

The Effect of Urban Green Space Pattern on the Spatial Distribution of PM_{2.5} in Isfahan

Arsalan Moeini

MSc, Environmental Pollution,
Department of Environmental
Sciences, Isfahan (Khorasgan)
Branch, Islamic Azad University,
Isfahan, Iran.

Mozhgan Ahmadi

Nadoushan

* Department of Environmental
Sciences, Waste and Wastewater
Research Center, Isfahan
(Khorasgan) Branch, Islamic
Azad University, Isfahan, Iran.
(Corresponding Author)
m.ahmadi1984@gmail.com

Abstract

Background and Purpose: Parks play a crucial role in modern city structures, serving various ecological functions. This study investigates the role of urban parks in the spatial distribution of PM_{2.5}.

Materials and Methods: Using the Inverse Distance Weighting (IDW) method, the daily values of the concentration of this pollutant, collected by 16 ground monitoring stations, were obtained for a full year from March 22, 2022, to March 20, 2023. Processing Landsat-8 satellite images, the entire green cover of Isfahan city was extracted. Subsequently, the annual concentration of this pollutant was mapped into a continuous map.

Results: Based on the results, Region 11 in the northwest of the city showed the highest average concentration of PM_{2.5} in the amount of 62.047 and a standard deviation of 4.091 among the 15 urban regions of Isfahan, indicating high pollution levels in this region. The results of the correlation analysis ($R^2 = 0.203$) between the annual concentration of PM_{2.5} and the total area of parks indicate that the greater the cumulative area of parks in an urban area, the lower the average concentration of PM_{2.5}. The results showed that only the size of each park and its normalized difference vegetation index with the concentration of annual PM_{2.5} have a negative and significant correlation of -0.572 and -0.748, respectively, at the one percent level ($p\text{-value} = 0.00$).

Conclusion: In conclusion, it can be inferred that utilizing the natural filtration capacity of park vegetation and larger green spaces significantly improves air quality.

Keywords: Greenspace, Particulate Matter, Isfahan, Normalized Difference Vegetation Index

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

► **Citation:** Moeini A, Ahmadi Nadoushan M. The Effect of Urban Green Space Pattern on the Spatial Distribution of PM_{2.5} in Isfahan. *Journal of Research in Environmental Health*. 10 (2):48-63.

Received: 2024/02/22

Accepted: 2024/08/18

Doi:10.22038/jreh.2024.24891

اثر الگوی پارک‌های شهری بر توزیع مکانی PM_{2.5} در شهر اصفهان

ارسلان معینی

کارشناس ارشد آلودگی محیط زیست،
گروه محیط زیست، واحد اصفهان
(خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی،
اصفهان، ایران

مژگان احمدی ندوشن

* گروه محیط زیست، مرکز تحقیقات
پسماند و پساب، واحد اصفهان
(خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی،
اصفهان، ایران (نویسنده
مسئول)

m.ahmadi1984@gmail.com

چکیده

زمینه و هدف: یکی از مهم‌ترین نقش‌های پارک‌های شهری، جذب انواع آلاینده‌ها بخصوص ذرات معلق PM_{2.5} و کمک به بهبود شرایط اتمسفر شهری است. در مطالعه حاضر به بررسی نقش پارک‌های شهری در توزیع مکانی ذرات معلق PM_{2.5} پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها: در گام اول، مقادیر روزانه غلظت این آلاینده که توسط ۱۶ ایستگاه پایش زمینی برداشت می‌شوند برای یک سال کامل از اول فروردین ۱۴۰۱ تا پایان اسفند این سال اخذ گردید و با استفاده از روش معکوس فاصله وزنی به نقشه پیوسته از غلظت سالانه این آلاینده تبدیل شد. سپس با پردازش تصاویر ماهواره لندست-۸، پوشش سبز پارک‌های شهر اصفهان استخراج گردید. سنج‌های سیمای سرزمین با استفاده از نرم‌افزار فرگستس کمی گردید.

یافته‌ها: بر اساس نتایج این تحلیل، منطقه ۱۱ در شمال غرب شهر بالاترین میانگین غلظت ذرات PM_{2.5} به میزان ۶۲/۰۴۷ و انحراف معیار ۴/۰۹۱ (در بین ۱۵ منطقه شهری اصفهان) را نشان داد که گویای سطوح بالای آلودگی در این منطقه است. نتایج حاصل از بررسی همبستگی ($R_2 = ۰/۲۰۳$) بین غلظت سالانه ذرات معلق PM_{2.5} با وسعت پارک‌ها نشان داد که هرچه وسعت تجمعی پارک‌ها در یک ناحیه شهری بیشتر باشد، متوسط غلظت ذرات معلق آن به مراتب پایین‌تر خواهد بود. نتایج نشان داد که تنها وسعت هر پارک و شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی آن با غلظت ذرات معلق سالانه دارای همبستگی منفی و معنی‌دار به ترتیب به میزان $-۰/۵۷۲$ و $-۰/۷۴۸$ در سطح یک صدم ($p\text{-value} = ۰/۰۰$) است.

نتیجه‌گیری: می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ظرفیت فیلتراسیون طبیعی پوشش گیاهی پارک‌ها و فضاهای سبز بزرگتر به‌طور قابل توجهی به بهبود کیفیت هوا از طریق کاهش غلظت ذرات PM_{2.5} کمک می‌کند.

کلیدواژه‌ها: پارک‌های شهری، ذرات معلق، اصفهان، شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی

◀ **استناد:** معینی، ا. احمدی ندوشن م. اثر الگوی پارک‌های شهری بر توزیع مکانی PM_{2.5} در شهر اصفهان. فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. تابستان ۱۴۰۳؛ ۱۰(۲): ۴۸-۶۳.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

نوع مقاله: پژوهشی

مقدمه

شهرنشینی پدیده‌ای چندوجهی است که در دهه‌های اخیر رشد بی‌سابقه‌ای داشته و منجر به دگرگونی‌های چشم‌گیری در بافت اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی مناطق در سراسر جهان شده است. درحالی‌که شهرنشینی اغلب با پیشرفت و توسعه اقتصادی همراه است، گسترش بی‌رویه آن به دلیل انبوهی از اثرات نامطلوب بر محیط طبیعی و انسانی، نگرانی‌هایی را ایجاد کرده است (۱). با افزایش جمعیت شهری، تقاضا برای مسکن، حمل‌ونقل، تامین آب و سرویس بهداشتی افزایش می‌یابد و اغلب از ظرفیت دولت‌های محلی برای تامین منابع کافی پیشی می‌گیرد. این منجر به بارگذاری بیش از حد و ناکارآمدی سیستم‌های شهری می‌شود که منجر به افزایش ازدحام، آلودگی و به خطر افتادن سلامت عمومی می‌شود (۲). آلودگی شهری، محصول جانبی اجتناب‌ناپذیر از شهرنشینی و صنعتی‌شدن سریع و نشان‌دهنده‌ی یک چالش محیطی فراگیر و پیچیده با پیامدهای عمیق برای سلامت انسان و سیستم‌های اکولوژیکی است (۳). آلودگی هوا، پیامد فراگیر صنعتی‌شدن، شهرنشینی و فعالیت‌های انسانی است و به‌عنوان یک چالش محیطی مبرم با پیامدهای گسترده‌ای برای سلامت عمومی، اکوسیستم‌ها و سیستم آب‌وهوای جهانی شناخته می‌شود. یکی از اجزای اصلی آلودگی هوا، شامل ذرات ریز و ذرات معلق در هوا است. این ذرات میکروسکوپی که اغلب از فرآیندهای احتراق در وسایل نقلیه، نیروگاه‌ها و تاسیسات صنعتی ساطع می‌شوند، می‌توانند پس از استنشاق به اعماق سیستم تنفسی نفوذ کرده و منجر به طیفی از مشکلات سلامتی شوند (۴). بیماری‌های تنفسی و قلبی‌عروقی از جمله آسم، برونشیت، و حملات قلبی، با قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض سطوح بالای ذرات معلق مرتبط هستند. علاوه بر این، وجود ذرات بسیار ریز با اثرات شدیدتری بر سلامتی همراه است زیرا این ذرات می‌توانند وارد جریان خون شده و به اندام‌های حیاتی برسند (۵). ذرات معلق از منابع مختلفی مانند وسایل نقلیه، فرآیندهای صنعتی، فعالیت‌های ساختمانی و منابع طبیعی مانند آتش-سوزی، طوفان و گردوغبار منتشر می‌شوند (۶). استنشاق ذرات معلق یک راه اصلی اثرگذاری آن است، زیرا این ذرات میکروسکوپی می‌توانند به اعماق سیستم تنفسی نفوذ کنند

(۷). تاثیر ذرات معلق بر سیستم تنفسی بی‌شمار است و از تحریک و التهاب راه‌های هوایی گرفته تا پیامدهای سلامتی شدیدتر را در برمی‌گیرد. افراد مبتلا به بیماری‌های تنفسی زمینه‌ای مانند آسم و بیماری مزمن انسدادی ریه، به‌ویژه آسیب پذیر هستند، علائم آن‌ها بیشتر شده و افزایش دفعات تشدید تنفسی را تجربه می‌کنند (۸).

باید توجه داشت که کاهش اثرات بهداشتی ذرات معلق شهری نیازمند یک رویکرد جامع شامل اقدامات نظارتی، نوآوری‌های تکنولوژیکی و مداخلات بهداشت عمومی است. پیاده‌سازی و اجرای استانداردهای سخت‌گیرانه کیفیت هوا، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع خودروبی و صنعتی و ترویج استفاده از منابع انرژی پاک‌تر، استراتژی‌های اساسی هستند. طرح‌های برنامه‌ریزی شهری که فضاهای سبز و محیط‌های دوست‌دار عابران پیاده را در اولویت قرار می‌دهند نه تنها به بهبود کیفیت هوا بلکه به رفاه کلی ساکنان شهری کمک می‌کنند (۷). شهرنشینی به خودی خود نیز آلودگی‌های کاربری زمین را تغییر می‌دهد و منجر به تغییراتی در تعلیق مجدد گردوغبار، پراکندگی آلاینده‌ها و پویایی کلی منابع ذرات معلق می‌شود (۹). کاهش اثرات نامطلوب آلودگی شهری مستلزم یک رویکرد چند وجهی است که نوآوری‌های تکنولوژیکی، اقدامات نظارتی دقیق و مشارکت جامعه را در بر می‌گیرد. برنامه‌ریزی شهری پایدار، توسعه‌ی زیرساخت‌های سبز و ارتقای حمل‌ونقل عمومی، استراتژی‌های محوری برای مقابله با آلودگی هوا هستند. پارک‌های سبز شهری با انواع و کارکردهای گوناگون خود، نقشی حیاتی در افزایش زیست‌پذیری مناطق شهری دارند (۱۰). کریدورهای سبز و اکوسیستم‌های طبیعی در محیط‌های شهری نه تنها تعادل اکولوژیکی را تقویت می‌کند، بلکه انعطاف‌پذیری شهرها را در برابر عوامل استرس‌زای محیطی نیز افزایش می‌دهد (۱۱). به‌ویژه در زمینه ذرات معلق که خطرات بهداشتی قابل‌توجهی را به همراه دارد، نقش پارک‌های سبز شهری بسیار مهم است. درختان به‌عنوان موانع طبیعی عمل می‌کنند و ذرات معلق در هوا را روی سطوح خود می‌گیرند و به دام می‌اندازند (۱۲).

با مکان‌یابی استراتژیک پارک‌ها در مناطقی با سطوح بالای ترافیک وسایل نقلیه یا انتشار گازهای گلخانه‌ای صنعتی، برنامه‌ریزان شهری می‌توانند حائل‌های سبزی ایجاد کنند

که به عنوان فیلترهای طبیعی عمل می‌کنند و تاثیر آلاینده‌ها را بر مناطق مسکونی و تجاری مجاور رهگیری و کاهش می‌دهند (۱۳). اصفهان به عنوان یکی از مراکز اصلی شهری ایران، با سطوح فزاینده‌ای از آلودگی هوا مواجه است که عمدتاً ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای وسایل نقلیه، فعالیت‌های صنعتی و توسعه شهری است. در این منظر شهری پیچیده، بررسی سهم پارک‌های شهری در کاهش ذرات معلق برای مدیریت آگهانه محیط‌زیست و برنامه‌ریزی شهری پایدار مهم و ضروری است. بررسی نقش پارک‌های شهری در کاهش ذرات معلق از اهمیت بالایی برخوردار است، به‌ویژه در بافت شهر اصفهان، جایی که شهرنشینی رو به رشد و چالش‌های زیست‌محیطی همگرا هستند. اصفهان به عنوان یکی از مراکز اصلی شهری ایران، با سطوح فزاینده‌ای از آلودگی هوا مواجه است که عمدتاً ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای وسایل نقلیه، فعالیت‌های صنعتی و توسعه شهری است. در این منظر شهری پیچیده، بررسی سهم پارک‌های شهری در کاهش ذرات معلق به مسیری محوری برای مدیریت آگهانه محیط‌زیست و برنامه‌ریزی شهری پایدار مهم و ضروری است (۱۴). ضرورت بررسی نقش پارک‌های شهری در کاهش ذرات معلق در شهر اصفهان ریشه در ضرورت رسیدگی به چالش‌های مبرم آلودگی هوا در این محیط شهری دارد. یافته‌های چنین تحقیقاتی می‌تواند به سیاست‌های مبتنی بر شواهد و استراتژی‌های برنامه‌ریزی شهری کمک کند و به ایجاد محیط‌های شهری سالم‌تر، پایدارتر و انعطاف‌پذیر کمک کند. لذا هدف این مطالعه، ارزیابی اثر الگوی پارک‌های شهری بر توزیع مکانی ذرات معلق ۲/۵ در شهر اصفهان است.

روش کار

منطقه مورد مطالعه

اصفهان اولین شهر کشور از نظر توانمندی گردشگری، دومین شهر صنعتی و سومین مادر شهر کشور از نظر جمعیت به‌شمار می‌آید (آمارنامه شهرداری اصفهان، ۱۳۹۰). وسعت شهر اصفهان در حدود ۴۰۹۰ کیلومتر مربع می‌باشد که به پانزده منطقه شهری تقسیم شده است. از سطح عمومی دریاها حدود ۱۵۷۰ متر ارتفاع دارد و در بین طول‌های جغرافیایی ۴۲،۴۰" ۱۶' ۵۱° تا ۱،۶۰" ۵۴' ۵۱° شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۴۴،۵۷" ۴۸' ۳۲° تا

۵۰،۳۹" ۲۳' ۳۲° شمالی قرار گرفته است. آب‌وهوای اصفهان بر اساس روش طبقه‌بندی اقلیمی دومارتون، معتدل و خشک است و مقدار بارش باران و برف آن پایین‌تر از نسبت تبخیر و تعرق است که از مشخصه‌های بارز آن می‌توان به تابستان‌هایی گرم و خشک اشاره کرد. شبکه پارک‌های شهری و بوستان‌های اصفهان به بیش از ۳۰۰ ناحیه مجزا می‌رسد که حدود ۱۰ درصد از وسعت شهر اصفهان را به خود اختصاص داده است. در این بین، ۶۳ پارک به عنوان نواحی با پوشش سبز شهری برای استفاده عموم طراحی شده و تحت مدیریت شهرداری اصفهان قرار دارد. اغلب پارک‌های عمومی شهر اصفهان در پیرامون رودخانه‌ی زاینده‌رود و بخش قابل توجهی از آن به صورت پارک کوهستانی در دامنه‌ی کوه صفه در جنوب شهر قرار گرفته است. عمده پوشش گیاهی این پارک‌ها شامل چمن، بوته و درخت‌ها است. از نظر پوشش درختی، غالباً با درختان همیشه سبز غیربومی به‌خصوص کاج است. حداقل وسعت بوستان‌های اصفهان ۵/۰ هکتار و متعلق به بوستان سعدی و بوستان ملت در بخش‌های ۷ و ۱۱ شهرداری اصفهان و بوستان زاینده‌رود با قرارگیری در حاشیه‌ی رودخانه‌ی زاینده‌رود و با مساحت بیش از ۴۳ هکتار بزرگ‌ترین پارک شهر اصفهان است. پارک مشتاق، کودک و قلمستان نیز از جمله پارک‌های با وسعت بیش از ۱۰ هکتار شهر اصفهان هستند. به‌طور متوسط، وسعت پارک‌ها و بوستان‌های شهر اصفهان برابر با ۵/۵ هکتار است با انحراف استاندارد ۷/۱ است که گویای وجود توزیع بسیار ناهمگن فضاهای سبز در پیرامون این شهر است. شکل ۱ نقشه کاربری و پوشش اراضی شهر اصفهان و شکل ۲ موقعیت ایستگاه‌های پایش غلظت ذرات معلق در شهر اصفهان را نشان می‌دهد.

محاسبه‌ی پراکنش ذرات معلق ۲/۵

به‌دلیل توسعه‌ی سریع، افزایش جمعیت و حضور طیف مختلفی از صنایع مختلف در پیرامون شهر اصفهان، غلظت انواع آلاینده‌های این شهر در طول چند دهه‌ی گذشته رو به افزایش گذاشته است (۱۵). بر این اساس، پایش مستمر و روزانه آلاینده‌ها در این شهر به‌عنوان یکی از اولویت‌ها در دستور کار شهرداری شهر اصفهان و اداره‌ی محیط‌زیست این شهر قرار گرفته تا تغییرات و روند آلاینده‌ها به‌صورت مدام پایش شده و در صورت نیاز، اقدامات مدیریت و فوریتی صورت بگیرد. در زمان انجام این تحقیق، تعداد ۱۶ ایستگاه

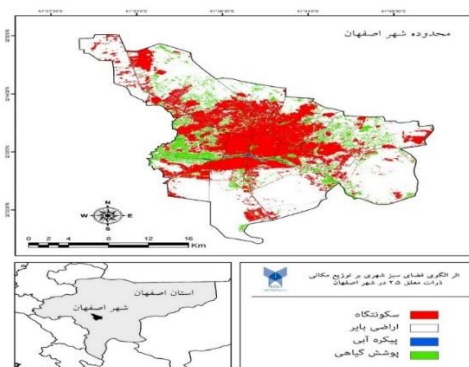
محاسبه شاخص‌های پوشش سبز در شهر اصفهان

فرض مورد استفاده در این مطالعه بر این امر استوار بود که غلظت ذرات معلق در نواحی با تراکم بالاتر پوشش سبز بیشتر است. با این حال، پوشش سبز محدوده اصفهان در دو طبقه‌ی مجزا قابل بررسی است. اولین پوشش سبز مورد بررسی، شبکه پارک‌های شهر اصفهان است که با مساحت بالغ بر ۳۴۶ هکتار به صورت متمرکز در هسته‌ی مرکزی شهر اصفهان قرار گرفته است. همچنین علاوه بر پوشش سبز پارک، بخش قابل توجهی از پوشش سبز این شهر در پیرامون نواحی سکونت‌گاهی به صورت باغات و اراضی کشاورزی حضور دارد. همچنین پوشش‌های سبزی مانند درختان حاشیه جاده‌ها علی‌رغم عدم طبقه‌بندی آن‌ها به عنوان پارک‌های شهری، نقش بارز در کاهش اثر آلاینده‌ها دارد (۱۷). از این رو علاوه بر شبکه‌ی پارک‌های شهر اصفهان، کل پوشش گیاهی شهر نیز به عنوان پارامتر اثرگذار بر کاهش غلظت ذرات معلق محاسبه و به عنوان عامل مستقل مورد بررسی قرار گرفت.

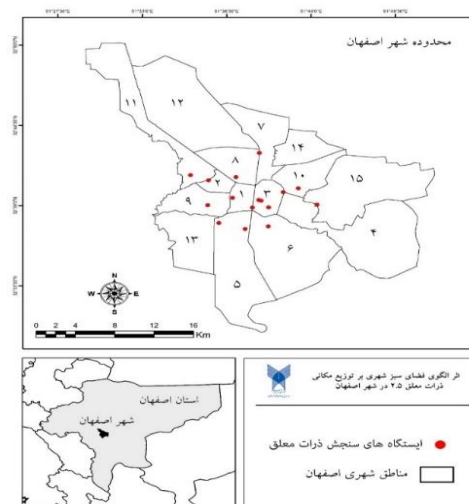
برای محاسبه و تولید نقشه کل پوشش گیاهی شهر اصفهان از پردازش تصاویر ماهواره‌ای بهره گرفته شد. برای این منظور، از تصاویر ماهواره لندست-۸ (۱۸) استفاده شد. این ماهواره در ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شد و به طور همزمان توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) و ناسا اداره می‌شود. این ماهواره به حس‌گرهای پیشرفته‌ای مجهز است که تصاویر چندطیفی و حرارتی را ثبت کرده و آن را به ابزاری ارزشمند برای طیف وسیعی از کاربردها، از جمله مطالعه پوشش گیاهی شهری تبدیل می‌کند. این ماهواره داده‌ها را در ۹ باند طیفی از جمله مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر با دوره‌ی بازگشت ۱۶ روز برداشت می‌کند (۱۹).

شاخص‌های پوشش گیاهی مشتق شده از داده‌های لندست-۸، مانند شاخص گیاهی تفاوت نرمال شده^۱ به طور گسترده برای ارزیابی سلامت و تراکم پوشش گیاهی شهری استفاده می‌شوند (۲۰). در این مطالعه نیز برای آگاهی از توزیع مکانی انواع پوشش‌ها به خصوص برای تفکیک پوشش سبز از سایر پوشش‌ها از این شاخص بهره گرفته شد. از آنجایی

پایش زمینی ذرات معلق در شهر اصفهان قرار دارد که وظیفه‌ی ثبت غلظت‌های روزانه را به عهده دارد. در این مطالعه، مقادیر روزانه‌ی برداشت شده در هر ایستگاه برای یک سال کامل از اول فروردین ۱۴۰۱ تا پایان اسفند این سال برای انجام مطالعه‌ی حاضر مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی اثر ساختاری شبکه پارک‌های شهر اصفهان بر تغییرات تجمعی غلظت ذرات معلق، از مقادیر متوسط سالانه آن به عنوان متغیر وابسته استفاده گردید. سپس از روش معکوس فاصله وزنی برای تولید لایه پیوسته از غلظت ذرات معلق استفاده شد. در این روش، فرض بر این است که غلظت ذرات معلق با افزایش فاصله از نقاط معلوم، بر اساس معکوس فاصله وزنی کاهش یا افزایش می‌یابد (۱۶).



شکل ۱. کاربری و پوشش اراضی شهر اصفهان در استان اصفهان



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های پایش غلظت ذرات معلق در شهر اصفهان

¹ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

در این مطالعه در ابتدا مقدار متوسط شاخص تفاضل نرمال- شده گیاهی برای هر پارک محاسبه گردید. سپس بر اساس پیمایش میدانی و تفسیر لایه‌ی تولیدشده، از عدد حد آستانه ۰/۲ استفاده شد تا پوشش سبز شهر اصفهان از سایر پوشش‌ها تفکیک گردد. در نهایت، نواحی تفکیک شده به- عنوان لایه "کل پوشش گیاهی" شهر مورد استفاده قرار گرفت.

بررسی اثر پوشش سبز بر غلظت ذرات معلق در مقیاس منطقه

در این بخش از مطالعه، متوسط سالانه غلظت ذرات معلق ۲/۵ برای هر منطقه از مناطق ۱۵ گانه شهر اصفهان با استفاده از دستور Zonal statistics در نرم افزار ArcMap ورژن ۱۵ محاسبه شد. سپس وسعت کل پوشش سبز و وسعت پارک‌های شهر اصفهان در هر منطقه محاسبه گردید. در نهایت از آزمون همبستگی برای شناسایی تفاوت اثر هر منطقه بر کاهش غلظت ذرات معلق استفاده شد.

محاسبه سنج‌های سیمای سرزمین

در بخش خصوصیات بر ۵ خصوصیت مهم از پارک‌های شهری تاکید شد که شامل موارد زیر هستند: وسعت پارک، متوسط شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی، شاخص پیچیدگی شکلی پارک و شاخص هسته‌ی مرکزی پارک.

وسعت پارک

رابطه بین اندازه‌ی پارک و غلظت ذرات معلق در آن امری پیچیده است که می‌تواند تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله طراحی پارک، نوع پوشش گیاهی و محیط شهری اطراف قرار داشته باشد. با این حال ممکن است پارک‌های بزرگ‌تر ظرفیت زیرساختی گسترده‌تری داشته باشند که می‌تواند کیفیت هوا را بهبود ببخشد (۲۱).

متوسط شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی

تراکم پوشش گیاهی تاثیر مثبت و مستقیمی بر کاهش غلظت ذرات معلق در مناطق شهری دارد. پوشش گیاهی، به‌ویژه درختان و گیاهان با شاخ و برگ متراکم، می‌توانند به‌عنوان فیلترهای طبیعی عمل کنند و ذرات معلق را روی سطوح خود به دام بیندازند (۲۲). برای بررسی این اثر،

که غلظت ذرات معلق برای کل سال به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد، تصویر لندست مورد استفاده نیز به- صورت یک تصویر ترکیبی با اعمال فیلتر میانگین بر روی تمامی تصاویر بدون ابری که در سال ۱۴۰۱ از شهر اصفهان برداشت شده است، تولید شد. برای این منظور در ابتدا، داده‌های لندست-۸ در سامانه گوگل ارث انجین فراخوانی شد. این امر با استفاده از ee.ImageCollection و عبارت 'LANDSAT/LC08/C01/T1-SR' قابل اجرا است که در آن عبارت LC08 به معنی انتخاب ماهواره‌ی هشتم لندست و عبارت T1-SR به معنی انتخاب سطح اول تصحیح (T1) که دارای بازتاب سطح زمین (SR) است. سپس از دستور filterDate استفاده شد تا تنها تصاویر برداشت شده در سال ۱۴۰۱ انتخاب شود. برای انتخاب تصویری که با منطقه مورد مطالعه هم‌پوشانی دارند نیز از کد filterBounds استفاده شد. به دلیل این که تصاویر طول موج مرئی و مادون قرمز نزدیک مانند تصاویر ماهواره لندست ۸ تحت تاثیر پوشش ابر قرار دارند، بنابراین از دستور filterMetadata استفاده شد، تصاویری با پوشش ابر بیش از ۱ درصد با استفاده از عبارت 'CLOUD_COVER', 'less_than', 1 حذف شدند.

پس از استخراج تصویر تولیدشده، تفاضل بین باند مادون- قرمز نزدیک (باند ۵) و باند قرمز (باند ۴) بر حاصل جمع این دو باند تقسیم گردید تا لایه‌ی شاخص تفاضل نرمال- شده گیاهی^۲ این ماهواره برای منطقه‌ی مورد مطالعه به- دست آمد (۷). مقادیر شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی بین دو محدوده‌ی +۱ تا -۱ قرار دارد که عدد صفر در آن به‌عنوان عدد حد مرزی شناخته می‌شود. چنانچه اعداد این شاخص در یک ناحیه کمتر از صفر باشد آن ناحیه نشان‌دهنده‌ی گستره‌ی آبی است و هر چه این مقدار به عدد -۱ نزدیکتر شود پهنه‌ی آبی شناسایی شده دارای آب‌های عمیق‌تری خواهد بود. در سوی دیگر چنانچه اعداد این شاخص به سمت عدد مثبت ۱ نزدیک‌تر شود نشان‌دهنده‌ی مناطق با تراکم زیست توده سبز بالاتری خواهد بود.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

مقدار متوسط شاخص تفاضل نرمال‌شده‌ی گیاهی هر پارک به‌عنوان عامل اثرگذار محاسبه گردید.

شاخص پیچیدگی شکلی پارک

شکل و طراحی یک پارک می‌تواند بر غلظت ذرات‌معلق در پارک تاثیرگذار باشد (۲۳). در این مطالعه، برای محاسبه پیچیدگی شکلی پارک‌ها از شاخص شکل در نرم‌افزار FRAGSTATS استفاده شد. این شاخص برای بررسی پیچیدگی شکل هندسی یک ناحیه مانند یک پارک مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن، مساحت و محیط منطقه در رابطه‌ی زیر قرار می‌گیرد. مقدار بزرگتر شاخص شکل نشان‌دهنده‌ی پیچیدگی بیشتر شکل ناحیه است. به‌عبارت دیگر، لکه با شاخص شکل بزرگتر معمولاً شکل نامتعادل و نامتقارن دارد.

$$\text{Shape Index} = (4\pi * \text{Area}) / (\text{Perimeter}^2)$$

– Shape Index شاخص شکل

– Area مساحت منطقه مورد بررسی

– Perimeter محیط منطقه مورد بررسی و

– π نماد پی است که تقریباً برابر با ۳/۱۴۱۵۹ است.

شاخص هسته مرکزی پارک

شاخص هسته مرکزی نشان‌دهنده‌ی بخشی از یک پارک است که به‌وسیله منطقه حاشیه‌ای از نواحی بیرونی حفاظت می‌شود. درصد مساحت هسته در یک پارک می‌تواند نقش مهمی در تعیین غلظت ذرات‌معلق آن داشته باشد زیرا در این نواحی اثر عواملی مانند تراکم پوشش گیاهی و وجود موانع انسداد الگوهای جریان هوا بیشتر است. برای محاسبه شاخص منطقه هسته، ابتدا مساحت ناحیه هسته را با جمع کردن مساحت همه ناحیه‌های طبقه‌بندی شده به‌عنوان مناطق هسته در منظره تعیین می‌شود. سپس این مقدار را بر مساحت کل منظره تقسیم شده و درنهایت، نسبت به دست‌آمده را در ۱۰۰ ضرب خواهد شد تا شاخص به‌صورت درصدی بیان شود. نحوه‌ی محاسبه‌ی این شاخص به‌صورت زیر است:

$$\text{CAI} = (\text{Acore} / \text{Atotal}) \times 100$$

CAI شاخص هسته‌ی مرکزی

Acore مساحت کل مناطق هسته در لکه و

Atotal مساحت کل لکه است.

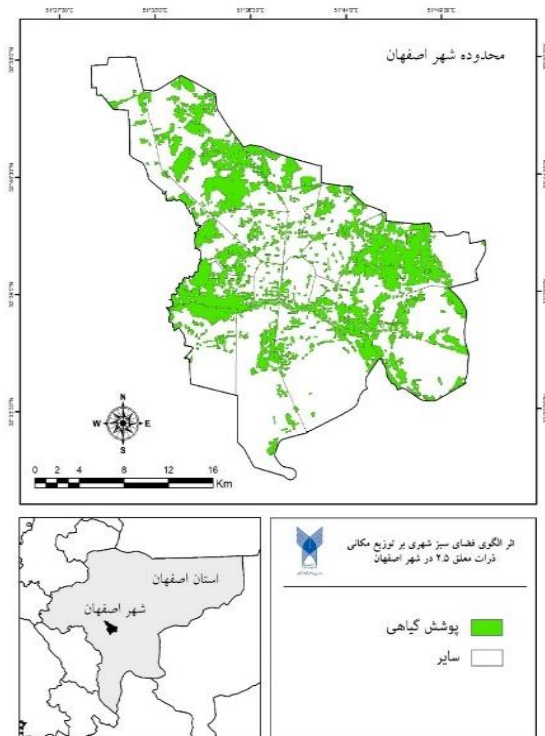
مقدار بالاتر این شاخص نشان‌دهنده‌ی وجود مناطق هسته بزرگتر و بیشتر در پارک مورد مطالعه است. از طرف دیگر، مقدار پایین این شاخص به وجود مناطق هسته کوچکتر یا پراکنده‌تر در لکه اشاره دارد که بیشتر در پارک‌های طولی دیده شده و ممکن است تاثیراتی روی حفظ و عملکرد اکولوژیکی سیمای سرزمینی مانند پارک داشته باشد.

برای بررسی ارتباط بین هر شاخص با متوسط غلظت ذرات‌معلق در هر پارک در ابتدا از آزمون آماری کولموگروف اسمیرنوف (۲۴) استفاده شد تا توزیع نرمال داده‌ها مشخص گردد. چنانچه مقادیر به‌دست‌آمده از توزیع نرمال پیروی کرد، از آزمون همبستگی پیرسون و چنانچه فاقد توزیع نرمال بودند از آزمون همبستگی اسپیرمن برای بررسی روابط استفاده می‌شود. برای تفسیر این نتایج نیز به دو پارامتر قدرت و معنی‌داری ارتباط در دو سطح ۰/۰۱ و ۰/۰۵ توجه گردید.

یافته‌ها

پوشش گیاهی شهر اصفهان

لایه پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده حاصل از پردازش تصویر ماهواره لندست برای شهر اصفهان در شکل ۳ نشان داده شده است. این لایه طیف بزرگی از اعداد شامل اعداد منفی تا مثبت را دربرگرفته است که نشان‌دهنده‌ی وجود طیف گسترده‌ای از انواع کاربری و پوشش اراضی در منطقه می‌مورد مطالعه است. اعداد منفی در مرکز شهر اصفهان مربوط به وجود آب در بستر رودخانه‌ی زاینده‌رود است. عمده‌ترین پوشش گیاهی موجود در محدوده‌ی شهر اصفهان را می‌توان در اطراف نواحی سکونت‌گاهی مرکز شهر به‌صورت اراضی کشاورزی حاشیه‌ای مشاهده کرد که تشکیل محدوده‌های سبز رنگ بزرگ و متمایز را داده‌اند؛ حال آن‌که در نواحی مرکزی شهر اصفهان، به‌جز حاشیه‌ی رودخانه‌ی زاینده‌رود و پارک‌های شهری بزرگ عمدتاً از سطوح نفوذناپذیر تشکیل شده است، مقدار شاخص تفاضل نرمال‌شده گیاهی آن نزدیک به صفر است. به‌دلیل وجود اراضی بایر در محدوده‌ی شهر و اراضی سکونت‌گاهی، بخش قابل‌توجهی از وسعت مورد مطالعه را می‌توان در طبقه‌ی بدون پوشش گیاهی قرار داد. شکل ۴ وسعت کل پوشش مستخرج از شاخص تفاضل نرمال‌شده گیاهی در شهر اصفهان را نشان می‌دهد.

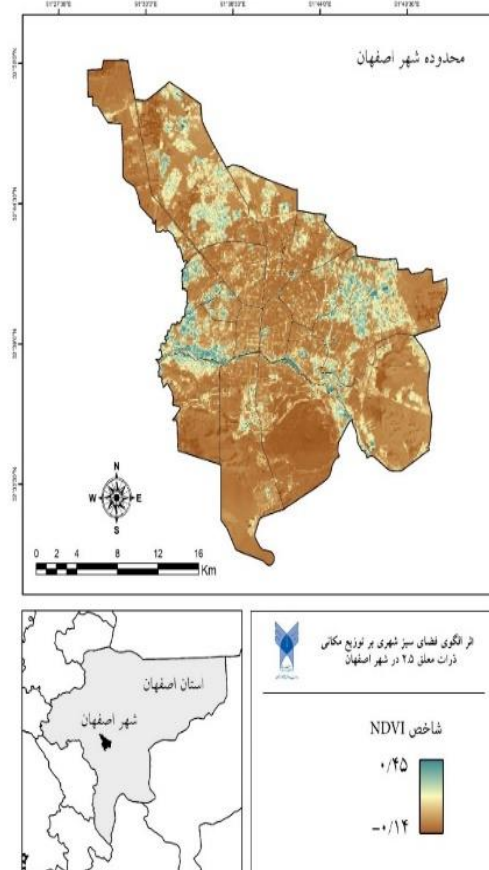


شکل ۴. وسعت کل پوشش مستخرج از شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی در شهر اصفهان

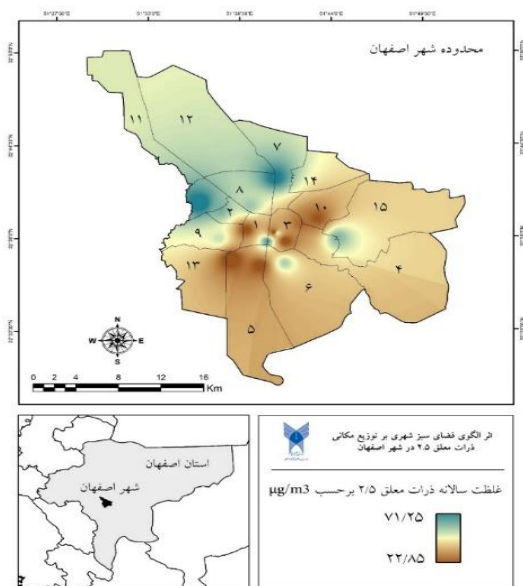
پراکندگی غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ در شهر اصفهان
تجزیه و تحلیل غلظت ذرات معلق در مناطق مختلف شهر، درک دقیقی از تفاوت‌های کیفیت هوا در منطقه‌های مختلف شهر اصفهان ارائه کرد. نتایج حاصل از میانبایی غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ در شکل ۵ نشان داده شده است. به‌طور کلی، بالاترین غلظت ذرات معلق در مناطق شمال-غربی شهر قرار دارد (حداکثر $71/25$ میکروگرم بر مترمکعب) که با حرکت به سمت جنوب شرقی شهر اصفهان به تدریج از غلظت آن کاسته و به مقدار حداقل $22/85$ میکروگرم بر مترمکعب رسیده است. در مرکز شهر اصفهان نیز تفاوت‌های بسیاری در متوسط غلظت ذرات معلق مشاهده می‌شود که احتمالاً به دلیل وجود منابع متعدد تولید این آلاینده با شدت انتشارهای مختلف است.

بر اساس نتایج حاصل از میانبایی، منطقه ۱۱ را می‌توان به‌عنوان یک کانون نگران‌کننده از غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ در نظر گرفت (جدول ۱). این منطقه بالاترین میانگین غلظت ذرات معلق (بیش از 62 میکروگرم بر مترمکعب) در بین ۱۵ منطقه شهری اصفهان را داشته که نشان‌دهنده

از آن جایی که پارک‌های شهر اصفهان عمدتاً توسط پوشش گیاهی متنوع طراحی و توسعه داده شده‌اند، تراکم پوشش گیاهی پارک‌های مورد مطالعه بسیار بالا و متوسط شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی آن عمدتاً در محدوده‌ی بین $0/3$ تا $0/5$ قرار گرفته است. کم‌ترین مقدار تراکم پوشش گیاهی در پارک بهارستان با شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی برابر با $0/22$ و بیشترین مقدار آن در باغ گل‌های شهر اصفهان با شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی نزدیک به $0/6$ به‌دست آمد که نشان از نقش مستقیم تراکم پوشش گیاهی در تغییرات شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی است. مقادیر انحراف استاندارد این شاخص در سراسر پارک‌ها تقریباً در محدوده‌ی $0/1$ قرار دارد که نشان از الگوی مشخص و ثابت در توزیع پوشش سبز در همه‌ی پارک‌های شهری مورد مطالعه است.



شکل ۳. نقشه پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده تولید شده با استفاده از تصاویر ماهواره لندست برای شهر اصفهان



شکل ۵. غلظت سالانه ذرات معلق ۲/۵ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) حاصل از میان‌یابی به روش معکوس فاصله وزنی

سطوح بالای آلودگی مداوم در این منطقه است. علاوه بر این، منطقه ۱۱ طیف وسیعی از غلظت ذرات معلق ۲/۵ را نشان می‌دهد که محدوده‌ای از ۵۴/۱۷ تا ۷۱/۲۵ میکروگرم بر مترمکعب را در برمی‌گیرد. مناطق ۷ و ۸ نیز با میانگین غلظت‌های قابل توجه، به ترتیب برابر با ۵۳/۳۸ و ۵۴/۲۹ میکروگرم بر کیلوگرم، همراه با مقادیر بالای حداکثر غلظت شناخته شدند. در مقابل، مناطق ۵ و ۱۰ به دلیل میانگین غلظت نسبتاً کمتر (به ترتیب ۳۶/۵۶ و ۳۷/۵۶ میکروگرم بر مترمکعب) و انحراف استانداردهای کمتر، حاکمی از شرایط هوای پایدارتر و پاک‌تر در این مناطق است. منطقه‌ی ۱۰، با انحراف استاندارد پایین (۳/۹۱) میکروگرم بر مترمکعب) نیز ثبات سطح کیفیت هوا را نشان می‌دهد. این نتایج نشان‌دهنده‌ی وجود تغییرپذیری بالای آلاینده‌های در مناطق مختلف شهر و احتمال وجود منابع فراوان و عوامل متعدد در پراکندگی آلاینده‌ها در شهر اصفهان است. جدول ۲ وسعت پارک‌های شهری در مناطق ۱۵ گانه‌ی شهر اصفهان را نشان می‌دهد.

جدول ۲. وسعت پارک‌های شهری در مناطق مختلف شهر اصفهان

بخش شهری	وسعت پارک شهری به هکتار
۱	۳۷/۱۷
۲	۹۶/۵
۳	۸۸/۲۲
۴	۷۵/۸۱
۵	۴۲/۵۰
۶	۷۷/۴۳
۷	۵۳/۶
۸	۲۸/۲۴
۹	۵۱/۱
۱۰	۸۰/۲۳
۱۱	۰۶/۴
۱۲	۴۰/۲۸
۱۳	۲۰/۱۷
۱۴	۵۲/۱۹
۱۵	۵۹/۷

غلظت سالانه ذرات معلق ۲/۵ در هر ناحیه شهری با وسعت پارک‌های شهری در آن ناحیه وجود دارد ($R^2 = ۰/۲۰۳$) به این صورت که هرچه وسعت تجمعی پارک‌ها در یک

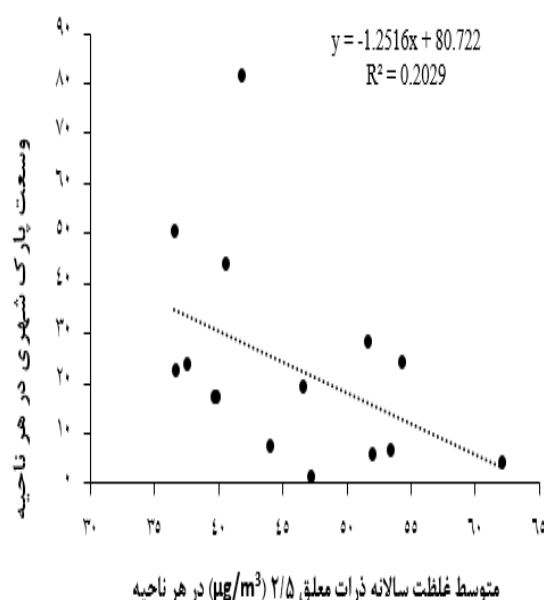
جدول ۱. آمار توصیفی غلظت ذرات معلق ۲/۵

($\mu\text{g}/\text{m}^3$) در مناطق ۱۵ گانه‌ی شهر اصفهان در سال ۱۴۰۱

منطقه شهر	آمار توصیفی غلظت ذرات معلق ۲/۵		
	حداقل	متوسط	حداکثر
۱	۴۰۴/۲۶	۶۸۶/۳۹	۴۰۶/۶
۲	۸۹۶/۳۳	۹۶۷/۵۱	۴۲۲/۳
۳	۰۷۲/۲۵	۶۷۷/۳۶	۱۴۱/۵
۴	۶۸۷/۳۰	۸۲۷/۴۱	۶۳۳/۲
۵	۸۵۹/۲۲	۵۶۳/۳۶	۳۳۲/۳
۶	۶۱۵/۲۸	۵۴۶/۴۰	۷۰۳/۲
۷	۶۵۹/۳۹	۲۸۴/۵۳	۰۱۳/۵
۸	۵۳۴/۴۱	۲۹۳/۵۴	۰۵۷/۴
۹	۶۰۴/۲۸	۱۷۶/۴۷	۶۹۱/۵
۱۰	۷۵۷/۲۷	۵۵۶/۳۷	۹۱۱/۳
۱۱	۱۷۰/۵۴	۰۴۷/۶۲	۰۹۱/۴
۱۲	۰۷۶/۴۹	۶۲۵/۵۱	۱۱۴/۲
۱۳	۶۴۴/۲۵	۸۳۳/۳۹	۴۰۶/۳
۱۴	۴۹۳/۴۱	۵۵۹/۴۶	۲۹۶/۳
۱۵	۶۳۴/۳۴	۹۳۳/۵۷	۷۹۵/۲

رابطه‌ی بین وسعت پارک‌های شهری با متوسط غلظت ذرات معلق در هر یک از مناطق شهری مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۶). یک رابطه‌ی خطی کاهشی بین متوسط

ناحیه شهری بیشتر باشد، متوسط غلظت ذرات معلق آن به- مراتب پایین تر خواهد بود (شیب منفی معادله خط برابر با ۱/۲۵-). این نتایج نشان می دهد که استراتژی های کاهش غلظت سالانه ذرات معلق در محدوده ی شهر اصفهان پارامتری از وسعت پارک هایی است که در درون شهر طراحی و مستقر شده است.



شکل ۶. ارتباط بین غلظت سالانه ذرات معلق ۲/۵ (µg/m³) با وسعت پارک های شهر اصفهان

نمودار پراکندگی توزیع متوسط غلظت سالانه ذرات معلق ۲/۵ در هر پارک با شاخص های مکانی آن شامل متوسط وسعت هر پارک، تراکم پوشش گیاهی، شاخص پیچیدگی

شکلی^۳، شاخص هسته ی مرکزی و متوسط، فاصله بین هر پارک با سایر پارک ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد هرچه وسعت یک پارک شهری بیشتر باشد، روند تغییر متوسط غلظت ذرات معلق پیش بینی شده با استفاده از روش میان یابی نیز در آن پارک نزولی خواهد بود. با افزایش تراکم پوشش گیاهی در هر پارک، متوسط غلظت ذرات معلق ۲/۵ آن پارک کاهش یافته است. به عبارت دیگر، غلظت ذرات معلق دارای رابطه معکوس با وسعت و شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی است. با این حال در مورد سایر شاخص ها، روند معنی داری مشاهده نگردید. نمودار پراکندگی داده های شاخص پیچیدگی شکلی، هسته ی مرکزی و متوسط فاصله پارک ها از یکدیگر در برابر متوسط غلظت سالانه ذرات معلق ۲/۵ عموماً ثابت و هم سو با خط افقی است که نشان دهنده ی عدم اثرگذاری آن ها بر تغییرات غلظت ذرات معلق است. نتایج حاصل از آزمون همبستگی نیز نشان داد که روند کاهشی مشاهده شده بین وسعت هر پارک و شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی با غلظت ذرات معلق سالانه دارای همبستگی منفی و معنی دار در سطح یک صدم ($p\text{-value} = 0/00$) است حال آن که هیچ رابطه آماری معنی داری در ارتباط بین سایر شاخص ها با متوسط غلظت سالانه ذرات معلق مشاهده نشد (جدول ۳). به طور کلی می توان بیان کرد که غلظت ذرات معلق پراکنده در هر پارک معیاری از وسعت و تراکم پوشش گیاهی آن است و ارتباطی با الگوهای استقرار مکانی آن مانند پیچیدگی شکلی و فاصله پارچه از یکدیگر ندارد.

جدول ۳. نتایج آزمون نرمالیت و همبستگی بین غلظت ذرات معلق ۲/۵ (µg/m³) و شاخص های مکانی

پارامتر	آماره	کولموگروف-اسمیرنوف			همبستگی با ذرات معلق	
		درجه آزادی	معنی داری	ضریب	معنی داری	
وسعت (هکتار)	۰/۲۳۶	۶۳	۰/۰۰۰	-۰/۵۷۲	۰/۰۰	
شاخص پیچیدگی شکلی (SHI)	۰/۱۸۰	۶۳	۰/۰۰۰	-۰/۰۷۵	۰/۵۵۷	
شاخص هسته مرکزی (CAI)	۰/۰۹۰	۶۳	۰/۲۰۰	-۰/۰۹۹	۰/۴۳۸	
شاخص متوسط فاصله پارک ها	۰/۱۰۴	۶۳	۰/۰۰۰	-۰/۲۴۴	۰/۰۵۴	
شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی (NDVI)	۰/۱۷۸	۶۳	۰/۰۰۰	-۰/۷۴۸	۰/۰۰۰	

متوسط غلظت ذرات معلق در مناطق شمال غربی شهر مشاهده شده است که حداکثر غلظت ثبت شده آن به ۷۱/۲۵ میکروگرم بر مترمکعب رسیده است. بر اساس دستورالعمل سازمان جهانی بهداشت، میانگین مجاز سالانه

بحث

غلظت ذرات معلق در شهر اصفهان

کیفیت هوای سالانه شهر اصفهان تغییرات بارزی در متوسط غلظت ذرات معلق از خود نشان داد. بیشترین میزان

³ Shape complexity index (SHI)

هوا و کاهش تاثیر آلاینده‌ها بر سلامت عمومی و محیط- زیست در اصفهان ضروری است. علی‌رغم این یافته، اثر دیگر منابعی که در تولید و انتشار ذرات معلق نقش داشته و عموماً در بیرون از مرزهای شهر اصفهان دارند نیز نیازمند توجه است. یکی از مهم‌ترین این منابع، کانون گردوغبار دشت سگری در شرق شهر اصفهان است که در زمان فعالیت، بخش‌هایی از شرق شهر اصفهان را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. از این‌رو، سطوح پایین گردوغبار در شرق شهر اصفهان معیاری از پایداری همیشگی آن نبوده و در شرایطی که بادهای غالب از شرق به غرب شدت می‌گیرند، ممکن است قسمت‌های شرقی شهر اصفهان نیز به شدت تحت تاثیر قرار بگیرد.

مقایسه پوشش سبز و توزیع پارک‌ها در توزیع ذرات معلق

در این مطالعه، ارتباط قابل توجهی بین میانگین غلظت ذرات با مجموع مساحت پارک‌های شهری در هر منطقه شهری به‌دست آمد. تراکم پوشش گیاهی بالاتر توانایی پارک‌ها را برای فیلترکردن و جذب آلاینده‌ها مانند ذرات معلق افزایش می‌دهد و در نتیجه بر همبستگی مشاهده‌شده تاثیر می‌گذارد.

هم‌سو با این نتیجه، مطالعه بارویس و همکاران (۲۶) و اوتوسون و همکاران (۲۷) نیز نشان دادند که توانایی یک پارک در کاهش غلظت ذرات معلق به‌میزان زیادی به تراکم و تنوع پوشش گیاهی آن وابسته است. با این‌حال باید توجه داشت که طراحی و چیدمان پارک‌های شهری نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در این بین دارند. چنانچه دینر و همکاران (۲۸) نشان داد، یک پارک خوب طراحی شده با مکان استراتژیک پوشش گیاهی، مسیرهای پیاده‌روی و مناطق تفریحی می‌تواند الگوهای باد خاصی ایجاد کند که پراکندگی آلاینده‌ها را افزایش داده و تصفیه‌ی هوا را ارتقا می‌دهد. این جنبه از طراحی در نهایت ممکن است به همبستگی قوی‌تر پوشش گیاهی و غلظت ذرات معلق در مناطق شهری کمک کند.

علاوه بر پراکنش پوشش گیاهی، نزدیکی پارک‌های شهری به منابع بالقوه‌ی آلودگی، مانند جاده‌ها و مناطق صنعتی نیز می‌تواند بر کیفیت هوای داخل پارک‌ها اثرگذار باشد. به‌عنوان مثال، اگر پارک‌ها در نزدیکی مناطق پرتراфик واقع شوند و از وسعت و تراکم گیاهی خوبی برخوردار باشند،

ذرات معلق برابر با ۱۰ میکروگرم بر مترمکعب که نتایج به- دست آمده چندین برابر این مقدار را نشان می‌دهد. از آن‌جا که شهر اصفهان فاقد پستی بلندی محسوسی در مرزهای خود است، از این‌رو توپوگرافی شهر نمی‌تواند اثر معنی‌داری بر پراکندگی و تجمع آلاینده‌ها داشته باشد. با این‌حال، به- نظر می‌رسد الگوهای باد محلی نقش مهمی در انتقال و پراکندگی آلاینده‌های هوا به‌خصوص ذرات معلق در شهر اصفهان داشته باشد به این صورت که وجود بادهای غالب شمالی، آلاینده‌ها را از منابع مشخص به سمت مناطق شمال‌غربی منتقل کرده و منجر به غلظت‌های بالاتر ذرات معلق در آن منطقه شده است. از سوی دیگر، وجود مناطق صنعتی، ازدحام ترافیک و انتشار گازهای گلخانه‌ای از وسایل نقلیه می‌تواند به‌میزان قابل‌توجهی به افزایش غلظت ذرات کمک کند و تفاوت در توزیع این منابع در سراسر شهر درنهایت می‌تواند به تفاوت‌های مکانی در غلظت ذرات منجر شود (۲۵). به‌نظر می‌رسد که وجود مناطق صنعتی در شمال شهر اصفهان و ترافیک بیشتر خودروهای سبک و سنگین در این منطقه از شهر (به- خصوص منطقه‌ی صنعتی امیرکبیر) عامل مهم دیگری از افزایش غلظت ذرات معلق در شمال شهر اصفهان باشد.

به تفکیک مناطق شهری، منطقه‌ی ۱۱ را می‌توان به‌عنوان یک کانون نگران‌کننده برای غلظت ذرات معلق گرفت. این منطقه بالاترین میانگین غلظت ذرات معلق را با بیش از ۶۲ میکروگرم بر مترمکعب در بین ۱۵ پهنه‌ی شهری اصفهان دارد.

این نشان دهنده‌ی افزایش مداوم سطوح آلودگی در این منطقه است که عمده‌ترین فعالیت‌های صنعتی در محدوده- ی شهر اصفهان در این مناطق صورت می‌گیرد.

علاوه بر این منطقه‌ی ۱۱ با قرارگیری در مجاورت این منطقه نیز طیف گسترده‌ای از غلظت ذرات معلق را از خود نشان داد. برخلاف این مناطق نواحی جنوبی شهر میانگین و انحراف استاندارد غلظت نسبتاً پایین‌تری را نشان دادند که گویای شرایط هوای پایدارتر و تمیزتر در این مناطق است.

در مجموع این نتایج نشان از تنوع بالای آلاینده‌ها در مناطق مختلف شهر و احتمال وجود منابع و عوامل متعدد در پراکندگی آلاینده‌ها در اصفهان است و شناسایی و رسیدگی به این منابع برای استراتژی‌های مدیریت کیفیت

اثر کاهش غلظت ذرات معلق در آن ناحیه از شهر نیز بیشتر خواهد بود. علاوه بر این، ریزاقلیم ایجاد شده در هر منطقه‌ی شهری به‌وسیله‌ی پارک‌های آن، موجب بروز تغییرات در دما، رطوبت و الگوهای باد آن ناحیه می‌شود و در نهایت بر رفتار و پراکندگی آلاینده‌ها تاثیر می‌گذارد.

ارتباط شاخص‌های مکانی با غلظت ذرات معلق در هر پارک

نتایج سنجش‌های سیمای سرزمین پارک‌های شهری در اصفهان، اطلاعات مفیدی در مورد ساختار، پیکربندی‌های فضایی و ویژگی‌های مرکزی آن‌ها نشان داد. شاخص پیچیدگی محدوده عددی بزرگی را نشان داد که نشان از تنوع ساختاری پارک‌ها است. نتایج شاخص هسته‌ی مرکزی نیز نشان‌دهنده نسبت مناسب مناطق مرکزی و حاشیه‌ی پارک‌های شهر اصفهان است که به بهبود فرآیندهای اکولوژیکی و اکوسیستمی مانند افزایش کیفیت زیستگاه پرندگان و کاهش سطوح برخی از آلاینده‌ها مانند آلودگی صوتی (۲۹) منجر شده است.

تجزیه و تحلیل میانگین فواصل بین پارک‌ها بیشتر بر توزیع فضایی و دسترسی به فضاهای سبز اشاره دارد که بر اساس آن، شهر اصفهان دارای الگوی نسبتاً پراکنده از چیدمان پارک‌ها در سطح شهر است که بر اساس نتایج مطالعاتی از قبیل اورتی و همکاران (۳۰) و هالکسی و همکاران (۳۱)، ممکن است اتصالات اکولوژیکی ضعیفی بین پوشش سبز مناطق مختلف شهر ایجاد کند. این امر همچنین تعادل بین دسترسی برای ساکنان و توزیع یکنواخت در سراسر چشم انداز شهری را با مشکل مواجه می‌کند. از این رو، توزیع یکنواخت پارک‌های شهری در فواصل نزدیک به هم می‌تواند به عنوان یک رویکرد مهم در طراحی و برنامه‌ریزی اراضی شهر اصفهان در دستور کار قرار گیرد.

نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش وسعت پارک در هر ناحیه شهری، صرف‌نظر از پیچیدگی شکلی، موقعیت آن در سطح شهر و درصد هسته مرکزی آن، از غلظت ذرات معلق در پارک کاسته خواهد شد. از این رو است که گسترش پارک‌های شهری به عنوان یک رویکرد استراتژیک در برنامه‌ریزی شهری معاصر برای حل چالش‌های مرتبط با کیفیت هوا، به‌ویژه سطوح ذرات معلق در دستور کار قرار گرفته است. هم‌سو با نتایج این تحقیق نیز، مطالعات

مختلفی مانند سو و همکاران (۳۲)، آهن و همکاران (۳۳) و والدرو و همکاران (۱۸) نشان دادند که ارتباط قابل توجهی بین افزایش مساحت پارک‌های شهری و کاهش متعاقب آن در سطوح ذرات معلق در محیط شهری اطراف وجود دارد. مکانیسم مختلفی موجب حصول همبستگی بالا بین افزایش مساحت پارک و کاهش سطوح ذرات معلق چند می‌شود. به‌طور کلی، پارک‌های وسیع‌تر به ارتقای گردش و پراکندگی طبیعی هوا کمک کرده و در نهایت امکان رقیق شدن و پراکندگی آلاینده‌ها را فراهم می‌آورند.

در حالی که همبستگی بین افزایش مساحت پارک و کاهش سطوح ذرات معلق به‌خوبی در این مطالعات و سایر مطالعات پیشین ثابت شده است، اجرای موفقیت‌آمیز آن، مستلزم بررسی دقیق عوامل مختلف است که شامل انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب، طراحی پارک‌ها به‌صورتی که گردش هوای مطلوب را تسهیل کند و مکان‌یابی استراتژیک پارک‌ها نسبت به منابع آلودگی شهری است (۳۴). به‌طور خاص، نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش شاخص تفاوت نرمال شده گیاهی در پارک‌های شهری (صرف‌نظر از شکل، موقعیت و ساختار آن‌ها) به‌عنوان یک رویکرد مؤثر می‌تواند برای کاهش اثرات نامطلوب آلودگی هوا، به‌ویژه در مورد ذرات معلق مورد استفاده قرار بگیرد. باید توجه داشت که شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی که از تصاویر ماهواره‌ای مشتق می‌شود تراکم و سلامت پوشش گیاهی را نشان می‌دهد و شاخصی قوی از سرسبزی و پویایی اکولوژیکی پارک شهری است. یافته‌های این تحقیق هم‌سو با نتایج تعداد بسیاری از مطالعاتی است که به بررسی اثر کاهنده‌ی پوشش گیاهی بر ذرات معلق هوا پرداخته‌اند که خروجی آن‌ها، بارز ساختن ارتباط بین اکولوژی شهری، بهداشت محیط و برنامه‌ریزی شهری است و اساس این یافته ریشه در فرآیندهای فیزیولوژیکی پیچیده گیاهان دارد (۳۵، ۳۶). پوشش گیاهی، از طریق فتوسنتز، به‌طور فعال دی‌اکسیدکربن اتمسفر را جذب کرده و در عین حال اکسیژن آزاد می‌کند. به‌طور همزمان، ویژگی‌های سطحی برگ‌ها و ساختارهای گیاهی ذرات معلق را از هوا جذب و به دام می‌اندازند. این عمل دوگانه‌ی پوشش گیاهی در نهایت منجر به بهبود قابل اندازه‌گیری در کیفیت خواهد شد (۱۲). نتایج مطالعه قلمکاری و احمدی ندوشن (۳۷) در شهر اصفهان نیز نشان داد که همبستگی منفی و معنی‌داری بین

سبز بزرگ‌تر به‌طور قابل‌توجهی به بهبود کیفیت هوا کمک می‌کند. ادغام این رویکرد در چارچوب‌های برنامه‌ریزی شهری نه تنها می‌تواند اثرات بهداشتی آلودگی هوا را کاهش دهد، بلکه مناظر شهری انعطاف‌پذیر، پایدار و زیبایی‌شناختی را نیز در اختیار شهروندان اصفهان قرار خواهد داد. با توجه به موارد مطرح‌شده و مزایای فضای سبز در کاهش میزان ذرات معلق و با توجه به این که مشکل ذرات معلق در اصفهان حاد است، به مدیران و برنامه‌ریزان شهری پیشنهاد می‌شود نسبت به کاشت گونه‌های مقاوم و با نیاز آبی کم مانند داغداغان، زیتون تلخ و زرشک قرمز در کنار گونه‌های گیاهی غالب شهر اصفهان مانند توت، کاج و چنار در پارک‌ها و فضای سبز شهری اقدام نمایند.

تشکر و قدردانی: بدین وسیله از تمامی کسانی که در انجام این پژوهش ما را یاری کرده اند به ویژه اداره کل حفاظت محیط زیست به دلیل در اختیار قرار دادن داده، تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع: نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تاثیر بگذارد را رد می‌کنند.

حمایت مالی: این مقاله منتج از پایان نامه کارشناسی ارشد است و برای این پژوهش هیچگونه حمایت مالی از طرف هیچ نهادی دریافت نشده است.

ملاحظات اخلاقی: تمامی اصول اخلاقی در این مقاله در نظر گرفته شده است و نویسندگان در جریان هدف پژوهش و مراحل اجرای آن قرار گرفته‌اند. مقاله مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد با کد ۱۷۵۷۲۹۸۱۲۹۰۸۱۳۰۷۸۱۰۲۰۱۶۲۷۳۷۸۳۰ است.

References

- 1- Feng B, Zhang Y, Bourke R. Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models. Nat Hazards (Dordr) 2021; 106 (1):613-27. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04480-0>
- 2- Pandey B, Brelsford C, Seto KC. Infrastructure inequality is a characteristic of urbanization. Proc Natl Acad Sci USA 2022; 119 (15):e2119890119.

PM_{2.5} و NDVI مشاهده شد، بدین معنی که با افزایش تراکم پوشش گیاهی، میزان ذرات معلق کاهش یافته است. علاوه بر این، افزایش تراکم پوشش گیاهی در پارک‌های شهری به ایجاد ریزاقلیم سالم‌تر کمک می‌کند؛ به این صورت که فرآیند تعرق، که در آن گیاهان بخار آب را در هوا آزاد می‌کنند، منجر به خنک‌شدن موضعی و افزایش رطوبت می‌شود. این تغییرات ریزاقلیمی، ثبات جوی را افزایش داده و غلظت و پراکندگی ذرات معلق را کاهش می‌دهد (۳۸). با این حال باید توجه داشت که اثربخشی کامل این عوامل شامل انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب، بهینه‌سازی تراکم پوشش گیاهی و در نظر گرفتن چیدمان جغرافیایی پارک‌ها در ارتباط با الگوهای رایج باد و منابع آلودگی خواهد بود. به عبارت دیگر، قرارگیری استراتژیک فضاهای سبز در داخل ماتریس های شهری می‌تواند قابلیت‌های پراکندگی و جذب پوشش گیاهی را افزایش داده و تاثیر مثبت بر کیفیت هوا را بیشتر کند.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، می‌توان بیان کرد شهرنشینی و صنعتی‌شدن منجر به افزایش غلظت آلاینده‌های هوا از جمله ذرات معلق در بسیاری از مناطق شهری در سراسر جهان شده است. از این رو، برنامه‌ریزان شهری و سیاست‌گذاران محیط‌زیست با شناخت اثرات نامطلوب بهداشتی مرتبط با قرارگرفتن طولانی‌مدت در معرض سطوح بالای ذرات معلق، به دنبال راه‌حل‌های نوآورانه‌ای برای کاهش آلودگی هوا هستند. یکی از این راه‌حل‌ها شامل گسترش فضاهای سبز شهری، به‌ویژه پارک‌ها است تا به‌عنوان فیلتر و سینک‌های طبیعی برای ذرات معلق در هوا عمل کنند. به‌طور خاص، نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از ظرفیت فیلتراسیون طبیعی پوشش گیاهی و تاثیرگذاری بر پویایی جریان هوا، فضاهای

<https://doi.org/10.1073/pnas.2119890119>
PMid:35377809 PMCID:PMC9169802

- 3- Dano UL, Balogun A-L, Abubakar IR, Aina YA. Transformative urban governance: confronting urbanization challenges with geospatial technologies in Lagos, Nigeria. GeoJournal 2020; 85 (4):1039-56. <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10009-1>

- 4- Ortiz DI, Piche-Ovares M, Romero-Vega LM, Wagman J, Troyo A. The impact of deforestation, urbanization, and changing land use patterns on the ecology of mosquito and tick-borne diseases in Central America. *Insects* 2021; 13 (1):20. <https://doi.org/10.3390/insects13010020> PMid:35055864 PMCID:PMC8781098
- 5- Juma K, A. Juma P, Shumba C, Otieno P, Asiki G. Non-communicable diseases and urbanization in African cities: A narrative review. *Public Health in Developing Countries - Challenges and Opportunities: IntechOpen* 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89507>
- 6- Rovira J, Domingo JL, Schuhmacher M. Air quality, health impacts and burden of disease due to air pollution (PM10, PM2. 5, NO2 and O3): Application of AirQ+ model to the Camp de Tarragona County (Catalonia, Spain). *Science of the Total Environment* 2020; 703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.13553> 8 PMid:31759725
- 7- Hong Y, Xu X, Liao D, Hong JX, Chen Z. Air pollution increases human health risks of PM2. 5-bound PAHs and nitro-PAHs in the Yangtze River Delta, China. *China Science of the Total Environment* 2021; 770. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.14540> 2 PMid:33736387
- 8- Shi W, Bi J, Liu R, Liu M, Ma Z. Decrease in the chronic health effects from PM2.5 during the 13th Five-Year Plan in China: Impacts of air pollution control policies. *J Clean Prod* 2021; 317 (128433):128433. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128433> PMid:34511742 PMCID:PMC8421321
- 9- Yin Z, Huang X, He L, Cao S, Zhang JJ. Trends in ambient air pollution levels and PM2.5 chemical compositions in four Chinese cities from 1995 to 2017. *J Thorac Dis* 2020; 12 (10):6396-410. <https://doi.org/10.21037/jtd-19-crhh-aq-004> PMid:33209477 PMCID:PMC7656343
- 10- Meng F, Wang J, Li T, Fang C. Pollution characteristics, transport pathways, and potential source regions of PM2.5 and PM10 in Changchun City in 2018. *Int J Environ Res Public Health* 2020; 17 (18):6585. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186585> PMid:32927645 PMCID:PMC7559723
- 11-Aram F, Higuera García E, Solgi E, Mansournia S. Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon* 2019; 5 (4):e01339. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339> PMid:31008380 PMCID:PMC6458494
- 12- Ferrini F, Fini A, Mori J, Gori A. Role of vegetation as a mitigating factor in the urban context. *Sustainability* 2020; 12 (10):4247. <https://doi.org/10.3390/su12104247>
- 13- Enssle F, Kabisch N. Urban green spaces for the social interaction, health and well-being of older people-an integrated view of urban ecosystem services and socio-environmental justice. *Environmental science & policy* 2020; 109:36-44. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.04.008>
- 14- Yu T, Wang Y, Huang J, Liu X, Li J, Zhan W. Study on the regional prediction model of PM2.5 concentrations based on multi-source observations. *Atmos Pollut Res* 2022; 13 (4):101363. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101363>
- 15- Karimi H, Soffianian A, Mirghaffari N, Soltani S. Determining air pollution potential using geographic information systems and multi-criteria evaluation: A case study in Isfahan province in Iran. *Environ Process* 2016; 3 (1):229-46. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0136-4>
- 16- Chen M, Dai F, Yang B, Zhu S. Effects of neighborhood green space on PM2.5 mitigation: Evidence from five megacities in China. *Build Environ* 2019; 156: 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.007>
- 17- Takahashi M, Feng Z, Mikhailova TA, Kalugina OV, Shergina OV, Afanasieva LV, et al. Air pollution monitoring and tree and forest decline in East Asia: A review. *Sci Total Environ* 2020; 742 (140288) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140288> 8 PMid:32721711
- 18- Wulder MA, Roy DP, Radeloff VC, Loveland TR, Anderson MC, Johnson DM, et al. Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sens Environ* 2022; 280 (113195):113195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113195>

- 19- Masek JG, Wulder MA, Markham B, McCorkel J, Crawford CJ, Storey J. Empowering open science and applications through continuity. *Remote Sensing of Environment*. 2020; 9. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111968>
- 20- Kašpar V, Zapletal M, Samec P, Komárek J, Bílek J, Jurán S. Unmanned aerial systems for modelling air pollution removal by urban greenery. *Urban For Urban Greening* 2022; 78 (127757):127757. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127757>
- 21- Becchetti L, Beccari G, Conzo G, Conzo P, De Santis D, Salustri F. Park municipalities and air quality. *SSRN Electron J* 2021. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3933841>
- 22- Coleman CJ, Yeager RA, Pond ZA, Riggs DW, Bhatnagar A, Pope I. Mortality risk associated with greenness, air pollution, and physical activity in a representative US cohort. *Science of the Total Environment* 2022; 824. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153848> PMID:35176374 PMCID:PMC10243166
- 23- Lei Y, Davies GM, Jin H, Tian G, Kim G. Scale-dependent effects of urban greenspace on particulate matter air pollution. *Urban For Urban Greening* 2021; 61 (127089):127089. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127089>
- 24- Barrio D, Inouzhe E, Matrán H. On approximate validation of models: a Kolmogorov-Smirnov-based approach. *Test* 2020; 29:938-65. <https://doi.org/10.1007/s11749-019-00691-1>
- 25- Harrison RM, Van Vu T, Jafar H, Shi Z. More mileage in reducing urban air pollution from road traffic. *Environ Int* 2021; 149 (106329):106329. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106329> PMID:33561618
- 26- Barwise Y, Kumar P. Designing vegetation barriers for urban air pollution abatement: a practical review for appropriate plant species selection. *Npj Clim Atmos Sci* 2020; 3 (1). <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0115-3>
- 27- Ottosen T-B, Kumar P. The influence of the vegetation cycle on the mitigation of air pollution by a deciduous roadside hedge. *Sustain Cities Soc* 2020; 53 (101919):101919. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101919>
- 28- 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. *Science of the Total Environment* 2021; 796. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148605> PMID:34271387
- 29- Jafari N, Bina B, Mortezaie S, Ebrahimi A, Abdollahnejad A. Survey of Noise Pollution Levels in Congested Areas of Isfahan, Iran. *Iran HSR* 2012; 7 (5). (Persian)
- 30- Orti MA, Casanelles-Abella J, Chiron F, Deguines N, Hallikma T, Jaksi P. Negative relationship between woody species density and size of urban green spaces in seven European cities. *Urban Forestry & Urban Greening* 2022; 74. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127650>
- 31- Halecki W, Stachura T, Fudała W, Stec A, Kuboń S. Assessment and planning of green spaces in urban parks: A review. *Sustain Cities Soc* 2023; 88 (104280):104280. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104280>
- 32- Su TH, Lin CS, Lu SY, Lin JC, Wang HH, Liu CP. Effect of air quality improvement by urban parks on mitigating PM2.5 and its associated heavy metals: A mobile-monitoring field study. *Journal of Environmental Management* 2022; 323. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116283> PMID: 36261989
- 33- Ahn H, Lee J, Hong A. Urban form and air pollution: Clustering patterns of urban form factors related to particulate matter in Seoul, Korea. *Sustain Cities Soc* 2022; 81 (103859):103859. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103859>
- 34- Guler D, Yomralioglu T. Suitable location selection for the electric vehicle fast charging station with AHP and fuzzy AHP methods using GIS. *Ann GIS* 2020; 26 (2): 169-89. <https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1737226>
- 35- Badach J, Dymnicka M, Baranowski A. Urban vegetation in air quality management: A review and policy framework. *Sustainability*. 2020;12 (3):1258. <https://doi.org/10.3390/su12031258>
- 36- Nemitz E, Vieno M, Carnell E, Fitch A, Steadman C, Cryle P, et al. Potential and limitation of air pollution mitigation by vegetation and uncertainties of deposition-based evaluations. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2020;378 (2183):20190320. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0320> PMID:32981438 PMCID:PMC7536036
- 37- Ghalamkari P, Ahmadi Nadoushan M. The Relationship between Landscape Pattern and Dispersion of PM2.5 in Isfahan city. *Journal of*

Research in Environmental Health. 2022;8 (2):123-35. (Persian)

38- Singh N, Singh S, Mall RK. Urban ecology and human health: implications of urban heat island, air pollution and climate change nexus.

Urban Ecology: Elsevier; 2020. p. 317-34.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820730-7.00017->