



Health risk assessment of Formaldehyde in Tehran's air using Remote Sensing Data

Mosayeb Kalvandi¹ | Amirarsalan Pardakhti² | Aziz Azizpour³ | Mohammad Naji⁴

1. Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mosayeb.kalvandi@ut.ac.ir

2. Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: ars_pardakhti@alumni.ut.ac.ir

3. Corresponding Author, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: aziz.azizpour@ut.ac.ir

4. Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran. E-mail: mo_naji@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 06 May 2026

Received in revised form 07

July 2026

Accepted 14 July 2026

Keywords:

Carcinogenic risk assessment,

Chronic daily intake,

Secondary pollutant,

Volatile organic compounds.

ABSTRACT

Formaldehyde (HCHO) is a toxic volatile organic compound (VOC) and a Group 1 human carcinogen. In the Tehran metropolitan area, rapid urbanization, heavy traffic, and substantial emissions of photochemical precursors contribute to elevated levels of reactive carbon compounds. Nevertheless, long-term urban-scale assessments of ambient formaldehyde and its associated health impacts remain limited. This study investigated tropospheric formaldehyde over Tehran during 2020–2023 using TROPOMI observations from the Sentinel-5P satellite, with all data processing conducted on the Google Earth Engine platform. After applying quality assurance filters, daily observations were aggregated to generate monthly, seasonal, and annual averages. Tropospheric vertical column densities were converted to near-surface concentrations using ERA5 planetary boundary layer height data. Human health risk was assessed by estimating chronic daily intake (CDI) and excess lifetime cancer risk (ELCR) following the RAIS/U.S. EPA framework, using an inhalation unit risk (IUR) of $1.3 \times 10^{-5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$. In addition, spatial hotspots were identified using the Getis-Ord G_i^* statistic. The screening-level estimates indicated that monthly near-surface HCHO concentrations ranged from 2.7 to 9.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, whereas annual mean concentrations varied between 5.6 and 6.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, with persistent pollution hotspots located in central and northeastern Tehran. Seasonal analysis revealed maximum concentrations during summer, coinciding with intensified photochemical oxidation of volatile organic compounds. Estimated CDI values ranged from 0.00077 to 0.00257 $\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$, while annual ELCR values ranged from 7.28×10^{-5} to 8.00×10^{-5} , remaining near the upper bound of the U.S. EPA acceptable risk range (10^{-6} – 10^{-4}). The corresponding population-equivalent lifetime cancer burden was estimated at approximately 633–695 excess cancer cases among Tehran's 8.69 million inhabitants. These findings indicate a moderate yet meaningful screening-level cancer risk and demonstrate the utility of a satellite-based approach for assessing formaldehyde exposure and associated health risks in urban areas lacking continuous ground-based monitoring.

Cite this article: Kalvandi, M., Pardakhti, A., Azizpour, A. & Naji, M. (2026). Health risk assessment of Formaldehyde in Tehran's air using Remote Sensing Data. *Journal of Natural Environment*, 79 (3), 531-545. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.413913.2914>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Formaldehyde (HCHO) is a highly reactive volatile organic compound and an important carbonyl species in the lower atmosphere. It is classified as a Group 1 human carcinogen and is associated with respiratory irritation, reduced lung function, and increased cancer risk. Atmospheric HCHO originates from both primary emissions and secondary photochemical production through oxidation of anthropogenic and biogenic volatile organic compounds. Tehran provides an important case for studying ambient HCHO because of its high population density, heavy traffic, fossil-fuel consumption, industrial activities, and semi-enclosed topography, which can restrict pollutant dispersion. Previous field studies in Tehran have generally been limited in spatial and temporal coverage. Therefore, this study investigated the spatial and temporal variability of tropospheric HCHO over Tehran during 2020–2023 and estimated screening-level health risks associated with long-term exposure to near-surface HCHO.

Material and Methods

Tropospheric HCHO vertical column densities were obtained from the Sentinel-5P/TROPOMI offline HCHO product for January 2020 to December 2023 and processed in Google Earth Engine. Pixels with a quality assurance value of at least 0.5 were retained, and daily observations were aggregated to monthly, seasonal, and annual scales. Because TROPOMI provides column densities rather than direct surface concentrations, HCHO columns were converted to screening-level near-surface mass concentrations using planetary boundary layer height (PBLH) from ERA5, assuming simplified uniform mixing within the boundary layer. Monthly ERA5 PBLH values were used, together with 2-m air temperature, 10-m wind speed, total precipitation, and surface pressure. Monthly, seasonal, and annual HCHO maps were generated without spatial interpolation. Spatial hot and cold spots were identified using the Getis-Ord G_i^* statistic at the 90%, 95%, and 99% confidence levels. Relationships between HCHO and meteorological variables were evaluated using 48 monthly observations. Pearson correlation analysis was followed by multiple linear regression to assess the contribution of temperature, wind speed, precipitation, and surface pressure to monthly HCHO variability. For health risk assessment, chronic daily intake (CDI) and excess lifetime cancer risk (ELCR) were calculated using the RAIS/U.S. EPA inhalation risk assessment framework. A lifetime exposure scenario was considered, and ELCR was estimated using an inhalation unit risk of $1.3 \times 10^{-5} \text{ (}\mu\text{g/m}^3\text{)}^{-1}$. Because long-term, co-located ground-based HCHO measurements were unavailable in Tehran, the satellite-derived estimates were interpreted as screening-level values. Uncertainty was partly addressed by testing mixing heights of 800, 1000, and 1200 m and applying $\pm 30\%$ uncertainty to satellite-derived HCHO concentrations.

Results

Results

The four-year mean distribution showed persistent higher HCHO values in central and northeastern Tehran and lower values in southern areas. Getis-Ord G_i^* analysis confirmed statistically significant hot spots in the central and northeastern sectors and cold spots in the south. Seasonal variability was also pronounced: HCHO concentrations were highest in summer and lowest in winter, consistent with stronger photochemical oxidation of volatile organic compounds during warmer and sunnier periods. Annual mean screening-level near-surface HCHO concentrations ranged from 5.6 to 6.15 $\mu\text{g/m}^3$ during 2020–2023, while monthly concentrations ranged from 2.7 to 9.0 $\mu\text{g/m}^3$. CDI values ranged from 0.00077 to 0.00257 mg/kg/day, and annual ELCR values ranged from 7.28×10^{-5} to 8.00×10^{-5} . These estimates fall within the commonly used U.S. EPA cancer risk range of 10^{-6} to 10^{-4} , but near its upper bound. For a population of approximately 8.69 million, the corresponding population-equivalent lifetime cancer burden was estimated at about 633–695 cases. These values should be interpreted as screening indicators for population-level prioritization rather than exact predictions of individual cancer cases. Meteorological analysis showed that temperature had the strongest positive relationship with HCHO, whereas wind speed had a significant negative relationship. The multiple regression model explained a substantial portion of monthly variability, with temperature and wind speed emerging as the dominant meteorological controls. These findings support the combined role of enhanced photochemical production and atmospheric dispersion in controlling HCHO variability in Tehran.

Discussion and Conclusion

Sentinel-5P/TROPOMI observations combined with ERA5 reanalysis provide a useful complementary approach for screening-level assessment of HCHO pollution in data-limited urban environments. Persistent hot spots in central and northeastern Tehran, together with the summer maximum, indicate areas and periods that warrant greater attention in air-quality management. The estimated CDI and ELCR values further suggest that long-term ambient HCHO exposure should be considered in public-health planning. However, TROPOMI measures tropospheric columns rather than direct ground-level concentrations, and conversion to near-surface concentrations depends on assumptions about vertical mixing and PBLH. The absence of long-term local monitoring also limits direct validation. Future studies should combine satellite observations with ground-based measurements and chemical transport modeling to improve local validation, surface-concentration estimates, and source attribution.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

CRedit authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

ارزیابی ریسک سلامت فرمالدئید در هوای تهران با بهره‌گیری از داده‌های سنجش‌ازدور

مسئب کلوندی^۱ | امیرارسلان پرداختی^۲ | عزیز عزیزپور^۳ | محمد ناجی^۴

۱. گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mosayeb.kalvandi@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ars_pardakhti@alumni.ut.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: aziz.azizpour@ut.ac.ir

۴. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: mo_naji@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۳ کلیدواژه‌ها: آلاینده ثانویه، ارزیابی خطر سرطان‌زایی، ترکیبات آلی فرار، مصرف مزمن روزانه.	فرمالدئید یک ترکیب آلی فرار، سمی و از عوامل سرطان‌زای گروه ۱ برای انسان است. در کلانشهر تهران، به دلیل شهرنشینی سریع، ترافیک سنگین و انتشار بالای پیش‌سازهای فتوشیمیایی، سطوح قابل‌توجهی از ترکیبات کربن واکنش‌پذیر مشاهده می‌شود. با این حال، ارزیابی‌های بلندمدت شهری درباره فرمالدئید محیطی و پیامدهای سلامت آن محدود بوده است. در این مطالعه، تغییرات فرمالدئید تروپوسفری تهران طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های ماهواره TROPOMI و Sentinel-5P بررسی شد و پردازش داده‌ها در بستر گوگل ارث انجین صورت گرفت. پس از اعمال فیلتر کیفیت، داده‌های روزانه برای تولید میانگین‌های ماهانه، فصلی و سالانه. چگالی ستون تروپوسفری با بهره‌گیری از ارتفاع لایه مرزی سیارهای ERA5 به غلظت نزدیک سطح تبدیل شد. برای ارزیابی خطر سلامت، مصرف مزمن روزانه (CDI) و ریسک سرطان اضافی مادام‌العمر (ELCR) براساس چارچوب RAIS/U.S. EPA محاسبه شد و از عامل خطر استنشاقی IUR برابر با $10^{-5} \times 1/3$ با واحد عکس میکرو گرم بر مترمکعب استفاده گردید. همچنین، نقاط داغ مکانی با آماره Getis-Ord Gi* شناسایی شدند. برآوردهای غربالگری سطح غلظت نزدیک سطح HCHO در تهران نشان داد که دامنه غلظت ماهانه بین $2/7$ تا $9/0$ میکرو گرم بر مترمکعب متغیر بود، در حالی که میانگین سالانه بین $5/6-6/15$ میکرو گرم بر مترمکعب قرار داشت و کانون‌های پایدار آلودگی در مرکز و شمال شرق تهران قرار دارند. بیشینه فصلی در تابستان و همزمان با تشدید اکسیداسیون فتوشیمیایی ترکیبات آلی فرار رخ داد. مقادیر CDI بین $0/00257-0/0077$ میلی گرم بر کیلوگرم در روز و ELCR سالانه $7/28 \times 10^{-5}$ تا $8/00 \times 10^{-5}$ برآورد شد که در کرانه بالایی دامنه معیار U.S. EPA ($10^{-6}-10^{-4}$) قرار دارد. معادل جمعیتی خطر سرطان مادام‌العمر حدود 633 تا 695 مورد در جمعیت $8/69$ میلیونی برآورد شد. این نتایج بیانگر خطر غربالگری متوسط اما معنی‌دار بوده و کارایی رویکرد ماهواره‌مبنای را در شهرهای فاقد پایش پیوسته زمینی نشان می‌دهد.

استاد: کلوندی، مسیب؛ پرداختی، امیر ارسلان؛ عزیزپور، عزیز؛ و ناجی، محمد؛ (۱۴۰۵). ارزیابی ریسک سلامت فرمالدئید در هوای تهران با بهره‌گیری از داده‌های سنجش‌ازدور. محیط زیست طبیعی، ۷۹ (۳)، ۵۴۵-۵۳۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.413913.2914>



مقدمه

آلودگی هوای محیط به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی عصر حاضر، نقش عمده‌ای در بروز مرگ‌ومیر زودرس در سراسر جهان ایفا می‌کند. رشد سریع شهرنشینی، تمرکز جمعیتی و اتکای گسترده به سوخت‌های فسیلی موجب شده است که ترکیبات آلی فرار (VOCs) و سایر آلاینده‌های واکنش‌پذیر به سطوح نگران‌کننده برسند. ارزیابی‌های جهانی نشان می‌دهد سالانه حدود ۶ تا ۷ میلیون مرگ زودرس به آلودگی هوا نسبت داده می‌شود و سهم قابل‌توجهی از آن مربوط به بیماری‌های قلبی-عروقی، تنفسی و سرطان است (Ghoshua et al., 2022). در میان انواع VOC، فرمالدئید^۲ (HCHO) جایگاه ویژه‌ای دارد. این گاز بسیار واکنش‌پذیر، سرطان‌زا (گروه ۱ طبق IARC) و فراگیر است که هم از منابع اولیه و هم از فرآیندهای ثانویه اتمسفری منشأ می‌گیرد. منابع اولیه آن شامل آگروز و وسایل نقلیه، فعالیت‌های صنعتی، احتراق سوخت‌های فسیلی، پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها، سوزاندن زیست‌توده و آتش‌سوزی‌های جنگلی است. افزون بر این، بخش مهمی از فرمالدئید اتمسفری از اکسیداسیون فتوشیمیایی ترکیبات آلی فرار انسان‌ساخت و زیستی در جو تولید می‌شود (Rana et al., 2019). فرمالدئید علاوه بر سمیت مستقیم، در شیمی جو نیز نقش مهمی دارد و در تشکیل ازن تروپوسفری، مه‌دود فتوشیمیایی و ذرات معلق آلی ثانویه مشارکت می‌کند؛ از این رو به‌عنوان شاخصی برای سنجش میزان اکسیداسیون VOCهای غیرمتان و شدت فعالیت‌های فتوشیمیایی در جو شناخته می‌شود (Mo et al., 2024; Barrese et al., 2024). مواجهه استنشاقی طولانی‌مدت با فرمالدئید می‌تواند موجب تحریک چشم و دستگاه تنفسی فوقانی، اختلالات تنفسی، تشدید آسم، کاهش عملکرد ریه و افزایش خطر سرطان‌های نازوفارنکس و مجاری تنفسی شود. شواهد اخیر همچنین نشان می‌دهد که مواجهه در محیط‌های داخلی مسکونی و کاری سهم قابل‌توجهی در بار بیماری‌های مرتبط با این ترکیب دارد. اگرچه معمولاً غلظت فرمالدئید در محیط‌های داخلی به دلیل انتشار از مصالح ساختمانی، مبلمان، فرآورده‌های چوبی و منابع احتراقی بیشتر از محیط بیرونی است، اما فرمالدئید موجود در هوای بیرونی نیز اهمیت زیادی دارد؛ زیرا علاوه بر مشارکت در فرآیندهای فتوشیمیایی جو، می‌تواند از طریق نفوذ به ساختمان‌ها، به‌ویژه در فضاهای با تهویه طبیعی، در غلظت‌های داخلی نیز نقش مؤثری داشته باشد (Harkey et al., 2021; Gao et al., 2025). در کلانشهر تهران، با جمعیتی بیش از ۸ میلیون نفر و قرارگیری در یک حوضه محصور در دامنه‌های البرز، شرایط جوی نامساعد، وارونگی‌های دما، ترافیک سنگین و فعالیت‌های صنعتی زمینه‌ساز دوره‌های آلودگی شدید هستند. مطالعات پیشین سطوح بالای VOCها از جمله فرمالدئید را در ریزمحیط‌های مختلف شهری مانند جاده‌های اصلی، پایانه‌های حمل‌ونقل و محیط‌های داخلی گزارش کرده‌اند. با این حال، این تحقیقات عمدتاً مبتنی بر داده‌های پراکنده و کوتاه‌مدت بوده و فاقد پوشش مکانی-زمانی گسترده در مقیاس کلانشهر هستند؛ در نتیجه، ارزیابی‌های جامع از تغییرات مکانی، روندهای زمانی و پیامدهای سلامت ناشی از فرمالدئید محیطی هنوز محدود باقی مانده است (Dehghani et al., 2017). در سال‌های اخیر، سنجش‌ازدور ماهواره‌ای به‌ویژه با مأموریت Sentinel-5P و ابزار TROPOMI^۳ به یک منبع ارزشمند برای پایش آلاینده‌های تروپوسفری تبدیل شده است. TROPOMI با وضوح مکانی بالا (حدود ۳/۵×۵/۵ کیلومتر) و پوشش روزانه جهانی، امکان بررسی دقیق الگوهای مکانی-زمانی آلاینده‌هایی همچون NO₂، SO₂، CO و فرمالدئید را فراهم کرده است. داده‌های HCHO این ابزار در مطالعات جهانی برای شناسایی نقاط داغ آلودگی، بررسی چرخه‌های فصلی، تحلیل منابع انسانی و زیستی و ترکیب با اندازه‌گیری‌های زمینی جهت تخمین غلظت نزدیک سطح به‌کار رفته‌اند (Maurya et al., 2022). با وجود این ظرفیت‌ها، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای تخمین خطرات سلامت ناشی از مواجهه با فرمالدئید تروپوسفری در منطقه خاورمیانه، به‌ویژه در کلانشهرهایی مانند تهران، هنوز محدود است. چارچوب‌های ارزیابی خطر سلامت نظیر RAIS/U.S. EPA، ابزارهای استاندارد برای محاسبه مصرف مزمن روزانه (CDI^۴) و خطر سرطان مادام‌العمر (ELCR^۵) با تکیه بر عوامل خطر واحد استنشاقی و داده‌های سم‌شناسی ارائه می‌دهند (Bhat et al., 2023). اگرچه این روش‌ها به‌طور گسترده برای محیط‌های داخلی و نقاط آلاینده محلی استفاده شده‌اند، اما ادغام آنها با داده‌های ماهواره‌ای در مقیاس شهری نوآوری مهمی محسوب می‌شود.

^۱Volatile Organic Compounds^۲Formaldehyde^۳Tropospheric Monitoring Instrument^۴Chronic Daily Intake^۵Excess Lifetime Cancer Risk

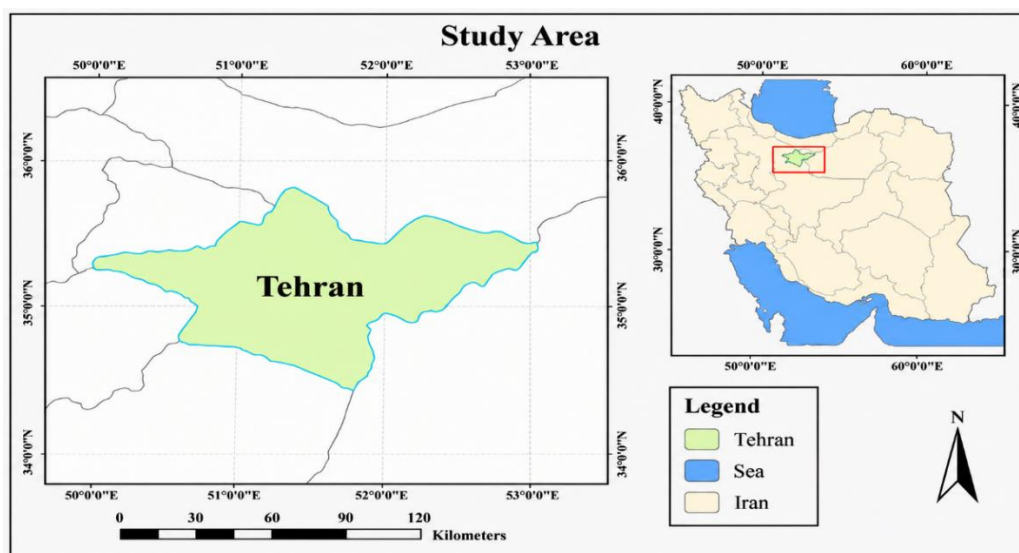
بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف بررسی تغییرات مکانی و زمانی فرمالدئید تروپوسفری بر فراز تهران طی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های TROPOMI در بستر گوگل ارث انجین، تبدیل ستون‌های فرمالدئید به غلظت نزدیک سطح با بهره‌گیری از ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای (PBLH^۶) ERA5، و نهایتاً محاسبه شاخص‌های خطر سلامت در سطح غربالگری برای جمعیت شهری انجام شده است. این رویکرد امکان ارائه تصویری جامع، کمی و مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای از مواجهه فرمالدئید و پیامدهای آن را فراهم می‌کند و مکمل ارزشمندی برای پایش‌های زمینی محدود در تهران محسوب می‌شود. این مطالعه شواهد علمی اولیه‌ای را برای برنامه‌ریزی مدیریت کیفیت هوا، اولویت‌بندی مناطق پرخطر و هدایت سیاست‌گذاری‌های کاهش مواجهه فراهم می‌کند.

روش‌شناسی پژوهش

تهران (شکل ۱) در دامنه جنوبی رشته‌کوه البرز و در یک حوضه نیمه‌محصور قرار گرفته است. این موقعیت توپوگرافی، به‌ویژه در شرایط سکون جوی، پراکندگی آلاینده‌ها را محدود می‌کند. تمرکز بالای جمعیت، ترافیک سنگین، فعالیت‌های صنعتی و شرایط هواشناسی خاص، تهران را به منطقه‌ای مناسب برای مطالعه رفتار فضایی و زمانی فرمالدئید اتمسفری تبدیل کرده است (Abbasi et al., 2024).

چگالی ستون تروپوسفری فرمالدئید از ابزار پایش تروپوسفری TROPOMI، نصب‌شده بر روی ماهواره Sentinel-5 Precursor، با استفاده از محصول HCHO_OFFL استخراج شد. داده‌های مربوط به بازه زمانی ژانویه ۲۰۲۰ تا دسامبر ۲۰۲۳ دریافت و در محیط گوگل ارث انجین (GEE^۷) پردازش شدند. برای افزایش قابلیت اعتماد داده‌ها، تنها پیکسل‌هایی با مقدار تضمین کیفیت برابر یا بزرگ‌تر از ۰/۵ مورد استفاده قرار گرفتند. مشاهدات روزانه ابتدا موزائیک شدند و سپس به ترکیب‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه تبدیل شدند. تمامی مراحل پردازش شامل فیلترسازی کیفی، تجمیع زمانی و محاسبه میانگین‌ها در محیط GEE انجام شد. محصول TROPOMI، چگالی ستون تروپوسفری فرمالدئید را با واحد مول بر مترمربع ارائه می‌کند.

برای استفاده از این داده‌ها در ارزیابی غربالگری خطر سلامت، مقادیر ستونی به غلظت جرمی برآوردی نزدیک سطح با واحد میکروگرم بر مترمکعب تبدیل شدند. این تبدیل با استفاده از PBLH-ERA5 انجام شد و بر فرض ساده شده اختلاط یکنواخت فرمالدئید درون لایه مرزی سیاره‌ای استوار بود (Li et al., 2025). رابطه مورد استفاده برای برآورد غلظت نزدیک سطح به صورت رابطه ۱ است.



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه و محدوده شهر تهران

Figure 1. Geographical location map of the study area and the boundary of Tehran City

^۶Planetary Boundary Layer Height

^۷Google Earth Engine

$$C_{\text{surf}} = \frac{V_{\text{CHCHO}} \times MW_{\text{HCHO}} \times 10^6}{H} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه، C_{surf} بیانگر غلظت برآوردی نزدیک سطح فرمالدئید در سطح غربالگری با واحد میکرو گرم بر مترمکعب است. V_{CHCHO} چگالی ستون عمودی تروپوسفری فرمالدئید حاصل از TROPOMI با واحد مول بر مترمربع، MW_{HCHO} جرم مولکولی فرمالدئید برابر با ۳۰/۰۳ گرم بر مول و H ارتفاع اختلاط با واحد متر است. در این پژوهش، H با استفاده از متغیر ارتفاع PBLH از مجموعه داده بازتحلیل ERA5 تقریب زده شد. ERA5 یک محصول بازتحلیل جهانی است که با همگون‌سازی داده‌های مشاهده‌ای و مدل‌های عددی تولید می‌شود و به‌طور گسترده در مطالعات جوی برای برآورد متغیرهای هواشناسی استفاده شده است (Hersbach et al., 2020). از آنجا که هدف این مطالعه ارزیابی عملکرد ERA5 نبود، از نسخه استاندارد این محصول استفاده شد و صحت‌سنجی مستقل آن در تهران انجام نشد؛ با این حال، اثر عدم قطعیت ارتفاع اختلاط در قالب تحلیل حساسیت ارتفاع‌های ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ متر بررسی شد. برای برآورد غلظت نزدیک سطح، از مقادیر ماهانه ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای ERA5 استفاده شد. مقادیر حاصل به‌عنوان برآوردهای غربالگری غلظت نزدیک سطح تفسیر شدند. پارامترهای هواشناسی مؤثر بر تشکیل، تجمع و پراکنش فرمالدئید از مجموعه داده بازتحلیل ERA5 با تفکیک‌پذیری مکانی $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ استخراج شدند. متغیرهای مورد استفاده شامل میانگین ماهانه دمای ۲ متری، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر، بارش کل، فشار سطحی و ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای بودند. این داده‌ها برای بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ استخراج و از نظر مکانی با شبکه داده‌های TROPOMI هم‌مکان‌سازی شدند (Copernicus Climate Change Service, 2025). متغیرهای هواشناسی استخراج‌شده در مراحل بعدی برای تحلیل همبستگی و مدل‌سازی رگرسیونی به‌کار رفتند تا نقش شرایط هواشناسی در تغییرپذیری زمانی و مکانی HCHO جو در تهران بررسی شود. نقشه‌های ماهانه، فصلی و سالانه به‌صورت مستقیم براساس داده‌های شبکه‌بندی‌شده TROPOMI و بدون اعمال هرگونه درون‌یابی تهیه شدند. تمامی نقشه‌ها در ArcGIS و با حفظ ساختار اصلی داده‌های TROPOMI تهیه شدند. برای شناسایی الگوهای خوشه‌بندی مکانی و تعیین نقاط داغ و سرد از آماره *Getis-Ord Gi در سطوح اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد استفاده شد (Getis and Ord, 1992). محصول HCHO سنجنده TROPOMI در مطالعات بین‌المللی با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی FTIR و MAX-DOAS ارزیابی و اعتبارسنجی شده است (De Smedt et al., 2021). با این حال، در محدوده تهران داده‌های زمینی پیوسته، همزمان و هم‌مکان برای اندازه‌گیری فرمالدئید در دسترس نبود. بنابراین، در این پژوهش صحت‌سنجی محلی مستقیم انجام نشد. از این‌رو، محصول اصلی TROPOMI بدون کالیبراسیون محلی استفاده شد و نتایج حاصل به‌عنوان برآوردهای غربالگری برای تحلیل مکانی-زمانی HCHO و ارزیابی اولیه خطر سلامت در مقیاس شهری تفسیر شدند (Vigouroux et al., 2020). برای کاهش ابهام ناشی از این محدودیت، مقادیر برآوردی از نظر مرتبه بزرگی با دامنه‌های گزارش‌شده در مطالعات میدانی پیشین تهران مقایسه شدند (Salari et al., 2016; Dehghani et al., 2017; Eslami et al., 2019). و عدم قطعیت بازایی ماهواره‌ای نیز در قالب تحلیل حساسیت لحاظ گردید (Rana et al., 2019). برای بررسی رابطه بین غلظت‌های HCHO و پارامترهای هواشناسی، از مقادیر میانگین ماهانه برای دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. در مجموع، این دوره شامل ۴۸ مشاهده ماهانه بود (جدول ۱). ابتدا ضرایب همبستگی پیرسون محاسبه شدند تا شدت و جهت روابط خطی دوجانبه بین HCHO و متغیرهای هواشناسی ارزیابی شود. در مرحله بعد، یک مدل رگرسیون خطی چندگانه برازش شد. در این مدل، شاخص ماهانه HCHO نزدیک سطح در سطح غربالگری به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد و متغیرهای دما، سرعت باد، بارش و فشار سطحی به‌عنوان متغیرهای مستقل وارد مدل شدند. عملکرد مدل با استفاده از ضریب تعیین، ضرایب رگرسیون، آماره‌های t و مقادیر p ارزیابی شد. سطح معنی‌داری آماری برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. برای بررسی احتمال هم‌خطی چندگانه میان متغیرهای پیش‌بین، فاکتور تورم واریانس محاسبه و بررسی شد. همچنین، تشخیص‌های باقیمانده شامل بررسی بصری نرمال‌بودن باقیمانده‌ها و همسانی واریانس انجام گرفت تا کفایت مدل خطی ارزیابی شود. تحلیل رگرسیونی در این مطالعه با هدف بررسی اکتشافی کنترل‌های هواشناسی بر تغییرپذیری ماهانه HCHO انجام شد. بنابراین، این مدل به‌عنوان یک ابزار تبیینی برای درک روابط آماری میان HCHO و متغیرهای هواشناسی به‌کار رفت.

ارزیابی خطر سلامت بر پایه سیستم اطلاعات ارزیابی خطر و چارچوب استنشاقی U.S. EPA انجام شد. در این چارچوب، مصرف مزمن روزانه از طریق استنشاق براساس غلظت HCHO، نرخ تنفس، مدت مواجهه، وزن بدن و زمان میانگین گیری به صورت رابطه ۲ محاسبه می شود.

$$CDI = \frac{C \times BR \times ED}{BW \times AT} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه، CDI مصرف مزمن روزانه از طریق استنشاق است. C غلظت فرمالدئید نزدیک سطح با واحد میکروگرم بر متر مکعب، BR نرخ استنشاق برابر با ۲۰ متر مکعب بر روز، ED مدت مواجهه، BW وزن بدن برابر با ۷۰ کیلوگرم و AT زمان میانگین گیری برحسب روز است.

براساس راهنمای ارزیابی خطر سلامت آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده، زمان میانگین گیری مواجهه بسته به نوع پیامد سلامت تعیین می شود؛ به گونه ای که برای اثرات غیر سرطان زا معمولاً برابر با دوره مواجهه و برای اثرات سرطان زا برابر با طول عمر در نظر گرفته می شود (Paustenbach, 2000). در این مطالعه، تمرکز اصلی بر خطر سرطان زایی ناشی از مواجهه بلندمدت محیطی بود. بنابراین، برای مقادیر CDI گزارش شده و مورد استفاده در تفسیر مواجهه جمعیتی، سناریوی مواجهه مادام العمر در نظر گرفته شد. در این سناریو فرض شد که ساکنان به طور پیوسته طی ۷۰ سال (۲۵۵۵۰ روز) در معرض HCHO محیطی قرار دارند. بر این اساس، مدت مواجهه و زمان میانگین گیری برابر در نظر گرفته شدند. در نتیجه، نسبت ED/AT برابر با ۱ می شود و رابطه عملی محاسبه CDI به شکل ساده شده به صورت رابطه ۳ تبدیل می شود.

$$CDI = \frac{C \times BR}{BW} \quad (\text{رابطه ۳})$$

با این حال، فرم کامل رابطه RAIS در این مطالعه حفظ شد تا هم سازگاری با نمادگذاری استاندارد ارزیابی خطر رعایت شود و هم امکان استفاده از مقادیر جایگزین مدت مواجهه در تحلیل های سناریویی آینده وجود داشته باشد. در این پژوهش، CDI به عنوان یک شاخص مواجهه استنشاقی نرمال شده برحسب غلظت گزارش شد تا شدت مواجهه بلندمدت را تحت سناریوی مفروض مادام العمر توصیف کند. خطر سرطان اضافی مادام العمر به صورت جداگانه و با استفاده از رویکرد استاندارد خطر واحد استنشاقی برآورد شد. در این روش، ELCR مستقیماً از حاصل ضرب غلظت HCHO در مقدار خطر واحد استنشاقی به صورت رابطه ۴ محاسبه می شود.

$$ELCR = C \times IUR \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه، ELCR خطر سرطان اضافی مادام العمر، C غلظت HCHO نزدیک سطح در سطح غربالگری با واحد میکروگرم بر مترمکعب و IUR خطر واحد استنشاقی است. برای حفظ سازگاری واحدها با غلظت های استخراج شده از Sentinel-5P، در این مطالعه از مقدار حد پایین خطر واحد استنشاقی فرمالدئید در چارچوب RAIS/EPA استفاده شد.

$$IUR = 1/3 \times 10^{-5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1} = 1/5967 (\text{ppm})^{-1}$$

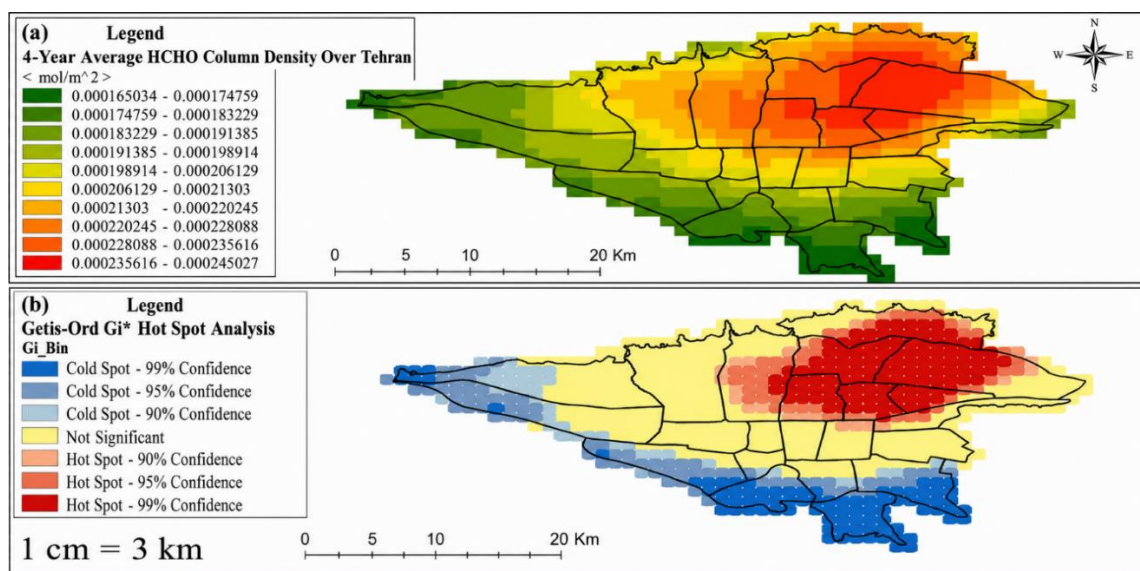
این مقدار برای ارزیابی های مواجهه بلندمدت محیطی و غیر شغلی مناسب است و بخش پایین دامنه عدم قطعیت RAIS را نشان می دهد. استفاده از این مقدار منجر به برآوردی نسبتاً محافظه کارانه از خطر در سناریوی مواجهه محیطی می شود. در مجموع، در این مطالعه CDI و ELCR دو هدف تفسیری مرتبط اما متمایز دارند. CDI برای توصیف شدت مواجهه استنشاقی بلندمدت استفاده شد، در حالی که ELCR برای برآورد مستقیم احتمال خطر سرطان اضافی مادام العمر بر پایه غلظت HCHO و خطر واحد استنشاقی به کار رفت.

برای ارائه حدود اطمینان واقع بینانه برای برآوردهای خطر سلامت، دو مؤلفه ساده عدم قطعیت ارزیابی شد. نخست، آزمون حساسیت ارتفاع اختلاط (۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ متر) برای کمی سازی این موضوع به کار رفت که عدم قطعیت های موجود در PBLH چگونه بر غلظت برآورد شده نزدیک سطح زمین و برآوردهای خطر اثر می گذارند. دوم، برای بررسی حساسیت نتایج نسبت به عدم قطعیت بازایی ماهواره ای، مقادیر HCHO در دو سناریوی $\pm 30\%$ تغییر داده شدند ($0.7 \times C$ و $1.3 \times C$). دامنه ۳۰ درصد براساس مطالعات اعتبارسنجی محصول HCHO سنجنده TROPOMI و عدم قطعیت های گزارش شده برای این محصول انتخاب

شد (Vigouroux *et al.*, 2020; De Smedt *et al.*, 2021). مقادیر متناظر CDI و ELCR برای این کران‌های پایین و بالا دوباره محاسبه شدند. در مجموع، این تحلیل‌ها به‌جای یک برآورد قطعی منفرد، بازه‌ای واقع‌بینانه از مقادیر بالقوه خطر را فراهم کردند. بر این اساس، مقادیر غلظت نزدیک سطح حاصل از تبدیل داده‌های ستونی TROPOMI در این مطالعه به‌عنوان نمایه‌های سطحی در سطح غربالگری تفسیر می‌شوند و نه اندازه‌گیری‌های مستقیم غلظت واقعی در سطح زمین. در نتیجه، شاخص‌های خطر سلامت محاسبه‌شده بر پایه این مقادیر، شامل مصرف مزمن روزانه از طریق استنشاق و خطر سرطان اضافی مادام‌العمر، نیز باید به‌عنوان برآوردهای غربالگری برای تحلیل اولیه مواجهه و خطر در مقیاس شهری در نظر گرفته شوند. این شاخص‌ها برای شناسایی الگوهای نسبی و اولویت‌بندی مکانی مناسب هستند، اما نمی‌توانند جایگزین سنجش‌های زمینی، برآوردهای فردمحور مواجهه یا ارزیابی‌های اپیدمیولوژیک دقیق شوند.

یافته‌های پژوهش

نقشه میانگین چهارساله HCHO (شکل ۲) نشان داد که بیشترین مقادیر در نواحی مرکزی و شمال‌شرقی تهران متمرکز است. این الگو می‌تواند با تراکم بالاتر ترافیک، فعالیت‌های شهری و انتقال غالب غرب به شرق مرتبط باشد. در مقابل، بخش‌های جنوبی شهر غلظت‌های کمتری را نشان دادند. تحلیل Getis-Ord Gi* نیز این الگو را تأیید کرد و خوشه‌های معنی‌دار نقاط داغ را در مرکز و شمال‌شرق و نقاط سرد را در جنوب شهر آشکار ساخت.

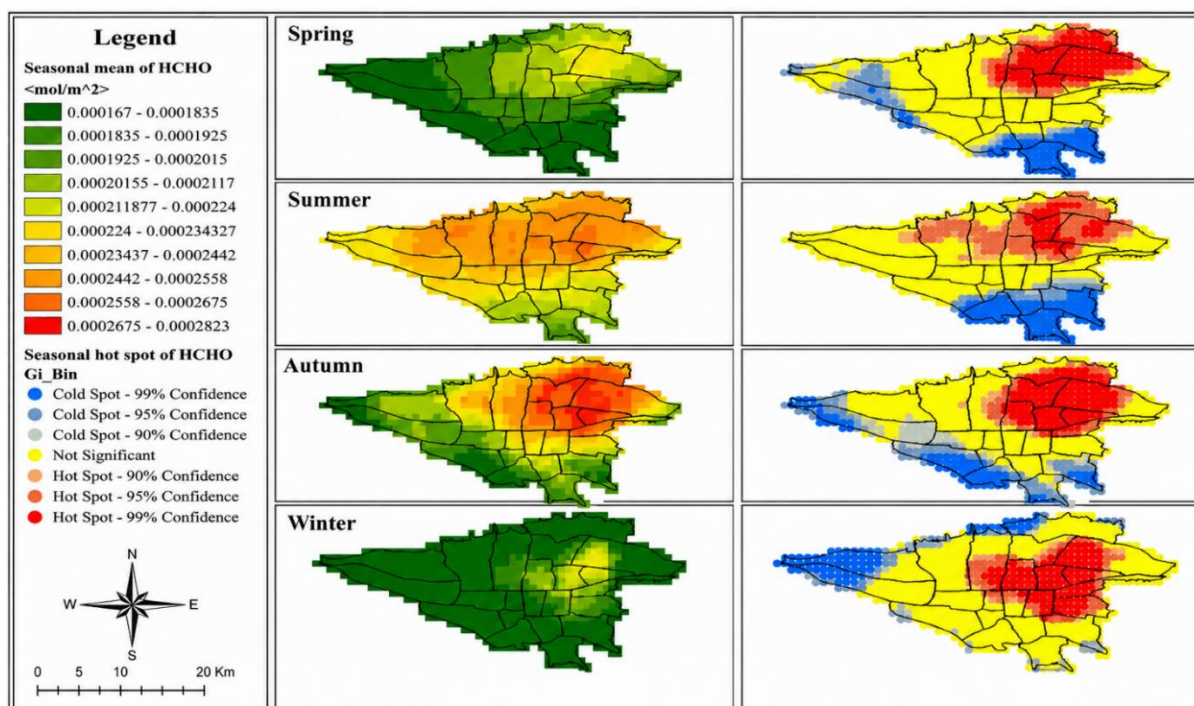


شکل ۲- (a) میانگین چهارساله چگالی ستونی HCHO تروپوسفری بر فراز تهران (۲۰۲۰-۲۰۲۳)، (b) تحلیل نقاط داغ Getis-Ord Gi* براساس میدان شبکه‌بندی شده HCHO، که خوشه‌های نقاط داغ و نقاط سرد از نظر آماری معنی‌دار را براساس سطح اطمینان نشان می‌دهد

Figure 2. (a) Four-year mean tropospheric HCHO column density over Tehran (2020–2023); (b) Getis-Ord Gi* hot spot analysis based on the gridded HCHO field, showing statistically significant hot spot and cold spot clusters according to confidence level

الگوی فصلی HCHO (شکل ۳) نشان داد که بیشینه غلظت‌ها در تابستان و کمینه آنها در زمستان رخ می‌دهد. این الگوی فصلی عمدتاً ناشی از افزایش تولید فتوشیمیایی فرمالدئید در ماه‌های گرم و کاهش آن در ماه‌های سرد است. هرچند وارونگی دمایی در زمستان می‌تواند موجب تجمع برخی آلاینده‌ها شود، اما کاهش شدت تابش خورشیدی و واکنش‌های فتوشیمیایی باعث می‌شود غلظت فرمالدئید در این فصل معمولاً کمتر از تابستان باشد (Zhao *et al.*, 2024). افزایش دما و شدت تابش خورشیدی در تابستان، مهم‌ترین عامل این بیشینه فصلی است. از نظر سالانه، میانگین شاخص HCHO نزدیک سطح در تهران بین ۶/۱۵-

۵/۶ میکروگرم بر متر مکعب متغیر بود. کمترین مقدار در سال ۲۰۲۲ و بیشترین مقدار در سال ۲۰۲۰ مشاهده شد، اگرچه اختلاف بین سال‌ها نسبتاً محدود بود و نشان‌دهنده پایداری نسبی بار آلودگی در دوره مطالعه است.



شکل ۳- میانگین فصلی HCHO تروپوسفری بر فراز تهران طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳

Figure 3. Seasonal mean tropospheric HCHO over Tehran during 2020–2023

جدول ۱ غلظت ماهانه HCHO در نزدیکی سطح زمین، مقدار CDI و ELCR را برای تهران طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد. این داده‌ها مبنای محاسبه شاخص‌های سالانه ارائه شده در جدول ۲ بوده‌اند. مطابق این نتایج، نوسانات فصلی و سالانه غلظت HCHO منجر به تغییرات قابل توجهی در میزان مواجهه مزمن جمعیت شده است. نتایج ارزیابی خطر سلامت نشانگر این است که میانگین سالانه CDI بین 0.00176 – 0.0016 میلی گرم بر کیلوگرم در روز و ELCR در بازه 10^{-5} تا 10^{-4} است که میانگین سالانه CDI بین 0.00176 – 0.0016 میلی گرم بر کیلوگرم در روز و ELCR در بازه 10^{-5} تا 10^{-4} است. این مقادیر در بخش بالایی دامنه معیار U.S. EPA برای خطر سرطان مادام‌العمر قرار می‌گیرند و نشان‌دهنده یک خطر غربالگری متوسط اما قابل توجه هستند.

جدول ۱- غلظت‌های ماهانه HCHO نزدیک سطح زمین، دریافت روزانه مزمن (CDI) و خطر اضافی سرطان در طول عمر (ELCR) برای تهران طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳

Table 1. Monthly near-surface HCHO concentrations, chronic daily intake (CDI), and excess lifetime cancer risk (ELCR) in Tehran during 2020–2023

سال	ماه	HCHO (mg/m³)	CDI (mg/kg·day)	ELCR
2020	دی	0.0051	0.00146	6.63×10^{-5}
	بهمن	0.0039	0.00111	5.07×10^{-5}
	اسفند	0.0051	0.00146	6.63×10^{-5}
	فروردین	0.0057	0.00163	7.41×10^{-5}
	اردیبهشت	0.0054	0.00154	7.02×10^{-5}
	خرداد	0.0075	0.00214	9.75×10^{-5}
	تیر	0.0081	0.00231	1.05×10^{-4}
2022	مرداد	0.0069	0.00197	8.97×10^{-5}
	شهریور	0.0063	0.00180	8.19×10^{-5}
	دی	0.0042	0.00120	5.46×10^{-5}
2023	بهمن	0.0039	0.00111	5.07×10^{-5}
	اسفند	0.0027	0.00077	3.51×10^{-5}
	فروردین	0.0042	0.00120	5.46×10^{-5}
	اردیبهشت	0.0045	0.00129	5.85×10^{-5}
	خرداد	0.0063	0.00180	8.19×10^{-5}
	تیر	0.0072	0.00206	9.36×10^{-5}
	مرداد	0.0090	0.00257	1.17×10^{-4}
2023	شهریور	0.00645	0.00184	8.39×10^{-5}

سال	ماه	HCHO (mg/m ³)	CDI (mg/kg·day)	ELCR	سال	ماه	HCHO (mg/m ³)	CDI (mg/kg·day)	ELCR
2021	مهر	0.0078	0.00223	1.01×10^{-4}	2023	مهر	0.0057	0.00163	7.41×10^{-5}
	آبان	0.0051	0.00146	6.63×10^{-5}		آبان	0.0066	0.00189	8.58×10^{-5}
	آذر	0.0069	0.00197	8.97×10^{-5}		آذر	0.0066	0.00189	8.58×10^{-5}
	دی	0.0052	0.00150	6.83×10^{-5}		دی	0.0072	0.00206	9.36×10^{-5}
	بهمن	0.0057	0.00163	7.41×10^{-5}		بهمن	0.0036	0.00103	4.68×10^{-5}
	اسفند	0.0036	0.00103	4.68×10^{-5}		اسفند	0.00495	0.00141	6.43×10^{-5}
	فروردین	0.0048	0.00137	6.24×10^{-5}		فروردین	0.0036	0.00103	4.68×10^{-5}
	اردیبهشت	0.0051	0.00146	6.63×10^{-5}		اردیبهشت	0.00495	0.00141	6.43×10^{-5}
	خرداد	0.0078	0.00223	1.01×10^{-4}		خرداد	0.0069	0.00197	8.97×10^{-5}
	تیر	0.0072	0.00206	9.36×10^{-5}		تیر	0.0069	0.00197	8.97×10^{-5}
	مرداد	0.0060	0.00171	7.80×10^{-5}		مرداد	0.0081	0.00231	1.04×10^{-4}
	شهریور	0.0051	0.00146	6.63×10^{-5}		شهریور	0.0063	0.00180	8.19×10^{-5}
	مهر	0.0051	0.00146	6.63×10^{-5}		مهر	0.00585	0.00167	7.61×10^{-5}
	آبان	0.0078	0.00220	1.01×10^{-4}		آبان	0.00705	0.00201	6.63×10^{-5}
	آذر	0.0066	0.00189	8.58×10^{-5}		آذر	0.0081	0.00231	1.05×10^{-4}

جدول ۲- مقادیر سالانه HCHO، CDI و ELCR در تهران طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳

Table 2. Annual HCHO, CDI, and ELCR values in Tehran during 2020–2023

سال	میانگین شاخص HCHO نزدیک سطح (میکروگرم بر مترمکعب)	CDI (میلی گرم بر کیلوگرم در روز)	ELCR	طبقه‌بندی خطر EPA
2020	6.15	0.00176	8.00×10^{-5}	در محدوده معیار
2021	5.83	0.00167	7.58×10^{-5}	در محدوده معیار
2022	5.6	0.0016	7.28×10^{-5}	در محدوده معیار
2023	6.12	0.00175	7.96×10^{-5}	در محدوده معیار

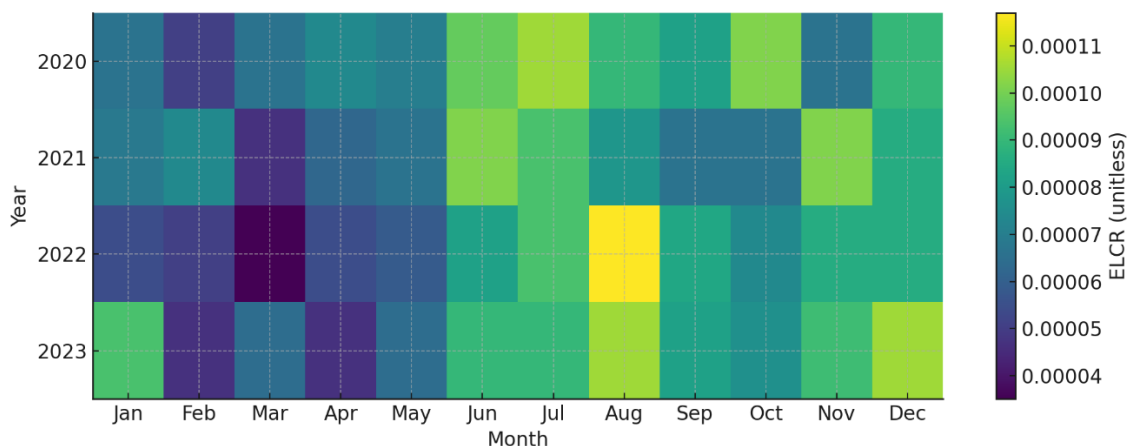
با در نظر گرفتن جمعیت ۸/۶۹ میلیونی تهران، موارد سرطان مادام‌العمر معادل جمعیتی برای سناریوهای سالانه حدود ۶۳۳ تا ۶۹۵ مورد برآورد شد. این مقادیر باید صرفاً به‌عنوان برآوردهای سناریومحور در مقیاس جمعیت تفسیر شوند. تحلیل همبستگی در جدول ۳ نشان می‌دهد که دما قوی‌ترین رابطه مثبت را با HCHO دارد ($r = 0.83$ و $P < 0.001$) در حالی که سرعت باد دارای رابطه منفی معنی‌دار است ($r = -0.56$ و $P < 0.001$). بارش و فشار نیز به ترتیب همبستگی مثبت ضعیف و منفی ضعیف نشان دادند. مدل رگرسیون خطی چندگانه (رابطه ۵) بخش زیادی از تغییرپذیری ماهانه HCHO را توضیح داد ($r^2 = 0.83$) و نشان داد دما و سرعت باد مهم‌ترین کنترل‌کننده‌های هواشناسی غلظت HCHO در تهران هستند.

$$\text{HCHO} = 6.41 + 0.083 (T - 18) + 0.004 (\text{Pr}cp - 27) - 0.565 (\text{W}spd - 2.3) - 0.107 (\text{Pres} - 905) \quad (\text{رابطه ۵})$$

جدول ۳- ضرایب رگرسیون خطی چندگانه برای تغییرپذیری ماهانه HCHO

Table 3. Multiple linear regression coefficients for monthly HCHO variability

پارامتر	ضریب β	رابطه	t	P	معناداری
دما ($T - \bar{T}$)	+0.083	مثبت قوی	5.94	0.0004	معنی‌دار
بارش ($\text{Pr}cp - \text{Pr}cp$)	+0.004	مثبت ضعیف	2.71	0.013	معنی‌دار
سرعت باد ($\text{W}spd - \text{W}spd$)	-0.565	منفی قوی	-4.89	0.001	معنی‌دار
فشار ($\text{Pres} - \text{Pres}$)	-0.107	منفی ضعیف	-2.54	0.018	معنی‌دار



شکل ۴- خطر اضافی سرطان در طول عمر (ELCR) ماهانه برآوردشده از HCHO سنجنده Sentinel-5P برای سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳

Figure 4. Monthly excess lifetime cancer risk (ELCR) estimated from Sentinel-5P HCHO data for 2020–2023

بحث

نتایج نشان‌دهنده وجود کانون‌های پایدار HCHO در نواحی مرکزی و شمال شرقی شهر است، در حالی که غلظت‌ها در مناطق جنوبی به‌طور مداوم کمتر بوده‌اند. تحلیل‌های فصلی نشان می‌دهد که سطوح HCHO در اواخر بهار و تابستان به اوج می‌رسند که عمدتاً ناشی از افزایش اکسیداسیون فتوشیمیایی ترکیبات آلی فرار در دماهای بالاتر و تابش خورشیدی قوی‌تر است. این الگوها با نقش شناخته‌شده HCHO به‌عنوان محصول ثانویه اکسیداسیون VOCها و شاخص فعالیت فتوشیمیایی در جو شهری سازگار است (Wang et al., 2017). نکته مهم آن است که مقادیر ریسک سلامت گزارش شده در این مطالعه باید در چارچوب غربالگری تفسیر شوند. محصول ماهواره‌ای HCHO پوشش مکانی گسترده‌ای فراهم می‌کند و امکان مقایسه نسبی مواجهه در سطح شهر را می‌دهد، اما جایگزین پایش مستقیم زمینی برای ارزیابی‌های مقرراتی یا انتساب اپیدمیولوژیک نیست. بنابراین، ارزش اصلی رویکرد حاضر در شناسایی الگوهای مکانی پایدار، تضادهای فصلی و مناطق اولویت‌دار در مقیاس جمعیتی تحت شرایط محدودیت داده‌های پایش است.

کانون برجسته در مرکز و شمال شرق تهران را می‌توان به اثرات ترکیبی ترافیک متراکم، فعالیت‌های صنعتی و جریان غالب غرب به شرق نسبت داد که انتشارهای شهری را به سمت مناطق پایین‌دست انتقال می‌دهد. غلظت‌های کمتر در مناطق جنوبی ممکن است با تهویه بهتر، شدت انتشار پایین‌تر و تفاوت‌های توپوگرافی محلی مرتبط باشد. افزایش فصلی در دوره‌های گرم با وابستگی تشکیل ثانویه HCHO به دما همخوانی دارد، زیرا با افزایش فعالیت فتوشیمیایی، تولید آن نیز بیشتر می‌شود. در زمستان، کاهش تابش خورشیدی و افت نرخ اکسیداسیون VOCها می‌تواند تولید ثانویه HCHO را محدود کند؛ هرچند شرایط سکون و وارونگی دمایی ممکن است تجمع برخی آلاینده‌های اولیه را تشدید کند (Taguchi et al., 2021). بنابراین، کاهش HCHO زمستانی احتمالاً بیش از آنکه ناشی از تهویه بهتر باشد، بازتاب کاهش فعالیت فتوشیمیایی است.

رفتار مکانی و فصلی مشاهده‌شده در این مطالعه به‌طور کلی با پژوهش‌های سنجش‌ازدور پیشین در تهران و کلانشهرهای مشابه سازگار است. افزایش غلظت‌های HCHO استخراج‌شده از داده‌های TROPOMI در نواحی مرکزی و شمال شرقی تهران گزارش شده است که با الگوی مشاهده‌شده در این مطالعه همخوانی دارد (Moradi and Zeuss, 2024). مطالعات انجام‌شده در شهرهای با فعالیت فتوشیمیایی بالا مانند پکن و دهلی نیز سطوح بالاتر HCHO را در تابستان به دلیل افزایش اکسیداسیون VOCها و واکنش‌پذیری جوی قوی‌تر گزارش کرده‌اند (Kuttippurath et al., 2022; Tanvir et al., 2024). این شباهت‌ها تفسیر اینکه توزیع مشاهده‌شده HCHO بازتابی از فرآیندهای واقعی فتوشیمیایی و انتشارمحور است را تقویت می‌کند. اگرچه در تهران پایش درازمدت، همزمان و هم‌مکان برای HCHO جهت اعتبارسنجی مستقیم وجود ندارد، نتایج این پژوهش از نظر مرتبه

بزرگی با برخی اندازه‌گیری‌های میدانی کوتاه‌مدت قابل مقایسه است. برای نمونه، Dehghani و همکاران (۲۰۱۷) غلظت فرمالدئید را در پنج نقطهٔ پرتراфик تهران و یک ایستگاه زمینه طی دو فصل زمستان و بهار اندازه‌گیری کردند. در آن مطالعه، ۱۰۸ نمونه سه‌ساعته در بازهٔ ۱۱ صبح تا ۲ بعدازظهر برداشت شد و غلظت فرمالدئید همراه با متغیرهایی مانند CO ، O_3 ، NO_2 ، دما، رطوبت نسبی و فشار بررسی گردید. بنابراین، مقایسهٔ انجام‌شده در پژوهش حاضر صرفاً برای بررسی سازگاری کلی مرتبهٔ بزرگی مقادیر است و به‌عنوان صحت‌سنجی مستقیم یا نقطه‌به‌نقطه داده‌های TROPOMI تفسیر نمی‌شود (Dehghani et al., 2017). این مطالعهٔ میدانی همچنین سطوح بالاتر HCHO را در ماه‌های گرم گزارش کرده است که با رفتار فصلی مشاهده‌شده در داده‌های ماهواره‌ای همخوانی دارد. اگرچه این مقایسه به‌منزلهٔ اعتبارسنجی مستقیم در سطح نقطه‌ای نیست، بزرگی مقادیر و الگوی فصلی در میان مجموعه داده‌های مستقل از نظر فیزیکی معقول بودن روندهای مشتق‌شده از ماهواره را پشتیبانی می‌کند.

با وجود آنکه الگوهای مکانی و فصلی مشاهده‌شده با تأثیر مورد انتظار انتشار VOCهای ناشی از ترافیک، اکسیداسیون فتوشیمیایی و جریان غالب غرب-شرق سازگار است، تحلیل تخصیص منبع اختصاصی فراتر از دامنهٔ این پژوهش بوده است. محصول HCHO در TROPOMI یک ستون یکپارچهٔ تروپوسفری را نمایش می‌دهد و بین انتشارهای اولیه (مانند آگزوز خودرو و تبخیر سوخت) و تولید ثانویهٔ ناشی از اکسیداسیون VOCها تمایز قائل نمی‌شود. بنابراین، انتساب مناطق کانونی به منابع انتشار خاص باید به‌عنوان فرضی فیزیکی و محتمل، اما نه تأییدشده از نظر کمی، تفسیر شود. مطالعات آینده با ترکیب مشاهدات ماهواره‌ای، اندازه‌گیری‌های زمینی، مدل‌سازی انتقال شیمیایی یا تحلیل گونه‌بندی VOCها می‌توانند تفکیک دقیق‌تری از سهم منابع اولیه و ثانویهٔ HCHO محیطی در تهران فراهم کنند. محاسبات ریسک سلامت مبتنی بر چارچوب‌های RAIS/EPA نشان می‌دهد که ریسک مادام‌العمر سرطان در سطح غربالگری مرتبط با مواجهه طولانی‌مدت با HCHO محیطی در تهران در بخش بالایی بازه معیار سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (10^{-6} – 10^{-4}) قرار می‌گیرد. اگرچه این ریسک‌های سطح غربالگری در مقایسه با مواجهه‌های داخلی گزارش‌شده در تهران متوسط محسوب می‌شوند، در مقیاس جمعیتی قابل چشم‌پوشی نیستند. برآورد تعداد موارد معادل جمعیتی مادام‌العمر در حدود ۶۳۳ تا ۶۹۵ مورد تحت سناریوهای مواجههٔ سالانه، ماهیت غیرقابل اغماض اما در سطح غربالگری ریسک مزمن HCHO در هوای بیرونی تهران را نشان می‌دهد. تغییرپذیری زمانی ریسک سرطان برآوردشده به‌طور نزدیک با تغییرات فصلی و بین‌سالانه غلظت‌های سطحی HCHO همبستگی دارد، به‌طوری که دوره‌های گرم سهم نامتناسبی در افزایش برآوردهای ریسک ماهانه و فصلی دارند.

در تفسیر نتایج باید به چندین محدودیت توجه شود. نخست، TROPOMI ستون تروپوسفری HCHO را به‌صورت یکپارچه ارائه می‌دهد و نه اندازه‌گیری مستقیم در سطح زمین؛ بنابراین تبدیل چگالی ستون به غلظت تخمینی نزدیک به سطح با استفاده از ارتفاع لایهٔ مرزی سیاره‌ای تنها یک تقریب مرتبهٔ اول است و ممکن است توزیع واقعی عمودی HCHO را، به‌ویژه تحت شرایط لایه‌بندی‌شده جوی، به‌طور کامل بازنمایی نکند. دوم، فرض اختلاط یکنواخت درون لایهٔ مرزی ساده‌سازی‌ای است که ممکن است در حوضهٔ توپوگرافی پیچیده‌ای مانند تهران که وارونگی دمایی و پروفیل‌های عمودی غیر یکنواخت رایج است، منجر به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد غلظت‌های واقعی سطحی شود. سوم، داده‌های PBLH از ERA5 دارای تفکیک مکانی نسبتاً درشت (۲۵/۰ درجه) هستند که ممکن است تغییرپذیری محلی لایهٔ مرزی در مقیاس شهری را به‌خوبی نشان ندهند. چهارم، مشاهدات TROPOMI وابسته به زمان عبور ماهواره هستند و بنابراین چرخهٔ کامل شبانه‌روزی مرتبط با مواجهه بلندمدت انسانی را پوشش نمی‌دهند. پنجم، هیچ مجموعه دادهٔ درازمدت هم‌مکان برای پایش HCHO در تهران به‌منظور اعتبارسنجی رسمی در دسترس نبود؛ بنابراین مقایسه با مطالعات میدانی پیشین تنها باید به‌عنوان بررسی معقول بودن مرتبهٔ بزرگی مقادیر و نه اعتبارسنجی کامل تلقی شود. در نهایت، محاسبات ریسک سلامت نمایانگر سناریوهای مواجهه جمعیتی در سطح غربالگری براساس شرایط میانگین منطقه‌ای هستند و مواجهه‌های داخلی، تحرک فردی، ناهمگنی شغلی یا تغییرپذیری ریزمحیطی را در نظر نمی‌گیرند. بر این اساس، مقادیر CDI و ELCR گزارش‌شده نباید به‌عنوان برآوردهای دقیق ریسک مادام‌العمر فردی تلقی شوند، بلکه باید به‌عنوان ابزارهایی برای اولویت‌بندی مکانی نسبی و غربالگری ریسک مورد استفاده قرار گیرند.

مطالعات آینده می‌توانند مشاهدات TROPOMI را با اندازه‌گیری‌های زمینی نظیر MAX-DOAS یا کارزارهای نمونه‌برداری با قوطی‌های تحت خلأ ترکیب کنند تا اعتبارسنجی محلی بهبود یابد. ادغام با مدل‌های انتقال شیمیایی یا روش‌های یادگیری

ماشین نیز می‌تواند برآوردهای سطحی دقیق‌تری ارائه دهد. علاوه بر این، پیوند دادن سطوح HCHO بیرونی با مدل‌سازی مواجهه داخلی تصویر جامع‌تری از ریسک استنشاقی در سطح جمعیت تهران فراهم خواهد کرد. گسترش تحلیل چندساله با استفاده از مأموریت‌های ماهواره‌ای با تفکیک بالاتر (مانند TEMPO و Sentinel-4) می‌تواند به بهبود تشخیص روندها و شناسایی دقیق‌تر کانون‌های آلودگی کمک کند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که داده‌های Sentinel-5P/TROPOMI، در ترکیب با داده‌های بازتحلیل ERA5، می‌توانند به‌عنوان ابزار مکمل پایش زمینی برای غربالگری مکانی-زمانی فرمالدئید و اولویت‌بندی مناطق پرخطر به کار روند. نتایج بیانگر آن بود که بخش‌های مرکزی و شمال شرقی تهران به‌طور مستمر در معرض غلظت‌های بالاتر فرمالدئید قرار دارند و تغییرات فصلی این آلاینده عمدتاً تحت تأثیر فرآیندهای فتوشیمیایی و شرایط هواشناسی است. همچنین، مقادیر CDI و ELCR بیانگر آن است که مواجهه بلندمدت با فرمالدئید در برخی نواحی شهر از دیدگاه غربالگری سلامت نیازمند توجه بیشتر است. از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش می‌تواند در اولویت‌بندی مناطق پرخطر، طراحی برنامه‌های پایش، کنترل منابع انتشار و حمایت از تصمیم‌گیری مدیران شهری و متولیان سلامت مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، به دلیل نبود داده‌های زمینی پیوسته فرمالدئید در تهران، نتایج باید به‌عنوان برآوردهای غربالگری تفسیر شوند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، با بهره‌گیری از اندازه‌گیری‌های زمینی و مدل‌های انتقال شیمیایی، دقت برآوردهای ماهواره‌ای و ارزیابی خطر سلامت بیش از پیش بررسی شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (نویسنده مسئول) قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرات ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

- Abbasi, M.T., Alesheikh, A.A., Jafari, A., Lotfata, A., 2024. Spatial and Temporal patterns of urban air pollution in Tehran with a focus on PM_{2.5} and associated pollutants. *Scientific Reports* 14(1), 25150.
- Barrese, E., Valentini, M., Scarpelli, M., Samele, P., Malacaria, L., D'Amico, F., Lo Feudo, T., 2024. Assessment of formaldehyde's impact on indoor environments and human health via the integration of satellite tropospheric total columns and outdoor ground sensors. *Sustainability* 16(22), 9669.
- Bhat, T.A., Dolislager, F.G., Stewart, D.J., Manning, K.L., Noto, K.A., Galloway, L.D., Armstrong, A.Q., 2023. An Overview of the Risk Assessment Information System.
- Chan, K.L., Wiegner, M., van Geffen, J., De Smedt, I., Alberti, C., Cheng, Z., ... & Wenig, M. (2020). MAX-DOAS measurements of tropospheric NO₂ and HCHO in Munich and the comparison to OMI and TROPOMI satellite observations. *Atmospheric Measurement Techniques* 13(8), 4499-4520.

- Copernicus Climate Change Service (C3S), 2025. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. ECMWF Climate Data Store.
- De Smedt, I., Pinardi, G., Vigouroux, C., Compernelle, S., Bais, A., Benavent, N., ... Van Roozendaal, M., 2021. Comparative assessment of TROPOMI and OMI formaldehyde observations against MAX-DOAS network column measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 2021, 1-51.
- Dehghani, M.H., Salari, M., Naddafi, K., Nazmara, S., Ahmadi, E., Kumar, P., 2017. Evaluation of formaldehyde concentration in the ambient air of a most populated Iranian city, Tehran. *Air Quality, Atmosphere & Health* 10(6), 763-772.
- Eslami, F., Salari, M., Dehghani, M.H., Dargahi, A., Nazmara, S., Yazdani, M., Beheshti, A., 2019. Relationship of formaldehyde concentration in ambient air with CO, NO₂, O₃, temperature and humidity: modeling by response surface model.
- Getis, A., Ord, J.K., 1992. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis* 24(3), 189-206.
- Ghoshua, A., Akdis, C.A., Nadeau, K.C., 2022. World Health Organization global air quality guideline recommendations: Executive summary. *Allergy* 77(7), 1955-1960.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146(730), 1999-2049.
- Kuttippurath, J., Abhishek, K., Gopikrishnan, G.S., Pathak, M., 2022. Investigation of long-term trends and major sources of atmospheric HCHO over India. *Environmental Challenges* 7, 100477.
- Li, L., Ma, X., Chen, D., 2025. Spatiotemporal evolution characteristics and drivers of TROPOMI-based tropospheric HCHO column concentration in North China. *Sustainability* 17(10), 4386.
- Maurya, N.K., Pandey, P.C., Sarkar, S., Kumar, R., Srivastava, P.K., 2022. Spatio-temporal monitoring of atmospheric pollutants using Earth observation Sentinel-5P TROPOMI data: impact of stubble burning—a case study. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 11(5), 301.
- Mo, D., Zhang, H., Wang, Y., Tuo, F., Chen, M., Cao, Z., ... Bu, Z., 2025. Formaldehyde Exposure and Associated Health Burdens Apportioned to Residential and Public Places Based on Personal and Environmental Measurements. *Atmosphere* 16(10), 1165.
- Moradi, A., Zeuss, D., 2024. Investigation of the spatiotemporal patterns of air quality over the metropolitan area of Tehran, using TROPOMI and OMI data. *Air Quality, Atmosphere & Health* 17(2), 371-387.
- Paustenbach, D.J., 2000. The practice of exposure assessment: a state-of-the-art review. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part B: Critical Reviews* 3(3), 179-291.
- Rana, A.D., Parvez, S., Ul-Haq, Z., Batool, S.A., Chaudhary, M.N., Mahmood, K., Tariq, S., 2019. Anthropogenic, biogenic and pyrogenic emission sources and atmospheric formaldehyde (HCHO) and nitrogen dioxide (NO₂) columns over different land use/land covers of South Asia. *Applied Ecology & Environmental Research* 17(5).
- Salari, M., Nazmara, S., Naddafi, K., Dehghani, M.H., 2016. Investigation of daily and seasonal variations of formaldehyde concentration in ambient air of Enghelab Square, Tehran, during 2014–2015. *Journal of Research in Environmental Health*. (In Persian)
- Taguchi, S., Hagiwara, M., Shibata, A., Fujinari, H., Matsumoto, S., Kuwata, M., ... Kuramitz, H., 2021. Investigation and modeling of diurnal variation in suburban ambient formaldehyde concentration. *Environmental Science and Pollution Research* 28(11), 13425-13438.
- Tanvir, A., Javed, Z., Wang, S., Zhou, B., Zhang, S., Bai, X., 2024. Vertical characteristics of HCHO and NO₂ in suburban Shanghai: understanding of ozone formation sensitivity via secondary HCHO. *Environmental Research Letters*.
- Vigouroux, C., Langerock, B., Bauer Aquino, C.A., Blumenstock, T., Cheng, Z., De Mazière, M., ... Winkler, H., 2020. TROPOMI–Sentinel-5 Precursor formaldehyde validation using an extensive network of ground-based Fourier-transform infrared stations. *Atmospheric Measurement Techniques* 13(7), 3751-3767.
- Wang, C., Huang, X.F., Han, Y., Zhu, B., He, L.Y., 2017. Sources and potential photochemical roles of formaldehyde in an urban atmosphere in South China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122(21), 11-934.
- Zhao, T., Mao, J., Ayazpour, Z., González Abad, G., Nowlan, C.R., Zheng, Y., 2024. Interannual variability of summertime formaldehyde (HCHO) vertical column density and its main drivers at northern high latitudes. *Atmospheric Chemistry and Physics* 24(10), 6105-6121.