



Journal of Environmental
Management and Law

فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست

<https://sanad.iau.ir/en/Journal/jeml>

The Effects of Air Pollution on Kidney Function in Isfahan City

Samaneh Mohammadsaleimani¹, Mozhgan Ahmadi Nadoushan^{2*}, Mozhgan Mortazavi Najafabadi³,
Firouzeh Moeinzadeh⁴, Roya Kelishadi⁵

¹ Department of Environmental Sciences, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

² Department of Environmental Sciences, Waste and Wastewater Research Center, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

³ Isfahan kidney diseases research center, Isfahan University of medical sciences, Isfahan, Iran.

⁴ Isfahan kidney diseases research center, Isfahan University of medical sciences, Isfahan, Iran.

⁵ Child Growth and Development Research Center, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran.

*Corresponding Author: m.ahmadi@khuisf.ac.ir

Original Paper

Abstract

Received: 2023.07.07

Accepted: 2023.12.06

Keywords:

Kidney Function,
Sentinel P5,
Linear Regression,
Creatinine.

Ambient air pollution is recognized as one of the most serious issues around the world. Some effects of air pollution on human health is due to the penetration of pollutants into the body, which can lead to effects on the body's internal system. In order to carry out this study in Isfahan city, the spatial distribution of nitrogen dioxide, carbon monoxide, sulfur dioxide and ozone obtained from the annual average (2023) of Sentinel-P5 satellite products was obtained in terms of moles per cubic meter. The results of the pollutant density accuracy assessment were within the acceptable range of $R2 > 0.366 > 0.738$. Also, the level of blood creatinine and the geographical coordinates of the residence of 92 patients were also calculated and their spatial relationship with the concentration of pollutants was investigated by linear regression model. The results showed that with the increase in the concentration of each pollutant, the amount of blood creatinine also increased. The best regression model ($R2 = 0.234$) was obtained for carbon monoxide. The model made for ozone also showed a very low value of detection coefficient equal to (0.023). Based on the results, it seems that the increase in the concentration of these pollutants has caused an increase in blood pressure and stimulation of the renin-angiotensin-aldosterone system, which can lead to kidney dysfunction and an increase in the level of Creatinine in the blood.

<https://doi.org/10.30486/JEML.2023.1999949.3378>



Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the

آثار ناشی از آلودگی هوا بر عملکرد کلیه در شهر اصفهان

سمانه محمد سلیمانی^۱، مژگان احمدی ندوشن^{۲*}، مژگان مرتضوی نجف آبادی^۳، فیروزه معین زاده^۴، رویا کلیشادی^۵

- ۱- گروه محیط زیست، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
 ۲- مرکز تحقیقات پسماند و پساب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
 ۳- مرکز تحقیقات بیماری‌های کلیه اصفهان، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران.
 ۴- مرکز تحقیقات بیماری‌های کلیه اصفهان، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران.
 ۵- مرکز تحقیقات رشد و نمو کودکان، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران.

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.ahmadi@khuif.ac.ir

| نوع مقاله: | چکیده |
|--|--|
| علمی-پژوهشی | آلودگی هوای محیط به عنوان یکی از جدی‌ترین مسائل در سراسر جهان شناخته شده است. بخشی از اثرات آلودگی هوا بر سلامت انسان ناشی از نفوذ آلاینده‌ها به داخل بدن است که می‌تواند منجر به اثرات بر دستگاه داخلی بدن گردد. به منظور انجام این مطالعه در شهر اصفهان، توزیع مکانی دی‌اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد و ازون حاصل از میانگین سالانه (۱۴۰۱) پروداکت‌های ماهواره سنتینل ۵P بر حسب مول بر مترمکعب به دست آمد. نتایج حاصل از ارزیابی صحت تراکم آلاینده‌ها در محدوده قابل قبول $0/738 < R2 < 0/366$ قرار داشت. همچنین سطح کراتینین خون و مختصات جغرافیایی محل سکونت ۹۲ فرد بیمار نیز محاسبه و ارتباط مکانی آن‌ها با غلظت آلاینده‌ها توسط مدل رگرسیون خطی بررسی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت هر یک از آلاینده‌ها، مقدار کراتینین خون نیز افزایش پیدا کرده است. بهترین مدل رگرسیون $(R2 = 0/234)$ برای مونوکسید کربن به دست آمد. مدل ساخته شده برای ازون نیز مقدار بسیار پایین ضریب تشخیص برابر $(0/023)$ را از خود نشان داد. بر اساس نتایج اینطور به نظر می‌رسد که بالا رفتن غلظت این آلاینده‌ها باعث افزایش فشار خون و تحریک سیستم رنین- آنژیوتانسین- آلدوسترون شده است که می‌تواند به اختلال در کارکرد کلیه و افزایش سطح کراتینین در خون منجر شود. |
| تاریخچه مقاله: | |
| ارسال: ۱۴۰۲/۰۴/۱۶ | |
| پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵ | |
| کلمات کلیدی: | |
| عملکرد کلیه، سنتینل ۵P، رگرسیون خطی، کراتینین. | |

مقدمه

آلودگی هوا می‌تواند به طور قابل توجهی از لحاظ ترکیب شیمیایی بین شهرهای مختلف متفاوت باشد. منابع مختلفی برای این آلاینده‌ها وجود دارد ذرات معلق (PM) که عمدتاً شامل ذرات جامد حاصل از احتراق زغال سنگ، بنزین و سوخت دیزل است، عنصر اصلی آلودگی هوا است که بیشترین اثرات نامطلوب بر سلامتی را ایجاد می‌کند (Brück et al., 2016; Guo et al., 2019). آلودگی هوا به معنای وجود مواد مضر، ترکیبات شیمیایی غیرطبیعی یا ذرات معلق در هوا است که افزایش شدید غلظت آن‌ها می‌تواند برای سلامت انسان و محیط زیست ایجاد خطر کند (Almetwally et al., 2020). این مواد مضر می‌توانند از منابع طبیعی مثل ذرات گرد و خاک، دود و آلاینده‌های آلی، و یا منابع انسانی مانند گازهای صنعتی، آلاینده‌های خروجی خودروها و تولیدات صنعتی تولید شوند (Zaporozhets & Khaidurov, 2020). در شهرها به دلیل فشردگی جمعیت و تعدد فعالیت‌های انسانی، آلودگی هوا به مراتب بیشتر است. ترافیک شهری و حضور تعداد زیادی خودرو باعث تولید مواد آلاینده مانند ذرات معلق، اکسیدهای نیتروژن (NOx)، مونوکسید کربن (CO)، اکسیدهای گوگرد (SOx) و ازن (O₃) می‌شود (Daraei et al., 2020). دود حاصل از فعالیت‌های صنعتی و استفاده از سوخت‌های فسیلی برای گرمایش، از دیگر موارد تشدید حضور این آلاینده‌ها در هوای شهر است. به دلیل افزایش شدید جمعیت انسان در دهه‌های گذشته و تمایل بسیار زیاد برای شهرنشینی، مسئله آلودگی هوا و اثرات آن بر سلامتی انسان بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (Diener & Mudu, 2021).

اثرات آلودگی هوا بر سلامت انسان ممکن است به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم رخ دهد (Diener & Mudu, 2021). اثرات مستقیم شامل بروز عوارض تنفسی مانند التهاب ریه، آسم، عفونت‌های تنفسی، عوارض قلبی-عروقی مانند برگشت ناقص آنژیینی (علائم فشار در قفسه سینه) و افزایش خطر سکته قلبی و سکته مغزی است (Tran et al., 2020). در این بین، بیماری مزمن کلیه (CKD) یک حالت پیشرونده و بیماری طولانی مدت است که به طور تدریجی و در طول زمان باعث آسیب به عملکرد کلیه‌ها می‌شود (Charles & Ferris, 2020). در بیماری مزمن کلیه، کلیه‌ها قادر به تصفیه کامل و موثر مواد زائد و نگهداری تعادل آب و الکترولیت‌ها در بدن نیستند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ارتباط مستقیمی بین شدت آلودگی هوا با بیماری مزمن کلیه وجود دارد (Chen et al., 2021; Liang et al., 2021; Shubham et al., 2022). این ارتباط می‌تواند از طریق تأثیر آلودگی هوا بر عواملی مانند فشار خون بالا و التهابات سیستمیک، که هر دو عوامل مهم در توسعه بیماری مزمن کلیه هستند، بوجود آیند. به عبارت دیگر، آلودگی هوا ممکن است باعث ایجاد التهابات سیستمیک در بدن و در نهایت موجب توسعه بیماری مزمن کلیه شود (Shubham et al., 2022).

امروزه روش‌های بسیار زیادی برای شناسایی شدت آلودگی هوای شهرها و اثرات احتمالی آن‌ها بر سلامت انسان معرفی شده و مورد استفاده قرار گرفته است. از بین روش‌های موجود، سنجش از دور ماهواره‌ای اهمیت بسیاری در مطالعه آلودگی شهری دارد (Ghasempour et al., 2021). این روش به واسطه قابلیت‌های خود می‌تواند اطلاعات گسترده‌ای درباره آلودگی هوا و توزیع آن در مناطق مختلف شهرها ارائه دهد. سنجش از دور ماهواره‌ای، برداشت‌های مکانی از آلودگی هوا را در سطوح گسترده‌ای از مناطق شهری مقدور می‌سازد (Pathakoti et al., 2020). این روش همچنین اجازه می‌دهد تا نقشه‌های دقیقی از توزیع آلودگی هوا در شهرها تهیه شود و مناطقی که به طور خاص تحت تأثیر آلودگی قرار دارند مشخص شوند. علاوه بر توزیع مکانی آلاینده‌ها، سنجش از دور ماهواره‌ای قادر است تا تغییرات زمانی آلودگی هوا را نیز رصد کند که برای تحلیل الگوها و تغییرات روزانه، فصلی و سالانه آلودگی و درک بهتر از رفتار و شدت آلودگی در طول زمان مفید است (Wei et al., 2021).

تاکنون مطالعات بسیاری برای بررسی آلودگی هوا با استفاده از سنجش از دور انجام شده است. Shogrkhodaei و همکاران (۲۰۲۲) به یافتن ارتباط شاخص‌های سنجش از دوری با آلاینده‌های هوا در سطح شهر تهران پرداختند و نشان دادند که ارتباط قوی بین شاخص‌های سنجش از دور و آلاینده‌ها وجود دارد. Pourmohammadi و همکاران (۲۰۲۲) با توجه به اهمیت شهرستان ماهشهر

به‌عنوان یکی از قطب‌های صنعت پترو شیمی کشور نشان دادند که توزیع زمانی و مکانی شاخص‌های ماهواره‌ای آلاینده‌ها به شدت تحت تأثیر حضور صنایع مختلف در این ناحیه است. Liang و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که توزیع آلاینده‌های محاسبه شده از شاخص‌های ماهواره‌ای در شهرهای مهم چین از همبستگی بالایی با وقوع بیماری‌های مزمن کلیه برخوردار است. Hsu و همکاران (۲۰۲۳) و McKinley و همکاران (۲۰۲۱) نیز به طور مشابه، یافته‌هایی در مورد ارتباط قوی بین بیماری مزمن کلیه با توزیع آلاینده‌ها در شهرها نشان دادند.

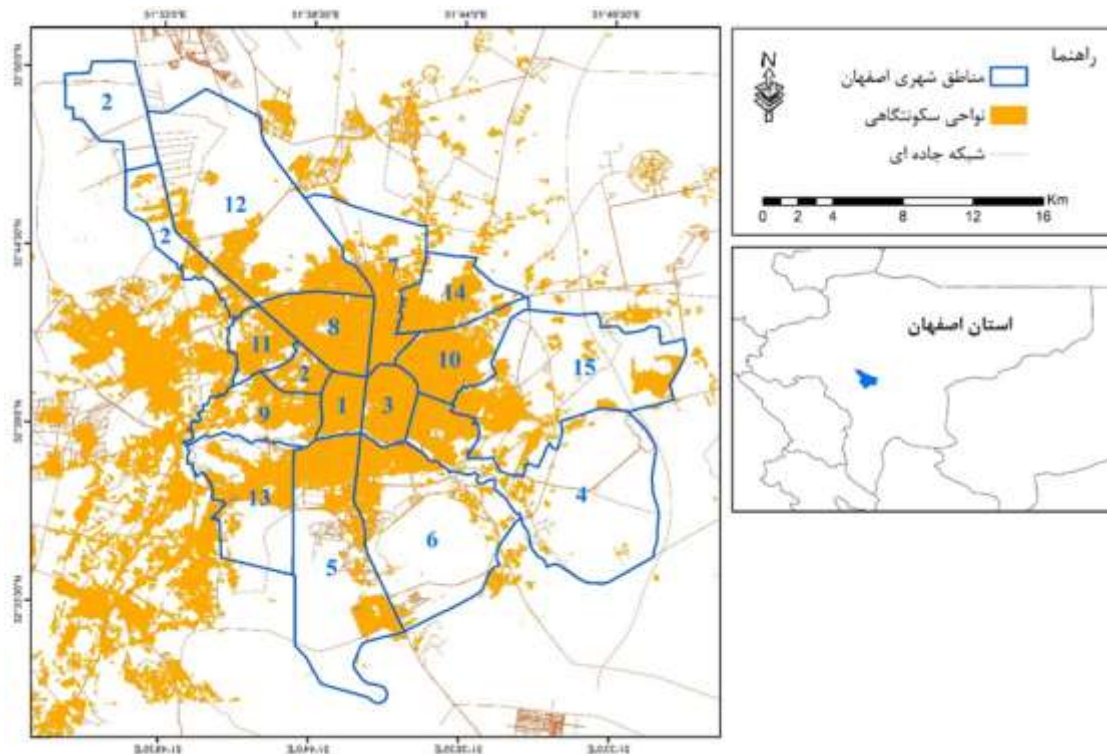
Bowe و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی بار جهانی و ملی بیماری مزمن کلیه و آلودگی هوا محیط پرداختند. هدف این مطالعه ادغام تمام شواهد اپیدمیولوژیک موجود برای توصیف مدل مواجهه-پاسخ ذرات ریز محیطی ($PM_{2.5}$) و خطر بیماری مزمن کلیوی (CKD) در مواجهه با غلظت ذرات معلق ($PM_{2.5}$) در انسان بود. سپس بار جهانی و ملی CKD قابل انتساب به $PM_{2.5}$ را تخمین زده شد. پس از آن، میزان بروز جهانی و ملی، شیوع، سال‌های زندگی تعدیل شده با ناتوانی (DALYs) و مرگ و میر ناشی از بیماری مزمن کلیه منتسب به $PM_{2.5}$ در ۱۹۴ کشور و منطقه در سال ۲۰۱۷ تخمین زده شد. بار جهانی CKD که به $PM_{2.5}$ نسبت داده می‌شود، قابل توجه است و براساس جغرافیا متفاوت است و به طور نامتناسبی توسط کشورهای محروم به دوش کشیده می‌شود. بیشتر بار مربوط به سطوح $PM_{2.5}$ بالاتر از دستورالعمل‌های WHO است، که نشان می‌دهد دستیابی به این اهداف ممکن است باعث کاهش بار CKD شود.

شهر اصفهان یکی از آلوده‌ترین شهرهای ایران است که به شدت تحت تأثیر ترافیک خودرو، تراکم بالای انسان و حضور صنایع و کارخانجات آلاینده بسیاری قرار گرفته است (Hajizadeh et al., 2021). در این مطالعه، شاخص‌های آلاینده شامل دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و ازن (O_3) از تصاویر ماهواره سنیتینل-۵P برای کل روزهای سال ۱۴۰۱ استخراج و میانگین آن‌ها به عنوان مقدار آلودگی هوا شهر اصفهان معرفی شد. پس از ارزیابی صحت تخمین‌های ماهواره‌ای، به مدلسازی ارتباط بین غلظت کراتینین خون به عنوان معیاری از شدت بیماری در افراد مبتلا به بیماری مزمن کلیه و شدت حضور آلاینده‌ها در محل زندگی هر فرد پرداخته شد تا معیاری از اثر آلودگی هوا بر این افراد در شهر اصفهان مشخص و برای مدیریت محیط‌زیستی شهر اصفهان مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهر اصفهان با وسعت ۳۴۰ کیلومتر مربع بین طول‌های جغرافیایی $32^{\circ} 48' 44.57''$ تا $51^{\circ} 16' 42.40''$ و عرض‌های جغرافیایی $51^{\circ} 54' 1/60''$ تا $51^{\circ} 54' 1/60''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $32^{\circ} 48' 44.57''$ تا $32^{\circ} 23' 50.39''$ شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). در طبقه‌بندی دوماترن، این شهر دارای اقلیم خشک و نیمه خشک با تابستان‌های گرم و خشک است به طوری که متوسط بارندگی آن کمتر از ۱۵۰ میلیمتر در سال است (Mahpour & El-Diraby, 2021). عموماً در بیش از ۸۰ درصد روزهای سال اصفهان پدیده وارونگی دمایی و تجمع آلاینده‌ها برقرار است که قطر اتمسفری آن بین ۴۰ تا ۱۲۰۰ متر در نوسان است. حضور صنایع بزرگ در پیرامون شهر اصفهان، افزایش شدید جمعیت شهر در طول سال‌های گذشته و ترافیک شهری از مهم‌ترین منابع آلودگی شهر اصفهان به‌شمار می‌آید (Hajizadeh et al., 2021).



شکل ۱- محدوده جغرافیایی شهر اصفهان

Fig. 1- Geographic boundaries of Isfahan city

تولید نقشه‌های آلاینده شهر اصفهان

سنتینل مجموعه‌ای از ماهواره‌های مشاهده زمین هستند که توسعه و عملیات آن‌ها توسط سازمان فضایی اروپا به عنوان بخشی از برنامه کوپرنیکوس صورت گرفت. ماهواره سنتینل ۵ یکی از مهم‌ترین این ماهواره‌ها است که در ژوئن ۲۰۲۲ توسط سازمان فضایی اروپا در محیط برنامه کوپرنیکوس برای نظارت و اندازه‌گیری مشکلات محیطی و آب و هوایی توسعه پیدا کرد. این سنجنده دارای ۴ باند ماهواره‌ای مشخص در بخش‌های ماورابنفش، باندهای مرئی، مادون قرمز کوتاه و مادون قرمز طول موج کوتاه است که از طول موج ۲۷۰ نانومتر تا ۲۳۸۵ نانومتر را پوشش می‌دهد. قدرت تفکیک مکانی این ماهواره ۱ کیلومتر است. این ماهواره هر ۹۹ دقیقه یک بار به دور زمین می‌چرخد و هر روز پوشش جهانی را فراهم می‌کند. در این مطالعه از ۴ آلاینده شامل مونوکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد و ازن که توسط این ماهواره بر حسب مول بر مترمربع تخمین زده شده و در اختیار کاربران قرار می‌گیرد استفاده شد. این لایه‌ها با اعمال فیلتر میانگین بر روی تمامی تصاویر برداشت شده در سال ۱۴۰۱ در سامانه گوگل ارث انجین و با کدهای دستوری زیر انجام شد.

| | |
|--|------------------------------------|
| var CO= ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_CO') | کد دریافت لایه‌های CO |
| .select(CO_column_number_density') | |
| var NO2= ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_NO2') | کد دریافت لایه‌های NO ₂ |
| .select(NO2_column_number_density') | |
| var SO2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_SO2') | کد دریافت لایه‌های SO ₂ |
| .select('SO2_column_number_density') | |
| var O3= ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_O3') | کد دریافت لایه‌های O ₃ |
| .select('O3_column_number_density') | |

ارزیابی صحت آلاینده‌ها

برای انجام ارزیابی صحت، متوسط مقدار آلاینده محاسبه شده توسط ایستگاه‌های زمینی شهر اصفهان در سال ۱۴۰۱ (تعداد ۱۰ ایستگاه) با مقدار متوسط آلاینده‌های به دست آمده از فیلتر میانگین که بر روی پروداکت‌های ماهواره سنتینل ۵P برداشت گردید مقایسه شد. برای انجام مقایسه از مدل رگرسیون خطی استفاده و مقدار ضریب تشخیص آن به عنوان معیاری از میزان تطابق داده‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای استفاده شد. چنانچه شیب خط نمودار مثبت و میزان ضریب تشخیص مدل در سطح معنی‌داری یک درصد قرار داشت، میزان صحت لایه‌ها مورد تأیید و برای انجام مدل‌سازی استفاده شدند.

شناسایی بیماران مزمن کلیه و محاسبه غلظت کراتینین

برای شناسایی افراد هدف در این مطالعه، چند معیار مهم به عنوان الزامات و مفروضات اولیه مورد توجه قرار گرفت. ابتدای امر، ابتلای افراد به بیماری مزمن کلیه است که در آن، پارامترهای مربوط به سلامت و عملکرد کلیه تحت تأثیر استرس‌های محیطی قرار دارد. دومین معیار، سکونت فرد در یک محل به خصوص از شهر و عدم تغییر موقعیت زیاد از محل زندگی است. به عبارت دیگر، فرد بیمار بایستی بیشترین ساعات روز خود را در محدوده‌ی محل سکونت سپری کرده باشد. این امر باعث می‌شود تا تغییرات پارامترهای کلیوی فرد تحت تأثیر آلاینده‌هایی باشد که در آن قسمت به خصوص از شهر تمرکز شده باشند. در این مطالعه، غلظت کراتینین خون افراد منتخب آزمایش و بر حسب میلی‌گرم بر دسی‌لیتر (mg/dL) گزارش گردید.

تحلیل آماری داده‌ها

توزیع نرمال داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف مورد بررسی قرار گرفت ($p\text{-value} < 0/05$). آزمون Levene برای ارزیابی همگنی واریانس انجام شد. سپس از مدل رگرسیون خطی تک متغیره استفاده شد تا رابطه بین غلظت کراتینین در بیماران مزمن کلیوی با غلظت آلاینده‌ها مشخص شود. در نهایت از ضریب تشخیص برای ارزیابی قدرت مدل‌های رگرسیونی و مقایسه‌ی آن‌ها استفاده شد (Chicco et al., 2021).

نتایج

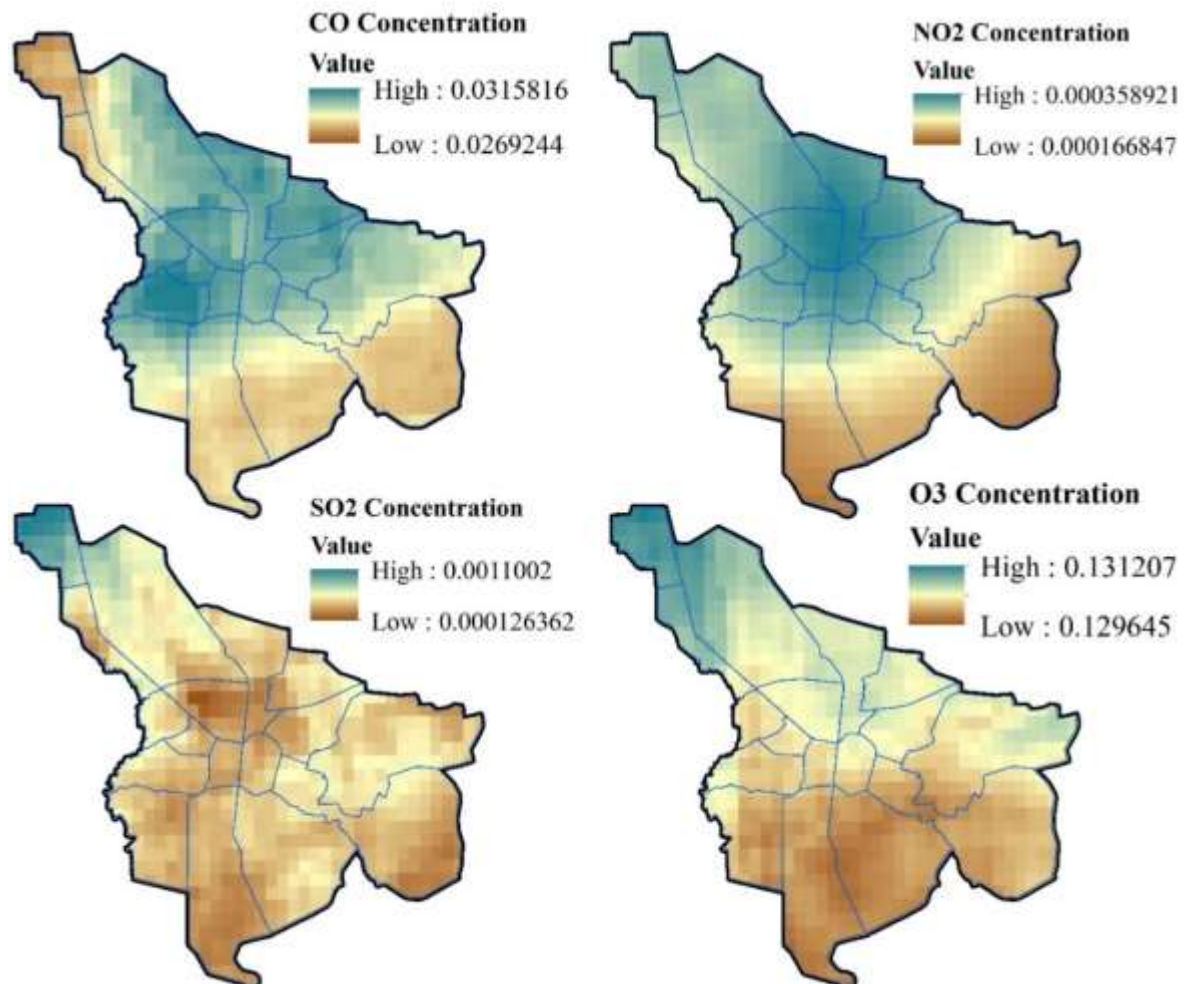
غلظت کراتینین محاسبه شده در بیماران به تفکیک گروه‌های سنی در (دول ۱ نشان داده شده است. تعداد ۹۲ بیمار در این مطالعه شرکت داده شدند. کمترین تعداد بیماران در گروه سنی کمتر از ۴۰ سال (۷ نفر) و بیشترین آنها در گروه سنی بیش از ۷۰ سال (۳۱ نفر) قرار داشتند. کمترین متوسط غلظت کراتینین نیز در گروه سنی کمتر از ۴۰ سال برابر با ۰/۷۵۲ و بیشترین آن در گروه سنی بیش از ۷۰ سال برابر با ۰/۱۰۷ به دست آمد. به طور متوسط، غلظت کراتینین در بیماران منتخب برابر با ۰/۸۹۸ به دست آمد.

جدول ۱- تعداد افراد و غلظت کراتینین (mg/dL) در گروه‌های سنی مختلف

Table 1- Number of individuals and creatinine concentration (mg/dl) in different age groups

| متوسط غلظت کراتینین | تعداد افراد | گروه سنی |
|---------------------|-------------|----------|
| ۰/۷۵۲ | ۷ | < ۴۰ |
| ۰/۷۸۰ | ۱۴ | ۴۰ - ۵۰ |
| ۰/۸۲۷ | ۱۹ | ۵۰ - ۶۰ |
| ۱/۰۲۴ | ۲۱ | ۶۰ - ۷۰ |
| ۱/۱۰۷ | ۳۱ | > ۷۰ |

نقشه حاصل از میانگین سالانه غلظت دی‌اکسیدهای نیتروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسیدهای گوگرد و ازن در شکل ۲ نشان داده شده است. بیشترین تجمع غلظت مونوکسیدکربن در قسمت‌های غربی و شمالی منطقه قابل مشاهده است حال آنکه قسمت‌های شرقی و به‌خصوص جنوب از غلظت به مراتب پایین‌تری از این آلاینده برخوردار بوده است. بیشترین غلظت مونوکسید کربن برابر با $0/031$ (مول بر مترمکعب) در منطقه ۹ بوده است و بیشتر کمترین مقدار آن برابر با $0/028$ (مول بر مترمکعب) در منطقه ۶ مشاهده شده است (جدول ۲). غلظت دی‌اکسیدگوگرد نیز مانند غلظت مونوکسیدکربن، از توزیع مکانی ناهمگنی بین قسمت‌های مختلف شهر اصفهان برخوردار بود و مشابه با غلظت دی‌اکسیدنیتروژن، اعداد بسیار پایینی را از خود نشان داد. تفاوت بین بالاترین و کمترین غلظت دی‌اکسیدگوگرد در محدوده‌های عددی صد هزارم اعشار قرار داشت. بالاترین غلظت این آلاینده را می‌توان در قسمت‌های شمالی شهر و در بخش‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده کرد (حداکثر $0/00060$ مول بر مترمکعب) حال آنکه غلظت‌های پایین آن در بخش‌های جنوبی تا مرکز شهر به‌دست آمد. غلظت ازن سطحی نیز روند افزایشی از سمت جنوب شهر به سمت قسمت‌های شمال و شمال غرب را از خود نشان داد به طوری که در بخش‌های جنوبی شهر به‌خصوص بخش ۱۳، ۱۴ و ۱۵ شهری کمترین غلظت این آلاینده به $0/129$ نیز می‌رسید و در قسمت‌های شمال غربی شهر در بخش ۱۲ شهری، حداکثر مقدار غلظت آلاینده از $0/131$ مول بر مترمکعب نیز بیشتر می‌شد.



شکل ۲- توزیع مکانی دی‌اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد و ازن حاصل از میانگین سالانه پروداکت‌های ماهواره سنتینل ۵P بر حسب مول بر مترمکعب

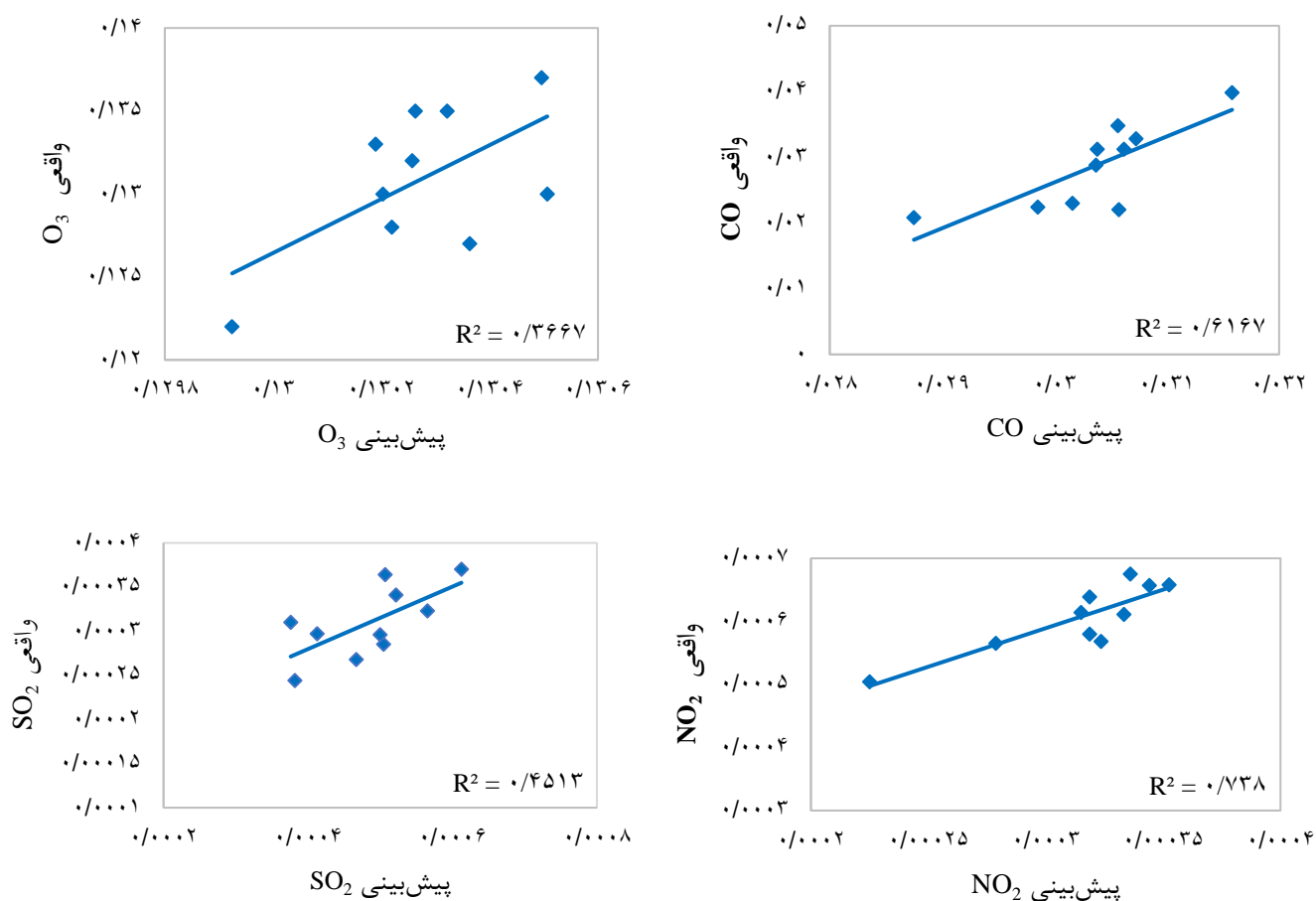
Fig. 2 - Spatial distribution of nitrogen dioxide, carbon monoxide, sulfur dioxide, and ozone from the annual average of Sentinel p5 satellite products per cubic meter

جدول ۲- متوسط غلظت دی‌اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد و ازن حاصل از میانگین سالانه پروداکت‌های ماهواره سنتینل ۵P بر حسب مول بر مترمکعب در بخش‌های مختلف شهر

Table 2 - Average concentration of nitrogen dioxide, carbon monoxide, sulfur dioxide, and ozone from the annual average of sentinel p5 satellite products per cubic meter in different city sections

| غلظت آلاینده بر حسب مول بر مترمکعب | | | | بخش شهر |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|---------|---------|
| O ₃ | SO ₂ | NO ₂ | CO | |
| ۰/۱۳۰۲۶ | ۰/۰۰۰۴۲ | ۰/۰۰۰۳۴ | ۰/۰۳۰۵۹ | ۱ |
| ۰/۱۳۰۸۰ | ۰/۰۰۰۷۰ | ۰/۰۰۰۳۰ | ۰/۰۲۸۸۵ | ۲ |
| ۰/۱۳۰۳۱ | ۰/۰۰۰۴۷ | ۰/۰۰۰۳۳ | ۰/۰۳۰۳۵ | ۳ |
| ۰/۱۳۰۱۲ | ۰/۰۰۰۴۵ | ۰/۰۰۰۲۳ | ۰/۰۲۸۷۶ | ۴ |
| ۰/۱۲۹۹۶ | ۰/۰۰۰۴۰ | ۰/۰۰۰۲۴ | ۰/۰۲۸۹۶ | ۵ |
| ۰/۱۲۹۹۶ | ۰/۰۰۰۵۰ | ۰/۰۰۰۲۵ | ۰/۰۲۸۸۳ | ۶ |
| ۰/۱۳۰۵۳ | ۰/۰۰۰۴۷ | ۰/۰۰۰۳۴ | ۰/۰۳۰۶۴ | ۷ |
| ۰/۱۳۰۴۷ | ۰/۰۰۰۳۴ | ۰/۰۰۰۳۵ | ۰/۰۳۰۵۵ | ۸ |
| ۰/۱۳۰۲۵ | ۰/۰۰۰۴۸ | ۰/۰۰۰۳۱ | ۰/۰۳۱۰۶ | ۹ |
| ۰/۱۳۰۳۹ | ۰/۰۰۰۵۱ | ۰/۰۰۰۳۲ | ۰/۰۳۰۵۲ | ۱۰ |
| ۰/۱۳۰۲۹ | ۰/۰۰۰۵۴ | ۰/۰۰۰۳۲ | ۰/۰۳۰۶۴ | ۱۱ |
| ۰/۱۳۰۶۲ | ۰/۰۰۰۶۰ | ۰/۰۰۰۳۱ | ۰/۰۳۰۰۹ | ۱۲ |
| ۰/۱۳۰۰۹ | ۰/۰۰۰۴۴ | ۰/۰۰۰۲۷ | ۰/۰۲۹۷۴ | ۱۳ |
| ۰/۱۳۰۴۸ | ۰/۰۰۰۵۳ | ۰/۰۰۰۳۳ | ۰/۰۳۰۷۲ | ۱۴ |
| ۰/۱۳۰۳۴ | ۰/۰۰۰۵۴ | ۰/۰۰۰۲۷ | ۰/۰۲۹۶۴ | ۱۵ |

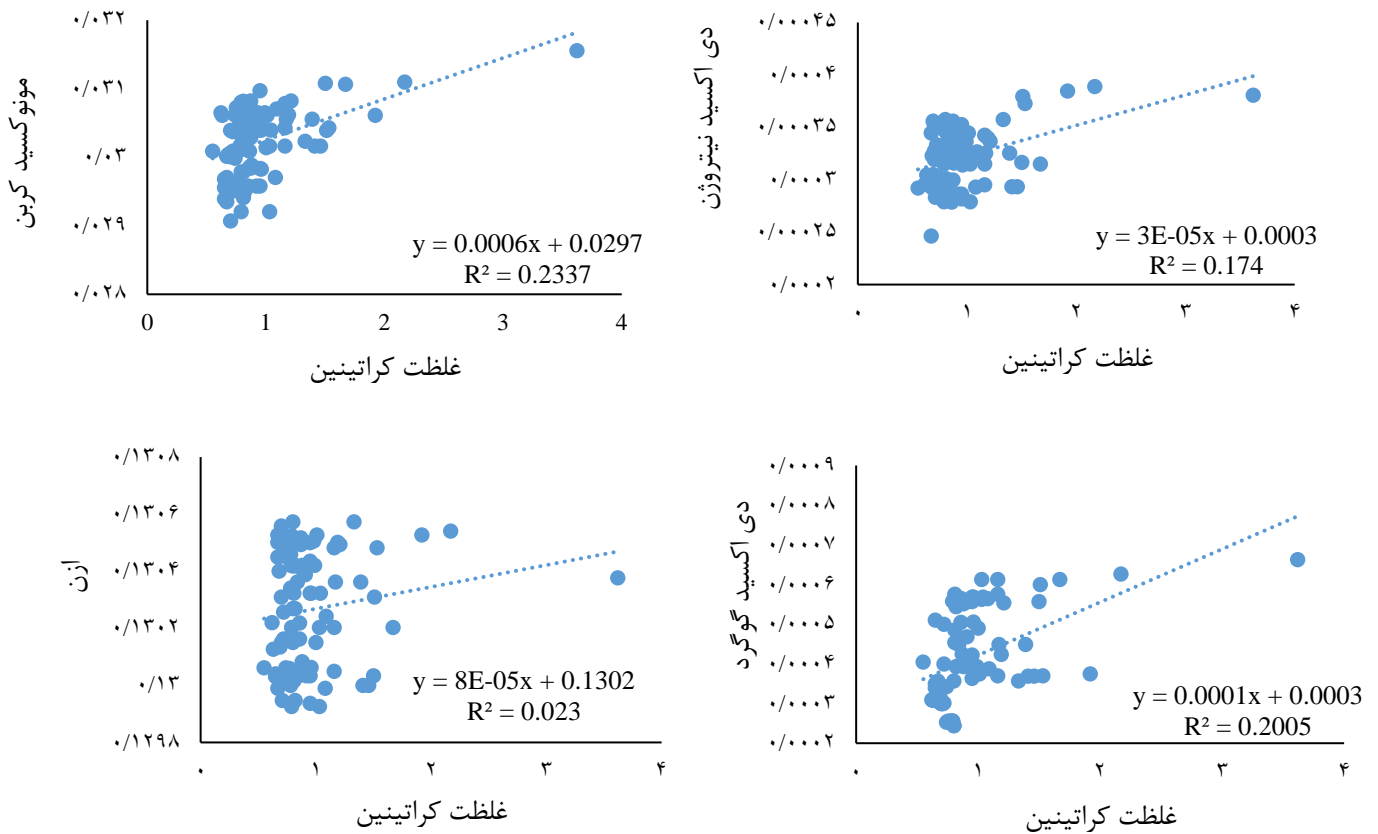
نتایج حاصل از ارزیابی صحت لایه‌های آلاینده‌ها با داده‌های زمینی در شکل ۳ نشان داده شده است. دقیق‌ترین مدل حاصل با ضریب تشخیص برابر با ۰/۷۳۸ برای دی‌اکسید نیتروژن به دست آمد. لایه‌های مونوکسید کربن و دی‌اکسید گوگرد نیز به ترتیب با ضریب تشخیص ۰/۶۱۶ و ۰/۴۵۱، دقت قابل قبولی را برای پیش‌بینی غلظت این آلاینده با استفاده از داده‌های زمینی نشان دادند. کمترین مقدار ضریب تشخیص نیز برای پیش‌بینی مقدار ازن (۰/۳۶۶) به دست آمد.



شکل ۳- نتایج حاصل از ارزیابی صحت لایه‌های دی‌اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد و ازن با واقعیت زمینی

Fig. 3- Accuracy assessment results of nitrogen dioxide, carbon monoxide, sulfur dioxide, and ozone layers with ground truth

نتایج حاصل از مدل سازی ارتباط بین غلظت کراتینین خون بیماران مزمن کلیوی با غلظت سالانه آلاینده‌ها با استفاده از رگرسیون خطی ساده در شکل ۴ نشان داده شده است. در تمام مدل‌های رگرسیونی، شیب خط نمودار مثبت به دست آمد، به این معنی که با افزایش غلظت هر یکی از آلاینده‌ها، مقدار کراتینین خون نیز افزایش پیدا کرده است. بهترین مدل رگرسیون با مقدار R^2 برابر با ۰/۲۳۴ برای مونوکسید کربن به دست آمد. مدل ساخته شده برای ازن نیز مقدار بسیار پایین ضریب تشخیص برابر با ۰/۰۲۳ را از خود نشان داد. بر این اساس، مقدار ازن تأثیر بسیار کمی بر افزایش غلظت کراتینین خون بیماران داشته است. دو مدل دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد نیز با مقادیر ضریب تشخیص برابر با ۰/۱۷۴ و ۰/۲۰۰ نشان از اثر معنی‌دار این دو آلاینده بر افزایش غلظت کراتینین خون بیماران داشته است.



شکل ۴ - نتایج رگرسیون حاصل از ارتباط کراتینین خون بیماران مزمن کلیوی با غلظت سالانه دی اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن، دی اکسید گوگرد و ازن

Fig. 4- Regression results of the relationship between blood creatinine of chronic kidney disease patients and annual concentrations of nitrogen dioxide, carbon monoxide, sulfur dioxide, and ozone

بحث و نتیجه گیری

اصفهان یکی از شهرهای به شدت آلوده در ایران است که خطرات بسیار زیادی را متوجه گروه‌های حساس مانند افراد مبتلا به بیماری مزمن کلیه کرده است. در این مطالعه، غلظت آلاینده‌های شهر اصفهان نسبت به مطالعاتی از قبیل Kaplan و همکاران (۲۰۱۹) و Ayoobi و همکاران (۲۰۲۲)، سطوح بسیار بالای آلودگی را نشان داد. به طور مثال، غلظت دی اکسید نیتروژن در مرکز و شمال شهر اصفهان به بیش از $0/00035$ مول بر مترمکعب نیز رسیده است. از لحاظ تغییرات مکانی، غلظت دی اکسید نیتروژن روندی نزولی به سمت حاشیه شهر را نشان داد و غلظت دی اکسید گوگرد و ازن نیز روند افزایشی به سمت شمال شهر داشتند. چنانچه Shahne و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند، این تغییرات بالا در غلظت آلاینده‌های تخمین زده شده توسط تصاویر ماهواره سنتینل ۵P می‌تواند به دلیل تغییرات در تراکم منابع انتشار آلاینده‌ها یا نوسانات فصلی آن‌ها در طول سال باشد.

نتایج حاصل از ارزیابی صحت لایه‌ها در مقیاس سالانه در محدوده قابل قبول $0/738 < R_2 < 0/366$ قرار داشت. بر این اساس، بالاترین صحت تصاویر سنتینل ۵P در تخمین غلظت دی اکسید نیتروژن به دست آمد که بالاترین غلظت آن در مرکز شهر و غلظت‌های حاشیه شهر در کمترین مقدار آن قرار داشت. بنابراین، تمرکز فعالیت‌ها در مرکز شهر اصفهان را می‌توان به عنوان یکی از مهم‌ترین

عوامل افزایش آلودگی هوا در شهر اصفهان در نظر گرفت و افرادی که در مرکز شهر اصفهان زندگی می‌کنند، بیش از سایرین تحت تأثیر اثرات مخرب آلاینده‌ها به خصوص انواع بیماری‌های مزمن مرتبط با آلودگی قرار خواهند گرفت. مطالعاتی از قبیل Kang و همکاران (۲۰۲۳) و Ahn و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که به دلیل تمرکز منابع آلاینده در مرکز شهر، امکان تجمع فصلی و سالانه انواع آلاینده‌ها در مرکز شهر بیش از نواحی حاشیه شهر خواهد بود.

آلودگی هوا می‌تواند فرآیندهای التهابی را تحریک کند و به توسعه بیماری مزمن کلیه کمک کند. کراتینین یک محصول زائد است که در نتیجه فرآیندهای متابولیک طبیعی توسط ماهیچه‌ها تولید می‌شود. این ماده از طریق کلیه‌ها از خون تصفیه شده و از طریق ادرار دفع می‌شود. باید توجه داشت که سطح کراتینین در بدن در درجه اول تحت تأثیر عواملی مانند توده عضلانی، سن و عملکرد کلیه است و سپس تحت تأثیر سایر عوامل بیرونی مانند آلاینده‌های هوا در بدن تجمع می‌یابد (Paoin et al., 2022). نتایج این مطالعه نشان داد که سطح کراتینین بدن بیماران مزمن کلیه در شهر اصفهان به طور معنی‌داری توسط غلظت سالانه آلاینده‌ها قابل پیش‌بینی است. به طور خاص، سطح مونوکسید کربن دارای ارتباط مسقیم و معنی‌داری با سطح کراتینین بدن بود ($R^2 = 0/233$).

باید توجه داشت که آلاینده‌های مورد بررسی در این تحقیق در زمره‌ی گازهای سمی هستند که از منابع متعددی مانند خروجی خودروها، نیروگاه‌های حرارتی و صنایع شیمیایی به جو وارد می‌شود. اثرات این آلاینده‌ها بر سلامت انسان به کرات اثبات شده است اما شدت تأثیر آن ممکن است بر کارکرد کلیه و سطح کراتینین در بدن متفاوت باشد (Lee et al., 2023). به طور کلی، تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که بالا رفتن سطح دی‌اکسید نیتروژن و گوگرد و حتی مونوکسید کربن در خون ممکن است باعث افزایش فشار خون و تحریک سیستم رنین-آنژیوتانسین-آلدو استرون در بدن شود. این مکانیسم می‌تواند منجر به اختلال در کارکرد کلیه و افزایش سطح کراتینین در خون شود (Jeong et al., 2020). از این رو، سطح بالای کراتینین در خون نشان‌دهنده مشکلات کلیه است و می‌تواند به عنوان نشانگر آسیب کلیه استفاده شود. اگرچه ارزیابی دقیق تأثیر آلاینده‌های مورد بررسی در این تحقیق بر کارکرد کلیه و سطح کراتینین در بدن هنوز به مطالعات بیشتری نیاز دارد اما اجتناب افراد حساس از محیط‌های به شدت آلوده در مرکز شهر قویاً تأکید می‌گردد. این امر به خصوص در مورد افراد مبتلا به بیماری مزمن کلیه که در مرکز شهر اصفهان و کانون آلودگی آن زندگی می‌کنند، لازم و ضروری است.

این مطالعه به بررسی بلندمدت آلاینده‌های هوا بر سطح کراتینین خون افراد مبتلا به بیماری مزمن کلیه پرداخته است. نتایج این مطالعه نشان داد که تصاویر ماهواره سنتینل ۵P از دقت قابل قبولی برای تخمین غلظت سالانه آلاینده‌ها در شهر اصفهان برخوردار است. اگرچه تغییرات مکانی بسیار زیادی در تجمع سالانه دی‌اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد و ازن در سطح شهر وجود دارد اما بیشترین غلظت آلاینده‌ها عموماً در مرکز شهر وجود دارد. بر اساس یافته‌های این تحقیق، سطح کراتینین خون بیماران یک متغیر وابسته از غلظت آلاینده‌ها در سطح شهر است. به طور خاص، قوی‌ترین مدل رگرسیون خطی برای مونوکسید کربن به دست آمد، حال آنکه ارتباط قوی و معنی‌داری بین ازن و کراتینین خون به دست نیامد. اگرچه این مطالعه اطلاعات مفیدی در خصوص تجمع آلاینده‌ها و اثر آن‌ها بر غلظت کراتینین خون افراد بیمار در اختیار قرار می‌دهد، اما توجه به سایر عوامل محیطی مانند شعاع حرکتی هر فرد در سطح شهر، نوع و محل فعالیت روزانه و خصوصیات فردی می‌تواند بخش زیادی از عدم قطعیت در مورد یافته‌های این تحقیق را برطرف کند.

References

- Ahn, H., Lee, J., & Hong, A. (2022). Urban Form And Air Pollution: Clustering Patterns of Urban form Factors Related to Particulate Matter in Seoul, Korea. *Sustainable Cities and Society*, 81, 103859.
- Almetwally, A. A., Bin-Jumah, M., & Allam, A. A. (2020). Ambient Air Pollution and Its Influence on Human Health and Welfare: an Overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 24815-24830.

- Ayoobi, A. W., Ahmadi, H., Inceoglu, M., & Pekkan, E. (2022). Seasonal Impacts of Buildings' Energy Consumption on the Variation and Spatial Distribution of Air Pollutant over Kabul City: Application of Sentinel—5P TROPOMI Products. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 15(1), 73-83.
- Bowe, B., Xie, Y., Yan, Y., Xian, H., & Al-Aly, Z. (2020). Diabetes Minimally Mediated the Association Between PM_{2.5} Air Pollution and Kidney Outcomes. *Scientific Reports*, 10(1), 4586.
- Brück, K., Stel, V. S., Gambaro, G., Hallan, S., Völzke, H., Ärnlöv, J., Kastarinen, M., Guessous, I., Vinhas, J., Stengel, B., & Brenner, H. (2016). CKD Prevalence Varies Across the European General Population. *Journal of The American Society of Nephrology*, 27(7), 2135-2147.
- Charles, C., & Ferris, A. H. (2020). Chronic Kidney Disease. *Primary Care: Clinics in Office Practice*, 47(4), 585-595.
- Chen, Y., Cao, F., Xiao, J. P., Fang, X. Y., Wang, X. R., Ding, L. H., & Pan, H. F. (2021). Emerging Role of Air Pollution in Chronic Kidney Disease. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(38), 52610-52624.
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The Coefficient of Determination R-Squared Is More Informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in Regression Analysis Evaluation. *Peerj Computer Science*, 7, E623.
- Daraei, H., Toolabian, K., Kazempour, M., & Javanbakht, M. (2020). The Role of the Environment and Its Pollution in the Prevalence of COVID-19. *Journal of Infection*, 81(2), E168-E169.
- Diener, A., & Mudu, P. (2021). 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*, 796, 148605.
- Ghasempour, F., Sekertekin, A., & Kutoglu, S. H. (2021). Google Earth Engine based Spatio-Temporal Analysis of Air Pollutants before and During the First Wave COVID-19 Outbreak over Turkey Via Remote Sensing. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128599.
- Guo, H., Chang, Z., Wu, J., & Li, W. (2019). Air Pollution and Lung Cancer Incidence in China: Who Are Faced With a Greater Effect?. *Environment International*, 132, 105077.
- Hajizadeh, Y., Jafari, N., Fanaei, F., Ghanbari, R., Mohammadi, A., Behnami, A., ... & Abdollahnejad, A. (2021). Spatial Patterns and Temporal Variations of Traffic-Related Air Pollutants and Estimating Its Health Effects in Isfahan City, Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19, 781-791.
- Hsu, S., Bi, J., & De Boer, I. H. (2023). Invited Perspective: Still Hazy? Air Pollution and Acute Kidney Injury. *Environmental Health Perspectives*, 131(4), 041302.
- Jeong, S.-M., Park, J.-H., Kim, H.-J., Kwon, H., & Hwang, S. E. (2020). Effects of Abdominal Obesity on the Association between Air Pollution and Kidney Function. *International Journal of Obesity*, 44(7), 1568-1576.
- Kang, J., Zhang, B., Zhang, J., & Dang, A. (2023). Quantifying the Effects of Different Containment Policies on Urban NO₂ Decline: Evidence from Remote Sensing and Ground-Station Data. *Remote Sensing*, 15(4), 1068.
- Kaplan, G., Avdan, Z. Y., & Avdan, U. (2019). Spaceborne Nitrogen Dioxide Observations from the Sentinel-5P TROPOMI over Turkey. in *International Electronic Conference on Remote Sensing* (P. 4). MDPI.
- Lee, W., Wu, X., Heo, S., Kim, J. M., Fong, K. C., Son, J. Y., ... & Bell, M. L. (2023). Air Pollution and Acute Kidney Injury in the US Medicare Population: A Longitudinal Cohort Study. *Environmental Health Perspectives*, 131(4), 047008.
- Liang, Z., Wang, W., Wang, Y., Ma, L., Liang, C., Li, P., ... & Zhang, L. (2021). Urbanization, Ambient Air Pollution, And Prevalence of Chronic Kidney Disease: A Nationwide Cross-Sectional Study. *Environment International*, 156, 106752.
- Mahpour, A., & El-Diraby, T. (2021). Incorporating Climate Change in Pavement Maintenance Policies: Application to Temperature Rise in the Isfahan County, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 71, 102960.

- Mckinley, J., Mueller, U., Atkinson, P., Ofterdinger, U., Cox, S., Doherty, R., ... & Pawlowsky-Glahn, V. (2021, June). Exploring the Effects of Environmental Toxins from Air Pollution on Chronic Kidney Disease. in *Geoenv2020*.
- Paoin, K., Ueda, K., Vathesatogkit, P., Ingviya, T., Buya, S., Dejchanchaiwong, R., ... & Tekasakul, P. (2022). Long-Term Air Pollution Exposure and Decreased Kidney Function: A Longitudinal Cohort Study in Bangkok Metropolitan Region, Thailand from 2002 To 2012. *Chemosphere*, 287, 132117.
- Pathakoti M., Muppalla A., Hazra S., Dangeti M., Shekhar R., Jella S., Mullapudi S.S., Andugulapati P., Vijayasundaram U. (2020). An assessment of the impact of a nation-wide lockdown on air pollution – a remote sensing perspective over India. *Atmos. Chem. Phys.* doi: 10.5194/acp-2020-621.
- Pourmohammadi, S., Lotfi, A., & Alranaee, M. (2022). Investigating the Effects of Land Changes on Some Pollutants in the Mahshahr Industrial Zone Using Remote Sensing and Analysis of Variance (ANOVA) Images. *Geography and Environmental Planning*, 33(4), 79-96. Doi: 10.22108/Gep.2022.133195.1510. [In Persian]
- Shahne, M. Z., Noori, A., & Attar, M. A. (2023). Investigation of Air Pollution During COVID-19 Pandemic Using Satellite and on-Site Measurement Data in Six Provinces in Iran. available at Research Square [https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2692377/v1] [In Persian]
- Shogrkhodaei, Z., Fathnia, A., & Razavi Termeh, V. (2022). Relationship between Covid-19 and Changes in Air Pollutants Using Satellite Imagery (Case Study: Tehran, Isfahan and Mashhad Metropolises). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 9 (1): 21-40. [In Persian]
- Razavi Termeh, V. (2022). Relationship between Covid-19 and Changes in Air Pollutants Using Satellite Imagery (Case Study: Tehran, Isfahan and Mashhad Metropolises). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 9(1), 21-40.
- Shubham, S., Kumar, M., Sarma, D. K., Kumawat, M., Verma, V., Samartha, R., & Tiwari, R. (2022). Role of Air Pollution in Chronic Kidney Disease: An Update on Evidence, Mechanisms and Mitigation Strategies. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 95(5), 897-908.
- Tran, V. V., Park, D., & Lee, Y.-C. (2020). Indoor Air Pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2927.
- Wei, J., Li, Z., Lyapustin, A., Sun, L., Peng, Y., Xue, W., ... & Cribb, M. (2021). Reconstructing 1-Km-Resolution High-Quality PM_{2.5} Data Records From 2000 to 2018 in China: Spatiotemporal Variations and Policy Implications. *Remote Sensing of Environment*, 252, 112136.
- Zaporozhets, A. O., & Khaidurov, V. V. (2020). Mathematical Models of Inverse Problems for Finding the Main Characteristics of Air Pollution Sources. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(12), 563.