Incidents and Disasters Resilience

Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir/

Spatial–temporal zoning and analysis of air pollution patterns in Tehran using integrated remote sensing and GIS

Sahar Danyali[1], Yasaman Ghorbani[2]✉

1. M.A., Department of Remote Sensing and Geographic Information System (GIS), Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: sahar.danyali@gmail.com
2. Corresponding Author, M.A., Department of Remote Sensing and Geographic Information System (GIS), Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: yasaman.gh20@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 13 May 2025
Received in revised form 13 August 2025
Accepted 26 August 2025
Available online 29 September 2025

Keywords:
Air Pollution,
Spatial Zoning,
Spatio-Temporal Analysis,
Remote Sensing,
Pollutant.

ABSTRACT

Objective: The main objective of this study is the spatial zoning and spatio-temporal analysis of air pollution in Tehran using the integration of satellite data and Geographic Information System (GIS) techniques in order to identify spatial distribution patterns of pollutants, determine critical areas, and investigate the statistical relationships between environmental indices and major air pollutants during the period 2019–2023. The study particularly focuses on understanding the differences between the spatial patterns of primary pollutants and the secondary pollutant ozone across the 22 districts of Tehran.

Method: This study is applied research with a descriptive–analytical approach. The data used include Landsat satellite imagery for extracting environmental indices including Land Surface Temperature (LST), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), albedo, and the VBSWIR spectral component, as well as Sentinel-5P satellite data for extracting column concentrations of gaseous pollutants including CO2, NO2, SO2, and O3. After preprocessing procedures, environmental index and pollutant maps were generated, and their spatial averages were calculated at the level of Tehran's 22 districts. Spatial zoning was conducted solely to illustrate spatial patterns, while relationships among variables were analyzed using Pearson correlation coefficients. All processing and analyses were carried out using ENVI, ArcGIS Pro, and Google Earth Engine software environments.

Results: The results indicate that air pollution in Tehran exhibits a heterogeneous yet spatially continuous pattern. Primary pollutants including CO2 and NO2 are mainly concentrated in the central, northern, and eastern districts, while the highest concentrations of SO2 are observed in the southern and southeastern parts of the city. In contrast, the secondary pollutant O3 displays a different spatial pattern, with higher concentrations mainly observed in the southern and central districts. Pearson correlation analysis revealed statistically significant relationships between environmental indices and pollutants. Specifically, LST shows an inverse relationship with primary pollutants and a strong direct relationship with O3, whereas NDVI is generally associated with reduced pollutant concentrations.

Conclusions: Based on the findings, air pollution in Tehran is a multifactorial phenomenon resulting from the interaction between the city's physical structure, environmental conditions, and human activities. The differing spatial patterns of primary and secondary pollutants suggest that air pollution control policies should be region-specific and should address not only emission reduction strategies but also the environmental processes influencing the formation of secondary pollutants.

Cite this article: Daniyali, S., Ghorbani, Y. (2025). Spatial–temporal zoning and analysis of air pollution patterns in Tehran using integrated remote sensing and GIS. ***Incidents and Disasters Resilience,*** *1*(3), 63-82. https://doi.org/10.22034/1.3.5

© Author(s) retain the copyright.

Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).
DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

تاب‌آوری در برابر حوادث و سوانح

Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir

پهنه‌بندی و تحلیل الگوهای فضایی–زمانی آلودگی هوای شهر تهران با تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)

سحر دانیالی[1]، یاسمن قربانی[2] ✉

۱. کارشناسی ارشد، گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: sahar.danyali@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد، گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: yasaman.gh20@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷

کلیدواژه‌ها:
آلودگی هوا،
پهنه‌بندی فضایی،
تحلیل فضایی–زمانی،
سنجش‌ازدور،
آلاینده.

چکیده

هدف: هدف این پژوهش، پهنه‌بندی و تحلیل فضایی–زمانی آلودگی هوای شهر تهران با استفاده از تلفیق داده‌های ماهواره‌ای و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌منظور شناسایی الگوهای مکانی توزیع آلاینده‌ها، تعیین مناطق بحرانی و بررسی روابط آماری میان شاخص‌های محیطی و آلاینده‌های اصلی هوا طی دوره زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ است. تمرکز اصلی پژوهش بر درک تفاوت الگوی آلاینده‌های اولیه و آلاینده ثانویه ازن در مقیاس مناطق ۲۲گانه شهر تهران قرار دارد.

روش پژوهش: این مطالعه از نوع کاربردی با رویکرد توصیفی–تحلیلی است. داده‌های مورداستفاده شامل تصاویر ماهواره‌ای Landsat برای استخراج شاخص‌های محیطی دمای سطح زمین (LST)، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، آلبدو و مؤلفه طیفی VBSWIR و داده‌های ماهواره Sentinel-5P برای استخراج غلظت ستونی آلاینده‌های گازی CO_2، NO_2، SO_2 و O_3 است. پس از انجام مراحل پیش‌پردازش، نقشه‌های شاخص‌های محیطی و آلاینده‌ها تولید و میانگین‌گیری مکانی آن‌ها در سطح مناطق ۲۲گانه تهیه شد. پهنه‌بندی فضایی صرفاً با هدف نمایش الگوهای مکانی صورت گرفت و تحلیل روابط میان متغیرها با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون انجام شد. کلیه مراحل پردازش و تحلیل در محیط نرم‌افزارهای ENVI، ArcGIS Pro و Google Earth Engine اجرا گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد آلودگی هوا در شهر تهران دارای الگوی فضایی ناهمگون اما پیوسته است. آلاینده‌های اولیه CO_2، NO_2 عمدتاً در مناطق مرکزی، شمال و شرق و بیشترین مقادیر SO_2 در مناطق جنوبی و جنوب شرقی شهر تهران تمرکز دارند. در مقابل، آلاینده ثانویه O_3 الگوی فضایی متفاوتی نشان داده و مقادیر بالاتر آن عمدتاً در مناطق جنوبی و مرکزی شهر مشاهده شد. نتایج تحلیل همبستگی پیرسون حاکی از وجود روابط آماری معنادار میان شاخص‌های محیطی و آلاینده‌ها است؛ به‌گونه‌ای که LST با آلاینده‌های اولیه رابطه معکوس و با O_3 رابطه مستقیم قوی نشان می‌دهد، درحالی‌که NDVI عمدتاً با کاهش غلظت آلاینده‌ها همراه است.

نتیجه‌گیری: بر اساس یافته‌ها، آلودگی هوای تهران پدیده‌ای چندعاملی و حاصل برهم‌کنش ساختار کالبدی شهر، شرایط محیطی و فعالیت‌های انسانی است. تفاوت الگوی مکانی آلاینده‌های اولیه و ثانویه نشان می‌دهد که سیاست‌های کنترل آلودگی باید منطقه‌محور بوده و علاوه بر کاهش منابع انتشار، به فرایندهای محیطی مؤثر بر شکل‌گیری آلاینده‌های ثانویه نیز توجه داشته باشند.

استناد: سحر؛ دانیالی، قربانی؛ یاسمن. (۱۴۰۴). پهنه‌بندی و تحلیل الگوهای فضایی–زمانی آلودگی هوای شهر تهران با تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). *تاب‌آوری در برابر حوادث و سوانح*، ۱ (۳)، ۶۳-۸۲. https://doi.org/10.22034/1.3.5

CC BY NC

© نویسندگان.

ناشر: پژوهشکده سوانح طبیعی.

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

مقدمه

آلودگی هوای شهری به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین و مخرب‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی عصر حاضر، نه‌تنها تهدیدی جدی برای سلامت عمومی به شمار می‌رود، بلکه پایداری اکوسیستم‌های شهری و رفاه اجتماعی را نیز تحت تأثیر قرار داده است (World Health Organization, 2021). بر اساس گزارش‌های سازمان جهانی بهداشت، بیش از ۹۰ درصد جمعیت جهان در مناطقی زندگی می‌کنند که کیفیت هوا از حد مجاز فراتر رفته و سالانه حدود ۷ میلیون مرگ زودرس ناشی از آلودگی هوا ثبت می‌شود. این پدیده در کلان‌شهرها به دلیل تراکم بالای فعالیت‌های انسانی، صنعتی و حمل‌ونقلی، ابعاد پیچیده‌تری یافته است (Kampa & Castanas, 2008). رشد شتابان شهرنشینی، تمرکز صنایع، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و توسعه شبکه حمل‌ونقل موتوری، سبب تشدید انتشار آلاینده‌های اصلی نظیر ذرات معلق ($PM_{2.5}$ و PM_{10}) دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، مونوکسید کربن (CO) و ازن سطح زمین (O_3) شده است (Seinfeld & Pandis, 2016).

در میان کلان‌شهرهای جهان، تهران به دلایل متعدد جغرافیایی، اقلیمی و انسانی در زمره آلوده‌ترین شهرها قرار دارد. این شهر در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز واقع شده و توپوگرافی بسته آن همراه با پدیده مکرر وارونگی دمایی در فصول سرد، مانع از پراکنش آلاینده‌ها می‌شود (Safavi & Alijani, 2006). از سوی دیگر، تراکم جمعیتی بالا (بیش از ۸ میلیون نفر در محدوده شهری)، ناوگان فرسوده حمل‌ونقل، تمرکز صنایع و مصرف گسترده سوخت‌های فسیلی، منابع انتشار مستمر آلاینده‌ها را تشکیل می‌دهند (Gholampour et al., 2019). مطالعات نشان می‌دهد که آلودگی هوای تهران پدیده‌ای چندعاملی و فضایی است که برهم‌کنش پیچیده‌ای بین منابع انتشار انسانی، شرایط جوی، الگوهای کاربری اراضی و ساختار کالبدی شهر در شکل‌گیری و تشدید آن دخیل است (Madani et al., 2020). به‌طور خاص، توسعه سطوح نفوذناپذیر، کاهش پوشش گیاهی و تشدید پدیده جزیره حرارتی شهری نه‌تنها کیفیت هوا را کاهش می‌دهد، بلکه توان خودپالایی طبیعی جو را نیز تضعیف می‌کند (Oke, 1982; Li et al., 2019).

باوجود اهمیت موضوع، بسیاری از مطالعات پیشین در حوزه آلودگی هوای تهران بر داده‌های نقطه‌ای و پراکنده ایستگاه‌های پایش زمینی متکی بوده‌اند. این داده‌ها اگرچه از دقت زمانی بالایی برخوردارند، اما به دلیل محدودیت پوشش مکانی و ناتوانی در ارائه تصویر پیوسته فضایی، قادر به شناسایی الگوهای ناهمگون آلودگی در سطح شهر و تحلیل تأثیر متغیرهای محیطی محلی نیستند (Liu et al., 2021). این شکاف روش‌شناختی، لزوم بهره‌گیری از فناوری‌های نوین را پررنگ می‌سازد. بنابراین، سنجش‌ازدور با فراهم آوردن داده‌های پیوسته، همگن و با توان تفکیک مکانی–زمانی مناسب، و سامانه اطلاعات جغرافیایی با قابلیت‌های قدرتمند تجزیه‌وتحلیل فضایی، انقلابی در پایش و مدل‌سازی آلودگی هوا ایجاد کرده‌اند (Gupta et al., 2020). به‌ویژه ماهواره‌هایی مانند Landsat (با سابقه داده‌دهی بلندمدت از دهه ۱۹۷۰ و Sentinel-5P با قابلیت اندازه‌گیری مستقیم آلاینده‌های گازی با تفکیک مکانی بالا)، بستری بی‌نظیر برای تحلیل‌های جامع فضایی–زمانی فراهم می‌آورند (Veefkind et al., 2012; Wulder et al., 2016). بااین‌حال، پژوهش‌های معدودی در ایران از این قابلیت‌ها برای تحلیل یکپارچه و بلندمدت آلودگی هوای تهران بهره برده‌اند.

هدف اصلی این پژوهش، تحلیل و پهنه‌بندی مکانی–زمانی آلودگی هوای شهر تهران با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای چندزمانه (لندست) و داده‌های آلاینده‌های گازی استخراج‌شده از ماهواره Sentinel-5P است. به این منظور، شاخص‌های کلیدی محیطی مؤثر بر کیفیت هوا، ازجمله دمای سطح زمین (LST)، شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)، آلبیدو، مؤلفه‌های طیفی مانند درصد سطوح نفوذناپذیر، استخراج و نقشه‌های مربوطه تولید می‌شوند. سپس با استفاده از روش‌های تحلیل مکانی در محیط GIS، الگوهای توزیع فضایی آلودگی هوا در مناطق ۲۲گانه شهر شناسایی شده و ارتباط کمی و کیفی آن با متغیرهای محیطی و کالبدی شهری مذکور موردبررسی قرار می‌گیرد. این پژوهش در پی پاسخ به این پرسش اساسی است که الگوهای فضایی–زمانی آلودگی هوا در تهران طی سه دهه گذشته چگونه بوده و چه ارتباطی با شاخص‌های محیطی و توسعه شهری دارد؟

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

ضرورت انجام این پژوهش از چند منظر حائز اهمیت است. از بعد علمی و روش‌شناختی، این تحقیق با تلفیق داده‌های چند منبع ماهواره‌ای (اپتیکال و گازی) و رویکردهای نوین تحلیل فضایی در GIS، به غنای پارادایم داده‌محور در مطالعات آلودگی هوا در ایران می‌افزاید. پر کردن شکاف مطالعاتی ناشی از محدودیت داده‌های زمینی و ارائه یک چهارچوب تحلیل مکانی یکپارچه برای تهران، الگویی برای پژوهش‌های مشابه در دیگر کلان‌شهرهای ایران فراهم می‌کند. از منظر کاربردی و مدیریت شهری، یافته‌های این پژوهش در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی‌شده با وضوح مکانی بالا، مناطق بحرانی و کانون‌های اصلی آلودگی را به‌طور عینی مشخص می‌سازد. این اطلاعات برای مدیران و تصمیم‌سازان نهادهایی مانند شهرداری، سازمان حفاظت محیط‌زیست و وزارت بهداشت، جهت اولویت‌بندی مداخلات مکانی، تخصیص بهینه منابع، مکان‌یابی فضای سبز جدید، سامان‌دهی ترافیک و کنترل کاربری اراضی، ابزاری حیاتی و پشتیبان تصمیم‌گیری است. درنهایت، از بعد بهداشتی و اجتماعی، درک دقیق الگوهای فضایی–زمانی آلودگی و عوامل کالبدی و محیطی تشدیدکننده آن، به طراحی برنامه‌های هدفمند کاهش مواجهه شهروندان با آلاینده‌ها، به‌ویژه گروه‌های حساس، کمک می‌کند و گامی عملی در جهت تحقق حق برخورداری از هوای پاک و ارتقای سلامت عمومی و عدالت محیط‌زیستی در پهنه شهر تهران است.

پیشینه پژوهش

پیشینه نظری

آلودگی هوا در چهارچوب علوم محیطی و جغرافیای شهری به‌عنوان پدیده‌ای فضایی–زمانی و چندعاملی تعریف می‌شود که حاصل برهم‌کنش پیچیده‌ای میان منابع انتشار، ویژگی‌های کالبدی و کاربری اراضی شهری، شرایط اقلیمی و فرایندهای فیزیکی و شیمیایی جو است (Seinfeld & Pandis, 2016). نظریه‌های کلاسیک آلودگی هوا عمدتاً بر مدل‌های انتشار نقطه‌ای و پخش جوی مانند مدل‌های Gaussian Plume و اندازه‌گیری‌های ایستگاهی مبتنی بودند. اگرچه این مدل‌ها در شناخت رفتار آلاینده‌ها مفیدند، اما به دلیل ساده‌سازی فرضیات و ناتوانی در شبیه‌سازی ناهمگونی فضایی پیچیده شهرها، با محدودیت‌های اساسی روبه‌رو هستند (Zannetti, 2013).

با گسترش تفکر سیستمی و جغرافیایی در مطالعات محیطی، نظریه وابستگی مکانی[1] و ناهمگونی فضایی[2] به‌عنوان مبانی کلیدی تحلیل آلودگی هوا مطرح شدند. بر اساس قانون اول جغرافیای توبلر، همه‌چیز با هر چیز دیگر مرتبط است، اما چیزهای نزدیک، بیشتر از چیزهای دور به هم مرتبط‌اند. این اصل، پایه‌گذار تحلیل‌های فضایی مانند خودهمبستگی فضایی[3] و روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری (Kriging, IDW) شد که نشان می‌دهد غلظت آلاینده‌ها به‌صورت تصادفی توزیع نشده و الگوهای فضایی مشخصی از تمرکز و پراکنش را دنبال می‌کنند (Anselin, 1988; West et al., 2016). این دیدگاه، پهنه‌بندی فضایی را به ابزاری ضروری برای شناسایی کانون‌های بحرانی و درک منطق مکانی آلودگی تبدیل کرده است.

در موازات این تحولات، نظریه سنجش‌ازدور در پایش آلودگی هوا شکل گرفت. این رویکرد، آلودگی را به‌عنوان پدیده‌ای قابل‌مشاهده در ستون جو تعریف می‌کند که ازطریق تعامل امواج الکترومغناطیس با ذرات معلق و گازهای آلاینده قابل‌اندازه‌گیری است. مفهوم عمق نوری آیروسل[4] به‌عنوان پل ارتباطی نظری بین بازتاب‌های ثبت‌شده توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای و غلظت سطحی ذرات معلق توسعه یافت و مبنای مدل‌های تخمین پهنه‌ای این آلاینده قرار گرفت (van Donkelaar et al., 2019). پرتاب ماهواره‌هایی مانند Sentinel-5P مجهز به سنجنده TROPOMI، گامی فراتر نهاد و رویکرد نظری را از اندازه‌گیری غیرمستقیم به سمت مشاهده مستقیم طیفی آلاینده‌های گازی کلیدی (NO_2, SO_2, CO, O_3, CH_4) سوق داد. این تحول، آلودگی هوا را به‌عنوان یک سامانه فضایی–زمانی پویا با قابلیت تحلیل در مقیاس‌های محلی تا جهانی بازتعریف کرد (Veefkind

1. Spatial Dependence
2. Spatial Heterogeneity
3. Spatial Autocorrelation
4. Aerosol Optical Depth - AOD

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

.(et al., 2022

سیستم اطلاعات جغرافیایی نیز چهارچوب نظری و عملیاتی یکپارچه‌ای برای مدیریت، تلفیق و تحلیل لایه‌های متغیر مکانی فراهم می‌آورد. نظریه تلفیق داده‌های مکانی در GIS امکان هم‌پوشانی و تحلیل هم‌زمان داده‌های ماهواره‌ای، اقلیمی، توپوگرافی، کاربری اراضی و شبکه‌های ارتباطی را فراهم ساخته و بستر تحلیلی لازم برای مطالعات علت‌یابی مکانی آلودگی هوا را مهیا می‌سازد (Longley et al., 2020). در سال‌های اخیر، نظریه‌های داده‌محور و یادگیری ماشین نیز به این عرصه وارد شده‌اند. این رویکردها بر این فرض استوارند که روابط بین آلاینده‌ها و عوامل محیطی اغلب غیرخطی، پیچیده و وابسته به زمینه مکانی است. بنابراین، تلفیق سنجش‌ازدور، GIS و الگوریتم‌های داده‌کاوی به‌عنوان چهارچوب نظری نوینی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی الگوهای فضایی–زمانی آلودگی مطرح شده است (Reichstein et al., 2019).

پیشینه تجربی

پیشینه تجربی پژوهش‌های مرتبط را می‌توان در سه سیر تحولی اصلی دسته‌بندی کرد:

الف) مطالعات مبتنی بر داده‌های زمینی و مدل‌های آماری: بخش عمده‌ای از پژوهش‌های اولیه در ایران و جهان متکی بر داده‌های ایستگاه‌های پایش کیفی هوا بود. برای نمونه، حسن‌وند و همکاران (۲۰۱۸) با تحلیل داده‌های ایستگاه‌های تهران نشان دادند غلظت ذرات معلق در مناطق مرکزی و پرترافیک شهر به‌طوربه‌طور معناداری بالاتر است. این مطالعات اگرچه ناهمگونی فضایی آلودگی را تأیید می‌کردند، اما به دلیل پراکندگی کمّی ایستگاه‌ها، فاقد توانایی ارائه تصویر پیوسته مکانی بودند. در سطح جهانی، مطالعاتی مانند پژوهش کامپا و کاستاناس[5] (۲۰۰۸) به‌طور گسترده به بررسی آثار بهداشتی آلاینده‌های اصلی بر سلامت انسان پرداختند.

ب) مطالعات مبتنی بر سنجش‌ازدور و تولید محصولات پهنه‌ای: با گسترش دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای رایگان، تحولی اساسی در مطالعات آلودگی هوا رخ داد. ون دوکلار[6] و همکاران (۲۰۱۹) با تلفیق داده‌های AOD سنجنده‌های MODIS و MISR با مدل‌های انتقال جوی، نقشه‌های جهانی $PM_{2.5}$ با تفکیک مکانی ۱×۱ کیلومتر را تولید کردند که دقت بالایی در بازنمایی الگوهای منطقه‌ای داشت. در ادامه، دی[7] و همکاران (۲۰۱۹) با به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین Ensemble، مدل‌های روزانه با تفکیک مکانی بالاتر ارائه دادند و نشان دادند رویکردهای داده‌محور قادر به کشف روابط غیرخطی پیچیده هستند. در زمینه آلاینده‌های گازی، پرتاب ماهواره Sentinel-5P نقطه عطفی بود. لیو[8] و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های NO_2 این ماهواره، تغییرات فضایی–زمانی این آلاینده را در کلان‌شهرهای آسیایی طی دوره همه‌گیری کووید–۱۹ تحلیل کردند و کاهش محسوس آلودگی ناشی از محدودیت‌های فعالیت انسانی را آشکار ساختند. مطالعات مشابهی توسط باونس[9] و همکاران (۲۰۲۰) در اروپا انجام شد.

ج) تلفیق سنجش‌ازدور، GIS و شاخص‌های محیطی شهری: روند نوین در پژوهش‌های تجربی، تمرکز بر تحلیل یکپارچه آلودگی هوا با سایر متغیرهای محیط شهری است. مطالعات متعددی ارتباط مثبت و قوی بین شدت جزیره حرارتی شهری (SUHI) و غلظت آلاینده‌ها را نشان داده‌اند (Li et al., 2019; Zhao et al., 2020). به‌طور هم‌زمان، نقش تعدیل‌کننده پوشش گیاهی شهری بر اساس شاخص‌هایی مانند NDVI به‌طور گسترده‌ای اثبات شده است (Nowak et al., 2021; Ji et al., 2021). برای مثال، ژانگ[10] و همکاران (۲۰۲۱) در شهرهای صنعتی چین، هم‌پوشانی فضایی قابل‌توجهی بین پهنه‌های با آلودگی بالا، مناطق صنعتی و سطوح نفوذناپذیر شناسایی کردند. در حوزه تحلیل‌های فضایی–زمانی یکپارچه، فو[11] و همکاران

5. Kampa & Castanas
6. van Donkelaar
7. Di
8. Liu
9. Bauwens
10. Zhang
11. Fu

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

(۲۰۲۲) با استفاده از مدل‌های سلسله‌مراتبی بیزی فضایی–زمانی نشان دادند که ترکیب بعد زمانی، دقت شناسایی روندها و عوامل مؤثر را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

در بستر ایران و تهران باوجود پیشینه غنی مطالعات میدانی درباره آلودگی هوای تهران (مانند Safavi & Alijani, 2006; Ghalampour et al., 2019)، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های فضایی یکپارچه نسبتاً نوپا است. برخی مطالعات اخیر به استخراج جداگانه شاخص‌هایی مانند LST یا NDVI برای تهران پرداخته‌اند (برای مثال، Taghavi et al., 2021) یا از داده‌های Sentinel-5P برای پایش کوتاه‌مدت یک آلاینده خاص استفاده کرده‌اند (Karimi & Razavi, 2022). بااین‌حال، شکاف پژوهشی آشکاری در زمینه تحلیل بلندمدت (چند دهه) و تلفیق هم‌زمان داده‌های چند ماهواره‌ای (لندست و سنتینل) با مجموعه‌ای جامع از شاخص‌های محیطی و کالبدی در مقیاس مناطق ۲۲گانه تهران مشاهده می‌شود. این پژوهش در صدد پر کردن این شکاف است.

مدل مفهومی پژوهش

آلودگی هوا در مقیاس شهری پدیده‌ای فضایی–زمانی، چندعاملی و وابسته به برهم‌کنش پیچیده میان فعالیت‌های انسانی، ساختار کالبدی شهر و فرایندهای فیزیکی–شیمیایی جو است. بر این اساس، در پژوهش حاضر مدل مفهومی به‌منظور تبیین چهارچوب تحلیلی حاکم بر روابط بین متغیرهای محیطی و آلاینده‌های هوا در شهر تهران تدوین شده است.

مدل مفهومی پژوهش بر این فرض استوار است که ویژگی‌های کالبدی و کاربری اراضی شهری به‌صورت مستقیم قابل‌اندازه‌گیری نیستند، اما اثر آن‌ها ازطریق شاخص‌های محیطی استخراج‌شده از داده‌های سنجش‌ازدور قابل بازنمایی و تحلیل است. در این چهارچوب، شاخص‌هایی نظیر دمای سطح زمین (LST)، شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)، آلبدو و شاخص طیفی VBSWIR به‌عنوان متغیرهای واسط میان ساختار فیزیکی شهر و کیفیت هوا در نظر گرفته می‌شوند.

در گام بعد، تغییرات مکانی–زمانی این شاخص‌های محیطی در ارتباط با توزیع فضایی آلاینده‌های اولیه هوا شامل CO_2، NO_2 و SO_2 در سطح مناطق ۲۲گانه شهر تهران موردبررسی قرار می‌گیرد. فرض اصلی مدل آن است که ناهمگونی فضایی در ویژگی‌های حرارتی، پوشش گیاهی و بازتابندگی سطح زمین، می‌تواند به الگوهای متفاوتی از تمرکز آلاینده‌های اولیه در سطح شهر منجر شود.

درنهایت، ازن سطح زمین (O_3) به‌عنوان آلاینده‌ای ثانویه در مدل مفهومی لحاظ شده است که توزیع فضایی آن نه مستقیماً، بلکه درنتیجه تعامل میان پیش‌سازهای شیمیایی، شرایط تابشی و وضعیت حرارتی سطح شهر شکل می‌گیرد. بر این اساس، O_3 در این مدل به‌عنوان خروجی غیرمستقیم فرایندهای محیطی و شیمیایی در نظر گرفته می‌شود.

مدل مفهومی پژوهش حاضر، چهارچوبی تحلیلی برای هدایت مراحل روش‌شناسی، تفسیر نتایج فضایی–آماری و انسجام منطقی میان داده‌ها، روش‌ها و یافته‌ها فراهم می‌آورد و از ادعای روابط علی قطعی فراتر نرفته و صرفاً بستری برای تحلیل روابط مکانی–آماری در مقیاس شهری ارائه می‌دهد.

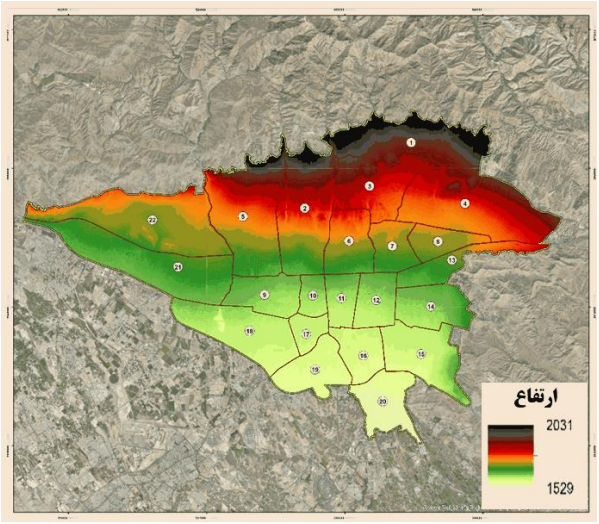
روش‌شناسی پژوهش

محدوده موردمطالعه

محدوده مکانی این پژوهش، مناطق ۲۲گانه شهرداری تهران را شامل می‌شود که به‌عنوان واحد تحلیل اصلی در نظر گرفته شده‌اند. تهران به‌عنوان پایتخت ایران، در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز واقع شده و به دلیل توپوگرافی بسته، تراکم بالای جمعیت، تمرکز فعالیت‌های صنعتی و حجم بالای تردد خودروها، همواره با چالش آلودگی هوای شدید روبه‌رو است. موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های طبیعی این شهر، ازجمله وارونگی دمایی در فصول سرد، موجب تشدید پدیده انباشت آلاینده‌ها می‌شود.
بازه زمانی موردبررسی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ است که باتوجه‌به دسترسی به جدیدترین داده‌های ماهواره‌ای و اهمیت بررسی روندهای اخیر آلودگی هوا انتخاب شده است. انتخاب این بازه پنج‌ساله امکان تحلیل تغییرات کوتاه‌مدت و شناسایی الگوهای

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

سالانه آلودگی را ممکن می‌سازد.



شکل ۱. موقعیت و محدوده مکانی پژوهش و ارتفاع سطح شهر تهران

نوع و رویکرد پژوهش

پژوهش حاضر ازنظر هدف، کاربردی و ازنظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی است. رویکرد حاکم بر این مطالعه، کمی و مبتنی بر تحلیل‌های فضایی-زمانی است. چهارچوب روش‌شناسی، تلفیق داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های مکانی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی بوده و هدف آن پهنه‌بندی و بررسی روند تغییرات آلودگی هوا در یک بازه پنج‌ساله است.

داده‌ها و منابع اطلاعاتی

داده‌های مورداستفاده در این پژوهش عمدتاً از منابع سنجش‌ازدور و با دسترسی آزاد تهیه شده‌اند. تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (سنجنده OLI/TIRS) برای بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ از پایگاه داده USGS EarthExplorer دریافت شد. این تصاویر با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر (باندهای اپتیکال) و ۱۰۰ متر (باندهای حرارتی) برای استخراج شاخص‌های محیطی سطح زمین مورداستفاده قرار گرفتند.

داده‌های ماهواره سنتینل ۵ (سنجنده TROPOMI) محصولات سطح ۲ این ماهواره شامل غلظت ستونی آلاینده‌های گازی دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، مونوکسید کربن (CO) و ازن (O_3) از پلتفرم Google Earth Engine استخراج شدند. قدرت تفکیک مکانی این داده‌ها ۵٫۵×۷ کیلومتر بوده که برای اهداف پهنه‌بندی شهری مناسب تشخیص داده شد.

مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر از ماهواره ALOS PALSAR برای در نظر گرفتن آثار توپوگرافی بر پراکنش آلاینده‌ها و لایه مرز مناطق ۲۲گانه شهرداری تهران به‌عنوان چهارچوب مکانی تحلیل و پهنه‌بندی در تمام مراحل پژوهش مورداستفاده قرار گرفت.

فرایند و مراحل روش‌شناسی

روش‌شناسی پژوهش حاضر با هدف تحلیل فضایی-زمانی آلودگی هوای شهر تهران و بررسی ارتباط آن با شاخص‌های محیطی استخراج‌شده از داده‌های سنجش‌ازدور در قالب یک فرایند مرحله‌مند طراحی شده است. این فرایند شامل گردآوری داده‌ها، پیش‌پردازش، استخراج شاخص‌ها، آماده‌سازی داده‌های آلاینده و انجام تحلیل‌های مکانی و آماری است.

در مرحله نخست، تصاویر ماهواره‌ای لندست تحت عملیات پیش‌پردازش شامل تصحیح اتمسفری، تصحیح رادیومتری و تصحیح هندسی قرار گرفتند. تصحیح اتمسفری با استفاده از الگوریتم FLAASH در نرم‌افزار ENVI انجام شد تا آثار جو بر بازتابندگی سطحی کاهش یابد. تصحیح هندسی تصاویر با خطای ریشه میانگین مربعات کمتر از ۰/۵ پیکسل انجام پذیرفت.

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

در مرحله دوم، شاخص‌های محیطی از تصاویر لندست پیش‌پردازش‌شده استخراج شدند. دمای سطح زمین (LST) با استفاده از باندهای حرارتی و الگوریتم پنجره مجزا محاسبه شد. شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) از نسبت تفاضل و مجموع باندهای مادون‌قرمز نزدیک و قرمز استخراج شد. آلبدو به‌عنوان شاخص بازتابندگی کلی سطح زمین از ترکیب وزنی بازتابندگی باندهای مختلف لندست محاسبه گردید. همچنین شاخص VBSWIR بر مبنای باندهای مادون‌قرمز موج کوتاه (SWIR) استخراج شد.

در مرحله سوم، داده‌های غلظت ماهانه آلاینده‌های گازی شامل CO_2، NO_2، SO_2 و O_3 از محصولات ماهواره Sentinel-5P برای دوره پنج‌ساله موردمطالعه استخراج شد. این داده‌ها که به‌صورت محصولات از پیش‌پردازش‌شده ارائه می‌شوند، ازنظر پوشش ابر و کیفیت داده مورد پالایش قرار گرفتند. به‌منظور امکان مقایسه مکانی، میانگین‌گیری مکانی داده‌ها در سطح مناطق ۲۲گانه شهر تهران انجام شد و برای کاهش نوسانات کوتاه‌مدت، میانگین‌گیری زمانی سالانه اعمال گردید.

در مرحله چهارم، تمامی لایه‌های شاخص‌های محیطی و آلاینده‌های گازی به‌صورت داده‌های پیوسته در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی آماده‌سازی شدند.

در مرحله پنجم و نهایی، تحلیل‌های مکانی و آماری در محیط نرم‌افزار ArcGIS Pro انجام پذیرفت. برای بررسی روابط کمی بین شاخص‌های محیطی LST، NDVI، Albedo و VBSWIR و غلظت آلاینده‌های هوا، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. این ضریب باتوجه‌به ماهیت پیوسته متغیرها و هدف پژوهش در تحلیل روابط خطی بین داده‌ها انتخاب گردید.



شکل ۲. فلوچارت مراحل روش‌شناسی پژوهش برای تحلیل فضایی–زمانی آلودگی هوای شهر تهران

یافته‌های پژوهش

در این بخش یافته‌های کمی و فضایی حاصل از پردازش و تحلیل داده‌های آلودگی هوا در شهر تهران طی دوره پنج‌ساله ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ ارائه می‌شود. نتایج مبتنی بر خروجی‌های پیوسته شامل نقشه‌های توزیع فضایی آلاینده‌ها و شاخص‌های محیطی استخراج‌شده در محیط GIS است. در این بخش، تمرکز صرفاً بر گزارش الگوهای مکانی و زمانی و ارائه مقادیر و روابط آماری است و تفسیر علی و بحث تفصیلی نتایج در بخش ۵ (بحث) ارائه خواهد شد.

الگوی فضایی–زمانی آلاینده‌های هوا در مناطق ۲۲گانه شهر تهران (۲۰۱۹–۲۰۲۳)

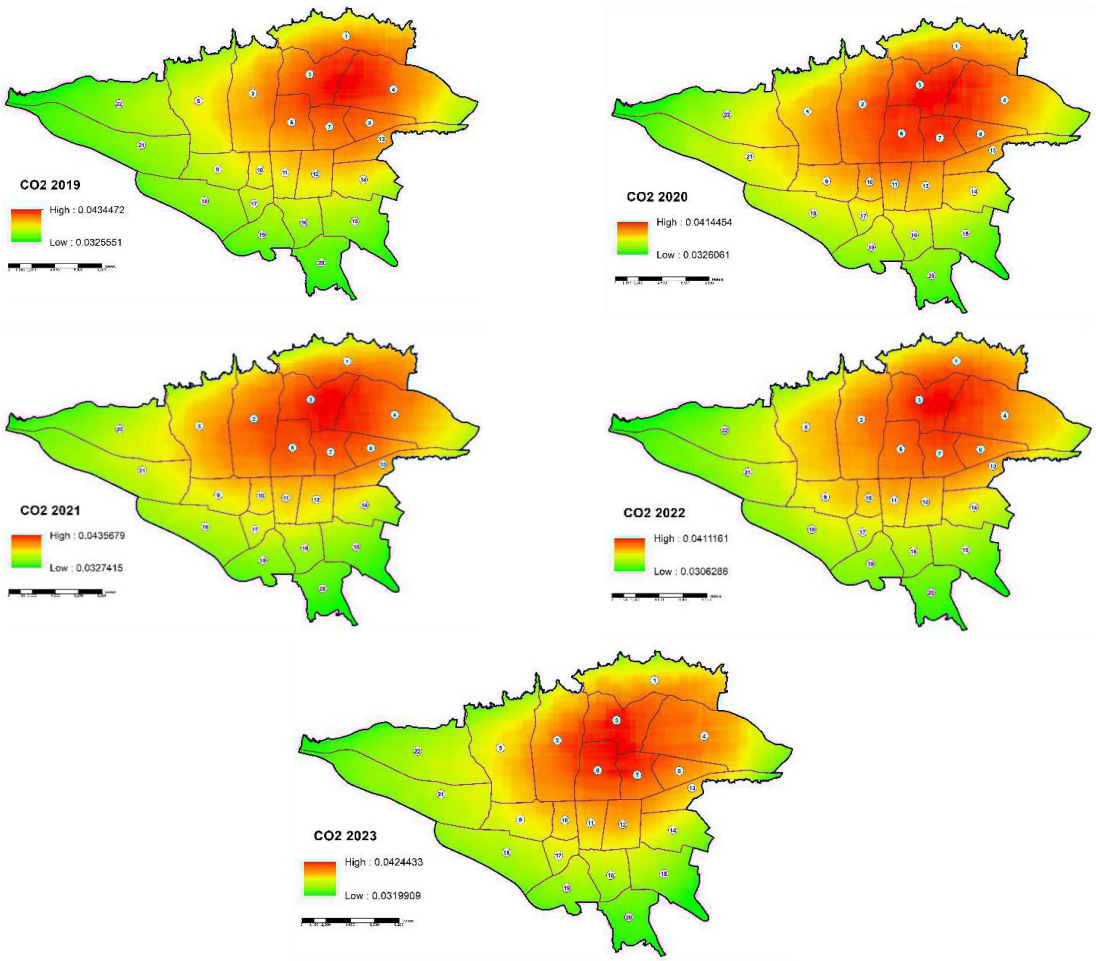
نقشه‌های پهنه‌بندی آلودگی هوا، توزیع فضایی آلاینده‌های SO_2، NO_2، CO_2 و O_3 را در مقیاس منطقه‌ای و در بازه زمانی

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

موردمطالعه نشان می‌دهند. در این نقشه‌ها، تغییرات تدریجی مقادیر و گرادیان‌های مکانی، امکان شناسایی نواحی با غلظت نسبی بالاتر یا پایین‌تر آلاینده‌ها را فراهم می‌سازد. به‌منظور تکمیل تحلیل فضایی، نمودارهای مربوط به تغییرات میانگین غلظت آلاینده‌ها در مناطق ۲۲گانه شهر تهران ارائه شده است که امکان مقایسه کمی مناطق مختلف و بررسی تفاوت‌های مکانی بین آن‌ها را فراهم می‌کند.

توزیع مکانی آلاینده $CO2$

بر اساس نقشه‌های CO_2، یک الگوی کاهشی تدریجی از نواحی شمالی به سمت مناطق مرکزی و جنوبی شهر مشاهده می‌شود. کمترین مقادیر CO_2 عمدتاً در مناطق مرکزی، جنوب غربی و جنوبی تهران متمرکز است، درحالی‌که مناطق شمالی و شمال شرقی شهر مقادیر پایین‌تری را نشان می‌دهند. این الگوی مکانی در طول دوره موردمطالعه نسبتاً پایدار بوده و بیانگر نقش غالب فعالیت‌های انسانی، تراکم ترافیکی و ساختار کالبدی متراکم در تولید CO_2 است.



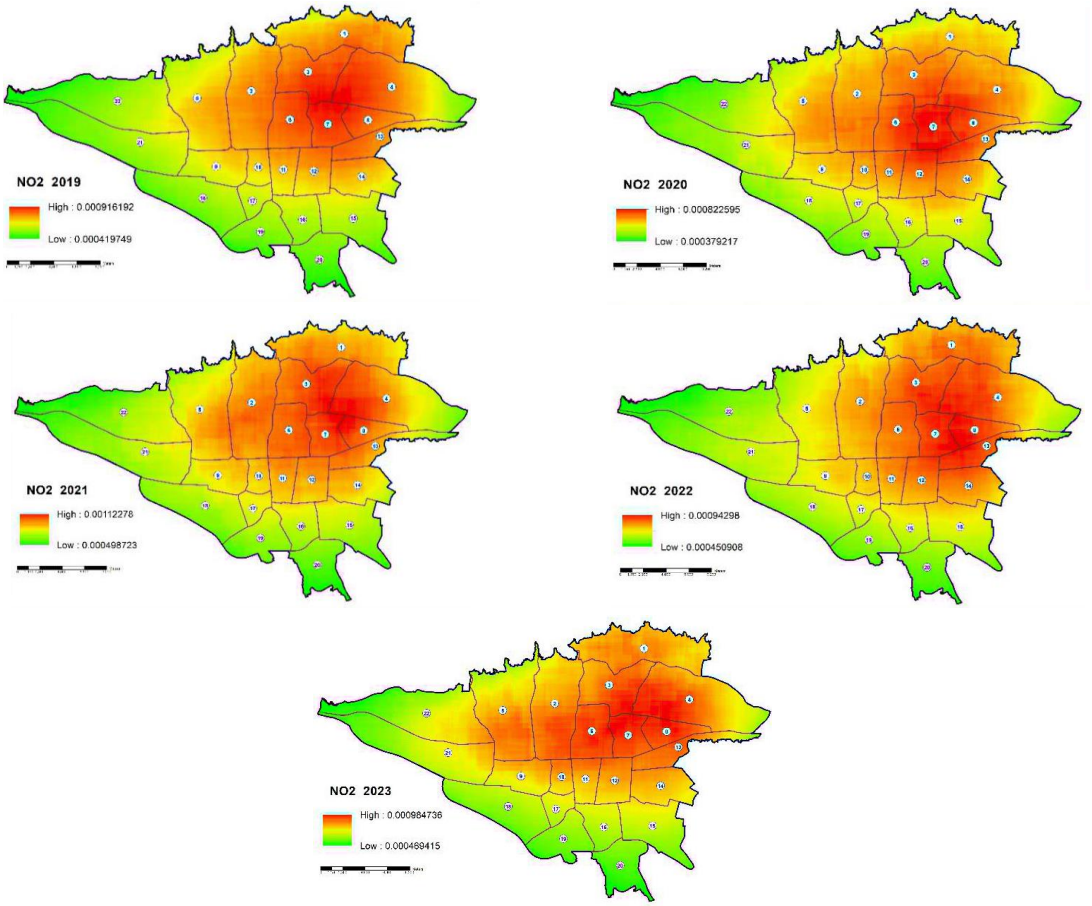
شکل ۳. نقشه‌های توزیع فضایی–زمانی غلظت CO_2 در مناطق ۲۲گانه شهر تهران (۲۰۱۹–۲۰۲۳)

توزیع مکانی آلاینده NO_2 **و** SO_2

الگوی فضایی آلاینده NO_2 شباهت زیادی به توزیع CO_2 دارد. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، بیشترین مقادیر NO_2 در مناطق مرکزی، شرقی و جنوب شرقی شهر تهران دیده می‌شود. این الگو نشان‌دهنده تأثیر مستقیم شبکه حمل‌ونقل، تراکم معابر شهری و فعالیت‌های ترافیکی بر افزایش غلظت NO_2 است. در مقابل، مناطق غربی شهر مقادیر پایین‌تری از این آلاینده را ثبت کرده‌اند.

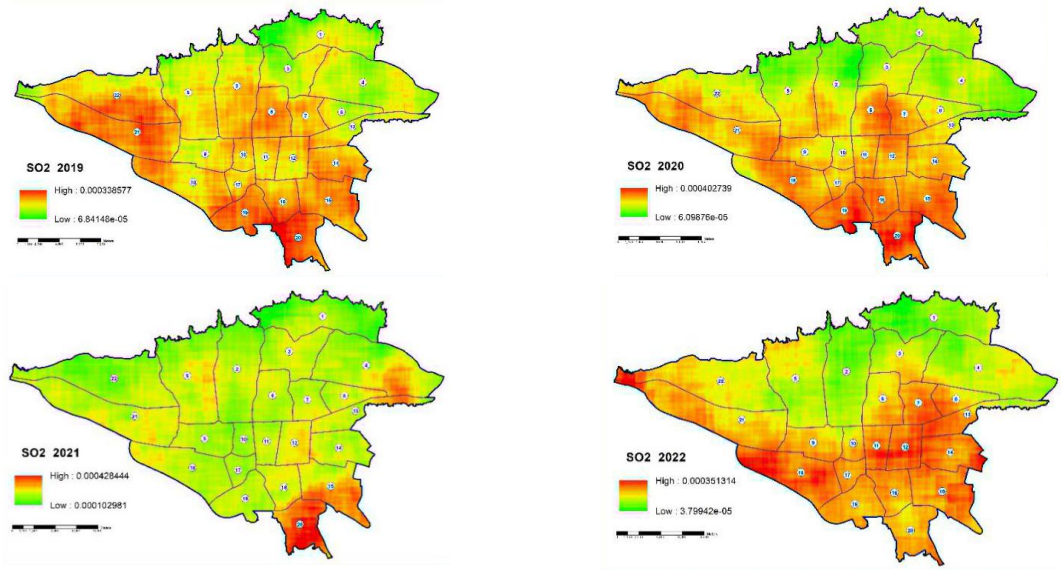
[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]



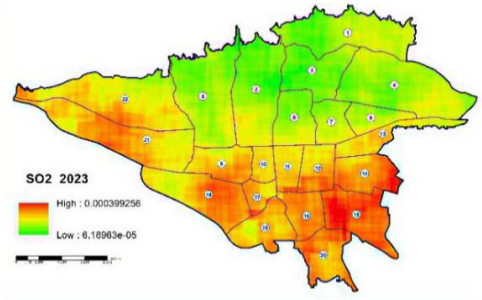
شکل٤. نقشه‌های توزیع فضایی–زمانی غلظت NO_2 در مناطق ۲۲گانه شهر تهران (۲۰۱۹–۲۰۲۳)

در مورد آلاینده SO_2، اگرچه دامنه تغییرات فضایی نسبت به NO_2 محدودتر است، اما همچنان گرادیان مکانی مشخصی از جنوب به شمال شهر قابل‌مشاهده است. تمرکز نسبی SO_2 در مناطق جنوبی و جنوب شرقی شهر می‌تواند بیانگر تأثیر منابع سوختی، فعالیت‌های صنعتی پیرامونی و شرایط توپوگرافی این نواحی باشد.



[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

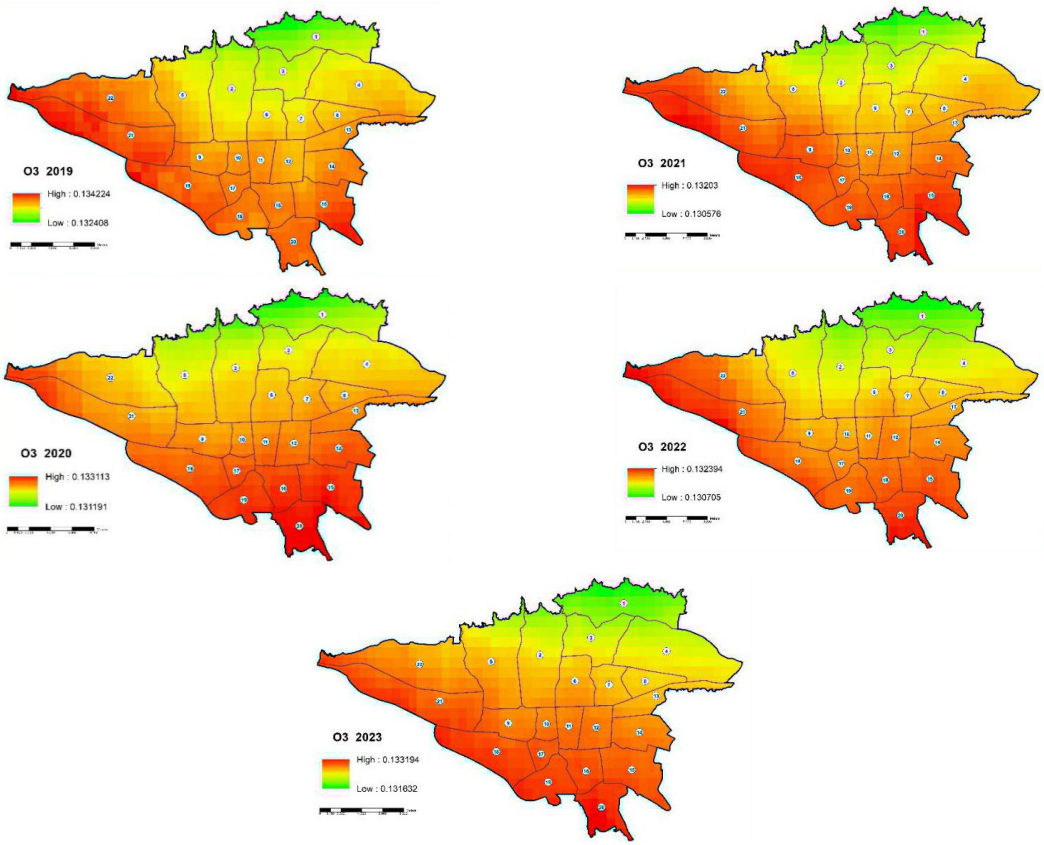
[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]



شکل ۵. نقشه‌های توزیع فضایی-زمانی غلظت SO_2 در مناطق ۲۲گانه شهر تهران (۲۰۱۹-۲۰۲۳)

الگوی فضایی آلاینده O_3

برخلاف آلاینده‌های اولیه، الگوی توزیع فضایی ازن سطح زمین (O_3) متفاوت و حتی معکوس نسبت به NO_2 و CO_2 است. نقشه‌ها نشان می‌دهند که کمترین مقادیر O_3 عمدتاً در مناطق شمالی، شمال شرقی و مرتفع شهر تهران مشاهده می‌شود، درحالی‌که مناطق مرکزی و جنوبی دارای مقادیر بالاتری هستند. این الگو بیانگر ماهیت ثانویه O_3 و وابستگی آن به واکنش‌های فتوشیمیایی، شدت تابش خورشیدی و دمای سطح زمین است.



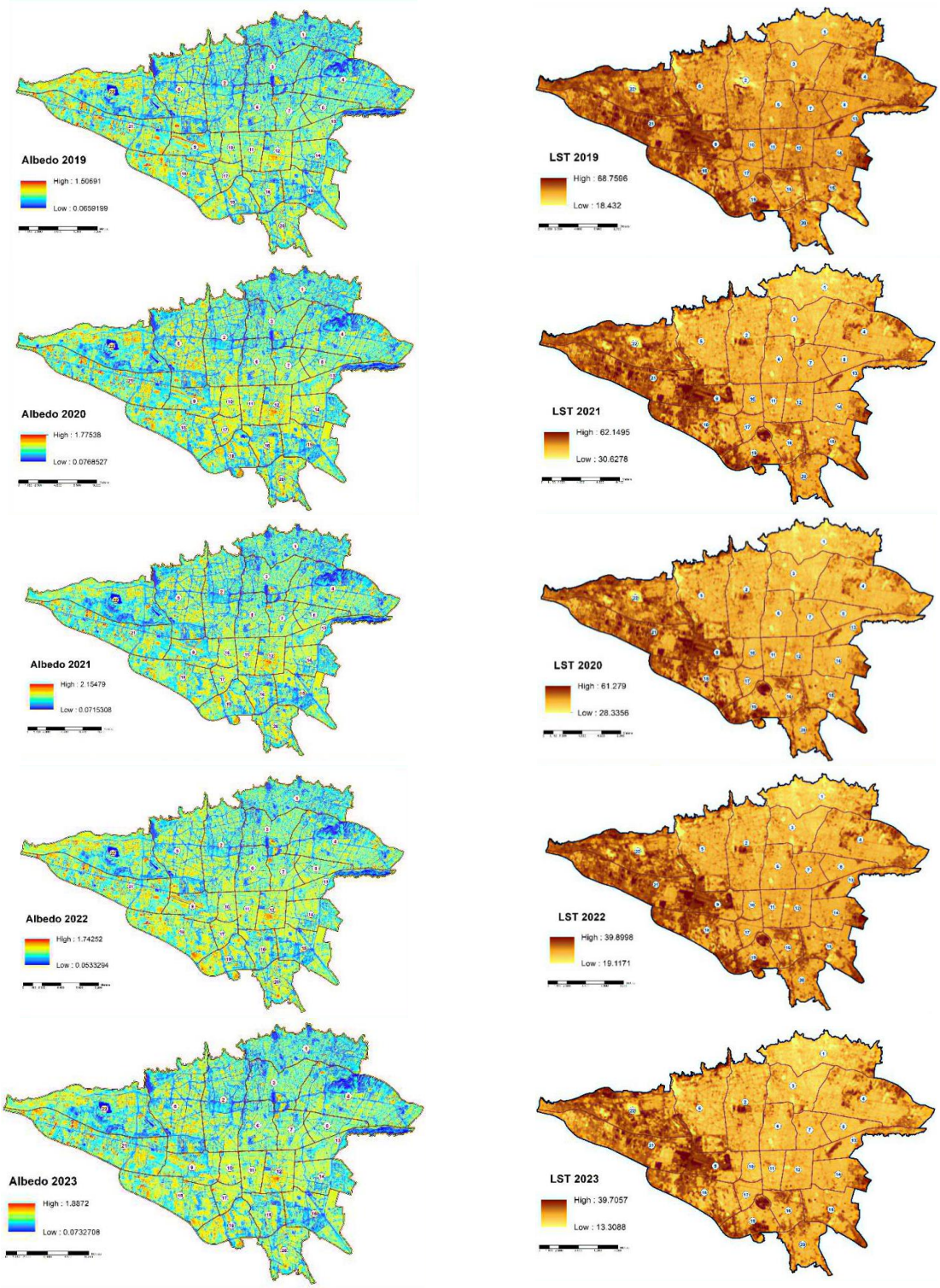
شکل ٦. نقشه‌های توزیع فضایی-زمانی غلظت O_3 در مناطق ۲۲گانه شهر تهران (۲۰۱۹-۲۰۲۳)

الگوی فضایی شاخص‌های محیطی

تحلیل شاخص‌های محیطی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای لندست شامل LST، NDVI، Albedo و VBSWIR نشان‌دهنده ساختار فضایی مشخص محیط شهری تهران است.

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]



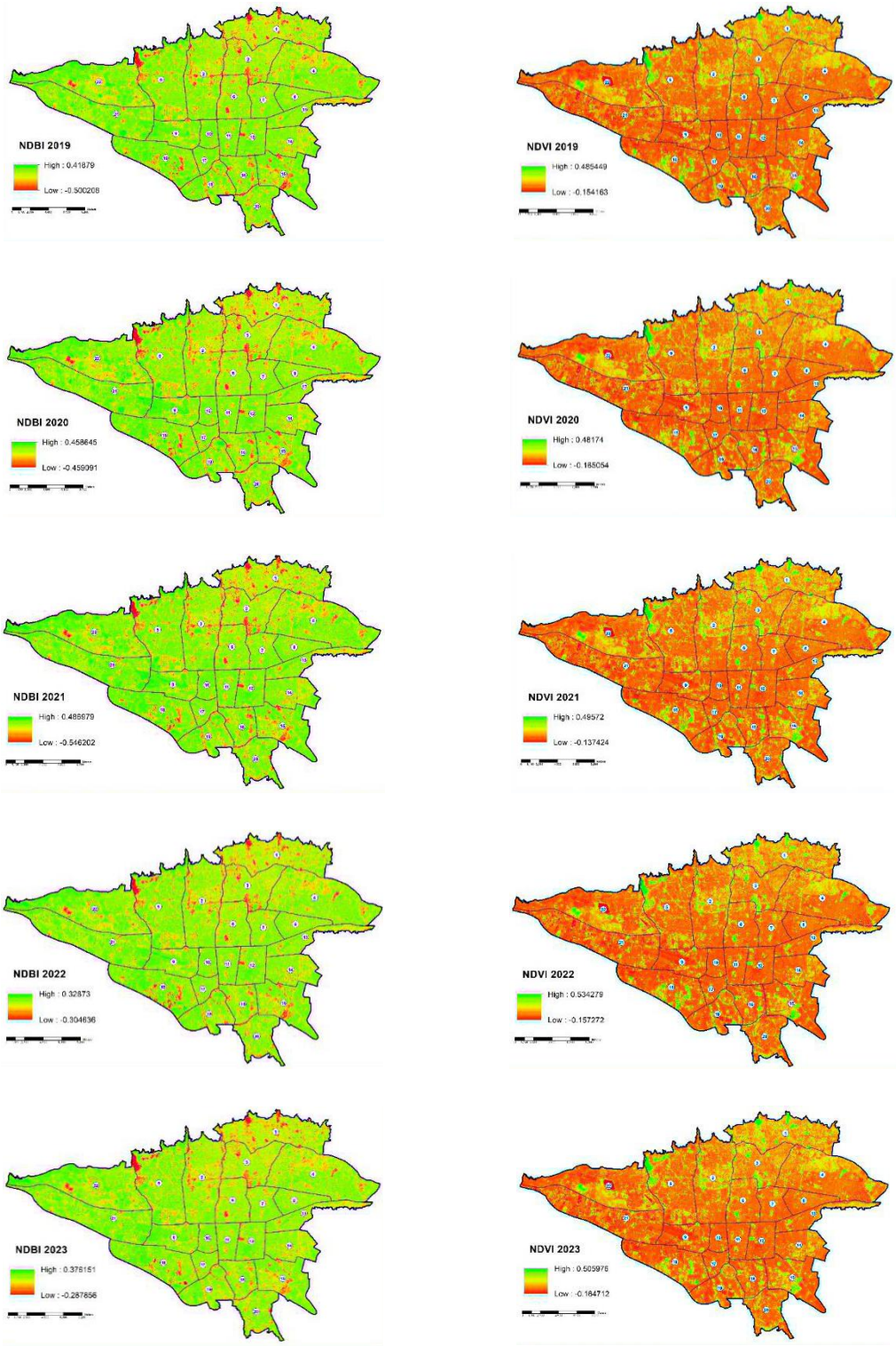
شکل ۷. نقشه‌های توزیع فضایی LST مناطق تهران در بازه ۵ ساله

شکل ۸. نقشه‌های توزیع فضایی Albedo مناطق تهران در بازه ۵ ساله

نقشه‌های LST بیانگر تمرکز دمای بالاتر در مناطق مرکزی، جنوبی و جنوب غربی شهر هستند که با گسترش سطوح ساخته‌شده و کاهش پوشش گیاهی همخوانی دارد. در مقابل، مناطق شمالی شهر دمای سطح زمین پایین‌تری را نشان می‌دهند.

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

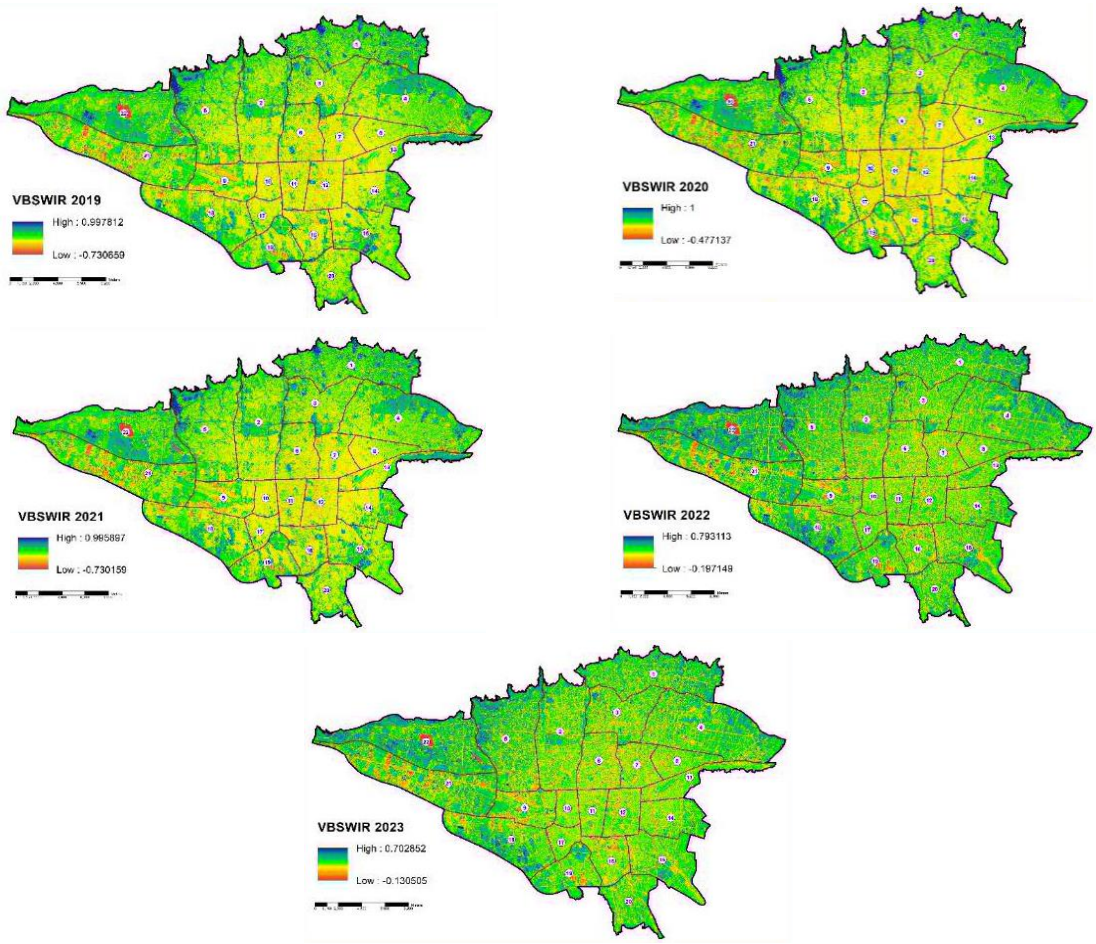
[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]



شکل ۹. نقشه‌های توزیع فضایی NDVI و NDBI مناطق تهران در بازه ۵ ساله

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]



شکل ۱۰. نقشه‌های توزیع فضایی VBSWIR مناطق تهران در باز در ۵ ساله

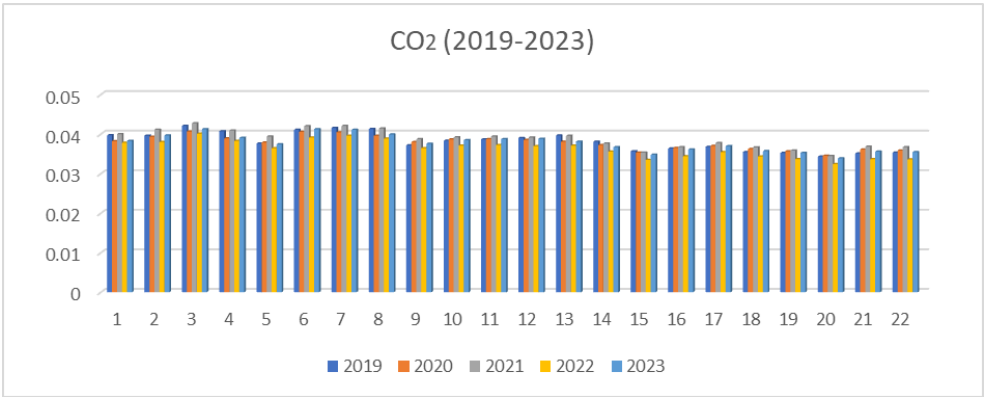
شاخص NDVI بیشترین مقادیر را در مناطق شمالی و کم‌تراکم شهر نشان می‌دهد، درحالی‌که شاخص‌های NDBI و VBSWIR در مناطق مرکزی و جنوبی به بیشترین میزان خود می‌رسند. این الگو نشان‌دهنده غلبه سطوح نفوذناپذیر و کالبد فشرده شهری در این نواحی است.

تحلیل آماری ارتباط بین شاخص‌های محیطی و آلاینده‌ها

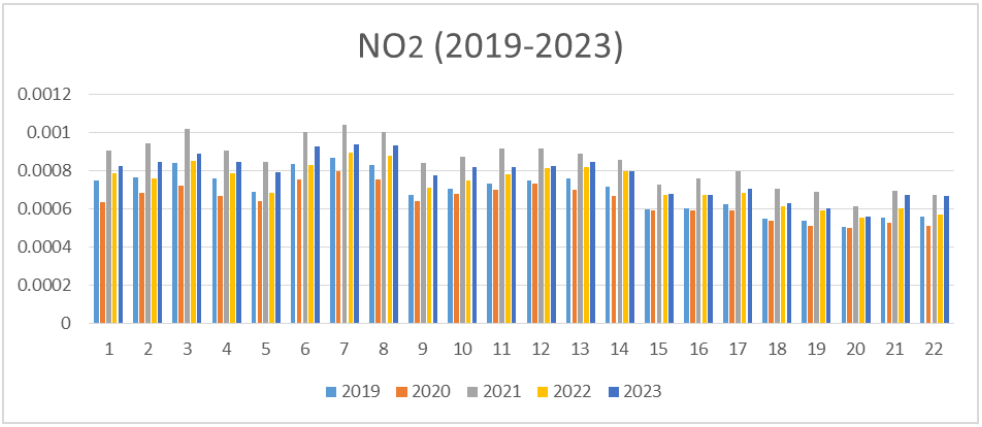
به‌منظور بررسی الگوی کمی و مکانی ارتباط بین شاخص‌های محیطی و آلاینده‌های هوا در سطح مناطق ۲۲گانه شهر تهران، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. در این تحلیل، میانگین مقادیر آلاینده‌ها (CO_2، NO_2، SO_2 و O_3) و شاخص‌های محیطی (LST، NDVI، Albedo و VBSWIR) در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ برای هر یک از مناطق محاسبه و سپس روابط آماری آن‌ها استخراج شد.

بر اساس شکل‌های ۱۱ تا ۱۴، توزیع مکانی آلاینده‌ها در مناطق ۲۲گانه تهران یکنواخت نیست و تفاوت‌های مشخصی بین مناطق مختلف مشاهده می‌شود. مقادیر بالاتر CO_2 عمدتاً در مناطق مرکزی و شمالی شهر ازجمله مناطق ۳، ۴، ۶ و ۸ مشاهده می‌شود. در مقابل، مناطق جنوبی و غربی مانند ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲ دارای مقادیر پایین‌تری از این آلاینده هستند. روند زمانی CO_2در اغلب مناطق نوسانات سالانه نسبتاً مشابهی را نشان می‌دهد، اما دامنه تغییرات در مناطق مرکزی بیشتر است.

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

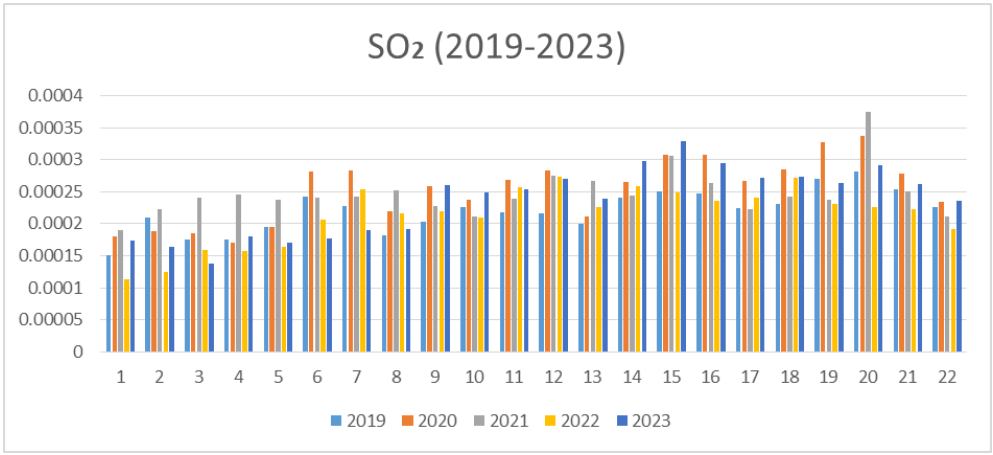


شکل ۱۱. نمودار تغییرات زمانی آلاینده CO2 مناطق ۲۲گانه تهران در بازه ۵ساله



شکل ۱۲. نمودار تغییرات زمانی آلاینده NO2 مناطق ۲۲گانه تهران در بازه ۵ساله

توزیع SO_2 نسبت به CO_2 و NO_2 پراکندگی بیشتری دارد، مقادیر بالاتر آن در برخی مناطق مرکزی، جنوب و جنوب غربی شهر ازجمله مناطق ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌شود. در مناطق شمالی، مقادیر SO_2 عموماً پایین‌تر و با نوسان کمتر همراه است.

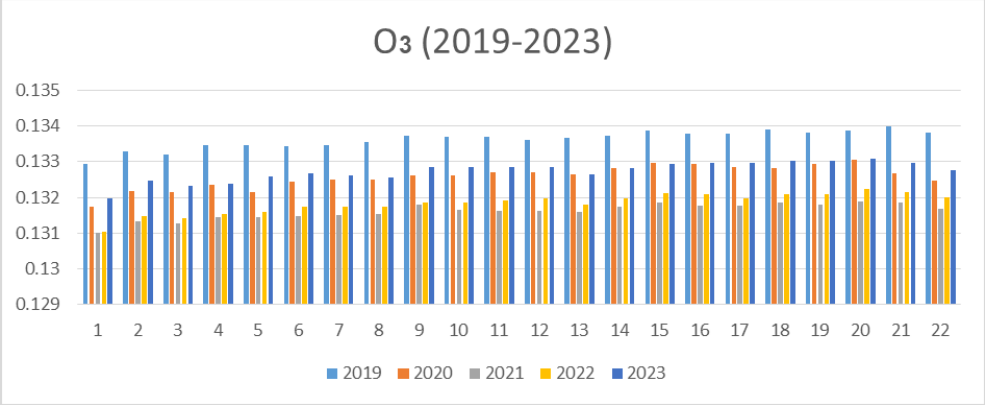


شکل۱۳. نمودار تغییرات زمانی آلاینده SO2 مناطق ۲۲گانه تهران در بازه ۵ساله

بیشترین مقادیر O_3 در مناطق جنوبی شهر مانند ۲۰، ۱۹و۲۰ مشاهده می‌شود. مناطق شمالی شهر، ازجمله مناطق ۱،۲،۳،۴، مقادیر پایین‌تری از ازن سطح زمین را نشان می‌دهند. این الگوی فضایی در تمامی سال‌های دوره مطالعه تداوم داشته است.

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]



شکل۱٤. نمودار تغییرات زمانی آلاینده O3 مناطق ۲۲گانه تهران در بازه ۵ساله

جمع‌بندی یافته‌های پژوهش

به‌طورکلی، نتایج تحلیل آماری نشان می‌دهد که مقادیر آلاینده‌ها در مناطق مختلف شهر تفاوت معناداری دارند و آلودگی هوای تهران دارای الگوی فضایی پیوسته و ناهمگون است.

آلاینده‌های اولیه CO_2 و NO_2 عمدتاً در مناطق شمالی و شمال شرقی شهر متمرکز شده‌اند. ازن سطح زمین (O_3) الگوی مکانی متفاوتی داشته و بیشتر تحت تأثیر شرایط اقلیمی و دمای سطح زمین قرار دارد. شاخص‌های محیطی، به‌ویژه LST و NDVI، نقش مهمی در تبیین تغییرات مکانی آلاینده‌های هوا ایفا می‌کنند.

بحث

تفسیر الگوی فضایی آلاینده‌های اولیه CO_2، NO_2 و SO_2

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که آلاینده‌های اولیه شامل CO_2، NO_2 در شهر تهران دارای الگوی فضایی نسبتاً مشابه و هم‌راستا هستند. بر اساس نتایج بخش چهارم، بیشترین مقادیر CO_2، NO_2 در مناطق ۳، ۶، ۷، ۸، ۱۲ و بیشترین مقادیر SO_2 در مناطق ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰ و بخش‌هایی از مناطق ۱۴ و ۱۲ مشاهده شد که در نقشه‌های پهنه‌بندی به‌صورت هسته‌های متمرکز آلودگی قابل‌تشخیص هستند. تمرکز مقادیر بالاتر این آلاینده‌ها در این مناطق شهر که در نقشه‌های طیفی–پیوسته به‌صورت گرادیان‌های افزایشی مشخص قابل‌مشاهده است، بیانگر نقش تعیین‌کننده ساختار کالبدی–عملکردی شهر در شکل‌گیری آلودگی هوا است.

این نواحی به دلیل تراکم بالای جمعیت، شبکه متراکم معابر، تمرکز فعالیت‌های تجاری–خدماتی و حجم بالای تردد وسایل نقلیه، به‌عنوان کانون‌های اصلی تولید آلاینده‌های اولیه شناخته می‌شوند. پیوستگی فضایی مشاهده‌شده در نقشه‌ها نشان می‌دهد که آلودگی هوا در این مناطق به‌صورت نقطه‌ای نیست، بلکه به شکل پهنه‌ای و پیوسته در سطح شهر گسترش یافته است؛ موضوعی که اهمیت مدیریت یکپارچه و منطقه‌محور آلودگی هوا را برجسته می‌سازد.

رفتار فضایی متفاوت ازن سطح زمین (O_3)

در مقابل آلاینده‌های اولیه، الگوی فضایی ازن سطح زمین (O_3) رفتاری متفاوت و حتی معکوس را نشان می‌دهد. مطابق یافته‌های فصل چهارم، مناطق ۱، ۳، ۴ و ۵ کمترین مقادیر ازن سطح زمین را نشان می‌دهند، درحالی‌که مناطق مرکزی و جنوبی دارای مقادیر بالاتری هستند. تمرکز مقادیر بالاتر O_3 در مناطق شمالی و شمال شرقی شهر تهران که در نقشه‌های طیفی به‌وضوح قابل‌مشاهده است، تأییدکننده ماهیت ثانویه این آلاینده است.

ازن سطح زمین عمدتاً حاصل واکنش‌های فتوشیمیایی بین پیش‌سازهایی نظیر NO_x و ترکیبات آلی فرار در حضور تابش خورشیدی و دمای مناسب است. بنابراین، کاهش را می‌توان به مصرف سریع پیش‌سازها، تداخل شیمیایی و شرایط تهویه متفاوت

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

نسبت داد. این یافته نشان می‌دهد که کنترل آلودگی هوا نباید صرفاً بر کاهش آلاینده‌های اولیه متمرکز شود، بلکه لازم است فرایندهای شیمیایی ثانویه نیز در سیاست‌گذاری‌ها مدنظر قرار گیرد.

نقش شاخص‌های محیطی در تبیین الگوی آلودگی هوا

تحلیل هم‌زمان شاخص‌های محیطی شامل LST، NDVI، Albedo و VBSWIR نشان می‌دهد که ساختار فیزیکی شهر تهران نقش کلیدی در توزیع مکانی آلودگی هوا ایفا می‌کند. این الگو به‌ویژه در مقایسه بین مناطق شمالی (۱ تا ۵) و مناطق مرکزی–جنوبی شهر به‌وضوح قابل‌مشاهده است. افزایش LST در مناطق مرکزی و جنوبی که با غلبه سطوح ساخته‌شده و کاهش پوشش گیاهی همراه است، شرایط مناسبی را برای تجمع آلاینده‌ها فراهم می‌سازد.

در مقابل، مقادیر بالاتر NDVI در مناطق شمالی شهر، به‌عنوان شاخصی از پوشش گیاهی، با کاهش نسبی غلظت آلاینده‌های اولیه همراه بوده است. این موضوع نقش تعدیل‌کننده فضای سبز در بهبود کیفیت هوا و کاهش شدت آلودگی را تأیید می‌کند. شاخص‌های مرتبط با سطوح ساخته‌شده نظیر VBSWIR نیز به‌خوبی بیانگر تمرکز فعالیت‌های انسانی و تشدید آثار جزیره حرارتی شهری در مناطق مرکزی هستند.

تفسیر روابط آماری بین آلاینده‌ها و شاخص‌های محیطی

نتایج تحلیل همبستگی پیرسون نشان داد که بین LST و آلاینده‌های اولیه NO_2 و CO_2 رابطه‌ای منفی و نسبتاً قوی وجود دارد. این رابطه می‌تواند بیانگر پیچیدگی تعاملات اقلیمی–شهری باشد؛ به‌طوری‌که در مناطق با دمای سطحی بالاتر، فرایندهای اختلاط عمودی و تهویه محلی ممکن است باعث کاهش تمرکز آلاینده‌های اولیه شوند.

در مقابل، رابطه مثبت و قوی بین LST و O_3 نشان می‌دهد که افزایش دمای سطح زمین شرایط مناسبی را برای تولید ازن سطح زمین فراهم می‌کند. این رابطه آماری با الگوی مکانی مشاهده‌شده در مناطق شمالی تهران (به‌ویژه مناطق ۱ تا ۵) همخوانی دارد؛ مناطقی که هم دمای سطح زمین پایین‌تر و هم غلظت O_3 کمتری دارند. این یافته با ماهیت فتوشیمیایی O_3 سازگار بوده و نقش دما را به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در شکل‌گیری این آلاینده برجسته می‌سازد.

همچنین، همبستگی منفی NDVI با O_3 و SO_2 تأیید می‌کند که پوشش گیاهی می‌تواند ازطریق جذب آلاینده‌ها و بهبود شرایط ریزاقلیمی، نقش مؤثری در کاهش آلودگی هوا ایفا کند. روابط مشاهده‌شده برای شاخص VBSWIR نیز نشان‌دهنده اثر غیرمستقیم توسعه کالبدی شهر بر تغییرات غلظت آلاینده‌هاست.

جدول ۵. ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های محیطی منتخب و آلاینده‌های هوا در مناطق ۲۲گانه شهر تهران (میانگین دوره ۲۰۱۹–۲۰۲۳)

شاخص / آلاینده	CO_2	NO_2	SO_2	O_3
LST	-0.70	-0.71	+0.52	+0.70
NDVI	+0.17	+0.08	-0.55	-0.68
Albedo	-0.29	-0.24	+0.58	+0.62
VBSWIR	-0.23	-0.33	-0.43	-0.39

ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های محیطی و آلاینده‌های هوا نشان می‌دهد که دمای سطح زمین (LST) دارای همبستگی منفی قوی با CO_2 و NO_2 و همبستگی مثبت قوی با O_3 است که بیانگر نقش فرایندهای فتوشیمیایی در تولید ازن سطحی در نواحی گرم‌تر شهر تهران است.

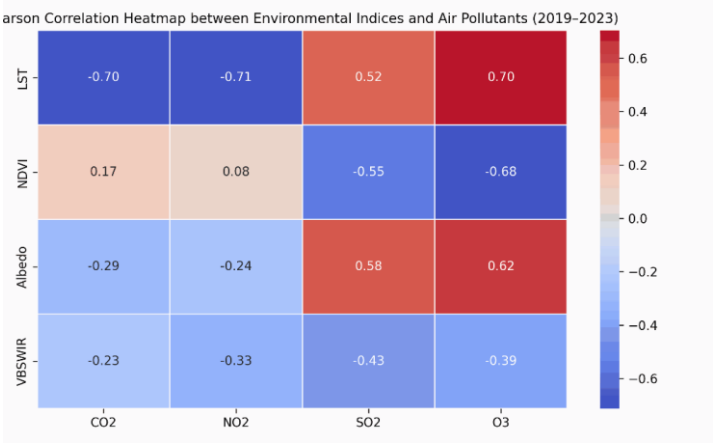
همچنین NDVI با SO_2 و O_3 همبستگی منفی قابل‌توجهی نشان می‌دهد که حاکی از نقش تعدیل‌کننده پوشش گیاهی در کاهش غلظت برخی آلاینده‌ها است. شاخص Albedo نیز ارتباط مثبت متوسط تا قوی با SO_2 و O_3 دارد که می‌تواند به ویژگی‌های سطوح مصنوع و بازتابش انرژی در مناطق شهری متراکم مرتبط باشد.

در نقشه حرارتی، شدت و جهت روابط آماری به‌صورت طیفی نمایش داده شده است؛ به‌طوری‌که رنگ‌های آبی نشان‌دهنده همبستگی منفی و رنگ‌های قرمز بیانگر همبستگی مثبت هستند. بیشترین همبستگی منفی بین LST با CO_2 و NO_2 و بیشترین همبستگی مثبت بین LST با O_3 مشاهده می‌شود. همچنین رابطه منفی قابل‌توجه NDVI با O_3 نقش پوشش گیاهی

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

در کنترل آلودگی هوا را تأیید می‌کند.



شکل ۱۵. نقشه حرارتی ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های محیطی (LST، NDVI، Albedo، VBSWIR) و آلاینده‌های هوا (CO_2، NO_2، SO_2، O_3) در مناطق ۲۲گانه شهر تهران (میانگین ۲۰۱۹–۲۰۲۳)

در این نقشه حرارتی، رنگ‌های آبی بیانگر همبستگی منفی و رنگ‌های قرمز نشان‌دهنده همبستگی مثبت هستند و شدت رنگ، قدرت رابطه را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر همبستگی منفی نسبتاً قوی LST با CO_2 و NO_2 و همبستگی مثبت نسبتاً قوی LST با O_3 است. همچنین NDVI با SO_2 و O_3 همبستگی منفی قابل‌توجه دارد که می‌تواند نقش پوشش گیاهی در تعدیل آلودگی را نشان دهد.

پیامدهای مدیریتی و برنامه‌ریزی شهری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که آلودگی هوای تهران نتیجه برهم‌کنش پیچیده‌ای از عوامل کالبدی، اقلیمی و انسانی است. تمرکز آلودگی در مناطق مرکزی و جنوبی شهر بیانگر ضرورت بازنگری در الگوی توسعه شهری، بهبود سیستم حمل‌ونقل عمومی، کنترل ترافیک و افزایش فضاهای سبز شهری است. از سوی دیگر، الگوی متفاوت O_3 نشان می‌دهد که سیاست‌های کاهش آلودگی باید چندبعدی بوده و علاوه بر کاهش منابع آلاینده، به شرایط اقلیمی و واکنش‌های شیمیایی جو نیز توجه داشته باشند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف پهنه‌بندی و تحلیل فضایی–زمانی آلودگی هوای شهر تهران در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ و با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام شد. استفاده هم‌زمان از داده‌های سنجش‌ازدور و شاخص‌های محیطی، امکان بررسی جامع و پیوسته الگوهای مکانی و زمانی آلودگی هوا را در سطح مناطق ۲۲گانه شهر تهران فراهم ساخت.

نتایج نشان داد که آلودگی هوای تهران دارای الگوی فضایی ناهمگون اما پیوسته است؛ به‌گونه‌ای که آلاینده‌های اولیه شامل CO_2، NO_2 عمدتاً در مناطق مرکزی و شرقی و آلاینده SO_2 جنوبی و جنوب غربی شهر تمرکز یافته‌اند. این الگو به‌طور مستقیم با تراکم بالای فعالیت‌های انسانی، کاربری‌های صنعتی، ترافیک و شبکه حمل‌ونقل متراکم و ساختار کالبدی فشرده این نواحی مرتبط است. در مقابل، مناطق شمالی شهر به دلیل ارتفاع بیشتر، تهویه طبیعی مناسب‌تر و پوشش گیاهی گسترده‌تر، مقادیر پایین‌تری از این آلاینده‌ها را نشان می‌دهند.

از سوی دیگر، الگوی فضایی ازن سطح زمین (O_3) رفتاری متفاوت از آلاینده‌های اولیه داشته و بیشترین مقادیر آن در مناطق جنوبی شهر مشاهده شد. این موضوع نشان‌دهنده ماهیت ثانویه O_3 و وابستگی آن به فرایندهای فتوشیمیایی، دمای سطح زمین و تابش خورشیدی است.

تحلیل شاخص‌های محیطی بیانگر آن است که دمای سطح زمین (LST) و پوشش گیاهی (NDVI) نقش کلیدی در تبیین

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

تغییرات مکانی آلودگی هوا دارند. نتایج همبستگی نشان داد که LST با آلاینده‌های اولیه رابطه‌ای منفی و با O_3 رابطه‌ای مثبت دارد، درحالی‌که NDVI عمدتاً رابطه‌ای معکوس با آلاینده‌ها نشان می‌دهد. این یافته‌ها تأیید می‌کند که گسترش سطوح ساخته‌شده، تشدید جزیره حرارتی شهری و کاهش فضای سبز از مهم‌ترین عوامل تشدید آلودگی هوا در تهران هستند.

درمجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که آلودگی هوای شهر تهران پدیده‌ای چندعاملی و حاصل برهم‌کنش پیچیده‌ای از عوامل کالبدی، اقلیمی و انسانی است و مدیریت آن نیازمند رویکردی یکپارچه، فضایی و مبتنی بر داده‌های مکانی است.

پیشنهادهای کاربردی (مدیریتی و اجرایی)

باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهادهای زیر جهت بهبود کیفیت هوای شهر تهران ارائه می‌شود:

- تمرکز سیاست‌های کاهش آلودگی بر مناطق بحرانی
- در اولویت قرار دادن برنامه‌های کنترل ترافیک، نوسازی ناوگان حمل‌ونقل و کاهش انتشار آلاینده‌ها
- افزایش و توسعه فضاهای سبز به‌ویژه در مناطق متراکم شهری، می‌تواند ازطریق کاهش LST و افزایش NDVI، نقش مؤثری در تعدیل آلودگی هوا و کاهش شدت جزیره حرارتی شهری ایفا کند.
- توجه به آلاینده‌های ثانویه در سیاست‌گذاری‌ها
- باتوجه‌به الگوی متفاوت O_3، سیاست‌های کنترل آلودگی باید علاوه بر کاهش منابع آلاینده‌های اولیه، فرایندهای شیمیایی و اقلیمی مؤثر بر تشکیل آلاینده‌های ثانویه را نیز مدنظر قرار دهند.

پیشنهادهای پژوهشی برای مطالعات آینده

- استفاده از داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالاتر و ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با ایستگاه‌های سنجش زمینی جهت افزایش دقت تحلیل‌ها.
- بررسی نقش عوامل هواشناسی نظیر سرعت و جهت باد، رطوبت نسبی و پایداری جوی در کنار شاخص‌های محیطی.
- به‌کارگیری مدل‌های پیشرفته مکانی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی آلودگی هوا و شناسایی سناریوهای آینده.

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

References

Anselin, L. (1988). Spatial econometrics: Methods and models. Dordrecht, Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7799-1

Bauwens, M., Compernolle, S., Stavrakou, T., Müller, J. F., van Gent, J., Eskes, H., ... & Coheur, P. F. (2020). Impact of coronavirus outbreak on NO_2 pollution assessed using TROPOMI and OMI observations. Geophysical Research Letters, 47(11), e2020GL087978. https://doi.org/10.1029/2020GL087978

Di, Q., Amini, H., Shi, L., Kloog, I., Silvern, R., Kelly, J., ... & Schwartz, J. (2019). An ensemble-based model of $PM_{2.5}$ concentration across the contiguous United States with high spatiotemporal resolution. Environment International, 130, 104909. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104909

Fu, P., Guo, X., Che, H., & Wang, Y. (2022). Spatiotemporal Bayesian hierarchical modeling of $PM_{2.5}$ concentrations in urban environments. Atmospheric Environment, 268, 118786. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118786

Ghalampour, M., Rezaei, A., & Mohammadi, F., 2019. Analysis of spatial pattern of air pollution in Tehran megacity using station data. Environmental Studies Journal, 44(3), 233-247. (in Persian)

Gholampour, A., Nabizadeh, R., Hassanvand, M. S., Taghipour, H., & Alizadeh, S. (2019). Characterization of air pollution and health risks in Tehran metropolitan area. Environmental Science and Pollution Research, 26(21), 21363–21374. (in Persian)

Gupta, P., Christopher, S. A., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y., & Kumar, N. (2020). Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. Atmospheric Environment, 244, 117950. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117950

Hasanvand, M., Naderi, S., & Ahmadi, M. (2018). Spatiotemporal analysis of suspended particles and influencing factors in Tehran. Environmental Science and Engineering Quarterly, 5(2), 45–60. (in Persian)

Ji, W., Zhao, S., Zhang, Y., & Wu, L. (2021). Impacts of urban vegetation on air quality: A global review. Environmental Research, 197, 111056. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111056

Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. Environmental Pollution, 151(2), 362–367. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012

Karimi, S., & Razavi, M., 2022. Spatial monitoring of NO_2 pollutant in Tehran megacity using Sentinel-5P data. Air Pollution Quarterly, 7(1), 15-28. (in Persian)

Li, X., Zhou, Y., Asrar, G. R., Imhoff, M., & Li, X. (2019). The surface urban heat island response to urban expansion: A panel analysis for the conterminous United States. Science of the Total Environment, 605–606, 426–435. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.229

Liu, F., Page, A., Strode, S. A., Yoshida, Y., Choi, S., Zheng, B., ... & Eskes, H. (2021). Abrupt decline in tropospheric nitrogen dioxide over China after the outbreak of COVID-19. Science Advances, 6(28), eabc2992. https://doi.org/10.1126/sciadv.abc2992

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2020). Geographic information science and systems (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118729700

Madani, K., AghaKouchak, A., Mirchi, A., & Khatami, S. (2020). Air pollution in Tehran: Spatial and temporal analysis. Atmospheric Environment, 223, 117271. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117271

Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Greenfield, E. (2021). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. Environmental Pollution, 193, 119–129. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.05.028

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), 1–24. https://doi.org/10.1002/qj.49710845502

Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J., Carvalhais, N., & Prabhat. (2019). Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. Nature, 566, 195–204. https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1

Safavi, S., & Alijani, B., 2006. Investigation of climatic factors affecting air pollution in Tehran. Geographical Researches, 38(1), 75-92. (in Persian)

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change (3rd ed.). Hoboken, NJ: Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119221173

Taghavi, N., Hosseini, M., & Karimi, R., 2021. Analysis of land surface temperature and vegetation cover changes in Tehran using Landsat satellite images. Iranian Journal of Remote Sensing and GIS, 12(2), 89-104. (in Persian)

Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. Economic Geography, 46(Supplement), 234–240. https://doi.org/10.2307/143141

van Donkelaar, A., Martin, R. V., Li, C., & Burnett, R. T. (2019). Regional estimates of chemical composition of fine particulate matter using a combined geoscience-statistical method with information from satellites, models, and monitors. Environmental Science & Technology, 53(5), 2595–2611. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06392

Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., ... & Levelt, P. F. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 precursor: A GMES mission for global observations of atmospheric composition. Remote Sensing of Environment, 120, 70–83. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027

West, J. J., Cohen, A., Dentener, F., Brunekreef, B., Zhu, T., Armstrong, B., ... & Wiedinmyer, C. (2016). What we breathe impacts our health: improving understanding of the link between air pollution and health.

Wulder, M. A., White, J. C., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Belward, A. S., Cohen, W. B., ... & Roy, D. P. (2016). The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction. Remote Sensing of Environment, 185, 271-283.

Zannetti, P. (2013). Air pollution modeling: Theories, computational methods and available software. New York, NY: Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-49711-3

Zhang, Y., Li, X., Wang, A., & Bao, T. (2021). Spatial relationship between urban impervious surface and air pollution in Chinese cities. Sustainable Cities and Society, 64, 102531. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102531

Zhao, S., Zhou, D., Liu, S., & Li, W. (2020). Surface urban heat island and air pollution in Chinese cities. Environmental Pollution, 264, 114735. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114735

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: WHO. https://doi.org/10.2471/BLT.21.285071

DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: https://doi.org/10.22034/1.3.5]