




## ارزش گذاری کمی نقش درختان شهری تهران در بهبود کیفیت هوا

ریحانه رسول زاده<sup>۱</sup> , نغمه مبرقی دینان<sup>۲</sup>، حسن اسماعیل زاده<sup>۳</sup>، یوسف رشیدی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکترا، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. نویسنده مسئول: r.rasoolzadeh@gmail.com
۲. دانشیار، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۳. دانشیار، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۴. استادیار، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>درختان شهری با تاثیر بر اکوسیستم، نقش مهمی در بهبود کیفیت زندگی دارند. در کلان شهرهایی مانند تهران، درختان شهری عنصر مهمی برای کاهش آلودگی هوا محسوب می شوند. در این مطالعه، با بهره گیری از ابزار i-Tree Eco، عملکرد اکوسیستمی بهبود کیفیت هوا شامل زدایش آلاینده های شاخص (CO<sub>2</sub>، NO<sub>2</sub>، SO<sub>2</sub>، O<sub>3</sub>، PM<sub>10</sub>، PM<sub>2.5</sub>)، ترسیب دی اکسید کربن و تولید اکسیژن درختان شهری تهران در سال ۲۰۲۰ برآورد و با استفاده از روش انتقال منافع (Benefit Transfer) ارزش گذاری اقتصادی شده است. نتایج نشان می دهد، درختان شهری تهران سالانه حدود ۲۲۱۷۶۱/۷۲ تن از آلاینده هوا را حذف و دی اکسید کربن را ترسیب می کنند که ارزش اقتصادی آن در حدود ۲۱۵۵۹۲۴ دلار در سال است. همچنین، این درختان در همین بازه زمانی حدود ۱۶۰۲۷۳ تن اکسیژن تولید کرده اند که به دلیل فراوانی اکسیژن در جو (حدود ۲۱ درصد)، ارزش اقتصادی آن نادیده گرفته می شود. تحلیل نسبت زدایش آلاینده ها و CO<sub>2</sub> توسط درختان به کل انتشار آن ها، نشان از سهم محدود آن در بهبود کیفیت هوا دارد؛ از این رو، اتکا صرف به درختان به عنوان راهکار مقابله با آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی کافی نیست بلکه تلفیق اقدامات مبتنی بر طبیعت با راهکارهای مدیریتی، ضرورت است. درختان شهری خدمات اکوسیستمی دیگری نیز دارند که کمی سازی و ارزش گذاری آن ها می تواند چشم انداز جامع تری از نقش واقعی این عناصر سبز در تاب آوری و پایداری شهر به دست دهد.</p>	<p>تاریخها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷</p> <p>واژگان کلیدی: ارزش گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستمی زیر ساخت های سبز شهری</p>


استناد: سول ازده، ریحانه، مبرقی دینان، نغمه، اسماعیل زاده، حسن، رشیدی، یوسف (۱۴۰۴). ارزش گذاری کمی نقش درختان شهری تهران در بهبود کیفیت هوا. *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲). ۱۴۲-۱۲۱.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2046747.1076>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).



## Quantitative evaluation of the role of urban trees in Tehran in improving air quality

Reyhaneh Rasoolzadeh <sup>1✉</sup> , Naghmeh Mobarghaee Dinan <sup>2</sup>, Hasan Esmailzadeh <sup>3</sup>, Yousef Rashidi <sup>4</sup>

1. Phd student, Environmental Science Research Institute (ESRI) Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Corresponding author: r.rasoolzadeh@gmail.com

2. Associate Professor, Environmental Planning Environmental Science Research Institute (ESRI) Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3. Associate Professor, Department of Environmental Planning and Design, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

4. Assistant professor, Department of Environmental Technology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

### Article Info

#### History

Received: November 16, 2025

Accepted: January 27, 2026

#### Keywords

Economic Valuation

Ecosystem Services

Urban Green Infrastructure.

### Abstract

Urban trees play an important role in improving the quality of life by affecting the ecosystem. In big cities like Tehran, urban trees are an important element to reduce air pollution. In this study, using the i-Tree Eco tool, the ecosystem performance of air quality improvement, including the removal of key pollutants (CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) carbon dioxide deposition and oxygen production of urban trees in Tehran in 2020, has been estimated and economically valued using the Benefit Transfer method. The results show that Tehran's urban trees remove about 221,761.72 tons of air pollutants and sequester carbon dioxide, which has an economic value of about \$2,155,924 per year. Also, these trees have produced about 160,273 tons of oxygen in the same period of time, which due to the abundance of oxygen in the atmosphere (about 21%), its economic value is ignored. The analysis of the ratio of removal of pollutants and CO<sub>2</sub> by trees to their total emission shows its limited contribution in improving air quality; Therefore, relying only on trees as a solution to deal with air pollution and climate change is not enough, but it is necessary to combine nature-based measures with management solutions. Urban trees have other ecosystem services, whose quantification and valuation can provide a more comprehensive perspective of the real role of these green elements in the resilience and sustainability of the city.

**Citation:** Rasoolzadeh, R., Mobarghaee Dinan, N., Esmailzadeh, H., & Rashidi, Y. (2025). Quantitative evaluation of the role of urban trees in Tehran in improving air quality. *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 121-142. <https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2046747.1076>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

**Publisher:** The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

## مقدمه

شهرها در مقیاس‌های مختلف جهانی، ملی، منطقه‌ای و محلی، اثرات محیط زیستی متعددی دارند (Gómez-Baggethu & Barton., 2013). نرخ جمعیت، در بسیاری از کشورهای جهان به سرعت در حال افزایش است؛ به طوری که رشد جمعیت شهری از رشد کل جمعیت جهان پیشی گرفته، شهرنشینی را به یکی از مهم‌ترین پدیده‌های اجتماعی و محیط زیستی فعلی تبدیل کرده است (عباس زاده تهرانی و همکاران، ۱۴۰۲). اگرچه شهرنشینی موجب توسعه اقتصادی مناطق و بهبود شرایط زندگی انسان می‌شود، مدیریت نامناسب، پیامدهای محیط زیستی متعددی دارد. یکی از مهم‌ترین این پیامدها، آلودگی هوا است که نوعی تهدید محیط زیستی، برای رفاه و سلامت انسان شناخته می‌شود (WHO, 2016) آلودگی هوا در سال ۲۰۱۸ باعث مرگ و میر حدود ۵/۵ میلیون نفر شد (Landrigan et al., 2018).

بر اساس آمار سازمان ملل متحد (۱۹۵۰ تا ۲۰۱۸)، جمعیت شهری جهان با میانگین نرخ رشد سالانه ۲/۵۴ درصد، از حدود ۰/۸ میلیارد نفر به ۴/۲ میلیارد نفر افزایش یافته است (United Nations, 2019). با ادامه این روند، نرخ شهرنشینی می‌تواند از ۵۶ درصد در سال ۲۰۲۱ به ۶۸ درصد در سال ۲۰۵۰ برسد (Lisboa et al, 2024). جمعیت شهرنشین در ایران نیز، از ۳۱/۴ درصد در سال ۱۹۵۶ به ۷۴/۲۶ درصد در سال ۲۰۱۶ افزایش داشته است در این میان تهران، بزرگ‌ترین شهر خاورمیانه (Hosseini et al., 2022) از این روند مستثنی نیست، نرخ شهرنشینی در این شهر از ۴۷ درصد در سال ۱۹۷۶ به ۷۴ درصد در سال ۲۰۱۶ رسیده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). افزایش جمعیت این شهر را مشکلات محیط زیستی متعددی به ویژه آلودگی هوا روبرو کرده است. عوامل مختلفی مانند تردد بیش از ۷۰۰ هزار موتورسیکلت و ۳ میلیون خودرو، وجود ۱۷۰۰۰ واحد صنفی و صنعتی (معادل ۲۵ درصد صنایع کل کشور) و مصرف حدود ۲۰ درصد از کل انرژی کشور، نقش مهمی در افزایش آلودگی هوای شهر تهران داشته است (گزارش سالانه کیفیت هوا و صدای تهران در سال ۱۴۰۰، ۱۴۰۱). با وجود تلاش برای کاهش آلودگی هوا، همچنان جمعیت زیادی از شهروندان در معرض غلظت‌های خطرناک آلاینده‌های هوا قرار دارند. برای مثال، هوای شهر تهران در ۱۱۹ روز از سال ۱۴۰۲، در وضعیت نامطلوب قرار داشته است (گزارش سالانه کیفیت هوا و صدای تهران در سال ۱۴۰۲، ۱۴۰۳).

ارزش‌گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستمی، یکی از ابزارهای مهم در ارزیابی منافع مستقیم و غیرمستقیم طبیعت است که، می‌تواند نقش مؤثری در حفاظت محیط زیست، مدیریت منابع طبیعی و توسعه پایدار شهری داشته باشد (Ma et al., 2019). سیاست‌گذاران و مدیران شهری برای مقابله با آلودگی هوا عمدتاً بر راهکارهای فنی و مهندسی تمرکز دارند (Baró et al., 2014) آنها به پتانسیل زیرساخت‌های سبز شهری در ارائه خدمات اکوسیستمی تنظیمی، مانند بهبود کیفیت هوا توجهی ندارند (Escobedo et al., 2011; Nowak et al., 2006). با وجود اهمیت این موضوع، تاکنون اطلاعات جامع و دقیقی درباره ارزش اقتصادی خدمات اکوسیستمی درختان شهری تهران ارائه نشده است. این امر، ضرورت انجام پژوهشی که به این مهم پردازد را دوچندان می‌سازد.

با توجه به تاثیر فضای سبز در بهبود کیفیت هوا و سلامت عمومی، ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی درختان شهری، می‌تواند ابزار مهمی برای سیاستگذاران و برنامه ریزان شهری برای طراحی مناسب توسعه پایدار در مشکلات محیط زیستی باشد. نتایج این پژوهش، مبنای علمی برای توسعه طرح‌های محیط زیستی و سیاست‌گذاری‌های آینده در زمینه گسترش و حفاظت از فضای سبز شهری را فراهم آورد. از این رو، هدف اصلی این مقاله کمی‌سازی و ارزش‌گذاری عملکرد اکوسیستمی تنظیمی بهبود کیفیت هوا است که شامل حذف آلاینده‌های شاخص هوا، ترسیب و ذخیره کربن و تولید اکسیژن توسط درختان شهری تهران با استفاده از مدل i-Tree Eco است.

## مبانی نظری

زیرساخت‌های سبز شهری، جزئی اساسی در اکوسیستم شهری هستند که خدمات اکوسیستمی متنوعی از جمله بهبود کیفیت هوا را به ساکنین شهرها ارائه می‌دهند (Ostad-Ali Askari and Shayannejad, 2021; Jim and Chen, 2009). در سال ۲۰۰۵، نخستین سیستم جامع ارزیابی اکوسیستم‌ها در مقیاس بزرگ در گزارش ارزیابی اکوسیستم هزاره<sup>۱</sup> معرفی شد (MEA, 2005). در این گزارش، طبقه‌بندی انواع خدمات (عملکردها) اکوسیستمی به چهار دسته اصلی تولیدی<sup>۲</sup>، حمایتی<sup>۳</sup>، تنظیمی<sup>۴</sup> و فرهنگی<sup>۵</sup> پیشنهاد شد (Kumar, 2012). فضای سبز شهری از طریق تصفیه هوا (عملکرد اکوسیستمی تنظیمی)، تولید اکسیژن (عملکرد اکوسیستمی تولیدی) و جذب کربن (عملکرد اکوسیستمی تنظیمی) محیط زیست و اقلیم محلی را بهبود بخشد (مبرقی و همکاران، ۱۳۸۸، Li et al., 2021; Talebmorad et al., 2021). از این رو، زیر ساخت‌های سبز شهری نقش مهمی در پایداری محیط شهری و بهبود کیفیت زندگی شهروندان دارند (Kabisch et al., 2015).

مطالعات زیادی درباره کمی‌سازی و ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی درختان شهری انجام شده‌است در این مطالعات از روش‌ها و مدل‌های مختلفی مانند روش‌های آزمایشگاهی (کشلو و اقتصادی، ۱۳۹۰؛ آزموده و حیدری، ۱۳۹۳؛ Ryu et al., 2019)، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (Hirabayashi, 2021) و مدل‌های مختلفی مانند PARS TAC (محاسبه گر کیفیت هوا مبتنی بر رویکرد مدل‌سازی مبتنی بر جز<sup>۶</sup> که مدل پیشین i-Tree است) (Motesadi-Zarandi et al., 2015)، UFORE (Yang et al., 2005; Chaparro & Terradas, 2009) و i-Tree (Riondato et al., 2020) برای کمی‌سازی عملکرد اکوسیستمی ارتقا کیفیت هوا به وسیله درختان شهری استفاده شده‌است، لیکن در سال‌های اخیر مدل Tree-Mحبوبیت بیشتری یافته و در مطالعات بسیاری در سرتاسر جهان به کار رفته‌است (Li et al., 2025; Song et al., 2020; Watson & Bai, 2025; Lin et al., 2020; Yao et al. 2022).

نواک و همکاران در سال ۲۰۱۳ نقش درختان و جنگل‌های شهری منطقه شیکاگو را به کمک مدل i-Tree مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیقات نشان داد که ۱۵۷,۱۴۲,۰۰۰ درخت و درختچه با پوشش کانوپی ۲۱ درصدی در منطقه مطالعاتی وجود دارد. این تعداد درخت سالانه حدود ۱۸,۰۸۰ تن از آلاینده‌های هوا را به ارزش ۱۳۷ میلیون دلار حذف می‌کنند (Nowak et al., 2013). همچنین در همین سال، نواک و همکاران، مدل‌سازی حذف PM<sub>2.5</sub> توسط درختان را در ده شهر از ایالات متحده بررسی کردند. بر اساس نتایج مشخص شد که مقدار کل سالانه حذف PM<sub>2.5</sub> توسط درختان از ۷,۴ تن تا ۵,۶۴ تن متغیر است. از این رو، میانگین سالانه بهبود کیفیت هوا در بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ بین ۰/۰۵٪ در سانفرانسیسکو و ۰/۲۴٪ در آتلانتا متفاوت بود. بر اساس نتایج آن‌ها، درک تأثیرات درختان شهری بر کیفیت هوا می‌تواند منجر به بهبود استراتژی مدیریت جنگل شهری برای حفظ سلامت انسان شود (Nowak et al., 2013). نواک و همکاران در سال ۲۰۰۶ حذف آلاینده‌های هوا توسط درختان و درختچه‌های شهری ایالات متحده را بررسی و میزان آن را حدود ۷۱,۱۰۰ تن در سال با ارزش ۳/۸ میلیارد دلار برآورد کردند (Nowak et al., 2006).

1. Millennium Ecosystem Assessment (MEA)
2. Providing Services
3. Supporting Services
4. Regulating Services
5. Cultural Services
6. Component-based modeling approach

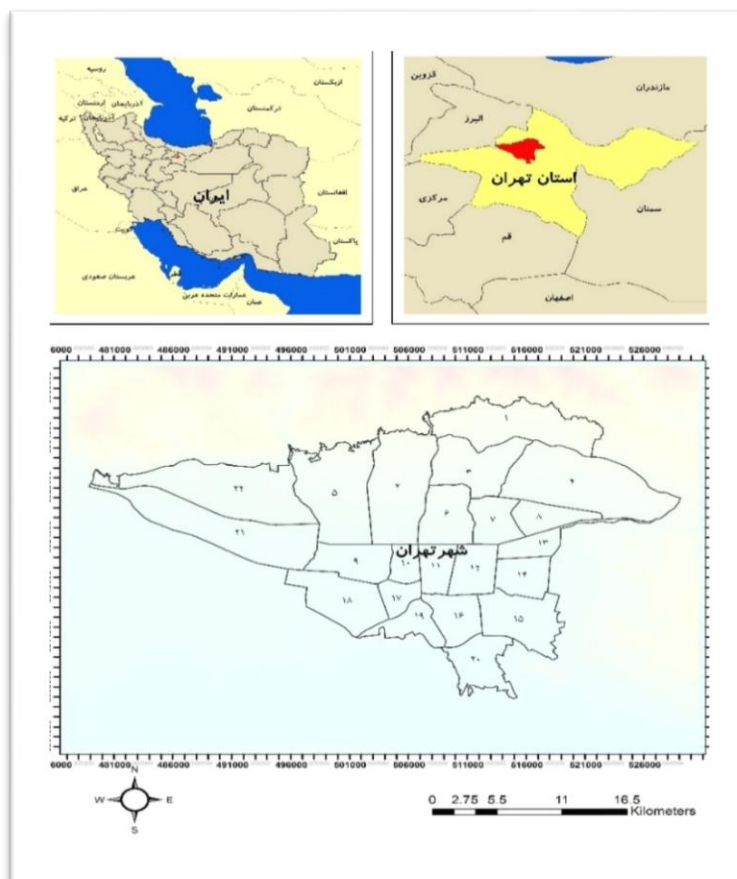
مطالعات تلفیقی اثرات درختان بر آلودگی هوا نشان می‌دهد که مدیریت شهری درختان می‌تواند یک راهکار مناسب برای بهبود کیفیت هوا باشد و به رعایت استانداردهای هوای پاک کمک کند. در سال ۲۰۱۵، واتکس و همکاران با استفاده از مدل i-Tree Eco دو عملکرد اکوسیستمی تنظیمی ترسیب کربن و حذف آلاینده‌های هوا درختان شهری مرکز شهر سگد<sup>۱</sup> مجارستان را بررسی کردند. در این پژوهش بعد از تعیین خصوصیات ساختاری جنگل شهری، میزان حذف آلاینده‌های هوا و ترسیب کربن برای گونه‌های مختلف درختی در منطقه برآورد شد. سرانه سالیانه حذف آلاینده‌های هوا را برای هر درخت بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ گرم تخمین زدند (Watkiss et al., 2015). مک پرسون و همکاران نیز در سال ۲۰۱۷، ساختار، عملکرد و ارزش جنگل‌های شهری را در جوامع کالیفرنیا بررسی نمودند.

پژوهش حاضر بر اساس دستورالعمل i-Tree Eco، ۷۰۳ پلات انتخاب و بررسی شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد، درختان شهری در سال به طور خالص ۳۵۳۷ تن از آلاینده‌های هوا را جذب می‌کنند (McPherson et al., 2017). برای برآورد و کمی‌سازی عملکرد اکوسیستمی ارتقا کیفیت هوا از مدل i-Tree Eco استفاده شد. این مدل جامع‌ترین ابزار در مجموعه مدل‌های i-Tree به شمار می‌آید و در میان چندین ابزار تحلیلی و برنامه‌های کاربردی آن (i-Tree canopy, i-Tree Tree Pest Detection Module)، مناسب‌ترین ابزار برای تعیین نقش زیرساخت‌های سبز شهری در ارتقاء کیفیت هوا است. i-Tree یک نرم‌افزار به روز و دقیق است که به وسیله سرویس جنگل دپارتمان کشاورزی ایالات متحده<sup>۲</sup> برای ارزیابی ساختار جنگل‌های شهری و خدمات اکوسیستمی آن‌ها توسعه یافته است (i-Tree Eco User's Manual, 2019). i-Tree Eco یک مدل انعطاف پذیر است که با استفاده از داده‌های حاصل از مطالعات میدانی مربوط به جنگل‌های شهری و داده‌های ساعتی هواشناسی و آلودگی هوا، ساختار جنگل شهری و خدمات اکوسیستمی آن را کمی‌سازی می‌کند (i-Tree Eco User's Manual, 2019).

## مواد و روش‌ها

### محدوده مطالعاتی

منطقه مطالعاتی در این پژوهش، شهر تهران (نواحی ۲۲ گانه) است (شکل ۱). شهر تهران با مساحتی در حدود ۶۰,۰۰۰ هکتار و جمعیتی در حدود ۱۳ میلیون نفر، تقریباً در قسمت مرکزی ایران (۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی، ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی) واقع شده است (رجایی، ۱۳۹۷). از شمال به دامنه جنوبی رشته کوه البرز و از جنوب به حاشیه شمالی کویر مرکزی ایران محدود می‌شود. از آن‌جا که شهر تهران از موقعیت جغرافیایی خاصی برخوردار است (ارتفاع این شهر در شمال ۱۷۰۰ متر، در نواحی مرکزی ۱۲۰۰ متر و در جنوب ۱۱۰۰ متر است)، شرایط اقلیمی متفاوتی، از نیمه مرطوب در شمال تا خشک و نیمه خشک در جنوب دارد (سالنامه آماری تهران، ۱۴۰۱).



شکل ۱ موقعیت شهر تهران

#### روش شناسی

- کمی سازی عملکرد اکوسیستمی بهبود کیفیت هوا (زدایش آلاینده های هوا، ذخیره و ترسیب کربن، و تولید اکسیژن)

برای کمی سازی خدمات اکوسیستمی حذف آلاینده های هوا، ذخیره و ترسیب کربن و تولید اکسیژن توسط درختان شهری تهران از نرم افزار i-Tree Eco استفاده شد. i-Tree Eco جامع ترین ابزار در مجموعه i-Tree است و در میان ابزارهای تحلیلی و کاربردی مختلف این مجموعه (مانند i-Tree canopy, i-Tree Pest Detection Module)، مناسب ترین گزینه برای ارزیابی نقش درختان شهری در بهبود کیفیت هوا است. از آن جا که i-Tree Eco نخستین بار در ایالات متحده آمریکا توسعه یافته است، به کارگیری آن در خارج از مرزهای این کشور نیازمند انجام برخی اقدامات مقدماتی و تطبیق با شرایط بومی است. بر همین اساس، در این مطالعه با پیروی از دستورالعمل های مربوطه i-Tree Eco برای شهر تهران بومی سازی و اجرا شد (Parsa et al., 2019; i-Tree Eco User's Manual, 2019). شکل ۲، مراحل پنجگانه اجرای i-Tree Eco برای کمی سازی عملکرد اکوسیستمی بهبود کیفیت هوا در خارج از مرزهای ایالات متحده را نشان می دهد. لازم به ذکر است پس از مرحله سوم یعنی جمع آوری میدانی داده ها، آنها به بخش Plot Sample نرم افزار جهت اجرای مدل وارد شدند.



شکل ۲ مراحل پنجگانه اجرای مدل i-Tree Eco جهت کمی‌سازی خدمات اکوسیستمی در خارج از مرزهای ایالات متحده (منبع: i-Tree Eco User's Manual, 2019)

-زدایش آلاینده‌های هوا

- کمی‌سازی بیوفیزیکی

مقدار حذف آلاینده‌های شاخص هوا ( $CO, NO_2, SO_2, O_3, PM_{10}, PM_{2.5}$ )، در ابزار i-Tree Eco، تحت شرایط غیر بارشی، از طریق مدل فرونشست خشک و با بهره‌گیری از داده‌های آلودگی هوا، اقلیم و شاخص‌های ساختار جنگل شهری برای یک سال میلادی برآورد می‌شود (Parsa et al., 2019). در این برآورد، شار حذف آلاینده ( $F$ ) بر حسب  $g \ h^{-1}$  به عنوان نتیجه سرعت رسوب ( $V_d$ ) بر حسب  $m \ s^{-1}$  و غلظت آلاینده ( $C$  بر حسب  $g \ m^{-3}$ ) مطابق معادله ۱ محاسبه می‌شود (Hirabayashi et al., 2015).

$$F = V_d \times C \times 3600 \quad \text{معادله ۱}$$

$V_d$  برای آلاینده‌های  $NO_2, SO_2, O_3$ ، به شکل معکوس مجموع مقاومت آئرودینامیکی ( $R_a \ (SM^{-1})$ )، مقاومت لایه مرزی شبه آرام برای آلاینده ( $R_b \ (SM^{-1})$ ) و مقاومت کانوپی ( $R_c \ (SM^{-1})$ ) به شکل معادله ۲ برآورد می‌شود (Parsa et al., 2019):

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_c} \quad \text{معادله ۲}$$

لازم به ذکر است که سرعت رسوب در طی دوران بارش صفر فرض می‌شود (Nowak et al., 2006). برای  $PM_{2.5}$  سرعت رسوب بر حسب سرعت باد و مساحت برگ برآورد می‌شود. میزان ارتقای ساعتی کیفیت هوا بر حسب واحد پوشش درختی از طریق فرونشست خشک آلاینده‌ها ( $I_{unit}$  بر حسب درصد) مطابق معادله ۳ محاسبه می‌شود (Hirabayashi et al., 2012). که در آن  $M_{Total}$  کل جرم آلاینده بر حسب واحد پوشش درختی ( $gm^2h^{-1}$ ) است.

$$I_{unit} = \frac{F}{F + M_{total}} \times 100 \quad \text{معادله ۳}$$

F شار آلاینده ( $gm^{-2}h^{-1}$ ) و  $M_{total}$  کل جرم آلاینده بر حسب واحد پوشش درخت ( $gm^{-2}h^{-1}$ ) است. میزان ارتقا ساعتی کیفیت هوا بر کل پوشش درخت ( $I_{total}$ ) (درصد) بر اساس معادله ۴ محاسبه می شود (Hirabayashi et al., 2015). در این معادله  $T_c$  کل درصد پوشش درختی محدوده مطالعاتی است.

$$I_{total} = \frac{F \times \frac{T_c}{100}}{F \times \frac{T_c}{100} + M_{total}} \times 100 \quad \text{معادله ۴}$$

#### - ترسیب و ذخیره کربن

کربن ذخیره شده در درخت معادل نصف زی توده برآورد شده درخت است. افزایش زی توده درخت، تعیین کننده میزان ترسیب کربن است (Nowak, 2019). مطابق معادله ۵، برای برآورد مقدار سالیانه ترسیب کربن، کربن ذخیره شده در سال فعلی از مقدار کربن ذخیره شده در سال قبل کم می شود (Crane and Nowak, J. D.; 2000, Nowak, 2002). مقدار ناخالص کربن ترسیب شده به میانگین رشد قطر درخت (که بر حسب زی توده در دسترس و طول فصل رشد، تعیین می شود)، طبقه قطر درخت، سلامت درخت و قرار گرفتن آن در معرض نور بستگی دارد (Crane and Nowak, J. D., 2002). مقدار کربن ذخیره شده درخت، مطابق معادله ۶ برآورد می شود. که در آن، ضریب کربن معمولاً برابر با ۰/۵ است. زی توده یک درخت را می توان با استفاده از معادلات آلومتریک برآورد کرد. این معادلات، زی توده را به پارامترهای قابل اندازه گیری درخت مانند قطر برابر سینه درخت (DBH)، ارتفاع و چگالی چوب مرتبط می کنند (Chow & Rolfe, 1989).

$$\text{معادله ۵} \quad \text{کربن ذخیره شده در سال قبل} - \text{کربن ذخیره شده در سال فعلی} = \text{ترسیب سالانه کربن}$$

$$\text{معادله ۶} \quad \text{ضریب کربن} \times \text{زی توده درخت} = \text{ذخیره کربن شده}$$

#### - تولید اکسیژن

درخت در طی فرایند فتوسنتز، کربن دی اکسید ( $CO_2$ ) را از اتمسفر جذب کرده و در مقابل اکسیژن را منتشر می کند. میزان اکسیژن تولید شده به میزان کربن ترسیب شده بستگی مستقیم دارد (Nowak, 2019). نسبت مقدار خالص اکسیژن تولید شده (کیلوگرم در سال) نسبت به مقدار خالص کربن ترسیب شده (کیلوگرم در سال) برابر است با ۲/۶۶ (یا  $\frac{32}{12}$ ) (Nowak, 2007).

ارزش اقتصادی عملکرد اکوسیستمی تولید اکسیژن توسط جنگل شهری به دلیل ناچیز بودن مقدار آن در مقایسه با مقدار اکسیژن اتمسفر (حدود ۲۱ درصد حجم اتمسفر) صفر در نظر گرفته می شود (Nowak, 2019).

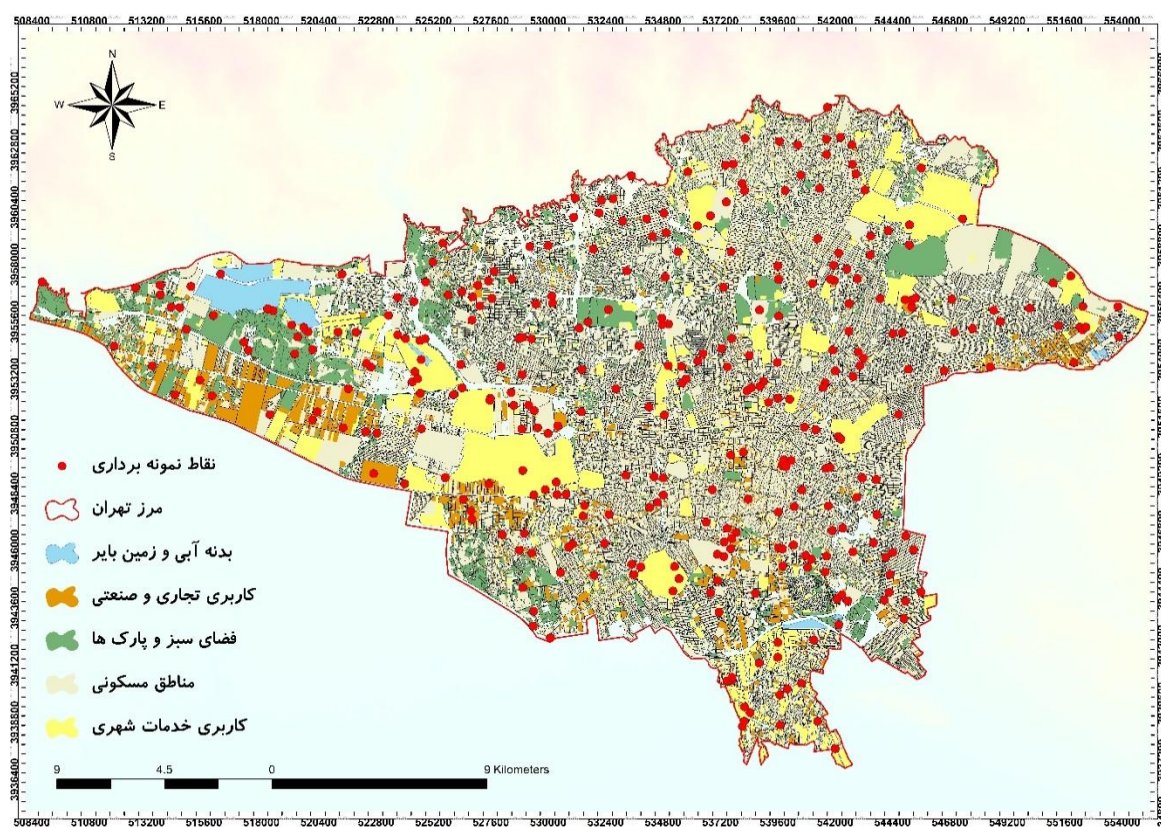
#### تعیین تعداد پلات ها

با توجه به مطالعات پیشین (Intasen et al., 2017; Nowak et al., 2011; Nowak et al., 2017; Mikulanis, 2014; PARD, 2014; Parsa et al., 2019) و راهنمای کاربران Tree Eco، تعداد ۳۳۰ پلات برای نمونه برداری از درختان شهر تهران تعیین گردید. سپس با استفاده از ماژول نقاط تصادفی نرم افزار ArcGIS 10.8، پلات های نمونه برداری به طور تصادفی در سرتاسر شهر تهران توزیع شد (شکل ۳). برای این کار، در اولین گام، نقشه کاربری اراضی شهر تهران از شهرداری تهران (سال ۱۳۹۶، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰) تهیه و به کمک بررسی های میدانی به روز رسانی شد. به دلیل عدم دسترسی به ۱۴ پلات، در مجموع ۳۱۶ پلات با شعاع ۱۱/۳۴ متر طی فصل رشد نمونه برداری و تمامی داده های مورد نیاز برای هر پلات (جدول

۱) جمع آوری شد. در این پژوهش، مطابق جدول ۱، دو نوع داده در مطالعات میدانی به دست آمد: ۱) اطلاعات عمومی پلات‌ها، ۲) اطلاعات مربوط به درختان.

جدول ۱ داده های میدانی ثبت شده

اطلاعات عمومی پلات ها	اطلاعات درختان
شناسه و آدرس پلات	شناسه درخت، فاصله و جهت درخت نسبت به مرکز پلات و مختصات جغرافیایی درخت
مختصات جغرافیایی مرکز پلات	وضعیت کاشت درخت (کاشته شده یا طبیعی) و نوع مالکیت درخت (شخصی یا عمومی)
تاریخ نمونه برداری	گونه درخت
کاربری و پوشش واقعی زمین	DBH (قطر برابر سینه)
درصد پوشش درختی	ارتفاع کل درخت، ارتفاع پایه تا تاج پوشش
درصد مساحت قابل کشت درون پلات‌ها	عرض تاج
درصد قابلیت دسترسی به پلات‌ها	میزان قرارگیری در معرض نور تاج پوشش
واحدهای نمونه برداری	درصد از دست رفتگی تاج پوشش و درصد سرخشکیدگی
-	پوشش زیر کانوپی (نفوذ پذیر یا نفوذ ناپذیر)



شکل ۳ نقشه پراکنش نقاط نمونه برداری در شهر تهران

### ارزش گذاری اقتصادی عملکرد اکوسیستمی بهبود کیفیت هوا

روش "انتقال منافع" رویکردی است که در مطالعات ارزش گذاری اقتصادی اکوسیستم‌ها برای برآورد ارزش اقتصادی کالاها و خدمات محیطی از طریق انتقال نتایج مطالعات موجود به یک مکان یا زمینه جدید استفاده می‌شود. این روش برای ارزیابی خدمات اکوسیستمی در شرایطی که محدودیت‌های مالی یا زمانی وجود دارد، برای انجام مطالعات

ارزش گذاری اولیه اقتصادی مفید است (Agaton and Guila, 2023). از این رو، در این مطالعه بر اساس منابع موجود، از روش انتقال منافع برای برآورد ارزش اقتصادی عملکرد اکوسیستمی بهبود کیفیت هوا توسط درختان شهری تهران استفاده شد. ارزش حذف آلودگی هوا به وسیله درختان شهری با استفاده از مقادیر میانگین ایالات متحده تخمین زده شد (Nowak et al., 2006). ارزش اقتصادی ترسیب هر تن کربن توسط درختان شهری ۱۸/۳۲ دلار (Nowak et al., 2007) برآورد گردید از آنجا که این مقادیر مربوط به ایالات متحده است، با استفاده از معادله (۱) برای استفاده در ایران به روزرسانی شد (مبرقعی دینان و همکاران، ۱۳۹۹).

$$Iran F_i = U.S F_i \times (Y Iran / Y U.S)^{\epsilon} \quad (1)$$

که در آن  $Iran F_i$  ارزش اقتصادی حذف آلاینده  $i$  در ایران،  $U.S F_i$  ارزش اقتصادی حذف آلاینده  $i$  در ایالات متحده،  $U.S F_i$  سرانه تولید ناخالص داخلی ایران (۱۳۱۱۶/۰۷۲۵ دلار در سال ۲۰۲۰)،  $Y U.S$  سرانه تولید ناخالص داخلی ایالات متحده (۶۳,۵۴۳/۵۷۸ دلار در سال ۲۰۲۰)، و  $\epsilon$  کشش درآمدی تمایل به پرداخت است (بانک جهانی مقدار ۱/۲ را برای کشورهای با درآمد متوسط پیشنهاد کرده است) (World Bank 2020).

## نتایج و بحث

درک صحیح از ساختار، عملکرد و ارزش زیرساخت‌های سبز شهری نقش کلیدی در بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی دارد؛ تصمیماتی که در نهایت می‌تواند منجر به بهبود کیفیت زندگی انسان و سلامت زیست‌محیطی شود. تعداد درختان موجود در زیرساخت‌های سبز شهری تهران حدود ۷ میلیون اصله با تراکم ۱۲۱ درخت در هکتار (با خطای استاندارد ۱۹/۵٪) برآورد شده است. این میزان پوش درختی در حدود ۱۴/۷ درصد از کل شهر تهران را پوشش می‌دهد. همچنین منشاء حدود ۲۸ درصد از درختان شناسایی شده قاره آسیا و ۲۶ درصد آمریکای شمالی گزارش شده است (Rasoolzadeh et al., 2022).

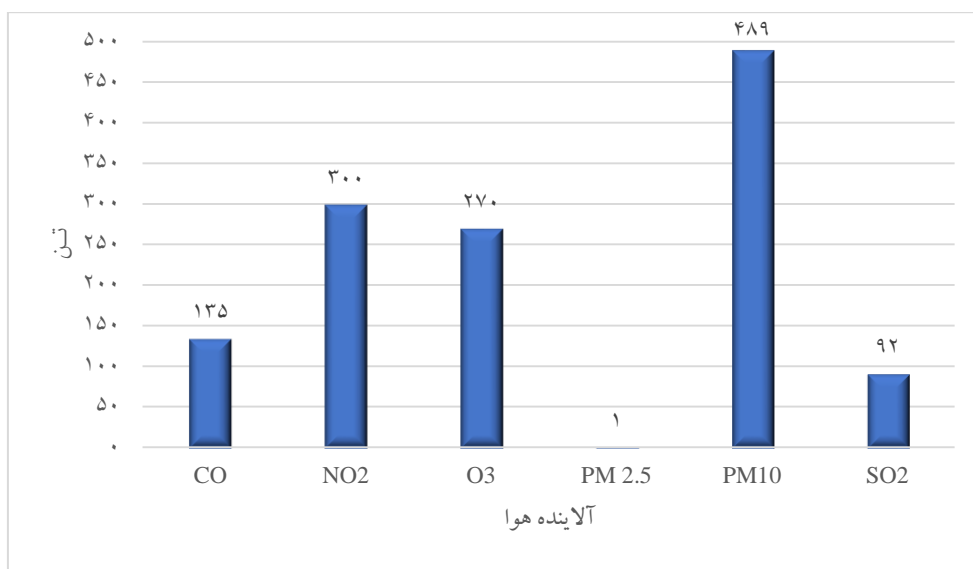
ترکیب گونه‌ای درختان، در فضای سبز شهر تهران، نشان‌دهنده حضور هم‌زمان گونه‌های بومی و غیربومی است. از این رو، ترکیب گونه‌ای در مناطق شهری معمولاً غنی‌تر از چشم‌اندازهای طبیعی اطراف است، که می‌تواند موجب افزایش تنوع زیستی درختی و در پی آن، بهبود کیفیت و تنوع خدمات اکوسیستمی ارائه شده شود. برای مثال، پژوهش رایلی و همکاران (۲۰۱۸) در شهر کلیولند، ایالت اوهایو، نشان داد که گونه‌های غیربومی درختی در فضاهای شهری بیشترین میزان خدمات اکوسیستمی را از نظر کمی و ارزش اقتصادی ارائه می‌دهند؛ در حالی که گونه‌های بومی در نواحی مسکونی، ارزش پولی بیشتری تولید می‌کنند (Riley et al., 2018).

این یافته‌ها گویای آن است که افزایش تنوع گونه‌ای، به‌ویژه در مناطق شهری که در معرض طیف گسترده‌ای از تنش‌های محیطی مانند آلودگی هوا، دمای بالا، کم‌آبی و فشار انسانی قرار دارد، می‌تواند اثرات منفی ناشی از آفات، بیماری‌ها و تغییرات اقلیمی را کاهش دهد. با این حال، این راهبرد ممکن است پیامدهایی نظیر کاهش جمعیت گونه‌های بومی یا تسلط گونه‌های مهاجم را نیز به دنبال داشته باشد. بنابراین، ضروری است که انتخاب گونه‌ها در برنامه‌ریزی شهری با دقت و بر اساس معیارهایی همچون سازگاری اقلیمی، مزایای اکوسیستمی و پتانسیل تهاجمی آن‌ها باشد.

## حذف آلاینده‌های هوا توسط درختان شهری تهران

کیفیت پایین هوا یکی از چالش‌های مهم محیط زیستی در کلان‌شهرهایی همچون تهران است. آلودگی هوا پیامدهای گسترده‌ای برای سلامت عمومی، محیط زیست، سازه‌های شهری و فرآیندهای اکوسیستمی به همراه دارد، از جمله کاهش دید، تسریع فرسایش مصالح و افزایش بیماری‌های قلبی و تنفسی. زیرساخت‌های سبز شهری خدمات

اکوسیستمی متعددی ارائه می‌دهند که با سلامت و رفاه انسان ارتباط نزدیکی دارد (Sahle et al., 2016; Wang et al., 2021). در این میان، پوشش گیاهی شهری، به‌ویژه درختان، تاثیر مهمی در کاهش آلودگی هوا دارند؛ آن‌ها نه تنها با جذب مستقیم آلاینده‌ها از جو، بلکه از طریق کاهش دمای هوا و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها به بهبود کیفیت هوا کمک می‌کنند (Nowak and Dwyer, 2007). گیاهان با مکانیسم‌هایی نظیر جذب گازی از طریق روزه‌ها و ترسیب ذرات معلق روی سطح برگ، آلاینده‌های مختلف را کاهش می‌دهند (Beckett et al., 1998; Roeland et al., 2019). از این رو، زیرساخت‌های سبز شهری به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارهای طبیعی برای مقابله با آلودگی هوا شناخته می‌شوند (Barwise & Kumar, 2020; Chavez-García and González-Méndez, 2021). نتایج نشان داده است که درختان شهری در تهران سالانه حدود ۱۲۸۶/۴۲ تن از آلاینده‌های شاخص هوا را حذف می‌کنند. این آلاینده‌ها شامل ازن ( $O_3$ ) به میزان ۲۷۰/۳۲ تن در سال، کربن مونوکسید (CO) به مقدار ۱۳۴/۸۳ تن در سال، نیتروژن دی‌اکسید ( $NO_2$ ) به میزان ۲۹۹/۶۸ تن در سال، ذرات معلق کوچکتر از ۲/۵ میکرومتر ( $PM_{2.5}$ ) به میزان ۰/۶۸ تن در سال، ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرومتر و بیشتر از ۲،۵ میکرومتر ( $PM_{10}^*$ ) به میزان ۴۸۹/۴۱ تن در سال (بیشترین حذف) و دی‌اکسید گوگرد ( $SO_2$ ) به میزان ۹۱/۵۰ تن در سال است (شکل ۴) (Rasoolzadeh et al., 2023).



شکل ۴ حذف آلاینده‌های هوا توسط درختان شهری تهران (تن در سال ۲۰۲۰) (Rasoolzadeh et al., 2023)

همانطور که مشاهده می‌شود آلاینده  $PM_{2.5}$  علی‌رغم خطرات بالایی که برای سلامت شهروندان به همراه دارد، در میان آلاینده‌های شاخص هوا، از کمترین مقدار حذف برخوردار است. درختان  $PM_{2.5}$  و  $PM_{10}$  را از طریق ترسیب خشک بر روی سطح برگ خود حذف می‌کنند (Nowak et al., 2013). میزان ترسیب ذرات معلق بسیار ریز در تابستان، با کلروفیل و کاروتنوئید برگ‌ها و نیز pH سطح برگ درختان در بهار و تابستان همبستگی منفی دارد (Bui et al., 2022). علاوه بر این، شرایط جوی و جغرافیایی در حضور ذرات معلق نقش مهمی دارند، یا از طریق شرایط اقلیمی مرتبط با حرکات باد یا بارش، تجمع ذرات معلق را تسهیل کرده یا مانع آن می‌شوند (Giardina and Buffa, 2018). به عبارت دیگر عوامل محیطی و گیاهی متعددی می‌تواند جذب و تعلیق مجدد ذرات معلق را پیچیده کند (Chávez-García and González-Méndez, 2021). علاوه بر این، خصوصیات میکروساختاری سطح برگ (مانند زبری، کرک‌دار بودن یا وجود موم اپیدرمی) نیز بر ظرفیت جذب آلاینده‌ها مؤثرند. با این وجود، برای محیط شهری، درختان ممکن است به دلیل محدودیت فضا یا پراکندگی آلاینده ذرات معلق در هوا، آنطور که انتظار می‌رود مناسب نباشند. از این‌رو مطالعات

بیشتری در مورد همبستگی‌های پیچیده بین تجمع ذرات معلق در برگ‌ها، ویژگی‌های برگ‌ها و شرایط محیطی مورد نیاز است تا استفاده مؤثر از گیاهان برای بهبود کیفیت هوا در محیط شهری افزایش یابد (Moura et al., 2024).

در جدول ۲، ارزش اقتصادی حذف آلاینده‌های شاخص هوا توسط درختان شهری تهران در سال ۲۰۲۰ بر حسب دلار و به کمک روش انتقال منافع برآورد و ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ستون دوم این جدول به کمک روش انتقال منافع، ارزش اقتصادی حذف هر تن از آلاینده‌های شاخص توسط درختان برای ایران محاسبه و به‌روزرسانی شده است. برای مثال، ارزش اقتصادی حذف هر تن CO معادل ۲۳۲/۵۰ دلار است. در مورد NO<sub>2</sub> و O<sub>3</sub>، ارزش اقتصادی حذف هر تن از این دو آلاینده برابر و معادل ۱۶۳۷/۷۰ دلار تخمین زده شده است. علت برابر بودن این ارقام این است که ازن یک آلاینده ثانویه محسوب می‌شود که از واکنش NO<sub>2</sub> در جو تشکیل می‌شود؛ بنابراین، کنترل یکی به کنترل دیگری نیز کمک می‌کند (i-Tree Eco User's Manual, 2019). در مورد آلاینده‌های دیگر، ارزش اقتصادی حذف هر تن SO<sub>2</sub> معادل ۴۰۰/۷۶ دلار و حذف هر تن PM<sub>10</sub> و هر تن PM<sub>2.5</sub> در حدود ۱۰۹۲ دلار برآورد شده است. ارزش اقتصادی کل حذف آلاینده‌ها توسط درختان شهری، میزان منفعت مالی است که درختان شهری به ساکنین آن شهر و حتی اطراف آن ارائه می‌دهد. به‌عنوان مثال، حذف CO توسط درختان شهری تهران ارزشی معادل ۳۱،۳۴۸ دلار در سال دارد. در مورد NO<sub>2</sub>، ارزش اقتصادی حذف آن ۴۹۰،۵۶۲ دلار در سال و ارزش پولی حذف O<sub>3</sub> در حدود ۴۴۲،۵۰۷ دلار در سال برآورد شده است. ارزش اقتصادی حذف PM<sub>2.5</sub>، که برای سلامت انسان بسیار خطرناک است، معادل ۷۴۰ دلار در سال است، در حالی که حذف PM<sub>10</sub> دارای ارزش اقتصادی ۵۳۴،۷۹۲ دلار در سال می‌باشد. حذف SO<sub>2</sub> توسط درختان شهر تهران ارزشی برابر با ۳۶،۶۶۸ دلار در سال به همراه دارد (Rasoolzadeh et al., 2023). در مجموع، ارزش اقتصادی سالانه عملکرد اکوسیستمی تصفیه هوا توسط درختان شهری تهران حدود ۱،۵۳۶،۶۱۹ دلار در سال برآورد شده است که نشان‌دهنده تأثیر مثبت و قابل توجه درختان در کاهش آلودگی و بهبود کیفیت هوای این شهر است. این ارقام تأکیدی بر اهمیت حفاظت و توسعه فضای سبز شهری برای ارتقای کیفیت زندگی شهروندان و کاهش اثرات مخرب آلودگی هوا دارد.

جدول ۲. زدایش آلودگی هوا توسط درختان شهری تهران (تن در سال) و ارزش اقتصادی آن (دلار)

آلاینده هوا	مقدار زدایش آلاینده‌های هوا توسط درختان شهر تهران (تن در سال)	ارزش اقتصادی زدایش هر تن آلاینده هوا توسط درختان (به روزرسانی شده برای ایران)	کل ارزش اقتصادی حذف آلاینده‌های هوا توسط درختان شهری تهران در سال (دلار)
CO	۱۳۴/۸۳	۲۳۲/۵۰	۳۱۳۴۸/۳
NO <sub>2</sub>	۲۹۹/۶۸	۱۶۳۷/۷۰	۵۶۲۴۹۰/۴
O <sub>3</sub>	۲۷۰/۳۲	۱۶۳۷/۷۰	۴۴۲۵۰۷/۸
PM <sub>2.5</sub>	۰/۶۸	۱۰۹۲/۹۵	۷۴۰/۱
PM <sub>10</sub>	۴۸۹/۴۱	۱۰۹۲/۷۲	۵۳۴۷۹۲/۵
SO <sub>2</sub>	۹۱/۵۰	۴۰۰/۷۶	۳۶۶۶۸/۲
کل	۱۲۸۶/۴۲	-	۱۵۳۶۶۱۹/۲

منبع: (یافته‌های تحقیق و Rasoolzadeh et al., 2023).

### ترسیب و ذخیره کربن

افزایش فعلی غلظت CO<sub>2</sub> در جو به عنوان یکی از عوامل اصلی تشدید تغییرات اقلیمی در جهان شناخته می‌شود (Pachauri, 2014). فعالیت‌های انسانی در مناطق شهری عامل انتشار ۷۱ درصد از CO<sub>2</sub> مرتبط با تولید انرژی است

(Grimm et al., 2008). از این رو، کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub> و تقویت مکانیسم‌های جذب کربن در محدوده‌های شهری به‌عنوان دو رویکرد کلیدی برای مقابله با تغییرات اقلیمی و کاهش اثرات آن بر مناطق شهری و بهبود تاب‌آوری شهرها مطرح شده‌است (Dhakal, 2010). در این میان، درختان شهری نقش مهمی در جذب و ذخیره‌سازی کربن دارد. گیاهان از طریق فرایند فتوسنتز، CO<sub>2</sub> اتمسفری را جذب کرده و آن را به ترکیبات آلی تبدیل می‌کنند؛ بنابراین، درختان می‌توانند به‌عنوان مخازن زنده کربن عمل کرده و سهم مثبتی در کاهش بار کربنی شهرها داشته باشند (Nowak et al., 2013).

درختان شهری تهران سالانه حدود ۶۰۱۰۱/۸ تن کربن که معادل ۲۲۰۳۹۳/۳ تن CO<sub>2</sub> است را ترسیب می‌کنند. با به‌روز رسانی ارزش اقتصادی ترسیب هر تن CO<sub>2</sub> در سال برای ایران (بر مبنای داده‌های ایالات متحده و تعدیل نرخ‌های محلی) این مقدار برابر با ۲/۸۱ دلار در سال به ازای هر تن CO<sub>2</sub> در نظر گرفته شد. بنابراین، ارزش اقتصادی کل کربن ترسیب شده توسط درختان شهری تهران حدود ۶۱۹۳۰۵ دلار در سال برآورد شده‌است.

علاوه بر ترسیب سالانه کربن، درختان می‌توانند به‌عنوان مخازن بلندمدت برای ذخیره کربن نیز عمل کنند. نتایج نشان می‌دهد که درختان شهری تهران تا کنون حدود ۲۵۴۵۷۹ تن کربن را در خود ذخیره کرده‌اند که معادل ۹۳۳۴۵۵ تن CO<sub>2</sub> است (Rasoolzadeh et al., 2024). ذخیره‌سازی کربن عمدتاً در بافت زنده درختان (تنه، شاخه و ریشه) اتفاق می‌افتد که با مرگ درخت و تجزیه بافت‌های آن دوباره به اتمسفر رها می‌شود.

#### نسبت زدایش به انتشار

در جدول ۳، مقدار انتشار (تن در سال) و مقدار زدایش (تن در سال) و نسبت زدایش به انتشار (درصد) آلاینده‌های شاخص هوا و گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub>، توسط درختان شهر تهران ارائه شده‌است. بررسی این مقادیر نشان می‌دهد که درختان شهری تنها سهم اندکی از بار آلاینده‌ها/ گاز گلخانه‌ای منتشر شده را می‌زدایند. به‌عنوان نمونه، نسبت حذف CO تنها ۰/۰۲۸ درصد از کل مقدار انتشار یافته (۴۷۷،۹۵۸ تن در سال) است. به‌طور مشابه، نسبت حذف برای PM<sub>2.5</sub> تنها ۰/۰۰۸ درصد و برای NO<sub>2</sub> حدود ۰/۲۹۲ درصد برآورد شده‌است. این ارقام نشان‌دهنده سهم ناچیز درختان در کاهش آلاینده‌ها است.

در این میان، بیشترین اثرگذاری درختان در حذف آلاینده‌ها مربوط به PM<sub>10</sub> بوده است، به‌طوری‌که حدود ۵/۲ درصد از ۹۴۰۵ تن PM<sub>10</sub> منتشرشده در سال توسط پوشش درختی جذب شده‌است. همچنین، نسبت حذف SO<sub>2</sub> نیز در حدود ۰/۴۸ درصد است. اگرچه این نسبت‌ها همچنان پایین‌اند، اما در مقایسه با سایر آلاینده‌ها بیشتر است.

در خصوص گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub> نیز، میزان ترسیب سالانه درختان حدود ۲۲۰۳۹۳ تن CO<sub>2</sub> در سال تخمین زده شده‌است، در حالی‌که بر اساس گزارش شهبازی و همکاران (۲۰۲۲) مقدار انتشار CO<sub>2</sub> در سطح شهر برابر ۴۷۰۷۱۰۰۰ تن در سال برآورد شده‌است. بنابراین، درختان شهری تنها حدود ۰/۴۷ درصد از کل CO<sub>2</sub> تولیدشده در سال را جذب می‌کنند.

اگرچه این نسبت‌ها در نگاه اول اندک به نظر می‌رسند، اما هرگونه کاهش هرچند کوچک در غلظت آلاینده‌ها می‌تواند پیامدهای بزرگ و معناداری برای سلامت عمومی به همراه داشته باشد. به‌عنوان مثال، کاهش حتی یک میکروگرم در مترمکعب از PM<sub>2.5</sub> با کاهش قابل توجه مرگ‌ومیرهای زودرس ناشی از بیماری‌های قلبی و ریوی همراه است. همین مسئله باعث شده‌است تا سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) از سال ۲۰۰۴، پوشش درختی را به‌عنوان معیاری بالقوه برای تحقق استانداردهای کیفیت هوا معرفی کند (Nowak, 2005).

جدول ۳ میزان حذف، انتشار و درصد حذف

حذف آلاینده (درصد)	میزان انتشار از منابع مختلف شهری (تن در سال) (Shahbazi et al., 2022)	حذف توسط درختان (تن در سال)	آلاینده / گاز گلخانه‌ای
۰/۰۲۸	۴۷۷۹۵۸	۱۳۴/۸۳	CO
۰/۲۹۲	۱۰۲۶۷۸	۲۹۹/۶۸	NO <sub>2</sub>
-	-	۲۷۰/۳۲	O <sub>3</sub>
۰/۰۰۸	۸۳۴۹	۰/۶۸	PM <sub>2.5</sub>
۵/۲۰۴	۹۴۰۵	۴۹۰/۰۹	PM <sub>10</sub>
۰/۴۸۲	۱۸۹۸۲	۹۱/۵۰	SO <sub>2</sub>
۰/۱۶۵	۶۱۷۳۷۲	۱۲۶۸/۴۲	کل آلاینده‌های هوا
۰/۴۷	۴۷۰۷۱۰۰۰	۲۲۰۳۹۳/۳	گاز گلخانه‌ای CO <sub>2</sub>

منبع: (یافته‌های تحقیق و Rasoolzadeh et al., 2024).

در جدول ۴، سرانه جذب آلاینده‌های شاخص هوا و CO<sub>2</sub> توسط درختان شهری تهران آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با احتساب جمعیت حدود ۹ میلیون نفری شهر تهران (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۰) سرانه جذب CO، ۱۵ گرم در سال، NO<sub>2</sub> حدود ۳۳ گرم در سال، O<sub>3</sub> در حدود ۳۰ گرم در سال، PM<sub>2.5</sub> در حدود ۰/۱ گرم در سال، PM<sub>10</sub> در حدود ۵۴/۴ گرم در سال، SO<sub>2</sub> در حدود ۱۰ گرم در سال و CO<sub>2</sub> در حدود ۲۴۴۸۸ گرم در سال (در حدود ۲۴/۵ کیلوگرم) توسط درختان شهری تهران است. میزان جذب CO<sub>2</sub> بسیار بیشتر از آلاینده‌های شاخص است، که نقش قابل توجه درختان در کاهش این گاز گلخانه‌ای و مقابله با تغییرات اقلیمی را نشان می‌دهد.

جدول ۴ سرانه حذف آلاینده‌های شاخص هوا و CO<sub>2</sub> در سال توسط درختان شهر تهران

آلاینده / گاز گلخانه‌ای	سرانه جذب (گرم در سال)
CO	۱۵/۰
NO <sub>2</sub>	۳۳/۳
O <sub>3</sub>	۳۰/۰
PM <sub>2.5</sub>	۰/۱
PM <sub>10</sub>	۵۴/۴
SO <sub>2</sub>	۱۰/۲
CO <sub>2</sub>	۲۴۴۸۸/۱

#### زدایش توسط گونه‌های درختی

در ابزار Tree Eco، بر خلاف برخی رویکردهای گونه‌محور، تفاوت مستقیم و ذاتی بین گونه‌های درختی از نظر نرخ حذف آلاینده‌های هوا لحاظ نمی‌شود؛ بلکه فرآیند زدایش آلاینده‌ها بر اساس مساحت برگ درختان و شرایط محیطی مانند سرعت باد، دما، رطوبت نسبی و غلظت آلاینده‌ها در سطح شهر و به طور یکسان برای تمام گونه‌ها شیب‌سازی

می‌شود. بنابراین، فراوانی درختان هر گونه و مساحت تاج پوشش آن‌ها مهم‌ترین دلایل تفاوت مقدار حذف آلاینده‌ها بین گونه‌های درختی در یک منطقه معین است.

اطلاعات مربوط به تعداد درختان، در جدول ۵، سطح برگ، میزان حذف آلاینده‌های شاخص و CO<sub>2</sub> توسط پنج گونه غالب درختی شهر تهران ارائه شده است. همانطور که انتظار می‌رود، گونه‌های دارای جمعیت بالا یا تاج پوشش گسترده‌تر، نقش مؤثرتری در زدایش گازها و ذرات داشته‌اند. برای مثال، گونه کاج تهران با بیش از ۹۲۸ هزار اصله درخت و سطح برگ قابل توجه ۶۲۰۵/۵ هکتاری، با حذف ۳۴۲/۱۷ تن آلاینده در سال، بیشترین سهم را در میان گونه‌های مورد بررسی به خود اختصاص داده است. همچنین، این گونه با ترسیب ۸۶۰۶/۳۵ تن کربن در سال، از نظر کاهش گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub> نیز عملکرد قابل توجهی داشته است.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که در شرایط یکسان اقلیمی و آلودگی، مدیریت فراوانی گونه‌های دارای سطح برگ بالا و طول عمر زیاد می‌تواند راهبردی مؤثری برای بهبود کیفیت هوای شهری و تقویت خدمات تنظیمی درختان شهری تلقی شود.

جدول ۵ مقایسه زدایش آلاینده‌های شاخص هوا و CO<sub>2</sub> توسط گونه‌های درختی غالب در شهر تهران

گونه	نام علمی	تعداد درخت (اصله)	مساحت برگ (هکتار)	حذف آلاینده‌ها (تن در سال)	ترسیب کربن (تن در سال)
کاج تهران	<i>Pinus eldarica</i>	۹۲۸۲۳۳	۶۲۰۵/۵	۳۴۲/۱۷	۸۹۹۰
اقاقیا	<i>Robinia pseudoacacia</i>	۷۱۱۵۶۲	۱۰۸۷/۱	۵۹/۹۴	۳۹۸۰
سرو نقره‌ای	<i>Cupressus arizonica</i>	۶۶۶۸۰۲	۱۵۸۲/۸	۸۷/۲۷	۱۱۸۹۰
چنار	<i>Platanus orientalis</i>	۵۹۵۳۶۲	۴۳۱۰/۴	۲۳۷/۶۷	۵۰۹۹
زبان گنجشک	<i>Fraxinus excelsior</i>	۳۳۵۷۸۷	۱۱۸۰/۹	۶۵/۱۲	۲۸۹۰

منبع: (یافته‌های تحقیق، Rasoolzadeh et al., 2022، Rasoolzadeh et al., 2024).

### تولید اکسیژن

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد، میزان اکسیژن تولیدی درختان شهری تهران حدود ۱۶۰۲۷۲ تن در سال برآورد شده است، لیک، ارزش اقتصادی آن برای جامعه قابل چشم پوشی است، چرا که میزان اکسیژن تولیدی توسط درختان در مقایسه با حجم اکسیژن اتمسفر ناچیز است (حدود ۲۱ درصد حجم اتمسفر را اکسیژن تشکیل می‌دهد) (Nowak et al., 2007).

یک جنگل در حال رشد می‌تواند CO<sub>2</sub> را جذب کرده و اکسیژن تولید کند. برعکس، یک جنگل در حال تخریب و فروپاشی، از طریق فرآیندهای تجزیه CO<sub>2</sub> را آزاد کرده و اکسیژن مصرف می‌کند (Nowak et al., 2007). باید توجه داشت که استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث مصرف اکسیژن می‌شود. از این رو، محتوای اکسیژن جو به آرامی در حال کاهش است. بین سال‌های ۱۹۸۹ و ۱۹۹۴، محتوای اکسیژن جو با نرخ سالانه ۲ ppm در حدود ۲۱۰،۰۰۰ ppm کاهش یافته است (Nowak et al., 2007; Broecker, 1996). بنابراین، کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی در مدیریت جنگل‌های شهری نه تنها باعث کاهش انتشار CO<sub>2</sub> می‌شود، بلکه مصرف اکسیژن را نیز کاهش می‌دهد (Nowak et al., 2002).

### وضعیت پوشش درختی شهر تهران در مقایسه با چند شهر دیگر

در جدول ۶، وضعیت پوشش درختی شهر تهران از نظر نسبت پوشش درختی، تراکم، ذخیره کربن، ترسیب سالانه کربن و زدایش سالانه آلاینده‌های هوا به ازای هر هکتار از مساحت محدوده‌ی مطالعاتی با چند شهر دیگر مقایسه شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، پوشش درختی ۱۴/۷ درصد از این شهر را پوشش می‌دهد که این مقدار در مقایسه با شهرهایی مانند لس‌آنجلس (۱۱/۱ درصد) و تبریز (۹/۴ درصد) بیشتر است، اما به‌طور قابل‌توجهی پایین‌تر از شهرهایی مانند آتلانتا (۳۶/۷ درصد) و بوستون (۲۲/۳ درصد) قرار دارد. تراکم درختی در تهران برابر با ۱۲۱ اصله در هکتار برآورد شده است که بالاتر از بسیاری از شهرهای مقایسه‌شده از جمله نیویورک (۶۵ اصله در هکتار)، لس‌آنجلس (۴۸ اصله در هکتار) و حتی بوستون (۸۳ اصله در هکتار) است. این تراکم بالا در حالی مشاهده می‌شود که نسبت پوشش درختی متوسط است؛ چراکه درختان شهری تهران عموماً در مرحله رشد اولیه قرار دارند (DBH بیش از ۷۵ درصد درختان تهران کمتر از ۱۵/۲ سانتی متر است). همچنین جوان بودن درختان شهر تهران سبب شده است که میزان ذخیره کربن در این شهر کم (۱/۱۸ تن در هکتار) و در مقایسه با شهرهایی مانند آتلانتا (۳۵/۷ تن در هکتار) و بالتیمور (۲۵/۰ تن در هکتار) بسیار پایین‌تر باشد. در خصوص ترسیب سالانه کربن، تهران با میزان ۱/۰۴ تن در هکتار در سال عملکرد نسبتاً مطلوبی دارد که حتی از نیویورک (۰/۴۸) و لس‌آنجلس (۰/۳۶) بالاتر است. این موضوع ممکن است به دلیل رشد فعال‌تر گونه‌های شهری، اقلیم گرم‌تر یا ترکیب گونه‌ای با نرخ فتوسنتز بالاتر باشد.

در نهایت، عملکرد درختان تهران در حذف سالانه آلاینده‌های هوا برابر با ۲۱/۷۹ کیلوگرم در هر هکتار گزارش شده است که بالاتر از لس‌آنجلس (۱۴/۷ کیلوگرم)، نیویورک (۱۹/۰ کیلوگرم) و تبریز (۹/۷ کیلوگرم) است. این مقدار احتمالاً تحت تأثیر شرایط اقلیمی خاص تهران و سطح بالای آلودگی اولیه هوا قرار دارد که باعث افزایش میزان جذب آلاینده‌ها می‌شود.

جدول ۶ مقایسه وضعیت پوشش درختی شهر تهران با چند شهر دیگر

مرجع	حذف آلاینده‌های هوا (کیلوگرم در هکتار در سال)	ترسیب کربن (تن در هکتار از مساحت منطقه در سال)	ذخیره کربن (تن در هکتار)	تراکم (اصله درخت در هکتار)	نسبت پوشش درختی به مساحت منطقه (درصد)	شهر
Nowak et al., 2006; Nowak et al., 2013	۴۴/۲	۱/۲۳	۳۵/۷	۲۷۵/۸	۳۶/۷	آتلانتا، آمریکا
Nowak et al., 2006; Nowak et al., 2013	۱۸/۶	۰/۸۰	۲۵/۰	۱۱۸/۵	۲۱/۰	بالتیمور، آمریکا
Nowak et al., 2006; Nowak et al., 2013	۱۸/۰	۰/۶۷	۲۰/۳	۸۲/۹	۲۲/۳	بوستون، آمریکا
Nowak et al., 2006; Nowak et al., 2013	۱۹/۰	۰/۴۸	۱۵/۳	۶۵/۲	۲۰/۹	نیویورک، آمریکا
Nowak et al., 2006; Nowak et al., 2013	۱۴/۷	۰/۳۶	۹/۴	۴۸/۴	۱۱/۱	لس‌آنجلس، آمریکا
Parsa et al., 2019	۹/۷	۰/۳۶	۲/۲	۷۹	۹/۴	تبریز، ایران
مطالعه حاضر	۲۱/۷۹	۱/۰۴	۱/۱۸	۱۲۱	۱۴/۷	تهران، ایران

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عملکرد اکوسیستمی بهبود کیفیت هوا شامل زدایش آلاینده‌های شاخص هوا، ترسیب و ذخیره کربن و تولید اکسیژن توسط درختان شهری تهران با استفاده از ابزار i-Tree Eco بررسی و با بهره‌گیری از رویکرد انتقال منافع ارزش‌گذاری اقتصادی شد. نتایج نشان داد که سالانه درختان شهری تهران در مجموع ۲۲۱۷۶۱/۷۲ تن از آلاینده‌های شاخص هوا شامل CO، NO<sub>2</sub>، SO<sub>2</sub>، O<sub>3</sub>، PM<sub>10</sub>، PM<sub>2.5</sub> و گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub> را حذف می‌کنند. ارزش اقتصادی این

عملکرد اکوسیستمی حدود ۲۱۵۵۹۲۴ دلار در سال برآورد می‌شود که نشان‌دهنده نقش قابل توجه درختان در بهبود کیفیت هوا و مقابله با تغییرات اقلیمی به ویژه در مقیاس محلی است.

سلمی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به کمک مدل i-Tree به بررسی نقش درختان در حذف آلاینده‌های هوا در شهر استراسبورگ فرانسه پرداختند. نتایج نشان داد که درختان شهری استراسبورگ سالانه در حدود ۸۸ تن از آلاینده‌های هوا را می‌زدایند (یک تن CO، ۱۴ تن NO<sub>2</sub>، ۵۶ تن O<sub>3</sub>، ۱۲ تن PM<sub>10-2.5</sub> (ذرات معلق با اندازه کوچکتر از ۱۰ میکرومتر و بزرگتر از ۲/۵ میکرومتر)، ۵ تن PM<sub>2.5</sub> و ۱ تن SO<sub>2</sub>). همانند مطالعه حاضر، مقایسه بین نرخ شبیه‌سازی شده حذف آلودگی و انتشارات محلی نشان داد که درختان مناطق عمومی استراسبورگ نسبت ناچیزی از میزان انتشار آلاینده‌های هوا را می‌زدایند به طوری که درختان شهری تنها در حدود ۷ درصد از ذرات معلق منتشر شده را کاهش می‌دهند و تأثیر آن بر حذف سایر آلاینده‌های هوا بسیار کم است. بنابراین، مطالعه سلمی و همکاران (۲۰۱۶) همانند مطالعه پیش‌رو نشان داد که درختان شهری یک عنصر مهم برای کاهش آلودگی هوا است، اما تنها راه حل این مشکل به شمار نمی‌رود (Selmi et al., 2016).

پارسا و همکاران در سال ۲۰۱۹، به بررسی شرایط فعلی و چشم‌انداز آتی زیر ساخت‌های سبز شهر تبریز در بهبود کیفیت هوای این شهر از طریق سناریوهای درختکاری و بر پایه مدل i-Tree Eco پرداختند. نتایج نشان داد که در سال ۲۰۱۵، وجود تقریباً ۱,۹۲۸,۰۰۰ اصله درخت در این شهر، سبب حذف ۲۳۸/۴ تن از آلاینده‌های هوا در سال (حدود ۸۹/۰۴ تن NO<sub>2</sub>، ۶۵/۳۸ تن O<sub>3</sub>، ۵۳/۶۹ تن SO<sub>2</sub>، ۱۸/۰۴ تن CO و ۱۲/۲۱ تن PM<sub>2.5</sub>) با ارزش اقتصادی ۸۸۹/۸۷۳,۱۹۰ دلار در سال است. همچنین این درختان ۵۴,۴۲۰ تن کربن را در خود ذخیره و سالانه ۹۲۰,۳ تن کربن را از طریق فتوسنتز ترسیب و ۲۳,۶۷۰ تن اکسیژن را در سال تولید کردند (Parsa et al., 2019) که در مقایسه با دیگر شهرهای جهان پتانسیل نسبتاً اندکی در تصفیه هوا به شمار می‌رود (Parsa et al., 2019). شاید تحقیق پارسا و همکاران (۲۰۱۹) را بتوان به عنوان مشابه‌ترین پژوهش داخلی با این بخش از پژوهش پیش‌رو دانست اما تفاوت این پژوهش با پژوهش پیش‌رو علاوه بر موقعیت محدوده مطالعاتی، مقیاس منطقه مطالعاتی نیز هست. حذف آلاینده‌های هوا تا حد زیادی به پوشش درختی و سطح غلظت آلاینده‌های هوا بستگی دارد و این دلیل تفاوت در برآورد عملکرد نقش درختان شهری در بهبود کیفیت هوا در مطالعات مختلف است.

همانند مطالعه سلمی و همکاران (۲۰۱۹)، درختان شهری تهران نسبت ناچیزی از آلاینده‌های هوا را می‌زدایند، بنابراین، اتخاذ رویکردی جامع در مدیریت کیفیت هوا ضروری است. در این راستا، علاوه بر تدوین سیاست‌های کارآمد، با تقویت زیرساخت‌های سبز با افزایش تعداد درختان سالم، حفظ و نگهداری درختان موجود، کاشت گونه‌های مقاوم و کم‌نیاز به منابع آبی، تمرکز بر کاشت درختان در مناطق آلوده مانند اطراف نیروگاه‌ها و صنایع، میزان انتشار آلاینده‌های هوا و دی‌اکسید کربن را کاهش داد. همچنین به کارگیری راهکارهای فنی به‌روز نیز از اهمیت بالایی دارد (Ariiluoma et al., 2021). بنابراین، درختان، اگرچه به تنهایی قادر به رفع مشکل آلودگی نیستند، اما می‌توانند به‌عنوان بخشی از یک راهبرد مکمل، در کنار اقدامات کنترلی دیگر، نقش مهمی ایفا کنند. با توجه به محدودیت‌های توسعه کمی فضای سبز در تهران، تمرکز بر ارتقاء کیفیت فضای سبز موجود اهمیت ویژه‌ای دارد. برای مثال، بیش از ۷۵٪ از درختان تهران دارای قطر برابر سینه (DBH) کمتر از ۱۵/۲ سانتی‌متر هستند، که بیانگر جوان بودن اکثر درختان شهر است. این امر، نیاز به مراقبت‌های خاص از جمله آبیاری منظم، هرس علمی، و محافظت در برابر آسیب‌های فیزیکی و شیمیایی را برجسته می‌سازد.

نقش درختان نباید تنها به حذف آلاینده‌ها یا CO<sub>2</sub> محدود شود. اثرات مثبت آن‌ها در کاهش دمای محیط، تعدیل اثر جزیره گرمایی، کاهش آلودگی، ارتقای کیفیت زندگی شهری، ایجاد زیبایی بصری، خدمات فرهنگی و تأمین زیستگاه، بسیار فراتر از آمار مربوط به بهبود کیفیت هوا است. بنابراین، در ارزیابی جامع نقش درختان در شهر، لازم است

به سایر خدمات اکوسیستمی آن‌ها توجه کرد. از این رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، ابعاد دیگر خدمات اکوسیستمی درختان شهری تهران بررسی و ارزش گذاری شوند. در این مطالعه تنها به نقش درختان در بهبود کیفیت هوای شهر تهران پرداخته شده است و نقش سایر اجزا زیرساخت‌های سبز از جمله درختچه‌ها توجه نشده است. از این رو پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی نقش درختچه‌ها در ارتقای کیفیت هوا مورد توجه قرار گیرد.

در نهایت، یافته‌ها نشان می‌دهد که درختان شهری می‌توانند به‌طور مؤثر در کاهش آلودگی هوا و ارتقای سلامت و رفاه شهروندان نقش آفرینی کنند. میزان این تأثیرگذاری به عواملی مانند ترکیب گونه‌ای، وضعیت فیزیولوژیکی، اقلیم محلی و نوع آلاینده بستگی دارد. محاسبه ارزش اقتصادی این خدمات، می‌تواند در سیاست‌گذاری شهری و تخصیص بودجه در راستای توسعه فضای سبز نقش کلیدی داشته باشد. از این رو، طراحی هوشمندانه فضای سبز شهری و انتخاب گونه‌های مؤثر در جذب آلاینده‌ها، به‌ویژه  $PM_{2.5}$ ، باید در اولویت مدیریت محیط‌زیست شهری قرار گیرد.

### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از صندوق حمایت از پژوهشگران که بخشی از هزینه‌های این تحقیق را تأمین نموده است (شماره ۹۸۰۱۲۶۳۵)، تشکر و قدردانی می‌شود.

### فهرست منابع

- آزموده، مریم و حیدری، ش (۱۳۹۳). اندازه‌گیری کمی میزان جذب آلاینده‌های ناشی از وسایل نقلیه توسط دیوارهای سبز. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، شماره ۱۶.
- احدی، سولماز، روشنی، م، شهبازی، ح، کریمی، الف. (۱۴۰۳). گزارش سالانه کیفیت هوا و صدای تهران در سال ۱۴۰۲. شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (<http://www.air.tehran.ir>).
- رجایی، علی (۱۳۹۷). ارایه راهکارهایی جهت کاهش آلودگی هوای شهر تهران. مجله نخبگان علوم و مهندسی، ۳(۱).
- روشنی، محسن، احدی، س، شهبازی، ح، خدام، ن، کریمی، اف. (۱۴۰۱). گزارش سالانه کیفیت هوا و صدای تهران در سال ۱۴۰۰. شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (<http://www.air.tehran.ir>).
- عباس‌زاده‌تهرانی، نادیا، رضائی، م، بیات، ر، حسین‌زاده، م، رهایی، ع، معادی‌رودسری، م.ح، عبدالاحد، ع، و کرمی، ف. (۱۴۰۲). ضرورت توجه به ظرفیت برد محیط‌زیستی در طرح‌های توسعه شهری با نگاه به وضعیت کلان‌شهر تهران. مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی. کنش‌ها، هاشم و اقتصادی، ع. (۱۳۹۰). نقش جنگلکاری در کاهش آلاینده‌های نفتی (عناصر و فلزات سنگین). نشریه محیط زیست طبیعی، مجله منابع طبیعی ایران، ۶۴(۲): ۱۸۵-۱۹۷.
- میرقعی دینان، نغمه، نظری، م. ر، رشیدی، ی، کدیوری، ف، ابراهیمی، ا، پای، ا، رسول‌زاده، ر، بدره‌کرده، س، و عرفانی، س. (۱۳۹۹). گزارش دستورالعمل‌های اجرایی ماده ۱۲ قانون هوای پاک. سازمان حفاظت محیط زیست ایران.
- میرقعی، نغمه، شرزه‌ای، غ، ع، مخدوم، م، یآوری، ا. ر. (۱۳۸۸). ارائه الگوی ارزش‌گذاری مکانی کارکرد جذب گاز دی اکسید کربن در جنگل‌های خزری ایران، محیط‌شناسی، ۵۱: ۵۷-۶۸.

- Agaton, C. B., & Guila, P. M. C. (2023). Ecosystem services valuation of constructed wetland as a nature-based solution to wastewater treatment. *Earth*, 4(1), 78-92.
- Ariiluoma, M., Ottelin, J., Hautamäki, R., Tuhkanen, E. M., & Mänttari, M. (2021). Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki. *Urban Forestry & Urban Greening*, 57, 126939.
- Assessment, Millennium Ecosystem (MEA). (2005). Millennium ecosystem assessment. Vol. 2. *Millennium Ecosystem Assessment*.
- Baró, F., Chaparro, L., Gómez-Baggethun, E., Langemeyer, J., Nowak, D. J., & Terradas, J. (2014). Carbon dioxide reductions through urban forestry: Guidelines for professional and volunteer tree planters. *Ambio*, 43(4), 466-479.
- Barwise, Y., & Kumar, P. (2020). Designing vegetation barriers for urban air pollution abatement: A practical review for appropriate plant species selection. *Climate and Atmospheric Science*, 3(1), 12.
- Broecker, W. S. (1996). *Et tu, O2? 21stC, The World of Research at Columbia University. Special Issue: Biospheres*.
- Bui, H. T., Odsuren, U., Kim, S. Y., & Park, B. J. (2022). Seasonal variations in the particulate matter accumulation and leaf traits of 24 plant species in urban green space. *Land*, 11(11), 1981.

- Chaparro, L., & Terradas, J. (2009). Ecological services of urban forest in Barcelona. *Institut Municipal de Parcs i Jardins Ajuntament de Barcelona, Àrea de Medi Ambient*.
- Chávez-García, E., & González-Méndez, B. (2021). Particulate matter and foliar retention: current knowledge and implications for urban greening. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14(9), 1433-1454.
- Chen, W. Y., & Jim, C. Y. (2008). Assessment and valuation of the ecosystem services provided by urban forests. *Ecology, planning, and management of urban forests: international perspectives*, 53-83.
- Chow, P., & Rolfe, G. L. (1989). Carbon and hydrogen contents of short-rotation biomass of five hardwood species. *Wood and Fiber Science*, 30-36.
- Dhakal, S. (2010). GHG emissions from urbanization and opportunities for urban carbon mitigation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2(4), 277-283.
- Escobedo, F. J., Kropp, J. P., & Zipperer, W. C. (2011). Urban forests and pollution removal: A review of the evidence and the role of trees. *Urban Forestry & Urban Greening*, 10(2), 97-108.
- Giardina, M., & Buffa, P. (2018). A new approach for modeling dry deposition velocity of particles. *Atmospheric Environment*, 180, 11-22.
- Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235-245.
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *science*, 319 (5864), 756-760.
- Hirabayashi, S. (2013). i-Tree Eco precipitation interception model descriptions version 1.0. U.S. *Forest Service*.
- Hirabayashi, S. (2021). Technical specifications of urban forests for air purification: A case study in Tokyo, Japan. *Trees, Forests and People*, 4, 100078.
- Intasen, M., Hauer, R. J., Werner, L. P., & Larsen, E. (2017). Urban forest assessment in Bangkok, Thailand. *Journal of Sustainable Forestry*, 36(2), 148-163.
- i-Tree Eco User's Manual, 2016. i-Tree Eco User's manual, i-Tree Tools.
- Jim, C. Y., & Chen, W. Y. (2009). Ecosystem services and valuation of urban forests in China. *Cities*, 26(4), 187-194.
- Kabisch, N., Qureshi, S., & Haase, D. (2015). Human-environment interactions in urban green spaces: A systematic review of contemporary issues and prospects for future research. *Environmental Impact Assessment Review*, 50, 25-34.
- Kumar, P. (2012). *The economics of ecosystems and biodiversity: ecological and economic foundations*. Routledge.
- Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J., Adeyi, O., Arnold, R., Baldé, A. B., & Zhong, M. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, 391(10119), 462-512.
- Lee, Ahreum, Sujong Jeong, Jaewon Joo, Chan-Ryul Park, Jhoo Kim, and Sookyung Kim. 2021. "Potential role of urban forest in removing PM2. 5: A case study in Seoul by deep learning with satellite data." *Urban Climate* 36: 100795.
- Li, X., Huang, Y., & Ma, X. (2021). Evaluation of the accessible urban public green space at the community scale with the consideration of temporal accessibility and quality. *Ecological Indicators*, 131, 108231.
- Li, Y. X., Ma, W., Zhang, W. X., & He, P. (2025). Estimating Small-Scale Forest Carbon Sequestration and Storage: i-Tree Eco Model Improved Application. *Forests*, 16(9), 1363.
- Lin, J., Kroll, C. N., & Nowak, D. J. (2020). Ecosystem service-based sensitivity analyses of i-Tree Eco. *Arboriculture and Urban Forestry*, 46(4), 287-306.
- Lisboa, M. A. N., da Silva, L. V. A., da Silva Nascimento, A., de Oliveira Silva, A., Teixeira, M. R. A., Ferreira, M. F. R., & Júnior, J. T. C. (2024). Diversity, structure, and carbon sequestration potential of the woody flora of urban squares in the Brazilian semiarid region. *Trees, Forests and People*, 16, 100561.
- Ma, B., Zhou, T., Lei, S., Wen, Y., & Htun, T. T. (2019). Effects of urban green spaces on residents' well-being. *Environment, Development and Sustainability*, 21, 2793-2809.
- McPherson, E. G. (2007). Benefit-based tree valuation. *Arboriculture & Urban Forestry* 33 (1): 1-11, 33(1), 1-11.
- McPherson, E. Gregory, Qingfu Xiao, Natalie S. van Doorn, John de Goede, Jacquelyn Bjorkman, Allan Hollander, Ryan M. Boynton, James F. Quinn, and James H. Thorne. 2017. "The structure, function and value of urban forests in California communities." *Urban Forestry & Urban Greening* 28: 43-53.
- Mikulanis, V. (2014). Phoenix, Arizona project area, community forest assessment. *U.S. Forest Service*.
- Motesadi-Zarandi, S., Molla-Norouzi, M., Hosseini, M., Nazari, F. (2015). Development of an applicable tree air quality benefit calculator (Pars Tac) in Iran. *Int. J. Biol. Pharm. Allied Sci.* 4, 5141- 5158.
- Moura, B. B., Zammarchi, F., Manzini, J., Hoshika, Y., Brilli, L., Vagnoli, C., ... & Ferrini, F. (2024). Assessment of seasonal variations in particulate matter accumulation and elemental composition in urban tree species. *Environmental Research*, 252, 118782.
- Nowak, D. J. (2005). Strategic tree planting as an EPA encouraged pollutant reduction strategy: how urban trees can obtain credit in state implementation plans. *Sylvan Communities* 23-27.

- Nowak, D. J. (2017). Assessing the benefits and economic values of trees. In *Routledge handbook of urban forestry* (pp. 152-163). Routledge.
- Nowak, D. J. (2017). Assessing the benefits and economic values of trees. In *Routledge handbook of urban forestry* (pp. 152-163). Routledge.
- Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental pollution*, 116(3), 381-389.
- Nowak, D. J., & Dwyer, J. F. (2007). Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In *Urban and community forestry in the northeast* (pp. 25-46). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4(3-4), 115-123.
- Nowak, D. J., Cumming, A., & Twardus, D. (2011). Urban forests of Tennessee. General Technical Report SRS-149. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station.
- Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., & Lapoint, E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental pollution*, 178, 229-236.
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Greenfield, E. (2014). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental pollution*, 193, 119-129.
- Nowak, David J. 2017. "Assessing the benefits and economic values of trees." In *Routledge handbook of urban forestry* 152-163. Routledge.
- Nowak, David J., Daniel E. Crane, and Jack C. Stevens. 2006. "Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States." *Urban forestry & urban greening*, 4, no. 3-4: 115-123.
- Nowak, David J., Eric J. Greenfield, Robert E. Hoehn, and Elizabeth Lapoint. 2013. "Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States." *Environmental pollution* 178: 229-236.
- Ostad-Ali-Askari, K., & Shayannejad, M. (2021). Quantity and quality modelling of groundwater to manage water resources in Isfahan-Borkhar Aquifer. *Environment, Development and Sustainability*, 23(11), 15943-15959.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... & van Ypersele, J. P. (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 151. Ipcc.
- Parsa, V. A., Salehi, E., Yavari, A. R., & van Bodegom, P. M. (2019). Analyzing temporal changes in urban forest structure and the effect on air quality improvement. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101548.
- Parsa, Vahid Amini, Esmail Salehi, Ahmad Reza Yavari, and Peter M. van Bodegom. 2019. "Analyzing temporal changes in urban forest structure and the effect on air quality improvement." *Sustainable Cities and Society* 48: 101548.
- Rasoolzadeh, R., Dinan, N. M., Esmailzadeh, H., & Rashidi, Y. (2022). Investigating the Urban trees' diversity in Tehran-Iran using i-Tree Eco model. *Journal of Wildlife and Biodiversity*, 6(2), 61-73.
- Rasoolzadeh, R., Mobarghaee Dinan, N., Esmailzadeh, H., Rashidi, Y., & Sadeghi, S. M. M. (2023). Assessment of air pollution removal by urban trees based on the i-Tree Eco Model: The case of Tehran, Iran. *Integrated Environmental Assessment and Management*.
- Rasoolzadeh, R., Mobarghaee Dinan, N., Esmailzadeh, H., Rashidi, Y., Marcu, M. V., & Sadeghi, S. M. M. (2024). Carbon sequestration and storage of urban trees in a polluted semiarid city. *Forests*, 15(9), 1488.
- Riley, C. B., Herms, D. A., & Gardiner, M. M. (2018). Exotic trees contribute to urban forest diversity and ecosystem services in inner-city Cleveland, OH. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 367-376.
- Riondato, E., Pilla, F., Basu, A. S., & Basu, B. (2020). Investigating the effect of trees on urban quality in Dublin by combining air monitoring with i-Tree Eco model. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102356.
- Ryu, J., Kim, J. J., Byeon, H., Go, T., & Lee, S. J. (2019). Removal of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) via atmospheric humidity caused by evapotranspiration. *Environmental pollution*, 245, 253-259.
- Sahle, M., Saito, O., Fürst, C., & Yeshitela, K. (2018). Quantification and mapping of the supply of and demand for carbon storage and sequestration service in woody biomass and soil to mitigate climate change in the socio-ecological environment. *Science of the total environment*, 624, 342-354.
- Selmi, W., Weber, C., Rivière, E., Blond, N., Mehdi, L., & Nowak, D. (2016). Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry & Urban Greening*, 17(2), 192-201.
- Selmi, Wissal, Christiane Weber, Emmanuel Rivière, Nadège Blond, Lotfi Mehdi, and David Nowak. 2016. "Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France." *Urban forestry & urban greening* 17: 192-201.
- Shahbazi, H., Abolmaali, A. M., Alizadeh, H., Salavati, H., Zokaei, H., Zandavi, R., ... & Hosseini, V. (2022). An emission inventory update for Tehran: The difference between air pollution and greenhouse gas source contributions. *Atmospheric Research*, 275, 106240.

- Song, P., Kim, G., Mayer, A., He, R., & Tian, G. (2020). Assessing the ecosystem services of various types of urban green spaces based on i-Tree Eco. *Sustainability*, 12(4), 1630.
- Song, X. P., Tan, P. Y., Edwards, P., & Richards, D. (2018). The economic benefits and costs of trees in urban forest stewardship: A systematic review. *Urban forestry & urban greening*, 29, 162-170.
- Talebmorad, H., Abedi-Koupai, J., Eslamian, S., Mousavi, S. F., Akhavan, S., Ostad-Ali-Askari, K., & Singh, V. P. (2021). Evaluation of the impact of climate change on reference crop evapotranspiration in Hamedan-Bahar plain. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 11(3), 333-347.
- United Nations. (2019). World urbanization prospects: The 2018 revision. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. <https://www.un.org/development/desa/publications/world-urbanization-prospects-the-2018-revision.html>.
- Wang, Y., Chang, Q., & Li, X. (2021). Promoting sustainable carbon sequestration of plants in urban greenspace by planting design: A case study in parks of Beijing. *Urban Forestry & Urban Greening*, 64, 127291.
- Watkiss, P., Hunt, A., Blyth, W., & Dyszynski, J. (2015). The use of new economic decision support tools for adaptation assessment: A review of methods and applications, towards guidance on applicability. *Climatic Change*, 132(3), 401-416.
- Watson, A. S., & Bai, R. S. (2025). Studies on ecosystem services and air-pollution mitigation in tropical urban vegetation using i-Tree Eco Model. *Environment, Development and Sustainability*, 1-18.
- World Bank. (2020). Retrieved from <https://data.worldbank.org/indicator/SP.DYN.LE00.IN?locations=IT>
- Yang, J., McBride, J., Zhou, J., & Sun, Z. (2005). The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban forestry & urban greening*, 3(2), 65-78.
- Yao, Y., Wang, Y., Ni, Z., Chen, S., & Xia, B. (2022). Improving air quality in Guangzhou with urban green infrastructure planning: An i-Tree Eco model study. *Journal of Cleaner Production*, 369, 133372.
- Yousofpour, Y., Abolhassani, L., Hirabayashi, S., Burgess, D., Sabouni, M. S., & Daneshvarkakhki, M. (2024). Ecosystem services and economic values provided by urban park trees in the air polluted city of Mashhad. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105110.

