷	بسیار پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز پایین، ظرفیت تصفیه بسیار پایین، وضعیت بسیار بحرانی.
۷	۰.۰۲	بسیار پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز بسیار پایین، ظرفیت تصفیه ناچیز، وضعیت بسیار بحرانی.
۸	۰.۰۲	بسیار پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز بسیار پایین، ظرفیت تصفیه ناچیز، وضعیت بسیار بحرانی.
۹	۰.۰۱	بسیار پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز بسیار پایین، ظرفیت تصفیه ناچیز، وضعیت بسیار بحرانی.
۱۰	۰.۰۱	بسیار پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز بسیار پایین، ظرفیت تصفیه ناچیز، وضعیت بسیار بحرانی.
۱۲	۰.۰۱	بسیار پایین	بحرانی	سرانه فضای سبز پایین، ظرفیت تصفیه ناچیز، وضعیت بسیار بحرانی.

تحلیل می‌کنیم تا تصویر کاملی از وضعیت تهران به دست آید.

منطقه ۲ با سرانه فضای سبز ۶۲.۹۲ متر مربع و تأثیر ۶۰.۸٪ در کاهش مرگ‌ومیر به‌وضوح یک نقطه پرت و استثنایی است. این منطقه بالاترین سرانه فضای سبز را در بین تمام مناطق دارد و تأثیر آن در کاهش مرگ‌ومیر نیز به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از سایر مناطق است. این موضوع نشان می‌دهد که وجود فضای سبز گسترده، احتمالاً به‌صورت پارک‌ها، بوستان‌ها یا جنگل‌کاری‌های وسیع، می‌تواند اثرات مثبت چشمگیری بر سلامت عمومی و کاهش مرگ‌ومیر داشته باشد. منطقه ۲۲ احتمالاً به دلیل داشتن فضاهای سبز بزرگ مانند پارک چیتگر یا دیگر فضاهای طبیعی، از نظر زیست‌محیطی و سلامت عمومی در موقعیت ممتازی قرار دارد. این سطح از تأثیر (۶۰.۸٪) ممکن است به عواملی مانند کاهش آلودگی هوا، بهبود کیفیت زندگی، افزایش فعالیت بدنی ساکنان و کاهش استرس مرتبط با محیط‌های سبز مرتبط باشد.

در رتبه‌های بعدی، مناطق ۱ و ۴ با سرانه فضای سبز به‌ترتیب ۱۵.۴۸ و ۱۴.۷۲ متر مربع قرار دارند که تأثیرات قابل‌توجهی

برای تحلیل تفصیلی رابطه بین سرانه فضای سبز و تأثیر آن در کاهش مرگ‌ومیر در ۲۲ منطقه تهران، از داده‌های ارائه‌شده استفاده می‌کنیم که شامل سرانه فضای سبز (متر مربع به ازای هر نفر) و درصد تأثیر در کاهش مرگ‌ومیر است. هدف این است که درک عمیقی از وضعیت هر منطقه ارائه دهیم و رابطه بین این دو متغیر را با تمرکز بر وضعیت مناطق تهران بررسی کنیم. تحلیل همبستگی قبلاً نشان داد که ضریب همبستگی پیرسون ۰.۹۸ است، که بیانگر رابطه خطی بسیار قوی بین سرانه فضای سبز و کاهش مرگ‌ومیر است. حالا به‌صورت تفصیلی وضعیت هر منطقه را بررسی کرده و تحلیل جامعی ارائه می‌دهیم.

داده‌ها نشان‌دهنده تفاوت‌های چشمگیر بین مناطق مختلف تهران از نظر سرانه فضای سبز و تأثیر آن بر کاهش مرگ‌ومیر است. برای درک بهتر، مناطق را بر اساس سرانه فضای سبز و تأثیرشان بررسی می‌کنیم و سپس به تحلیل کلی وضعیت و الگوهای موجود می‌پردازیم. ابتدا به سراغ مناطق با سرانه فضای سبز بالا می‌رویم و سپس مناطق با مقادیر پایین‌تر را

۰.۴۹٪ تا ۰.۸۱٪ است. این مناطق نشان‌دهنده وضعیت نامناسب‌تری از نظر دسترسی به فضای سبز هستند. برای مثال، منطقه ۲ با سرانه ۴.۵۲ متر مربع و تأثیر ۰.۵۹٪، یا منطقه ۱۸ با سرانه ۵.۶۸ متر مربع و تأثیر ۰.۸۱٪، نشان می‌دهند که سرانه فضای سبز در این مناطق به حد کافی نیست تا تأثیر قابل توجهی بر سلامت عمومی داشته باشد. این مناطق احتمالاً با چالش‌هایی مانند تراکم بالای جمعیتی، فضاهای سبز محدود یا پراکندگی نامناسب این فضاها مواجه هستند. منطقه ۲۱ با سرانه ۷.۶۶ متر مربع و تأثیر ۰.۶۲٪، استثنایی در این گروه است، زیرا با وجود سرانه نسبتاً بالاتر، تأثیر آن همچنان پایین است که ممکن است به عواملی مانند کیفیت پایین فضای سبز یا دسترسی محدود ساکنان به این فضاها مرتبط باشد.

در انتهای طیف، مناطق ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۴ با سرانه فضای سبز بسیار پایین (بین ۰.۷۶ تا ۳.۲۹ متر مربع) و تأثیرات ناچیز (۰.۰۱٪ تا ۰.۱۷٪) در دسته "بسیار پایین" قرار دارند. این مناطق وضعیت بحرانی از نظر فضای سبز دارند. برای مثال، منطقه ۱۰ با سرانه ۰.۷۶ متر مربع و تأثیر ۰.۰۱٪، یا منطقه ۹ با سرانه ۱.۰۱ متر مربع و تأثیر ۰.۰۱٪، نشان‌دهنده فقدان تقریباً کامل فضای سبز مؤثر هستند. این مناطق احتمالاً در مرکز شهر یا مناطق پرتراکم تهران قرار دارند که فضای کافی برای ایجاد پارک‌ها یا فضاهای سبز وجود ندارد. تأثیر ۰.۰۱٪ این مناطق در کاهش مرگ‌ومیر نشان‌دهنده نیاز فوری به برنامه‌ریزی شهری برای افزایش فضای سبز است، زیرا کمبود آن می‌تواند به افزایش بیماری‌های مرتبط با آلودگی هوا، استرس و سبک زندگی ناسالم منجر شود.

برای تحلیل کلی، می‌توان گفت که تهران از نظر سرانه فضای سبز و تأثیر آن بر کاهش مرگ‌ومیر به شدت نابرابر است. منطقه ۲۲ به‌عنوان یک نمونه موفق، نشان‌دهنده پتانسیل بالای فضای سبز در بهبود سلامت عمومی است، در حالی که مناطقی مانند ۷، ۸، ۹ و ۱۰ در وضعیت بحرانی قرار دارند. الگوی کلی داده‌ها نشان می‌دهد که هرچه سرانه فضای سبز بیشتر باشد، تأثیر در کاهش مرگ‌ومیر به‌صورت خطی افزایش می‌یابد، اما این رابطه در مناطق با سرانه بسیار پایین (زیر ۲ متر مربع) تقریباً به صفر می‌رسد، که نشان‌دهنده یک آستانه

در کاهش مرگ‌ومیر دارند (۱۳.۲۴٪ و ۱۲.۸۲٪). این دو منطقه نیز در دسته‌بندی کیفی "بالا" قرار گرفته‌اند، که نشان‌دهنده ارتباط مستقیم بین سرانه فضای سبز بالا و تأثیر مثبت بر سلامت است. این مناطق احتمالاً دارای پارک‌های بزرگ، باغ‌ها یا فضاهای سبز شهری قابل توجهی هستند که به بهبود شرایط زیست‌محیطی و کاهش عوامل خطر مرگ‌ومیر (مانند بیماری‌های تنفسی یا قلبی مرتبط با آلودگی) کمک می‌کنند. تفاوت اندک بین تأثیر این دو منطقه (حدود ۰.۴٪) با وجود سرانه‌های نزدیک به هم نشان می‌دهد که پس از یک آستانه مشخص (حدود ۱۰-۱۵ متر مربع)، افزایش سرانه فضای سبز همچنان تأثیر مثبت دارد، اما شدت افزایش تأثیر ممکن است کمی کاهش یابد.

منطقه ۱۹ با سرانه فضای سبز ۱۳.۵۷ متر مربع و تأثیر ۳.۶۳٪ در دسته "متوسط" قرار دارد. این منطقه، اگرچه سرانه فضای سبز قابل‌قبولی دارد، اما تأثیر آن در مقایسه با مناطق ۱ و ۴ به مراتب کمتر است. این اختلاف ممکن است به عواملی مانند توزیع نابرابر فضای سبز در منطقه، کیفیت فضای سبز (مانند نوع پوشش گیاهی یا دسترسی ساکنان)، یا عوامل اجتماعی-اقتصادی مانند تراکم جمعیت و شرایط زندگی بستگی داشته باشد. این موضوع نشان می‌دهد که تنها مقدار سرانه فضای سبز کافی نیست و نحوه مدیریت و دسترسی به این فضاها نیز در تأثیرگذاری آن‌ها نقش دارد.

مناطق ۱۵ و ۱۶ با سرانه‌های ۸.۱۶ و ۶.۷۵ متر مربع و تأثیرات ۳.۱۲٪ و ۲.۲۵٪ نیز در دسته "متوسط" قرار دارند. این مناطق نشان‌دهنده یک الگوی میانی هستند که در آن سرانه فضای سبز کمتر از مناطق ۱، ۴ و ۱۹ است، اما همچنان تأثیر قابل توجهی در کاهش مرگ‌ومیر دارند. این مناطق احتمالاً دارای پارک‌های محلی یا فضاهای سبز کوچک‌تر هستند که به‌طور نسبی به بهبود سلامت عمومی کمک می‌کنند، اما به دلیل سرانه پایین‌تر، تأثیرشان محدودتر است. مقایسه این مناطق با مناطق دارای سرانه بالاتر نشان می‌دهد که افزایش سرانه فضای سبز می‌تواند به‌طور مستقیم به افزایش تأثیر در کاهش مرگ‌ومیر منجر شود.

اکثر مناطق دیگر (مناطق ۲، ۳، ۵، ۱۳، ۱۷، ۱۸، ۲۰ و ۲۱) با سرانه فضای سبز بین ۱.۸۹ تا ۷.۶۶ متر مربع در دسته "پایین" قرار دارند و تأثیرشان در کاهش مرگ‌ومیر بین

فضاهای سبز موجود باشد تا تأثیر مثبت آن‌ها بر سلامت عمومی به حداکثر برسد.

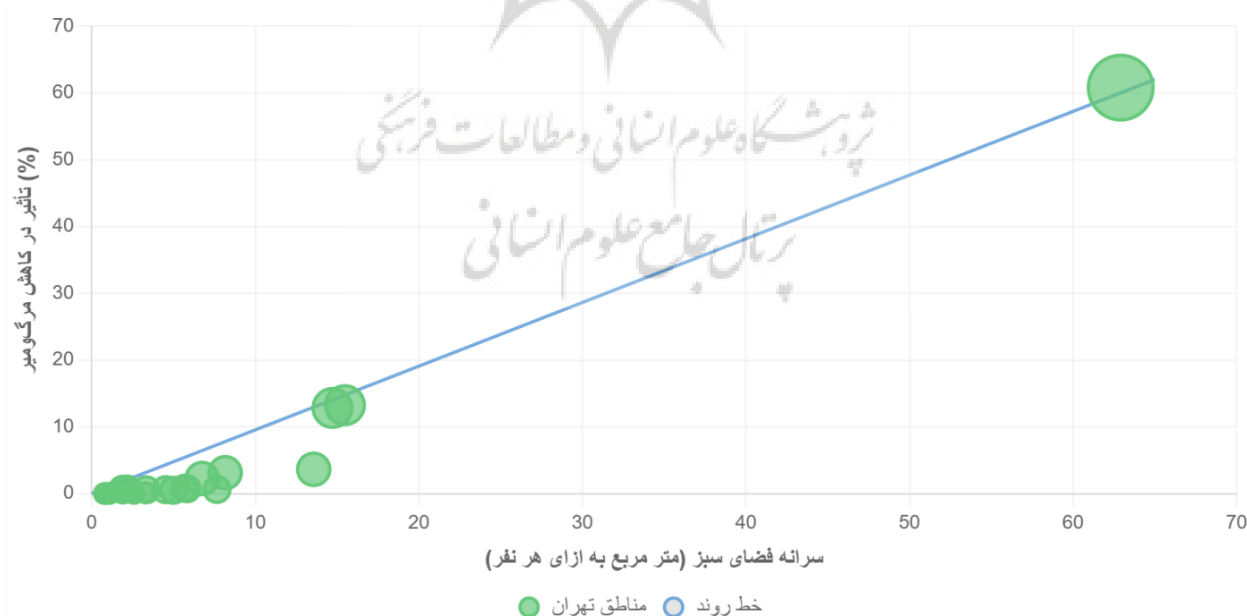
بحث و نتیجه گیری

تحلیل جامع داده‌های مربوط به سرانه فضای سبز و تأثیر آن بر کاهش آلودگی هوا و مرگ‌ومیر در ۲۲ منطقه تهران، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با وضوح بالا، اندازه‌گیری‌های میدانی، و تحلیل‌های نرم‌افزار کنوپی (Canopy نسخه ۷.۱)، نشان‌دهنده نابرابری‌های قابل توجه در توزیع منابع سبز و ظرفیت کاهش آلودگی هوا در این کلان‌شهر است.

این مطالعه با تمرکز بر آلاینده‌های کلیدی شامل ذرات معلق ریز (PM2.5)، ذرات معلق درشت (PM10)، مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO2)، اوزون (O3)، و دی‌اکسید گوگرد (SO2)، همراه با ارزیابی میزان کربن ذخیره‌شده و تصفیه‌شده توسط پوشش سبز، الگوهای منطقه‌ای را شناسایی کرده و بینش‌های ارزشمندی برای مدیریت پایدار شهری ارائه می‌دهد. یافته‌ها رابطه‌ای قوی بین سرانه فضای سبز و کاهش مرگ‌ومیر را نشان می‌دهند، به‌طوری‌که مناطق با سرانه بالاتر، تأثیرات مثبت بیشتری بر سلامت عمومی دارند.

حداقلی برای تأثیرگذاری فضای سبز است. همچنین، تفاوت بین مناطق با سرانه متوسط (مانند مناطق ۱۵ و ۱۶) و مناطق با سرانه بالا (مانند ۱ و ۴) نشان می‌دهد که افزایش سرانه فضای سبز فراتر از ۱۰ متر مربع می‌تواند تأثیرات چشمگیری داشته باشد.

از منظر برنامه‌ریزی شهری، این داده‌ها نشان‌دهنده نیاز به سرمایه‌گذاری در مناطق محروم از فضای سبز، به‌ویژه مناطق ۶ تا ۱۴، است. ایجاد پارک‌های محلی، گسترش فضای سبز در حاشیه شهر و بهبود دسترسی ساکنان به این فضاها می‌تواند به کاهش نابرابری‌های موجود کمک کند. همچنین، توجه به کیفیت فضای سبز (مانند تنوع گیاهی، امکانات تفریحی و دسترسی‌پذیری) به اندازه کمیت آن اهمیت دارد، زیرا برخی مناطق با سرانه نسبتاً خوب (مانند منطقه ۲۱) تأثیر پایینی دارند که ممکن است به مشکلات کیفی یا مدیریتی مرتبط باشد. در نهایت، نمودار همبستگی (شکل ۱۲)، این رابطه خطی قوی را به‌خوبی نشان می‌دهد. نقاط مربوط به مناطق ۱، ۴ و ۲۲ در بالای نمودار و مناطق ۶ تا ۱۴ در پایین آن قرار دارند، که تأییدکننده نابرابری‌های موجود است. برای بهبود وضعیت کلی تهران، باید تمرکز بر افزایش سرانه فضای سبز در مناطق محروم و حفظ کیفیت



شکل ۱۲. همبستگی سرانه فضای سبز و کاهش مرگ و میر در مناطق ۲۲ گانه تهران

مرگومیر است، پرهیز می‌کند، زیرا عوامل دیگری مانند تراکم جمعیت، الگوهای ترافیکی، و شرایط اقتصادی-اجتماعی نیز می‌توانند تأثیرگذار باشند.

مطابق جدول ۴، برای کاهش نابرابری‌های زیست‌محیطی، پیشنهادها زیر با اولویت‌بندی مشخص ارائه می‌شوند:

○ اولویت‌بندی توسعه فضای سبز در مناطق

کم‌برخوردار: مناطق ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۲ با سرانه فضای سبز زیر ۲.۵۸ مترمربع باید در اولویت اول توسعه فضای سبز قرار گیرند. ایجاد پارک‌های محلی، بام‌های سبز، و دیوارهای گیاهی در این مناطق می‌تواند دسترسی به فضای سبز را بهبود بخشد. به‌عنوان مثال، منطقه ۱۰ با سرانه ۰.۷۶ مترمربع و تصفیه تنها ۱۴.۵ کیلوگرم ذرات معلق ریز (PM2.5)، نیازمند سرمایه‌گذاری فوری برای کاشت درختان برگ‌پهن با ظرفیت بالای تصفیه (مانند چنار یا افرا) است.

○ تقویت زیرساخت‌های سبز در مناطق میانی:

مناطق ۱۵، ۱۶ و ۱۹ با سرانه متوسط (۶.۷۵ تا ۱۳.۵۷ مترمربع) باید از طریق بهبود مدیریت فضای سبز (مانند آبیاری منظم و تنوع گونه‌های گیاهی) و افزایش دسترسی ساکنان به پارک‌ها تقویت شوند. این اقدام می‌تواند تأثیر تصفیه آلودگی هوا را تا ۱۰-۵٪ افزایش دهد.

○ بررسی تأثیر فصلی پوشش سبز: با توجه به تغییرات

فصلی در عملکرد پوشش سبز (مانند ریزش برگ‌ها در پاییز)، پیشنهاد می‌شود مطالعات فصلی برای ارزیابی کارایی گونه‌های همیشه‌سبز (مانند کاج یا سرو) در تصفیه آلودگی هوا، به‌ویژه در زمستان که آلودگی هوا در تهران شدت می‌یابد، انجام شود. این امر به انتخاب گونه‌های مناسب برای مناطق مختلف کمک می‌کند.

○ تحلیل نقش گونه‌های گیاهی: کاشت گونه‌هایی با

ظرفیت بالای جذب آلودگی هوا (مانند درختان برگ‌پهن برای ذرات معلق ریز (PM2.5) و گونه‌های مقاوم به دی‌اکسید نیتروژن (NO2) مانند بلوط (باید در اولویت قرار گیرد. مطالعه‌ای جامع برای شناسایی گونه‌های بومی و مقاوم به شرایط آب‌وهوایی تهران توصیه می‌شود.

منطقه ۲۲ با سرانه فضای سبز ۶۲.۹۲ مترمربع و تأثیر ۶۰.۸٪ در کاهش مرگومیر، به دلیل مساحت گسترده پوشش سبز (بیش از

۱۳ میلیون مترمربع) و موقعیت جغرافیایی مطلوب در مجاورت کوهپایه‌های البرز، عملکردی برجسته در تصفیه آلودگی هوا (۶۲۳۴۸ کیلوگرم ذرات معلق ریز (PM2.5)، ۴۷۸۵۰۰ کیلوگرم ذرات معلق درشت (PM10)، و ۱۱۹۴۶۰۰ واحد در میلیارد (ppb) اوزون (O3)) و صرفه‌جویی اقتصادی سالانه حدود ۹۰۰ میلیون دلار دارد. مناطق ۱ و ۴ با سرانه‌های ۱۵.۴۸ و ۱۴.۷۲ مترمربع و تأثیرات ۱۳.۲۴٪ و ۱۲.۸۲٪ نیز از طریق فرآیندهای بیولوژیکی مانند رسوب‌گذاری ذرات و متابولیسم گیاهی، به کاهش غلظت آلودگی هوا (به‌ویژه ذرات معلق ریز (PM2.5) و اوزون (O3)) و بهبود سلامت تنفسی و قلبی‌عروقی کمک می‌کنند. در مقابل، مناطق مرکزی و جنوبی مانند ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۲ با سرانه‌های بسیار پایین (۰.۷۶ تا ۲.۵۸ مترمربع) و تأثیرات کم (۰.۰۱٪ تا ۰.۱٪) در کاهش مرگومیر، با چالش‌هایی مانند تراکم بالای جمعیتی، فعالیت‌های صنعتی، و کمبود فضای سبز مواجه‌اند. این مناطق تصفیه محدودی از آلودگی هوا (۱۲.۱ تا ۲۸.۲ کیلوگرم ذرات معلق ریز (PM2.5)) و کربن ذخیره‌شده اندک (۴۱۲ تا ۹۶۵ واحد) دارند، که آسیب‌پذیری بالای آن‌ها را در برابر اثرات آلودگی هوا نشان می‌دهد. مناطق میانی مانند ۱۵، ۱۶ و ۱۹ با سرانه‌های ۶.۷۵ تا ۱۳.۵۷ مترمربع و تأثیرات ۲.۲۵ تا ۳.۶۳٪ عملکرد بهتری دارند، اما همچنان نیازمند تقویت زیرساخت‌های سبز هستند.

از منظر مکانیسم‌های بیولوژیکی، پوشش سبز از طریق جذب سطحی، رسوب‌گذاری، و متابولیسم گیاهی، آلودگی هوا را کاهش می‌دهد و اثرات مخرب آن مانند استرس اکسیداتیو و التهاب را تعدیل می‌کند. به‌طور خاص، ذرات معلق ریز (PM2.5) و دی‌اکسید گوگرد (SO2) به دلیل نفوذپذیری بالا به سیستم تنفسی، تأثیرات منفی بیشتری بر مرگومیر دارند، و افزایش ۱۰ میکروگرم بر مترمکعب ذرات معلق ریز (PM2.5) یا ۱ واحد در میلیارد (ppb) دی‌اکسید گوگرد (SO2) به‌ترتیب با ۲.۹٪ و ۲.۸٪ افزایش مرگومیر مرتبط است. بااین‌حال، این مطالعه از نتیجه‌گیری‌های علی مستقیم، مانند ادعای اینکه فضای سبز به‌تنهایی عامل اصلی کاهش

هوا و مرگومیر مرتبط با آن کمک می‌کند، بلکه پایداری زیست‌محیطی، سلامت عمومی، و رفاه اجتماعی را در کلان‌شهر تهران تقویت می‌کند. اجرای این راهکارها نیازمند همکاری بین شهرداری، سازمان‌های زیست‌محیطی، بخش خصوصی، و شهروندان است تا توزیع عادلانه منابع سبز و کاهش نابرابری‌های زیست‌محیطی در تهران محقق شود.

پیشنهادهایی برای آینده

آینده‌پژوهی این مطالعه بر توسعه پایدار فضای سبز در تهران برای کاهش آلودگی هوا و مرگومیر تمرکز دارد. با توجه به رابطه قوی (ضریب همبستگی ۰.۹۸) بین سرانه فضای سبز و کاهش مرگومیر، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر بررسی تأثیر فصلی گونه‌های همیشه‌سبز (مانند کاج) در تصفیه آلاینده‌ها (همچون ذرات معلق ریز (PM2.5))، تحلیل گونه‌های بومی با ظرفیت بالای جذب آلودگی (مانند بلوط)، و ارزیابی هزینه-فایده توسعه فضای سبز در مناطق کم‌برخوردار (مانند مناطق ۷ تا ۱۲ با سرانه ۰.۷۶ تا ۲.۵۸ مترمربع) متمرکز شود.

یکپارچه‌سازی فناوری‌های نوین (مانند حسگرهای کیفیت هوا و بام‌های سبز) و مشارکت شهروندان در کاشت و نگهداری فضای سبز می‌تواند پایداری شهری و سلامت عمومی را تقویت کند.

○ **ارزیابی هزینه-فایده توسعه فضای سبز:** انجام تحلیل هزینه-فایده برای توسعه فضای سبز در مناطق کم‌برخوردار (مانند مناطق ۷ تا ۱۲) ضروری است. این تحلیل باید شامل صرفه‌جویی‌های بهداشتی (مانند کاهش هزینه‌های درمان بیماری‌های تنفسی) و مزایای اقتصادی (مانند افزایش ارزش املاک) باشد. به عنوان مثال، سرمایه‌گذاری در منطقه ۷ می‌تواند با صرفه‌جویی سالانه ۴۰۰-۵۰۰ هزار دلار، بازگشت سرمایه قابل توجهی داشته باشد.

○ **سیاست‌گذاری‌های یکپارچه:** سیاست‌گذاران شهری باید برنامه‌های توسعه فضای سبز را با کاهش انتشار آلودگی هوا از منابع متحرک (مانند بهبود حمل‌ونقل عمومی) و ثابت (مانند فیلتراسیون صنعتی) ترکیب کنند. همچنین، مشارکت شهروندان و سازمان‌های غیردولتی در طرح‌های کاشت درخت و نگهداری پارک‌ها می‌تواند هزینه‌ها را کاهش داده و پایداری پروژه‌ها را افزایش دهد.

این مطالعه چارچوبی مبتنی بر داده برای ارزیابی خدمات اکوسیستمی پوشش سبز فراهم کرده و بر ضرورت نظارت مستمر بر کیفیت هوا، به‌ویژه در مناطق آسیب‌پذیر، تأکید دارد. حفظ و گسترش پوشش سبز نه تنها به کاهش آلودگی

جدول ۴. راهبرد های پیشنهادی

منطقه	وضعیت پوشش سبز	تأثیر در کاهش مرگومیر	راهکارهای پیشنهادی
۱	مطلوب (سرانه ۱۵.۴۸ مترمربع، مساحت ۷.۸ میلیون مترمربع)	بالا (۱۳.۲۴٪ تأثیر)	حفظ و نگهداری فضاهای سبز موجود با مدیریت پایدار، کاشت گونه‌های درختی با ظرفیت بالای تصفیه (مانند چنار و کاج)، توسعه پارک‌های محلی جدید در نواحی پرتراکم، و استفاده از فناوری‌های سبز مانند بام‌های سبز در ساختمان‌ها.
۲	بحرانی (سرانه ۴.۵۲ مترمربع، مساحت ۳.۳ میلیون مترمربع)	پایین (۰.۵۹٪ تأثیر)	افزایش تعداد درختان برگ‌پهن در معابر و پارک‌ها، احیای فضاهای سبز تخریب‌شده، ایجاد دیوارهای گیاهی در مناطق پرتراکم، و تشویق مشارکت شهروندان در کاشت درختان.
۳	بحرانی (سرانه ۴.۹۹ مترمربع، مساحت ۱.۶ میلیون مترمربع)	پایین (۰.۴۹٪ تأثیر)	توسعه فضاهای سبز کوچک در زمین‌های بایر، کاشت درختان مقاوم به آلودگی، کاهش انتشار آلاینده‌ها از وسایل نقلیه با بهبود حمل‌ونقل عمومی، و ایجاد مشوق‌های مالی برای پروژه‌های سبز.
۴	مطلوب (سرانه ۱۴.۷۲ مترمربع، مساحت ۱۴.۲ میلیون مترمربع)	بالا (۱۲.۸۲٪ تأثیر)	تقویت مدیریت فضاهای سبز با نظارت بر سلامت درختان، گسترش پارک‌های منطقه‌ای، و ادغام فناوری‌های O3 و PM2.5 استفاده از گونه‌های گیاهی با کارایی بالا در تصفیه سبز در زیرساخت‌های شهری.

۵	بحرانی (سرانه ۳.۳۳ مترمربع، مساحت ۳.۰ میلیون مترمربع)	پایین (۰.۵۶٪ تأثیر)	افزایش تراکم پوشش درختی در مناطق پرجمعیت، بازسازی پارک‌های قدیمی، توسعه بام‌های سبز در مجتمع‌های مسکونی، و کاهش تردد وسایل نقلیه شخصی با توسعه مسیرهای دوچرخه‌سواری.
۶	بحرانی (سرانه ۳.۲۹ مترمربع، مساحت ۰.۸۷ میلیون مترمربع)	بسیار پایین (۰.۱۷٪ تأثیر)	احداث پارک‌های محلی در نواحی کم‌برخوردار، کاشت درختان مقاوم به شرایط شهری، ایجاد دیوارهای گیاهی در خیابان‌های اصلی، و همکاری با بخش خصوصی برای توسعه فضاهای سبز.
۷	بحرانی (سرانه ۱.۱ مترمربع، مساحت ۰.۳۴ میلیون مترمربع)	بسیار پایین (۰.۰۳٪ تأثیر)	اجرای فوری برنامه‌های کاشت درخت در معابر و زمین‌های بایر، توسعه میکروپارک‌ها، استفاده از فناوری‌های سبز مانند دیوارهای گیاهی، و کاهش انتشارات صنعتی با نظارت دقیق‌تر.
۸	بحرانی (سرانه ۰.۸۵ مترمربع، مساحت ۰.۳۹ میلیون مترمربع)	بسیار پایین (۰.۰۳٪ تأثیر)	کاشت درختان برگ‌پهن با ظرفیت بالای تصفیه در خیابان‌های پرتردد، احیای فضاهای سبز متروکه، توسعه بام‌های سبز در ساختمان‌های تجاری، و آموزش عمومی برای حفظ پوشش سبز.
۹	بحرانی (سرانه ۱.۰۱ مترمربع، مساحت ۰.۱۸ میلیون مترمربع)	بسیار پایین (۰.۰۱٪ تأثیر)	ایجاد فضاهای سبز کوچک در نواحی متراکم، کاشت درختان مقاوم به آلودگی، توسعه دیوارهای گیاهی در تقاطع‌های پرترافیک، و همکاری با سازمان‌های غیردولتی برای تأمین منابع مالی.
۱۰	بحرانی (سرانه ۰.۷۶ مترمربع، مساحت ۰.۲۶ میلیون مترمربع)	بسیار پایین (۰.۰۱٪ تأثیر)	اجرای پروژه‌های فوری کاشت درخت در زمین‌های بایر، توسعه میکروپارک‌ها در محله‌ها، استفاده از بام‌های سبز در ساختمان‌های عمومی، و کاهش ترافیک با بهبود حمل‌ونقل عمومی.
۱۱	بحرانی (سرانه ۱.۹۱ مترمربع، مساحت ۰.۶۱ میلیون مترمربع)	بسیار پایین (۰.۰۷٪ تأثیر)	افزایش تراکم درختی در معابر، احداث پارک‌های محلی، توسعه دیوارهای گیاهی در مناطق پرآلودگی، و تشویق مشارکت مردمی در پروژه‌های سبز.
۱۲	بحرانی (سرانه ۲.۵۸ مترمربع، مساحت ۰.۶۲ میلیون مترمربع)	بسیار پایین (۰.۰۱٪ تأثیر)	بازسازی فضاهای سبز موجود، کاشت درختان با ظرفیت تصفیه بالا، ایجاد میکروپارک‌ها با نظارت بر فعالیت‌های صنعتی، PM2.5 در نواحی پرجمعیت، و کاهش انتشار
۱۳	بحرانی (سرانه ۲.۱۷ مترمربع، مساحت ۰.۵۳ میلیون مترمربع)	پایین (۰.۶۸٪ تأثیر)	توسعه فضاهای سبز در حاشیه شهر، کاشت درختان مقاوم به گردوغبار، بهبود سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، و ایجاد مشوق‌های مالی برای توسعه سبز.
۱۴	بحرانی (سرانه ۱.۸۳ مترمربع، مساحت ۰.۹۸ میلیون مترمربع)	بسیار پایین (۰.۱۱٪ تأثیر)	افزایش تعداد درختان در پارک‌ها و معابر، احداث پارک‌های محلی جدید، استفاده از فناوری‌های سبز مانند بام‌های سبز، و کاهش انتشارات وسایل نقلیه با توسعه مسیرهای پیاده‌روی.
۱۵	نیازمند بهبود (سرانه ۸.۱۶ مترمربع، مساحت ۵.۲ میلیون مترمربع)	متوسط (۳.۱۲٪ تأثیر)	تقویت مدیریت فضاهای سبز موجود، کاشت گونه‌های درختی با کارایی بالا در تصفیه ، توسعه پارک‌های منطقه‌ای، و نظارت بر انتشارات صنعتی. NO2 و SO2
۱۶	نیازمند بهبود (سرانه ۶.۷۵ مترمربع، مساحت ۱.۷۸ میلیون مترمربع)	متوسط (۲.۲۵٪ تأثیر)	افزایش تراکم درختی در نواحی کم‌پوشش، بازسازی پارک‌های قدیمی، توسعه بام‌های سبز در مجتمع‌های مسکونی، و بهبود سیستم‌های آبیاری برای حفظ پوشش سبز.
۱۷	بحرانی (سرانه ۱.۸۹ مترمربع، مساحت ۰.۵۴ میلیون مترمربع)	پایین (۰.۶۵٪ تأثیر)	کاشت درختان برگ‌پهن در معابر، احداث میکروپارک‌ها، توسعه دیوارهای گیاهی در خیابان‌های پرتردد، و کاهش ترافیک با گسترش حمل‌ونقل عمومی.
۱۸	بحرانی (سرانه ۵.۶۸ مترمربع، مساحت ۲.۴۶ میلیون مترمربع)	پایین (۰.۸۱٪ تأثیر)	توسعه فضاهای سبز در نواحی حاشیه‌ای، کاشت درختان مقاوم به گردوغبار، بهبود با نظارت بر فعالیت‌های ساختمانی. PM10 زیرساخت‌های آبیاری، و کاهش انتشار

۱۹	نیازمند بهبود (سرانه ۱۳.۵۷ مترمربع، مساحت ۳.۶۵ میلیون مترمربع)	متوسط (۳.۶۳٪ تأثیر)	حفظ و گسترش فضاهای سبز موجود، کاشت گونه‌های درختی با ظرفیت تصفیه بالا، PM2.5 توسعه پارک‌های منطقه‌ای، و نظارت بر انتشارات صنعتی برای کاهش
۲۰	بحرانی (سرانه ۵.۸۳ مترمربع، مساحت ۲.۱۹ میلیون مترمربع)	پایین (۰.۷۳٪ تأثیر)	افزایش تراکم درختی در نواحی پرجمعیت، بازسازی پارک‌های موجود، توسعه دیوارهای گیاهی در معابر، و کاهش ترافیک با بهبود حمل‌ونقل عمومی.
۲۱	بحرانی (سرانه ۷.۶۶ مترمربع، مساحت ۱.۵۱ میلیون مترمربع)	پایین (۰.۶۳٪ تأثیر)	کاشت درختان مقاوم به آلودگی در حاشیه شهر، توسعه فضاهای سبز کوچک، استفاده از بام‌های سبز در ساختمان‌ها، و کاهش انتشارات وسایل نقلیه با توسعه مسیرهای دوچرخه‌سواری.
۲۲	مطلوب (سرانه ۶۲.۹۲ مترمربع، مساحت ۱۳.۲ میلیون مترمربع)	بسیار بالا (۶۰.۸٪ تأثیر)	حفظ زیرساخت‌های سبز موجود با مدیریت پایدار، کاشت گونه‌های گیاهی با ظرفیت ، توسعه پارک‌های طبیعی در نواحی کوهپایه‌ای، و ترویج O3 و PM2.5 بالای تصفیه الگوی این منطقه برای سایر مناطق تهران.



تقدیر و تشکر: این مقاله مستخرج از رساله دکتری، نویسنده اول با عنوان «تاثیر پوشش گیاهی بر آلاینده های محیطی در پهنه های شهری اقلیم گرم و نیمه خشک (نمونه مورد مطالعه: منطقه تاریخی بهارستان تهران» به راهنمایی نویسندگان دوم و سوم و مشاوره نویسندگان چهارم و پنجم در دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) می باشد.

تأییدیه های اخلاقی: موردی گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی گزارش نشده است.

سهم نویسندگان در مقاله و منابع مالی: نویسنده اول، پژوهشگر و نگارنده اصلی، ایده پرداز، انجام مطالعات، تدوین محتوا و فرایند تحقیق با سهم ۴۰٪، نویسندگان دوم و سوم، پژوهشگران همکار، نظارت بر فرایند تحقیق و کنترل نتایج با سهم هر کدام ۲۰٪، نویسندگان سوم و چهارم، پژوهشگران همکار، راهنمای روششناسی، کنترل کیفیت نتایج و فرایند تحقیق با سهم ۱۰٪.

References

- [1]. Ghorbankhani Z, Zarrabi MM, Ghorbankhani M. The significance and benefits of green infrastructures using I-Tree canopy software with a sustainable approach. *Environ Dev Sustain*. 2024 Jun;26(6):14893–14913. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03226-9>
- [2]. Aghazadeh F, Hejazi S, Jafari M, Delavar MR. Spatial-temporal analysis of day-night time SUHI and its relationship between urban land use, NDVI, and air pollutants in Tehran metropolis. *Appl Geomat*. 2023;1–22. <https://doi.org/10.1007/s12518-023-00515-w>
- [3]. Venter ZS, Aunan K, Chowdhury S, Lelieveld J. Reassessing the role of urban green space in air pollution control. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2024 Feb 6;121(6):e2306200121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2306200121>
- [4]. Vatani M, Kiani K, Mahdavinnejad M, Georgescu M. Evaluating the effects of different tree species on enhancing outdoor thermal comfort in a post-industrial landscape. *Environ Res Lett*. 2024 May 10;19(6):064051. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad49b7>
- [5]. Kermani M, Naddafi K, Yunesian M, Rastkari N, Nabizadeh R, Farhadi M, et al. Effect of air pollution on the emergency admissions of cardiovascular and respiratory patients, using the air quality model: a study in Tehran, 2005–2014. *Health Emerg Disasters Q*. 2016;1(3):137–146. <https://doi.org/10.15412/J.HDQ.09010304>
- [6]. BBC News. Tehran's air pollution in 2019 has 'caused the loss of 45 thousand years of life for residents'. 2022 [cited 2024 Apr 5]. Available from: <https://www.bbc.com/persian/iran-60052335>
- [7]. Iran Front Page. Iran Health Ministry: Tehran 19th most polluted capital in world. 2024 [cited 2024 Apr 5]. Available from: <https://zaya.io/vrpep>
- [8]. Karimi B, Shokrinezhad B. Air pollution and the number of daily deaths due to respiratory causes in Tehran. *Atmos Environ*. 2021 Feb;246:118161. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118161>
- [9]. Karimi Moshaver M, Mansouri SA, Adibi A. Relationship Between The Urban Landscape and Position of Tall Building In The City. *Bagh Nazar*. 2010;7(13):89–99. https://www.bagh-sj.com/article_28.html
- [10]. Hoek G, Krishnan RM, Beelen R, Peters A, Ostro B, Brunekreef B, et al. Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. *Environ Health*. 2013;12:1–16. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-43>
- [11]. Nafstad P, Håland E, Lund E, Magnus P. Urban air pollution and mortality in a cohort of Norwegian men. *Environ Health Perspect*. 2004 Apr;112(5):610–615. <https://doi.org/10.1289/ehp.6684>
- [12]. Dong GH, Chen H, Wang B, Wang Y, Jin Y, Sun L, et al. Long-term exposure to ambient air pollution and respiratory disease mortality in Shenyang, China: a 12-year population-based retrospective cohort study. *Respiration*. 2012;83(5):360–368. <https://doi.org/10.1159/000332930>
- [13]. Zhou M, Liu Y, He Y, Li J, Liang F, Kinney PL, et al. The associations between ambient air pollution and adult respiratory mortality in 32 major Chinese cities, 2006–2010. *Environ Res*. 2015 Mar;137:278–286. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.12.016>

- [14]. Diener A, Mudu P. How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective—with implications for urban planning. *Sci Total Environ*. 2021 Nov 20;796:148605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148605>
- [15]. Bayat R, Hassanzadeh A, Naddafi K, Yunesian M, Rastkari N, Nabizadeh R, et al. Health impact and related cost of ambient air pollution in Tehran. *Environ Res*. 2019 Sep;176:108547. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108547>
- [16]. Jaafari S, Malakoutikhah S, Sadr M, Yunesian M, Naddafi K. Applying landscape metrics and structural equation modeling to predict the effect of urban green space on air pollution and respiratory mortality in Tehran. *Environ Monit Assess*. 2020 Jul;192(7):412. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08377-0>
- [17]. Venter ZS, Aunan K, Chowdhury S, Lelieveld J. Reassessing the role of urban green space in air pollution control. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2024 Feb 6;121(6):e2306200121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2306200121>
- [18]. Rojas-Rueda D, de Nazelle A, Teixidó O, Nieuwenhuijsen MJ. Green spaces and mortality: a systematic review and meta-analysis of cohort studies. *Lancet Planet Health*. 2019 Nov;3(11):e469–e477. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30215-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30215-3)
- [19]. Barboza EP, Vermeulen R, Strak M, de Hoogh K, Beelen R, Eeftens M, et al. Green space and mortality in European cities: a health impact assessment study. *Lancet Planet Health*. 2021 Oct;5(10):e718–e730. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00229-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00229-1)
- [20]. Bauwelinck M, Dendoncker K, Van Poppel F, De Vlieger I, Lefebvre W, Beckx C, et al. Residing in urban areas with higher green space is associated with lower mortality risk: a census-based cohort study with ten years of follow-up. *Environ Int*. 2021 Mar;148:106365. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106365>
- [21]. Twohig-Bennett C, Jones A. The health benefits of the great outdoors: A systematic review and meta-analysis of greenspace exposure and health outcomes. *Environ Res*. 2018 Oct;166:628–637. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.030>
- [22]. Miller EB, Barden EM, Wilson JS. Racial disparities in access to public green spaces: using geographic information systems to identify underserved populations in a small American city. *Environ Justice*. 2022 Aug;15(4):246–256. <https://doi.org/10.1089/env.2021.0067>
- [23]. Vos PE, Maiheu B, Vankerkom J, Janssen S. Improving local air quality in cities: to tree or not to tree? *Environ Pollut*. 2013 Dec;183:113–122. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.021>
- [24]. Ai H, Zhang X, Zhou Z. The impact of greenspace on air pollution: Empirical evidence from China. *Ecol Indic*. 2023 Jan;146:109881. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109881>
- [25]. Hu M, Liu B, Yin GS. Multi-Site and Multi-Pollutant Air Quality Data Modeling. *Sustainability*. 2024 Jan;16(1):16. <https://doi.org/10.3390/su16010165>
- [26]. Mazaheri Tehrani A, Karamali F, Chimehi E. Evaluation of 5 Air Criteria Pollutants; Tehran, Iran. *Int Arch Health Sci*. 2015;2(3).
- [27]. i-Tree. i-Tree Canopy Technical Notes. 2025 [cited 2025 Apr 5]. Available from: <https://canopy.itreetools.org/references>
- [28]. i-Tree. All Tools. 2025 [cited 2025 Apr 5]. Available from: <https://www.itreetools.org/tools>
- [29]. Diener A, Mudu P. How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective - with implications for urban planning. *Sci Total Environ*. 2021 Nov 20;796:148605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148605>
- [30]. Wiseman P, Hauer RJ, Endreny TA. Using i-Tree Canopy to Assess Tree Canopy Cover and Ecosystem Services of Three Urban Forests Within the George Washington Memorial Parkway. 2023 [cited 2025 Apr 5]. Available from: <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/64591>
- [31]. Kim TH, Kim YS, Lee JH. i-Tree Canopy-based Decision Support Method for Establishing Climate Change Adaptive Urban Forests. *J Semicond Display Technol*. 2024 Feb;23(1):12–18.

- [32]. <https://koreascience.kr/article/JAKO202411462418124.page>
- [33]. Tehran Municipality. City statistical information. 2024 [cited 2025 Apr 5]. Available from: <https://zaya.io/ttacz>
- [34]. Hopkins LP, Hutyra LR, Raciti SM, Reinmann AB, Trakimas G, Hutyra ER. A simple tree planting framework to improve climate, air pollution, health, and urban heat in vulnerable locations using non-traditional partners. *Plants People Planet*. 2022 May;4(3):243–257. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10245>
- [35]. WHO. Environmental Health Criteria 13. Geneva: World Health Organization; 1979.
- [36]. Lewis AC. Optimising air quality co-benefits in a hydrogen economy: a case for hydrogen-specific standards for NOx emissions. *Environ Sci Atmos*. 2021;1(5):201–207. <https://doi.org/10.1039/D1EA00037C>
- [37]. Shams SR, Malekzadeh M, Khazaei M, Yousefi N, Taghizadeh M, Yunesian M. Artificial intelligence accuracy assessment in NO2 concentration forecasting of metropolises air. *Sci Rep*. 2021 Jan;11(1):1805. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81455-6>
- [38]. ALA. Ozone. 2025 [cited 2025 Apr 5]. Available from: <https://zaya.io/11a7v>
- [39]. Garaga R. Health Risk Assessment of Different Sources of Metals in PM10 and PM2.5 in the Largest City in Northeast India. *J Hazard Toxic Radioact Waste*. 2024 Apr;28(2):10. <https://doi.org/10.1061/JHTRBP.HZENG-1311>
- [40]. Stevens KA, Bryer TA, Yu H. Air Quality Enhancement Districts: democratizing data to improve respiratory health. *J Environ Stud Sci*. 2021 Dec;11(4):702–707. <https://doi.org/10.1007/s13412-021-00670-9>
- [41]. Tian Y. Climate Action Plan - Salt Lake City. MUP Capstone. 2021 [cited 2025 Apr 5]. <https://www.ideals.illinois.edu/items/119518>

