

Analysis of the Relationship between Industrial Pollutants and Urban Heat Islands Using Optical and Radar Remote Sensing Data (Case Study: Isfahan City)

Rahman Zandi¹ , Hojat Sadeghi²  and Sara Ghaedi³ 

1. Corresponding Author: Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Email: R.zandi@geo.ui.ac.ir

2. Assistant Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Email: h.sadeghi@geo.ui.ac.ir

3. M.Sc. in Geographic Information Systems (GIS), Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Email: saghaedi97@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Received:

2023/09/09

Accepted:

2023/12/03

pp:

1- 13

Keywords:

Air pollution, urban heat islands, GIS, Sentinel-5p, Isfahan metropolis

ABSTRACT

In recent decades, rapid urbanization, industrial concentration, and increasing traffic volumes have turned air pollution into one of the most critical environmental challenges in metropolitan areas. This phenomenon is closely linked to the formation of urban heat islands. The present study focuses on the city of Isfahan—one of Iran’s major industrial centers—to analyze spatial patterns of air pollution and its relationship with urban heat islands. Satellite data from Sentinel-5P and Landsat 8 and 9, along with ground-based air quality monitoring stations, were employed using spatial analysis techniques in the Geographic Information System (GIS). Four major pollutants—nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO), sulfur dioxide (SO₂), and particulate matter—were examined. Results revealed a heterogeneous distribution of pollutants, with the highest concentrations observed in central, northern, and northwestern districts (notably districts 2, 8, 12, 1, 3, 7, 9, and 11), whereas southern and southeastern areas (districts 4, 5, 6, and 15) exhibited lower pollution levels. Classical Ordinary Least Squares (OLS) and Geographically Weighted Regression (GWR) models indicated significant positive correlations between pollutant concentrations and urban variables such as population density, built-up intensity, and road density. Conversely, Land Surface Temperature (LST) showed a direct relationship with pollutant levels, while natural indicators, including vegetation cover (NDVI), surface water (NDWI), and elevation, were negatively correlated. Temporal analysis showed that in 2020, coinciding with COVID-19 restrictions, NO₂ and CO concentrations notably declined. Overall, findings highlight the decisive role of anthropogenic and industrial activities in exacerbating air pollution and urban heat island intensity in Isfahan.

Citation: Author Name. (2025). Analysis of the Relationship between Industrial Pollutants and Urban Heat Islands Using Optical and Radar Remote Sensing Data (Case Study: Isfahan City). *Journal of Geography and Regional Future Studies*, Articles in Press.



© Authors retain the copyright and full publishing rights. **Publisher:** Urmia University.

DOI:

DOR:

¹ Corresponding author: Rahman Zandi, Email: R.zandi@geo.ui.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

The high rate of urbanization in recent decades has had significant effects on the urban environment, including increasing urban temperatures and urban climate change. The increase in urban population, rapid industrialization, and increased concentrations of pollutants in the lower layers of the atmosphere have led to an intensification of the urban heat island phenomenon (Rezaei-Rad and Rafiiian, 2017). Due to further industrial development, the amount of pollutants resulting from human activities has increased significantly, which has led to serious problems in the public health and environmental sectors (WHO, 2016; Kashki et al., 2021). For this reason, many countries have established centers to monitor the concentration of air pollutants such as particulate matter, ozone, carbon monoxide, sulfur dioxide, and nitrogen dioxide (Kampa & Castanas, 2008; Zandi et al., 2026).

Therefore, the present study aims to analyze the trend and distribution of pollutants from industries and investigate the relationship between them and the heat island phenomenon in Isfahan city between 2018 and 2023, using satellite data, spatial statistical models (GWR and OLS), and station data, and is considered an effective step in filling the research gap in this field.

This study is one of the first studies to study air pollution by combining ground and satellite data. Its outstanding feature compared to similar studies is the integration of remote sensing information and field data. In addition, in the modeling section, the research method of this study is different from previous works; in such a way that modeling was carried out based on machine learning and OLS and GWR methods. These differences highlight the innovation and importance of this study compared to similar studies.

Methodology

This research is applied in terms of purpose and descriptive-analytical method. Two library and field methods were used to collect data. The first step in the present research is to obtain information through library methods. To achieve the objectives of this research, by studying the research background and also getting a general familiarity with the research design, it is necessary to collect information from written references on the subject, domestic and foreign articles, theses and reputable research journals, as well as information related to the characteristics of the region from relevant centers. This section includes collecting data on the concentration of various pollutants from the Department of Environment and Isfahan Municipality, as well as collecting data from Landsat 8 and Sentinel 5 satellite images from the Google Earth Engine system and was examined in the period 2018-2024. Ground station data was used to verify the accuracy of satellite data. Software such as ArcGIS, ENVI, EXCEL were used to analyze the data.

Results and discussion

During the period 1398-1402, aerosol pollution has shown a relatively constant but increasing trend in intensity and spatial distribution. The data indicate that high values of this index have been observed mainly in the central, northern, eastern and northeastern regions of the city; regions such as 3, 7, 8, 10, 14 and 15 have been classified as "very polluted" in most seasons and years. This pattern is likely due to high building density, increased absorption and reflection of ultraviolet radiation from hard surfaces (such as asphalt and concrete), and lack of vegetation. In contrast, the southern, southwestern and northwestern regions (especially regions 5, 6, 9 and 13) have a more favorable situation and are often classified as "clean" or "moderately polluted". Also, the highest value of this index is recorded in the warm seasons of the year, especially summers, which indicates an increase in the dispersion of light aerosols due to higher radiation and reduced relative humidity. In general, the spatial distribution of UVAI during this time period is in line with the radiation patterns and physical structure of the city and requires targeted management in critical areas (Zandi et al., 2014; Roki et al., 2014).

Conclusion

The present study aimed to investigate the relationship between air pollution, industrial activities, and the urban heat island phenomenon. Using satellite data and GIS-based spatial analysis, the spatial distribution and temporal trends of atmospheric pollutants were analyzed during the years 2018 to 2023. The data used included information from air pollution monitoring stations and Sentinel-5P satellite images, which were processed and analyzed separately. The study of NO_2 , SO_2 , and particulate matter (PM_{2.5} and UVAI) pollutants showed that high concentrations of these pollutants are mainly observed in densely populated and industrial areas of the city and overlap with the intensity of heat islands (LST). In Isfahan, this concentration was observed especially in the north and northwest of the city, where important industrial sectors such as petrochemicals, refineries, and power

plants are located. The southern and southeastern areas, which have lower population and industrial densities, experienced better air quality. The time trend of the data over the years of the study showed an overall increase in pollutant concentrations, however, a significant decrease was observed in 1401 due to COVID-19 restrictions, indicating the direct impact of human activities on air pollution. Analysis of ground and satellite data showed that NO₂ has the highest concentration in densely populated areas, while SO₂ has a heterogeneous distribution but is concentrated in the north and northwest of the city. Particulate matter (PM_{2.5} and UVAI) also showed the highest levels in the north, northeast and parts of the city center, while the southern and southwestern areas have better air quality. Modeling using ordinary linear regression (OLS) and geographical weighted regression (GWR) showed that population density, building density, and land surface temperature have a positive and significant relationship with pollutant concentrations, while soil moisture (NDWI) and vegetation cover (NDVI) have a negative relationship and play a moderating role in reducing pollutants. These findings indicate the complex interaction of natural and human factors in shaping air pollution patterns.

Declarations

Funding: There is funding support. This work is based upon research funded by Iran National Science Foundation (INSF) under project No. 4037347.

Authors' Contribution: The authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest: The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments: We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



تحلیل رابطه میان آلاینده‌های صنعتی و جزایر حرارتی شهری با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور اپتیکی و راداری (مطالعه موردی: شهر اصفهان)

رحمان زندی^۱، حجت صادقی^۲ و سارا قانلی^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. R.zandi@geo.ui.ac.ir

۲. استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: h.sadeghi@geo.ui.ac.ir

۳. کارشناس ارشد سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم جغرافیا، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: saghaedi97@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

دریافت:

۱۴۰۲/۰۶/۱۸

پذیرش:

۱۴۰۲/۰۹/۱۲

صص:

۱۳-۱

واژگان کلیدی:

آلودگی هوا، جزایر حرارتی شهری، GIS، سنتینل-5p، کلانشهر اصفهان

چکیده

در دهه‌های اخیر، توسعه بی‌رویه‌ی شهرنشینی، تمرکز فعالیت‌های صنعتی و افزایش ترافیک، آلودگی هوا را به یکی از چالش‌های اصلی زیست‌محیطی کلان‌شهرها بدل کرده است. این پدیده با شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری ارتباط تنگاتنگی دارد. پژوهش حاضر با تمرکز بر شهر اصفهان - یکی از قطب‌های صنعتی ایران - به تحلیل الگوهای فضایی آلودگی هوا و رابطه‌ی آن با جزایر حرارتی پرداخته است. داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-5P و لندست ۸ و ۹ در کنار داده‌های ایستگاه‌های پایش آلاینده‌ها و روش‌های تحلیل فضایی در محیط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد استفاده قرار گرفت. چهار آلاینده‌ی اصلی، شامل دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و ذرات معلق بررسی شد. نتایج نشان داد توزیع آلاینده‌ها در شهر ناهمگن بوده و بیشترین غلظت در مناطق مرکزی، شمالی و شمال‌غربی (به‌ویژه مناطق ۲، ۸، ۱۲، ۱، ۳، ۷، ۹ و ۱۱) مشاهده می‌شود؛ در حالی‌که نواحی جنوبی و جنوب‌شرقی (مناطق ۴، ۵، ۶ و ۱۵) کم‌آلوده‌ترینند. مدل‌سازی با رگرسیون کلاسیک (OLS) و رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) بیانگر رابطه‌ی مثبت و معنادار میان تراکم جمعیت، ساخت‌وساز و شبکه‌ی راه‌ها با غلظت آلاینده‌ها بود. همچنین، بین دمای سطح زمین (LST) و میزان آلاینده‌ها همبستگی مستقیم، و بین شاخص‌های طبیعی از جمله پوشش گیاهی (NDVI)، منابع آبی (NDWI) و ارتفاع، رابطه‌ی منفی مشاهده شد. نتایج زمانی نشان می‌دهد در سال ۲۰۲۰، هم‌زمان با محدودیت‌های ناشی از پاندمی کرونا، غلظت CO و NO_2 کاهش یافت. در مجموع، یافته‌ها نشانگر نقش بارز فعالیت انسانی و صنعتی در تشدید آلودگی هوا و جزایر حرارتی اصفهان است.

استناد: نام نویسندگان. (۱۴۰۴). تحلیل رابطه میان آلاینده‌های صنعتی و جزایر حرارتی شهری با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور اپتیکی و راداری (مطالعه موردی: شهر اصفهان). *فصلنامه جغرافیا و آینده‌پژوهی منطقه‌ای*، مقالات آماده انتشار.

ناشر: دانشگاه ارومیه.

نویسندگان حق چاپ و حقوق کامل نشر را حفظ می‌کنند.



DOI:

DOR: _

مقدمه

آلودگی هوای شهری یکی از مهم‌ترین معضلات زیست‌محیطی معاصر به شمار می‌آید که سلامت میلیون‌ها نفر را در شهرهای مختلف جهان تحت تأثیر قرار داده است. (Mamkhezri, 2020) غلظت بالای آلاینده‌های هوا و پیوند تنگاتنگ آن با شاخص‌های سلامت انسان، به‌ویژه در کلان‌شهرهای کشورهای در حال توسعه، این پدیده را به یکی از چالش‌های اصلی مدیران شهری و سیاست‌گذاران حوزه محیط زیست تبدیل کرده است. (Lu, 2021) علاوه بر پیامدهای زیست‌محیطی، آلودگی هوا آثار اقتصادی قابل توجهی نیز به همراه دارد؛ به‌گونه‌ای که هزینه‌های اقتصادی منتسب به آلودگی هوا در سال ۲۰۱۸ برای کشور چین حدود ۹۰۰ میلیارد دلار و برای ایالات متحده آمریکا حدود ۶۰۰ میلیارد دلار برآورد شده است (Li, 2018).

روند شتابان شهرنشینی طی دهه‌های اخیر، اثرات چشمگیری بر محیط زیست شهری بر جای گذاشته است؛ از جمله می‌توان به افزایش دمای شهرها، تغییر الگوهای اقلیم شهری و تشدید پدیده «جزایر حرارتی شهری» اشاره کرد. رشد جمعیت شهری، توسعه سریع صنعتی و افزایش غلظت آلاینده‌ها در لایه‌های پایین جو، از مهم‌ترین عوامل تقویت‌کننده این پدیده محسوب می‌شوند (رضایی‌راد و رفیعیان، ۱۳۹۶). هم‌زمان با گسترش فعالیت‌های صنعتی و مصرف فزاینده سوخت‌های فسیلی، میزان آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی به‌طور چشمگیری افزایش یافته و پیامدهایی جدی برای سلامت عمومی و پایداری زیست‌محیطی به همراه داشته است (WHO, 2016; Kashki et al., 2021). در پاسخ به این وضعیت، بسیاری از کشورها اقدام به ایجاد شبکه‌های پایش آلودگی هوا و اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌هایی نظیر ذرات معلق، ازن، مونوکسیدکربن، دی‌اکسیدگوگرد و دی‌اکسیدنیتروژن کرده‌اند (Castanas, 2008; Zandi et al., & Kampa 2026).

در ایران نیز طی سال‌های اخیر، شدت و فراوانی رخدادهای آلودگی هوا افزایش یافته است. با وجود اجرای سیاست‌هایی همچون توسعه سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی پاک، ارتقای استانداردهای سوخت‌های مصرفی و تشدید نظارت بر فرآیندهای صنعتی، آلودگی هوا همچنان روندی صعودی یا دست‌کم نوسانی در سطوح نگران‌کننده دارد. در این میان، شهرهایی نظیر اصفهان به دلیل استقرار صنایع سنگین، پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های پتروشیمی و نیز نقش محوری در شبکه حمل‌ونقل کشور، در زمره آلوده‌ترین شهرهای ایران قرار گرفته‌اند. تمرکز بالای فعالیت‌های صنعتی و ترافیکی در این شهر، منجر به افزایش قابل‌ملاحظه غلظت آلاینده‌ها، تشدید پدیده جزایر حرارتی شهری، بروز اختلالات تنفسی و قلبی و ایجاد تغییرات نامطلوب در اقلیم محلی شده است. بر این اساس، شهر اصفهان به‌عنوان منطقه مورد مطالعه این پژوهش انتخاب شده است.

یکی از رویکردهای نوین و کارآمد در پایش آلودگی هوا و تحلیل روابط محیطی مرتبط، بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور است. تصاویر اپتیکی، همچون داده‌های ماهواره لندست ۸، امکان استخراج شاخص‌های دمای سطح زمین را فراهم می‌کنند و داده‌های طیفی ماهواره Sentinel-5، که به‌طور ویژه برای پایش کیفیت هوا (از جمله NO_2 ، SO_2 و سایر گازهای آلاینده) طراحی شده است، امکان رصد گسترده و نسبتاً پیوسته آلاینده‌های جوی را مهیا می‌سازند. این داده‌ها به دلیل پوشش مکانی وسیع، تداوم زمانی و دقت طیفی مناسب، ابزار مناسبی برای تحلیل تغییرات فضایی - زمانی آلودگی هوا و پدیده جزایر حرارتی شهری به شمار می‌روند (Li & Wang, 2011).

در کنار داده‌های سنجش از دور، به‌کارگیری مدل‌های آماری فضایی همچون رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) و رگرسیون خطی معمولی (OLS) امکان تحلیل عمیق‌تر و ساختارمندتر روابط فضایی بین آلاینده‌های صنعتی و شدت جزایر حرارتی شهری را فراهم می‌کند. مدل GWR با در نظر گرفتن ناهمگنی فضایی، قادر است روابط محلی بین متغیرها را آشکار سازد و تغییرات مکانی ضرایب رگرسیون را نشان دهد؛ در حالی که مدل OLS به‌عنوان چارچوب پایه، تصویر کلی و یکپارچه‌ای از رابطه بین متغیرها در سطح کل منطقه مطالعه ارائه می‌کند. (Fotheringham et al., 2002; Nasiri et al., 2021) با وجود این، تلفیق داده‌های ماهواره‌ای با مدل‌های GWR و OLS برای تحلیل هم‌زمان ارتباط بین آلاینده‌های صنعتی و پدیده جزایر حرارتی در شهرهای ایران، به‌ویژه در شهر اصفهان، هنوز با خلأ پژوهشی قابل توجهی مواجه است.

علاوه بر این، دوره همه‌گیری کووید-۱۹ فرصتی کم‌سابقه برای بررسی تأثیر کاهش فعالیت‌های صنعتی و حمل‌ونقل بر کیفیت هوا فراهم آورد. نتایج برخی مطالعات نشان داده‌اند که در دوران قرنطینه ناشی از کووید-۱۹، به دلیل محدودیت رفت‌وآمدها و کاهش تولیدات صنعتی، غلظت برخی آلاینده‌ها در بسیاری از شهرهای جهان، از جمله شهرهای ایران، کاهش یافته است. (Baldasano, 2020) این دوره زمانی، نقش و سهم فعالیت‌های انسانی در تولید آلاینده‌ها را به‌طور برجسته‌ای نمایان کرده و اهمیت بهره‌گیری از داده‌های مستند ماهواره‌ای مانند Sentinel-5 و لندست ۸ را در تحلیل تغییرات فضایی - زمانی آلودگی هوا و دمای سطح زمین دوچندان کرده است.

با وجود افزایش مطالعات مرتبط با آلودگی هوا، جزایر حرارتی شهری و استفاده از داده‌های سنجش از دور، همچنان چندین خلأ علمی و کاربردی در این حوزه قابل مشاهده است:

کمبود مطالعات ترکیبی مبتنی بر داده‌های زمینی و ماهواره‌ای در مقیاس شهری

بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در ایران یا صرفاً بر داده‌های ایستگاهی تکیه داشته‌اند یا فقط از داده‌های ماهواره‌ای برای تحلیل روندهای آلودگی هوا استفاده کرده‌اند. تلفیق ساختاریافته و هم‌زمان این دو منبع داده برای تحلیل دقیق آلاینده‌های صنعتی و اثرات حرارتی آن‌ها، کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

نبود تحلیل فضایی - زمانی جامع با استفاده از مدل‌های پیشرفته آماری فضایی

مدل‌هایی مانند GWR که قادر به آشکارسازی ناهمگنی فضایی روابط هستند، هنوز در مطالعات مرتبط با آلودگی هوا و ارتباط آن با پدیده جزایر حرارتی در شهرهای ایران کاربرد محدودی داشته‌اند. اکثر پژوهش‌ها به مدل‌های کلاسیک OLS یا روش‌های تجربی ساده بسنده کرده‌اند.

فقدان مطالعات اختصاصی برای کلان‌شهرهای صنعتی ایران، به‌ویژه اصفهان

علی‌رغم شدت بالای آلودگی هوا در اصفهان، بررسی پیوند بین آلاینده‌های صنعتی، داده‌های سنجش از دور و تغییرات دمای سطح زمین در این منطقه به‌طور علمی و با روش‌های تلفیقی انجام نشده است.

بررسی محدود اثرات همه‌گیری کووید-۱۹ بر الگوهای آلودگی و دمای سطح زمین

اگرچه برخی مطالعات جهانی کاهش آلاینده‌ها در دوره قرنطینه را گزارش کرده‌اند، اما تحلیل فضایی - زمانی این تغییرات با استفاده از داده‌های Sentinel-5 و لندست ۸ و مقایسه با فعالیت‌های صنعتی در ایران - و به‌ویژه برای شهر اصفهان - هنوز انجام نگرفته است.

نبود یک چارچوب یکپارچه برای تحلیل هم‌زمان آلاینده‌ها، دمای سطح زمین و فعالیت‌های صنعتی

بیشتر پژوهش‌های موجود هر یک به بخشی از مسئله، مانند آلودگی هوا یا جزایر حرارتی، پرداخته‌اند و یک مدل یکپارچه برای ارتباطی این دو پدیده بر اساس داده‌های چندمنبعی ارائه نشده است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف تحلیل روند و الگوی فضایی آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های صنعتی و بررسی رابطه آن‌ها با شدت پدیده جزایر حرارتی شهری در شهر اصفهان طی دوره زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳، و با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌های آماری فضایی (GWR و OLS) و داده‌های ایستگاهی، می‌کوشد بخشی از خلأ موجود در ادبیات تحقیق را پوشش دهد. این پژوهش از جمله نخستین مطالعاتی است که در مقیاس شهری، به بررسی آلودگی هوا با ترکیب نظام‌مند داده‌های زمینی و ماهواره‌ای می‌پردازد. ویژگی برجسته این مطالعه، تلفیق اطلاعات سنجش از دور (مانند داده‌های Sentinel-5 و لندست ۸) با داده‌های میدانی و ایستگاهی است؛ رویکردی که می‌تواند منجر به بهبود دقت و جامعیت نتایج شود. افزون بر این، در بخش مدل‌سازی، استفاده هم‌زمان از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین

در کنار مدل‌های آماری کلاسیک OLS و GWR، این پژوهش را از بسیاری از مطالعات پیشین متمایز می‌کند. مجموعه این عوامل، نوآوری و اهمیت پژوهش حاضر را در زمینه تحلیل فضایی - زمانی آلودگی هوا و پدیده جزایر حرارتی شهری، به‌ویژه در شهر اصفهان، برجسته می‌سازد.

نوآوری پژوهش

این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین دارای چند نوآوری اساسی است که آن را از تحقیقات موجود متمایز می‌کند:

- تلفیق جامع داده‌های زمینی و ماهواره‌ای

استفاده هم‌زمان از داده‌های ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا، تصاویر Sentinel-5 برای آلاینده‌های گازی و داده‌های لندست ۸ برای استخراج دمای سطح زمین، یک رویکرد نوآورانه و کمتر به کار رفته در مطالعات شهری ایران است.

- به‌کارگیری مدل‌های پیشرفته تحلیل فضایی (GWR و OLS) همراه با روش‌های یادگیری ماشین

ترکیب مدل‌های آماری فضایی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، رویکردی نو در تحلیل روابط پیچیده بین آلاینده‌ها و جزایر حرارتی محسوب می‌شود و امکان بهبود دقت، پیش‌بینی‌پذیری و تبیین روابط محیطی را فراهم کرده است.

- تحلیل فضایی - زمانی پنج‌ساله با تمرکز بر دوره کووید-۱۹

پوشش بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳، شامل دوران پیش، حین و پس از قرنطینه کرونا، تصویر کم‌نظیری از تأثیر فعالیت‌های انسانی بر تغییرات آلاینده‌ها و دمای سطح زمین ارائه می‌دهد.

- ارائه یک چارچوب یکپارچه برای تحلیل ارتباط میان آلاینده‌های صنعتی و شدت جزایر حرارتی شهری

پژوهش حاضر با توسعه یک مدل ترکیبی داده‌محور، امکان تحلیل هم‌زمان سه مؤلفه کلیدی محیط شهری را فراهم کرده است:

• آلودگی ناشی از صنایع

• غلظت آلاینده‌های گازی

• الگوی دمای سطح زمین (LST)

- تمرکز بر شهر اصفهان به‌عنوان یکی از قطب‌های صنعتی کشور

انتخاب اصفهان، با توجه به شرایط خاص صنعتی، اقلیمی و جغرافیایی آن، به پژوهش ارزش کاربردی و سیاست‌گذاری بالایی می‌بخشد و آن را نسبت به مطالعات مشابه متمایز می‌کند.

مواد و روش پژوهش

این پژوهش از لحاظ هدف کاربردی و روش توصیفی - تحلیلی است. برای گردآوری داده‌ها از دو روش کتابخانه‌ای و میدانی

استفاده شده است.

مطالعات کتابخانه‌ای :

اولین گام در پژوهش حاضر کسب اطلاعات به روش کتابخانه ای است. برای تحقق اهداف این پژوهش با مطالعه پیشینه تحقیق و همچنین آشنایی کلی با طرح پژوهش نیاز به گردآوری اطلاعات از مراجع مکتوب در زمینه موضوع، مقاله‌های داخلی و خارجی، پایان نامه‌ها و مجلات پژوهش معتبر همچنین اطلاعات مربوط به ویژگی منطقه از مراکز مربوط تهیه گردید.

مطالعات میدانی:

این بخش شامل جمع‌آوری داده‌های غلظت آلاینده‌های مختلف از اداره محیط زیست و شهرداری اصفهان می‌باشد و همچنین جمع‌آوری داده‌های تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۵ از سامانه گوگل ارث انجین و در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۲۴ بررسی گردید. جهت صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای از داده‌های ایستگاه زمینی استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای مانند ArcGIS, ENVI, EXCEL استفاده گردید.

برای انجام این پژوهش، از مجموعه‌ای از داده‌ها و منابع مختلف بهره‌گرفته شده است که در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود:

۱) داده‌های روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه مربوط به آلاینده‌های جوی شامل ذرات معلق ($PM_{2.5}$)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) و مونوکسید کربن (CO)، طی دوره زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ از طریق اداره پایش و کنترل کیفیت هوای شهرداری اصفهان و همچنین اداره کل حفاظت محیط زیست استان اصفهان برای ۱۸ ایستگاه دریافت گردید. این داده‌ها به منظور تحلیل درون‌یابی آلودگی هوا و مقایسه آن در مناطق مختلف شهر مورد استفاده قرار گرفت.

۲) داده‌های سنجش از دور شامل تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-5 (جهت استخراج غلظت آلاینده‌های گازی از جمله SO_2 ، NO_2 و $PM_{2.5}$) و تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸، از طریق پلتفرم Google Earth Engine تهیه گردید. بر پایه این تصاویر، شاخص‌های زیست‌محیطی متعددی محاسبه شد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI)، دمای سطح زمین (LST) و شاخص اختلاف نرمال‌شده آب (NDWI) اشاره کرد. این شاخص‌ها به عنوان متغیرهای مکمل برای تحلیل‌های اکولوژیکی و ارتباط آن‌ها با وضعیت آلودگی در مناطق مختلف شهری به کار گرفته شده‌اند.

در این پژوهش، داده‌های سنجش‌ازدور متشکل از تصاویر Landsat-8/9 سنجنده‌های OLI و TIRS و محصولات Sentinel-5P (سنجنده TROPOMI، سطح پردازش (Offline Level-2) با استفاده از بستر محاسبات ابری Google Earth Engine (GEE) استخراج و پردازش گردید. کلیه مراحل فراخوانی، پالایش و پردازش داده‌ها از طریق اسکریپت‌نویسی در محیط GEE به زبان JavaScript انجام شد که امکان کار با حجم انبوه داده‌ها، پردازش موازی و دسترسی مستقیم به آرشیو کامل مأموریت‌های ماهواره‌ای را فراهم ساخت.

تصاویر لندست از مجموعه داده USGS Landsat Surface Reflectance Tier 1 در سطح Level-2 Surface Reflectance فراخوانی شد که شامل تصحیحات اتمسفری و هندسی استاندارد است. در صورت عدم دسترسی به محصول سطح L2، داده‌های سطح L1TP فراخوانی و با استفاده از الگوریتم LaSRC (Vermote et al., 2016) به بازتاب سطحی تبدیل گردید. کلیه داده‌ها به سامانه مختصات WGS84/UTM بازپروژکت شده و خطای هم‌مرجع‌سازی کمتر از نیم پیکسل حفظ شد. پوشش ابری، سایه ابر و برف بر اساس لایه QA_PIXEL حذف گردید.

از داده‌های بازتاب سطحی، شاخص‌های طیفی کلیدی شامل شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) و شاخص آب نرمال‌شده (NDWI) محاسبه شد. فرمول‌های این شاخص‌ها به شرح زیر است:

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) :

این شاخص با استفاده از رابطه (۱) و از تصاویر Landsat ۸ محاسبه شد:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (۱)$$

که در آن NIR باند نزدیک به مادون قرمز و RED باند قرمز تصویر است. این شاخص بیانگر پوشش گیاهی و سلامت آن است.

NDWI (Normalized Difference Water Index):

استخراج رطوبت سطحی، شاخص NDWI با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (۲)$$

که GREEN نمایانگر باند سبز و NIR نمایانگر باند نزدیک به مادون قرمز است. این شاخص برای شناسایی رطوبت سطح و آب سطحی کاربرد دارد.

LST (Land Surface Temperature):

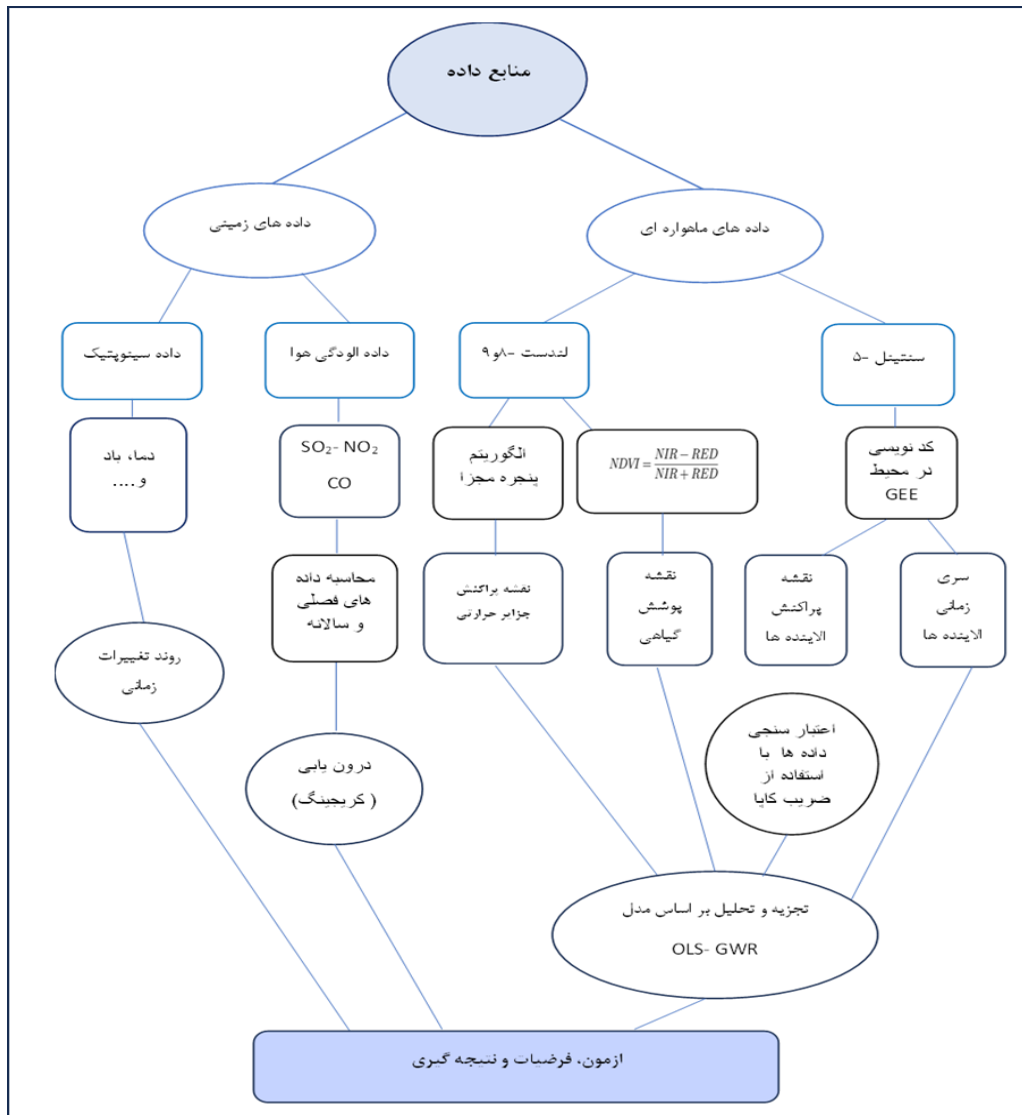
دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا (Split-Window Algorithm) از باندهای حرارتی تصاویر Landsat 8 استخراج شد. در این روش، ابتدا باندهای حرارتی با کمترین اثرات اتمسفری انتخاب و پس از تصحیح اتمسفری، دمای روشنایی (Brightness Temperature) برای هر پنجره یا باند حرارتی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه گردید.

$$T_i = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad LST = \sum_{i=1}^n w_i \cdot T_i \quad (۳)$$

داده‌های Sentinel-5P (TROPOMI) به صورت محصولات Offline Level-2 از مجموعه داده‌های موجود در آرشیو GEE فراخوانی شد. پالایش داده‌ها بر اساس مقادیر کیفیت با اعمال آستانه‌های $qa_value > 0.75$ و $cloud_fraction < 0.2$ صورت گرفت. تنها پیکسل‌های دارای کیفیت مطلوب و فاقد پوشش ابری در تحلیل باقی ماند. به منظور هم‌مکانی مکانی داده‌ها، تصاویر لندست با استفاده از روش میانگین مساحت‌وزن (Area-Weighted Averaging) به رزولوشن مکانی Sentinel-5P تجمیع شد. همگام‌سازی زمانی نیز از طریق انتخاب تصاویر هم‌روز یا حداکثر با اختلاف یک روز انجام پذیرفت؛ در صورت وجود چند تصویر معتبر در یک بازه زمانی، میانگین وزنی بر اساس شاخص کیفیت qa_value محاسبه شد.

در پایان، مجموعه داده‌ای یکپارچه شامل لایه‌های مکانی و زمانی هم‌مرجع شده بازتاب سطحی، شاخص‌های طیفی و دمای سطح زمین و مقادیر ستون عمودی آلاینده‌های جوی تهیه و به قالب Geo-TIFF صادر گردید تا در مراحل مدل‌سازی آماری و یادگیری ماشین مورد استفاده قرار گیرد.

برای مدل‌سازی روابط مکانی میان متغیرها، از مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) و رگرسیون خطی معمولی (OLS) استفاده شد. استفاده از مدل GWR مستلزم رعایت پیش‌فرض‌هایی است که پیش از اجرای مدل در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند. این پیش‌فرض‌ها شامل: (۱) وجود ناهمسانی مکانی در روابط میان متغیرها، (۲) نرمال بودن باقیمانده‌ها، (۳) عدم وجود هم‌خطی شدید میان متغیرهای مستقل بر اساس شاخص تورم واریانس (VIF)، (۴) عدم وجود خودهم‌بستگی فضایی معنی‌دار در باقیمانده‌ها با استفاده از شاخص Moran's I، و (۵) انتخاب پهنای باند بهینه با بهره‌گیری از معیارهای آماری مانند AIC یا روش اعتبارسنجی متقابل (Cross Validation) است. بررسی این شرایط پیش از اجرای مدل، اطمینان لازم را برای استفاده معتبر از GWR در تحلیل داده‌ها فراهم نمود (شکل شماره ۱).

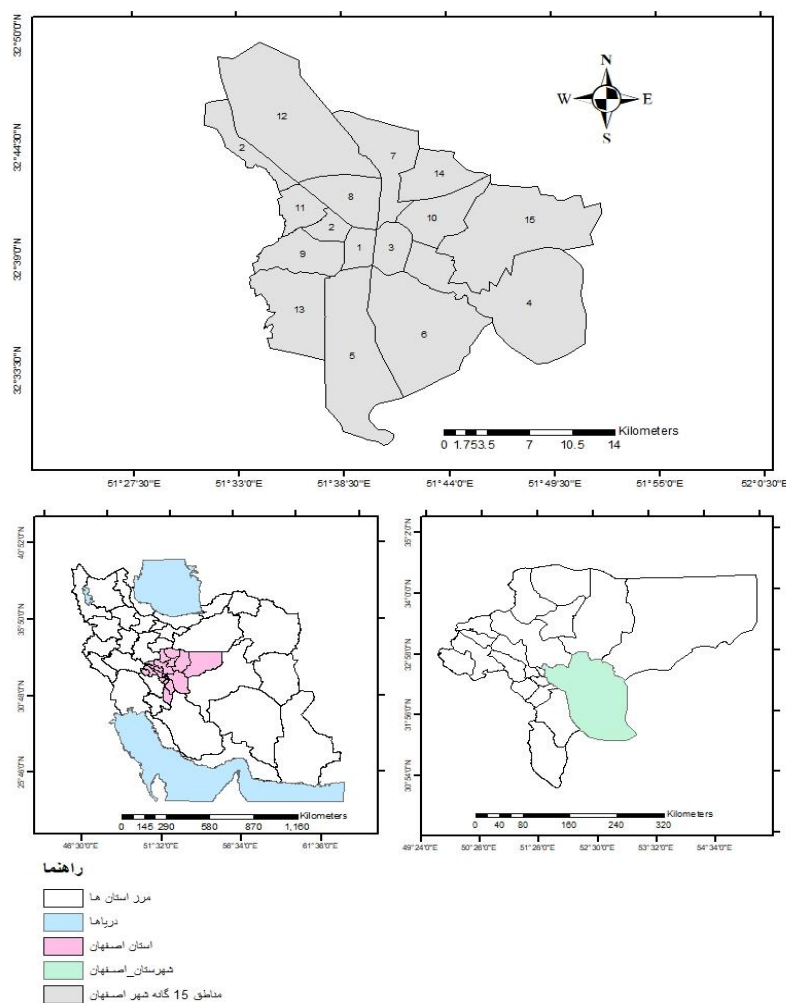


شکل شماره ۱- چارت مراحل انجام پژوهش

محدوده مورد مطالعه

کلان شهر اصفهان سومین شهر بزرگ کشور پس از تهران و مشهد در مرکز ایران است. اصفهان با گستره‌ای نزدیک به ۱۰۶۷۸۶ کیلومتر مربع میان ۳۰ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی خط استوا و ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی نصف‌النهار گرینویچ، واقع شده است. بر اساس آخرین سرشماری سال ۱۳۹۵ دارای جمعیت ۱،۹۶۰،۲۶۰ نفر است. محدوده شهری اصفهان از غرب تا خمینی شهر و نجف آباد از جنوب تا کوه صفه و سپاهان شهر از شمال تا شاهین شهر و از شرق تا دشت سگزی امتداد می‌یابد (شکل ۲). بر اساس آخرین تقسیمات شهری در سال ۱۳۹۶، شهر اصفهان پانزده منطقه شهری دارد. شهر اصفهان بر اساس دستورالعمل

وزارت کشور ساماندهی می‌شود که بر اساس آن شهر اصفهان در مجموع ۱۹۲ محله دارد که، از این تعداد ۲۵ محله شهرک‌های الحاق شده به این شهر هستند (زند و همکاران، ۱۴۰۲).



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی و تقسیمات سیاسی کلان شهر اصفهان (نگارندگان)

بحث و ارائه یافته‌ها

تحلیل سالانه آلاینده‌ها

جدول ۲ نشان می‌دهد که در طی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲، الگوی توزیع فضایی آلاینده‌ی دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) در شهر اصفهان از ثبات بالایی برخوردار بوده است. بالاترین غلظت این آلاینده همواره در نواحی مرکزی، شمالی، شمال‌غربی، غربی و شمال‌شرقی شهر، از جمله مناطق ۱، ۲، ۳، ۷، ۸، ۹، ۱۱، ۱۲ و ۱۴ مشاهده شده است. این مناطق معمولاً دارای تراکم جمعیت بالا، ترافیک سنگین و فعالیت‌های شهری و صنعتی متمرکز هستند که به‌طور مستقیم بر افزایش غلظت NO_2 اثرگذار بوده‌اند (Hoek et al., 2008; Zandi et al., 2026). در مقابل، نواحی شرقی، جنوبی و جنوب‌شرقی شهر نظیر مناطق ۴، ۵، ۶ و ۱۵ به‌طور پایدار در زمره‌ی مناطق پاک قرار گرفته‌اند. در این بازه، یک گرادیان فضایی مشخص در توزیع NO_2 از نواحی مرکزی و شمالی به سمت شرق و جنوب شهر قابل مشاهده است که با الگوهای مشابه در شهرهای دیگر نیز همخوانی دارد (Jerrett et al., 2005). از نظر روند زمانی، شدت آلاینده NO_2 در طی پنج سال گذشته تغییرات قابل توجهی نداشته و به‌صورت نسبتاً پایدار در همان مناطق متمرکز باقی مانده است.

در مورد آلاینده‌ی دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، داده‌های مربوط به سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد که گرچه شدت آلودگی در سطح شهر دچار نوسانات سالانه شده، اما شیب فضایی تغییرات این آلاینده نسبتاً مشخص بوده است. در تمام سال‌ها، بیشترین تمرکز آلودگی در نواحی شمالی، شمال‌غربی و غربی شهر به ثبت رسیده که شامل مناطقی چون ۲، ۸، ۹، ۱۰، ۱۲ و ۱۳ بوده‌اند. این نواحی معمولاً نزدیک به منابع آلاینده‌ی صنعتی و پرتردد شهری هستند که با افزایش انتشار SO_2 ارتباط مستقیم دارند (جعفری و همکاران، ۱۳۹۶). در مقابل، با حرکت به سمت نواحی شرقی، جنوب‌شرقی و جنوبی شهر نظیر مناطق ۴، ۵، ۶ و ۱۵، غلظت آلاینده به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است. بنابراین، شیب فضایی تغییرات آلاینده SO_2 از سمت شمال و شمال‌غرب به سوی جنوب و شرق کاهش یافته و این الگو در سال‌های مختلف تکرار شده است. اگرچه مقدار دقیق آلودگی در هر سال دچار نوساناتی بوده، اما مسیر کلی تغییرات در طول این پنج سال، روند کاهش به سمت مناطق حاشیه‌ای و کم‌تراکم را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، علی‌رغم نوسان سالانه در شدت آلودگی، شیب کلی تغییرات در سطح شهر، قابل تشخیص و جهت‌دار بوده است.

در نهایت، تحلیل آلاینده‌ی مونوکسید کربن (CO) طی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد که تمرکز این آلاینده نیز مانند سایر آلاینده‌ها در نواحی مرکزی، غربی و شمال‌غربی شهر قرار داشته است. مناطقی همچون ۱، ۲، ۳، ۸، ۹ و ۱۱ همواره در زمره‌ی نواحی بسیار آلوده قرار گرفته‌اند. عامل اصلی این تمرکز بالا را می‌توان به تراکم جمعیت، بار ترافیکی سنگین و تجمع مراکز تجاری، حمل‌ونقل و فعالیت‌های انسانی نسبت داد (جعفری و همکاران، ۱۳۹۶). در این بازه زمانی، یک شیب فضایی مشخص از مرکز به سمت حاشیه‌ی شهر قابل مشاهده است؛ به‌طوری‌که با دور شدن از مناطق مرکزی به سمت نواحی کم‌تراکم‌تر مانند ۴، ۵، ۶، ۱۲ و ۱۵، غلظت CO به‌طور محسوس کاهش یافته و این مناطق عمدتاً در زون پاک قرار گرفته‌اند. همچنین نواحی انتقالی مانند مناطق ۷، ۱۰ و ۱۴ معمولاً در سطح آلودگی متوسط قرار داشته‌اند. با وجود این الگوی فضایی ثابت، شدت آلودگی CO طی پنج سال گذشته تغییر چشم‌گیری نداشته و شیب زمانی آن روند قابل‌توجهی را نشان نمی‌دهد. بنابراین، با وجود وضوح شیب مکانی، تغییرات زمانی این آلاینده بیشتر حالت ایستا داشته و در سطح کلان شهر نوسان اندکی را تجربه کرده است.

طی بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲، آلاینده ائروسول، روندی نسبتاً ثابت اما افزایشی را در شدت و گسترش فضایی نشان داده است. داده‌ها حاکی از آن است که مقادیر بالای این شاخص عمدتاً در مناطق مرکزی، شمالی، شرقی و شمال‌شرقی شهر مشاهده شده‌اند؛ مناطقی مانند ۳، ۷، ۸، ۱۰ و ۱۴ در اکثر فصول و سال‌ها در طبقه‌بندی "بسیار آلوده" قرار گرفته‌اند. این الگو احتمالاً به دلیل تراکم بالای ساختمانی، افزایش جذب و بازتاب تابش فرابنفش از سطوح سخت (مثل آسفالت و بتن)، و کمبود پوشش گیاهی شکل گرفته است. در مقابل، مناطق جنوبی، جنوب‌غربی و شمال‌غربی (به‌ویژه مناطق ۵، ۶، ۹ و ۱۳) وضعیت مطلوب‌تری داشته و غالباً در طبقات "پاک" یا "با آلودگی متوسط" قرار گرفته‌اند. همچنین بیشترین مقدار این شاخص در فصول گرم سال به‌ویژه تابستان‌ها ثبت شده که نشان‌دهنده افزایش پراکنش ائروسول‌های نوری در اثر تابش بیشتر و کاهش رطوبت نسبی هواست. به‌طور کلی، توزیع فضایی UVAI در این دوره زمانی، هم‌راستا با الگوهای تابش و ساختار کالبدی شهر بوده و نیازمند مدیریت هدفمند در مناطق بحرانی است (زندگی و همکاران، ۱۴۰۲؛ روکی و همکاران، ۱۴۰۲).

جدول ۱- وضعیت الاینده ها در مناطق ۱۵ گانه کلانشهر اصفهان (نگارندگان)

منطقه	CO(۱۳۹۷-۱۴۰۲)	NO ₂ (۱۳۹۷-۱۴۰۲)	SO ₂ (۱۳۹۸-۱۴۰۲)	UVAI(۱۳۹۷-۱۴۰۲)
۱	بسیار الوده	بسیار الوده	متوسط	بسیار الوده
۲	بسیار الوده	بسیار الوده	بسیار الوده	متوسط
۳	بسیار الوده	الوده	متوسط	بسیار الوده
۴	پاک	پاک	پاک	متوسط
۵	پاک	پاک	پاک	پاک
۶	پاک	پاک	پاک	پاک
۷	متوسط	الوده	متوسط	بسیار الوده
۸	بسیار الوده	بسیار الوده	بسیار الوده	بسیار الوده
۹	بسیار الوده	الوده	الوده	متوسط
۱۰	متوسط	الوده	متوسط	بسیار الوده
۱۱	بسیار الوده	الوده	پاک	الوده
۱۲	پاک	متوسط	بسیار الوده	متوسط
۱۳	متوسط	متوسط	الوده	پاک
۱۴	الوده	الوده	متوسط	بسیار الوده
۱۵	پاک	پاک	پاک	الوده

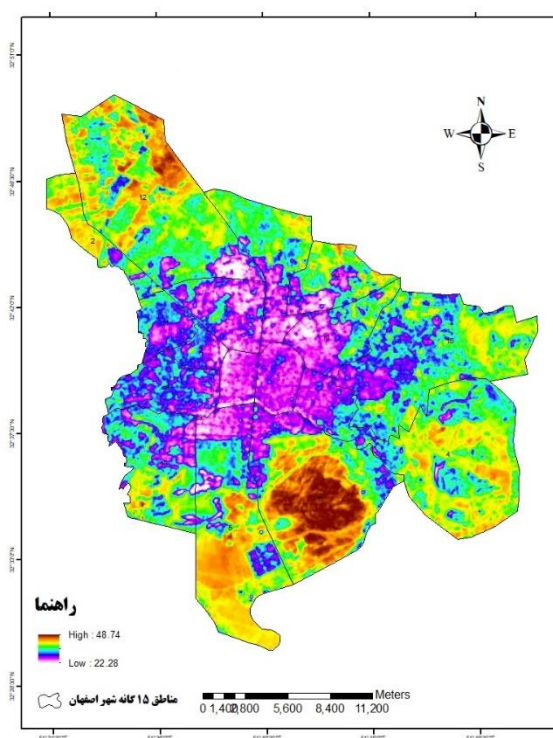
شاخص دمای سطح زمین (LST)

شاخص دمای سطح زمین (Land Surface Temperature – LST)، یکی از شاخص‌های مهم استخراج شده از داده‌های سنجش از دور است که دمای تابشی سطوح زمین را در طیف مادون قرمز حرارتی اندازه‌گیری می‌کند. برخلاف دمای هوا که توسط ایستگاه‌های زمینی سنجیده می‌شود، LST بازتابی از ویژگی‌های سطح زمین نظیر پوشش گیاهی، نوع مصالح، کاربری اراضی، و ویژگی‌های توپوگرافی است. این شاخص در مطالعات مربوط به جزایر حرارتی شهری، مدل‌سازی اقلیم‌های محلی، بهینه‌سازی زیرساخت‌های شهری، و تحلیل اثرات گرمایش سطح زمین اهمیت فراوانی دارد (Zhou et al., 2014; Weng, 2009).

با توجه به گسترش سریع شهرنشینی در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران، بهره‌گیری از شاخص LST می‌تواند در شناسایی نواحی مستعد گرمایش شهری، ارزیابی تغییرات زیست‌محیطی و ارتقاء کیفیت برنامه‌ریزی شهری نقش مهمی ایفا کند (Voogt & Oke, 2003). نقشه بررسی شده (شکل ۴-۶۱)، توزیع مکانی شاخص دمای سطح زمین را در پانزده منطقه کلان‌شهر اصفهان طی سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۷ نمایش می‌دهد. بر اساس طیف رنگی این نقشه، نواحی با رنگ‌های قهوه‌ای، نارنجی و زرد دارای بیشترین مقادیر LST، و نواحی با رنگ‌های آبی، بنفش و سبز دارای مقادیر کمتر این شاخص هستند. محدوده دمای سطحی در این نقشه بین ۲۲/۲۸ تا ۴۸/۷۴ درجه سانتی‌گراد متغیر است. نواحی جنوبی، جنوب‌شرقی و شمال غربی شهر که عمدتاً شامل سطوح خشک، بافت‌های صنعتی، یا زمین‌های فاقد پوشش گیاهی هستند، بیشترین دما را نشان می‌دهند. در مقابل، نواحی مرکزی، غربی و شمال شرقی شهر که از پوشش گیاهی بیشتر و مصالح سبک‌تری برخوردارند، در محدوده دمایی پایین‌تر قرار دارند (زند و صادقی، ۱۴۰۱). این توزیع دما نشان‌دهنده تأثیر مستقیم نوع کاربری و پوشش زمین

بر رفتار حرارتی شهر است و به شکل‌گیری پدیده جزیره حرارتی شهری منجر می‌شود که خود زمینه‌ساز تغییر در الگوهای مصرف انرژی، آسایش حرارتی و کیفیت زیست‌محیطی مناطق شهری است (Weng, 2009).

از منظر زیست‌محیطی، رابطه بین شاخص LST و آلودگی هوا در کلان‌شهرهایی نظیر اصفهان حائز اهمیت است (شکل ۳). در نواحی با دمای سطحی بالا، معمولاً غلظت آلاینده‌هایی مانند ذرات معلق (PM_{2.5} و PM₁₀) و گازهای آلاینده افزایش می‌یابد. این هم‌زمانی فضایی می‌تواند ناشی از افزایش فعالیت‌های انسانی، استفاده از سوخت‌های فسیلی، و مصرف بالای انرژی برای سرمایش در مناطق گرم‌تر باشد (Weng, 2009; Nasiri et al., 2022). همچنین، افزایش دمای سطح موجب تقویت پدیده وارونگی دما در جو شده و از طریق کاهش جابجایی هوای عمودی، منجر به ماندگاری بیشتر آلاینده‌ها در لایه‌های نزدیک به سطح زمین می‌شود. مطالعات انجام‌شده در سایر کلان‌شهرها نیز تأیید کرده‌اند که شاخص LST می‌تواند به عنوان نشانگری غیرمستقیم در ارزیابی توزیع مکانی آلودگی هوا مورد استفاده قرار گیرد (Zhou et al., 2014).



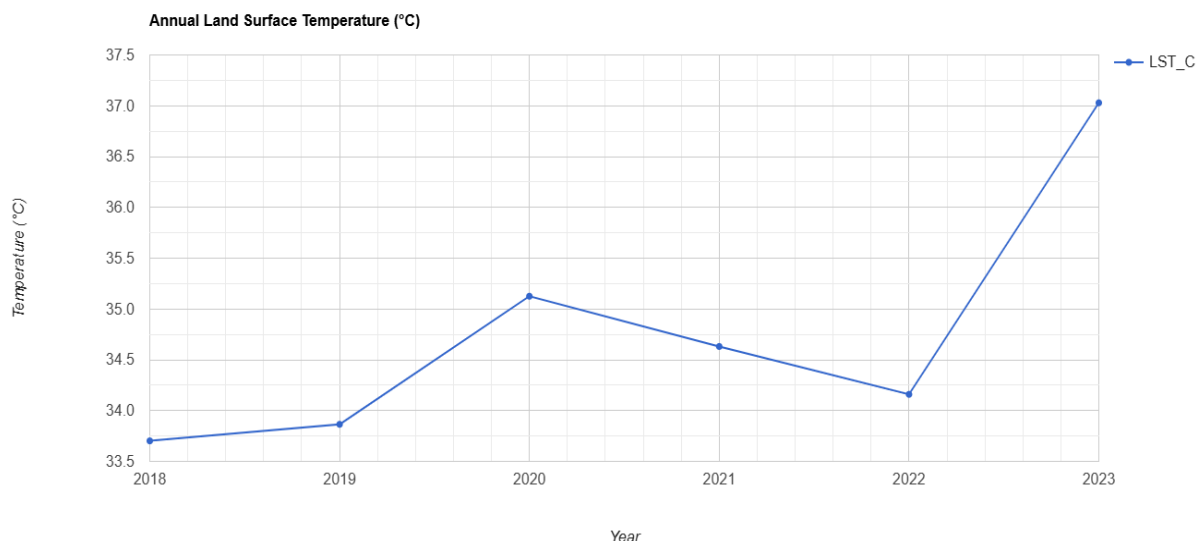
شکل شماره ۳- نقشه شاخص (LST) کلانشهر اصفهان در بازه زمانی ۱۳۹۷-۱۴۰۲ (نگارندگان)

نمودار سری زمانی شاخص دمای سطح زمین (LST)

بر اساس نمودار روند سری زمانی دمای سطح زمین (شکل ۴)، در شهر اصفهان طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ نشان‌دهنده نوسانات معنی‌داری در الگوی حرارتی منطقه است. تحلیل داده‌های استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای لندست نشان می‌دهد که میانگین دمای سطح زمین از حدود ۳۳/۷ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۱۸ به بیش از ۳۷/۲ درجه در سال ۲۰۲۳ رسیده است. این افزایش حدود ۳/۵ درجه‌ای طی یک بازه شش‌ساله، حاکی از یک روند کلی گرم‌شدگی در سطح زمین است که می‌تواند به دلیل ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی باشد. نتایج پژوهش‌های پیشین نیز مؤید آن است که توسعه شهری، کاهش پوشش گیاهی و افزایش سطوح غیرقابل نفوذ، از عوامل اصلی افزایش دمای سطح زمین در شهرهای بزرگی نظیر اصفهان هستند (زندگی و شهریار، ۱۴۰۴).

افزایش دمای سطح زمین می‌تواند پیامدهایی از جمله تشدید پدیده جزایر حرارتی شهری (Urban Heat Islands) و افزایش غلظت آلاینده‌های جوی در پی داشته باشد. در مناطق شهری، افزایش دما موجب تسریع در واکنش‌های فتوشیمیایی و در نتیجه افزایش آلاینده‌هایی

نظیر آزون سطحی می‌شود (Zandi et al., 2022). افزون بر آن، مطالعات داخلی نیز نشان داده‌اند که جزایر حرارتی می‌توانند منجر به پایداری هوا، کاهش تهویه طبیعی و در نهایت افزایش تمرکز آلاینده‌ها شوند (کریمی و یزدان‌پناه، ۱۴۰۰). از این‌رو، تحلیل روند دمایی شهر اصفهان نه تنها از منظر اقلیم‌شناسی شهری حائز اهمیت است، بلکه در زمینه مدیریت آلودگی هوا، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و توسعه پایدار شهری نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارد.

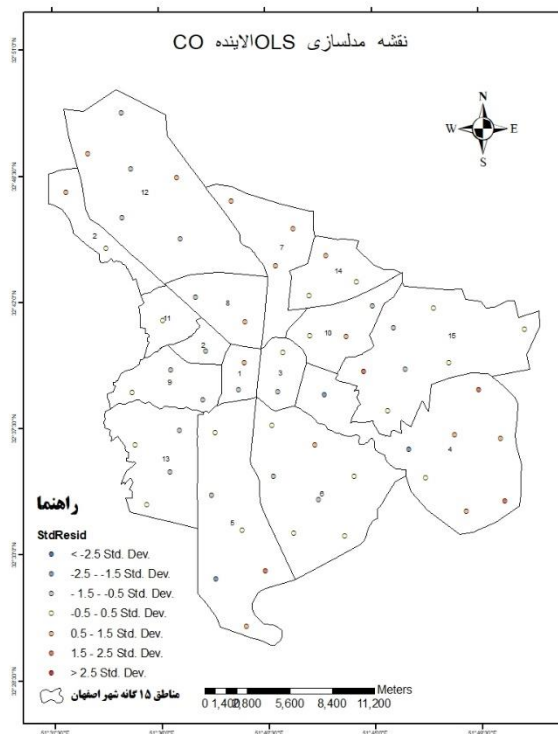


شکل ۴- نمودار سری زمانی دمای سطح زمین (LST)

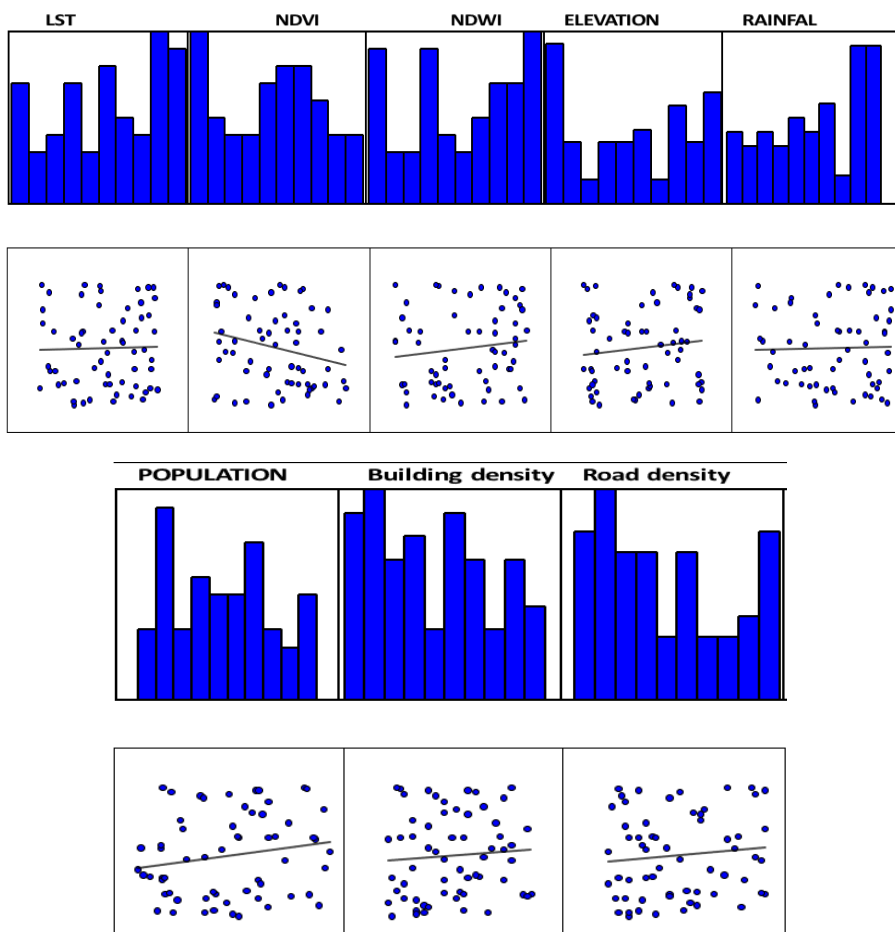
مدلسازی به روش OLS و GWR

مدلسازی به روش OLS

نتایج مدل رگرسیون خطی معمولی (OLS) برای آلاینده کربن مونوکسید (CO) (شکل‌های ۵ و ۶) نشان می‌دهد که این مدل تنها بخش اندکی از تغییرات مکانی CO را توضیح می‌دهد ($R^2=0.145$ و $Adjusted R^2=0.011$) شاخص AICc مدل $-151,07$ بوده و آزمون‌های F و Wald در سطح ۵٪ معنادار نیستند ($p=0.392$ و $p=0.085$)، هرچند مقادیر Jarque-Bera و Koenker (BP) نشان‌دهنده نبود ناهمسانی و انحراف معنی‌دار از نرمالیت باقیمانده‌ها هستند. همچنین همه VIFها کمتر از ۱,۲ گزارش شده‌اند که نشان‌دهنده عدم وجود هم‌خطی جدی بین متغیرهای مستقل است. در بین متغیرهای وارد شده، دمای سطح زمین (LST)، تراکم جمعیت، تراکم ساختمانی و تراکم معابر ضریب مثبت داشته‌اند و نشان می‌دهند در نواحی با تراکم بالاتر جمعیت یا ساخت‌وساز، مقادیر CO نیز بیشتر است، هرچند سطح معناداری آماری (p-value) این متغیرها بالاتر از آستانه ۰,۰۵ بوده است. تنها متغیری که در آستانه معناداری قرار گرفته، شاخص پوشش گیاهی (NDVI) با ضریب منفی ($\beta \approx -0.087$ ، $p=0.052$) بوده که بیانگر نقش بازدارنده پوشش گیاهی در پراکنش CO است. سایر متغیرها اثر مثبت اما غیرمعنادار داشته‌اند. به‌طور کلی، این یافته‌ها نشان می‌دهد که الگوی فضایی آلاینده CO به‌صورت نسبی با ویژگی‌های انسانی و فیزیوگرافی منطقه هم‌راستا بوده، اما مدل OLS در تبیین تغییرات مکانی این آلاینده قدرت توضیح‌دهندگی محدودی داشته است.



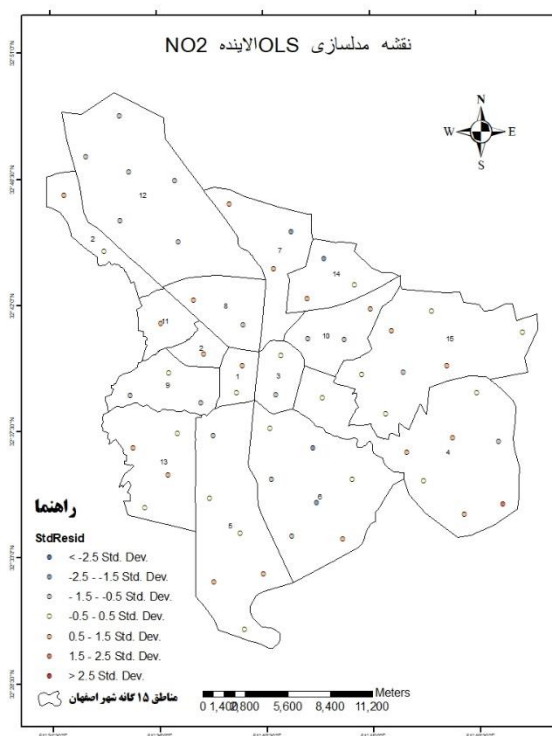
شکل شماره ۵- نقشه مدلسازی OLS آلاینده CO

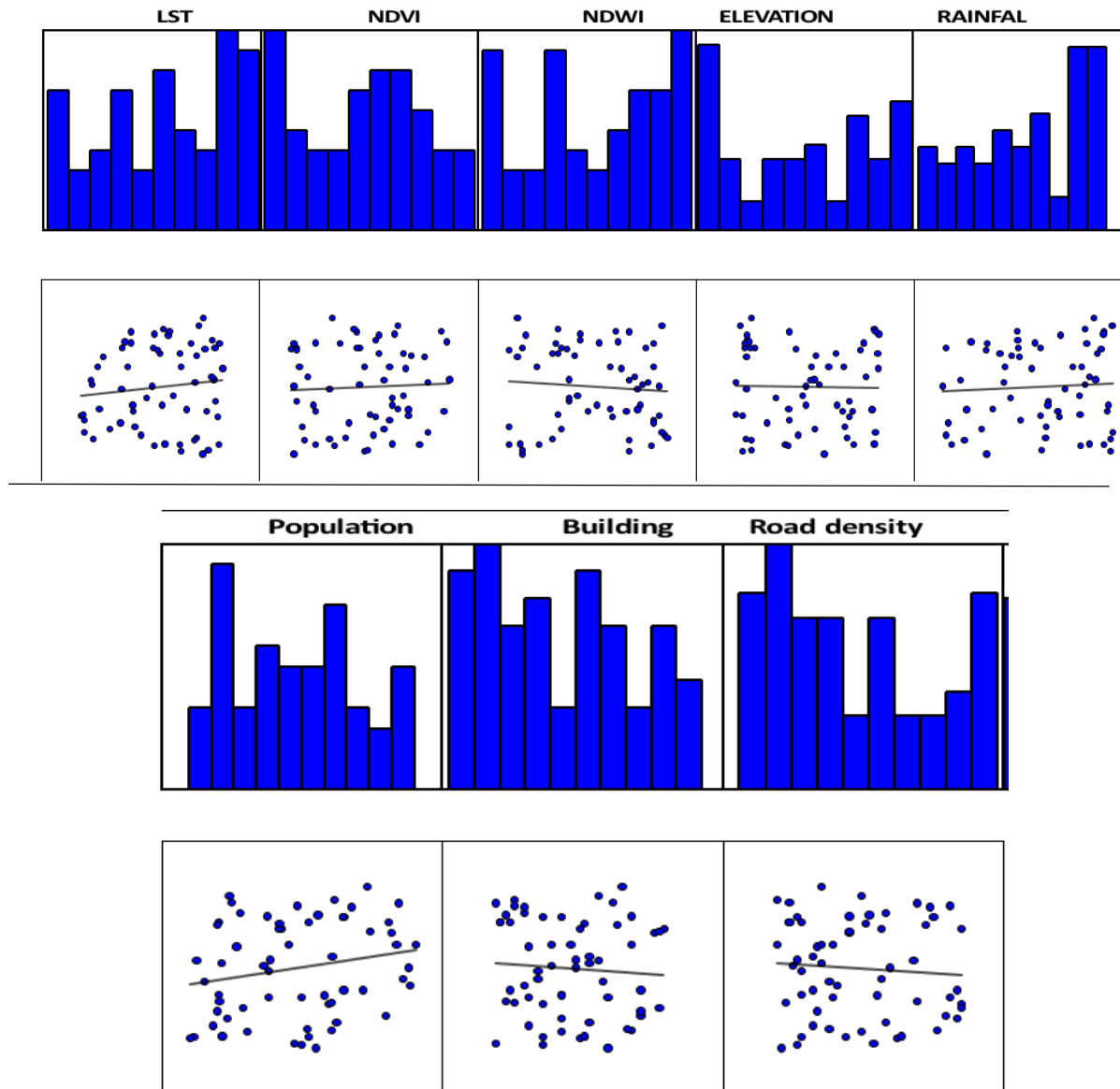


شکل شماره ۶- نمودار مدلسازی OLS آلاینده CO

مدلسازی آلاینده NO_2 به روش OLS

مدل رگرسیون خطی معمولی (OLS) برای آلاینده نیتروژن دی‌اکسید (NO_2) (شکل‌های ۷ و ۸) نشان می‌دهد که با وجود استفاده از چندین متغیر محیطی و انسانی، توان توضیح‌دهندگی مدل پایین بوده است ($R^2=0.076$ ، $Adjusted R^2=-0.068$) مقدار $AICc=400.85$ مثبت شد و هیچ‌یک از آزمون‌های کلی (Wald و F) در سطح ۵ درصد معنادار نبودند ($p=0.65$ و $p=0.83$) در عین حال، شاخص Koenker (BP) و آزمون Jarque-Bera حاکی از آن است که ناهمسانی و انحراف جدی از نرمالیت در باقیمانده‌ها وجود ندارد. بررسی شاخص‌های هم‌خطی نیز نشان داد همه‌ی VIFها کمتر از ۱,۲ هستند و مشکلی از این نظر وجود ندارد. در تحلیل ضرایب، دمای سطح زمین (LST) اثر مثبت ولی غیرمعنادار نشان داد ($\beta \sim +0.10$)، $p=0.39$ پوشش گیاهی (NDVI) نیز با ضریب مثبت ($\beta \sim +3.82$ ، $p=0.38$) ظاهر شد که احتمالاً بازتاب وجود منابع آلاینده در فضاهای سبز و مناطق تراکم شهری است. در مقابل، شاخص رطوبت ($\beta \sim -2.29$ ، $p=0.60$) و ارتفاع ($\beta \sim -0.002$ ، $p=0.87$) هر دو اثر کاهنده بر NO_2 داشتند. از میان متغیرهای انسانی، تراکم جمعیت بیش از دیگر عوامل با NO_2 همبسته بود و در آستانه‌ی معناداری قرار گرفت ($\beta \sim +0.00045$ ، $p=0.06$)، به‌گونه‌ای که افزایش تراکم جمعیتی با افزایش غلظت NO_2 همراه بود. در حالی که ضرایب تراکم ساختمانی ($\beta \sim -2.68$ ، $p=0.72$) و تراکم معابر ($\beta \sim -2.38$ ، $p=0.65$) منفی بودند که می‌تواند بازتاب تهویه‌پذیری بهتر یا پراکندگی بیشتر منابع در این بخش‌ها باشد. به این ترتیب، اگرچه روابطی بین برخی شاخص‌ها و غلظت NO_2 دیده شد، اما مدل OLS تنها بخش اندکی از تغییرات مکانی این آلاینده را پوشش داده و نتایج به‌طور کلی معنادار نیستند. این وضعیت نشان می‌دهد برای تحلیل دقیق‌تر باید از مدل‌های پیشرفته‌تر یا داده‌های تکمیلی استفاده شود تا الگوی فضایی NO_2 روشن‌تر شود.

شکل شماره ۷- مدلسازی OLS آلاینده NO_2

شکل شماره ۸- نمودار مدلسازی OLS آلاینده NO₂

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

پژوهش حاضر با هدف بررسی رابطه میان آلودگی هوا، فعالیت‌های صنعتی و پدیده جزایر حرارتی شهری انجام شد و با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های مکانی مبتنی بر GIS، پراکنش فضایی و روند زمانی آلاینده‌های جوی در طول سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۲ تحلیل شد. داده‌های مورد استفاده شامل اطلاعات ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا و تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-5P بودند که به صورت جداگانه پردازش و تحلیل شدند. بررسی آلاینده‌های NO₂، SO₂ و ذرات معلق (PM_{2.5}) و UVAI نشان داد که تمرکز بالای این آلاینده‌ها عمدتاً در نواحی پرتراکم و صنعتی شهر مشاهده می‌شود و با شدت جزایر حرارتی (LST) هم‌پوشانی دارد. در اصفهان، این تمرکز به ویژه در شمال و شمال غرب شهر مشاهده شد، جایی که بخش‌های صنعتی مهمی مانند پتروشیمی، پالایشگاه و نیروگاه‌ها مستقر هستند. نواحی جنوبی و جنوب شرقی که تراکم جمعیتی و صنعتی پایین‌تری دارند، کیفیت هوای بهتری تجربه کردند. روند زمانی داده‌ها طی سال‌های مطالعه نشان‌دهنده افزایش کلی غلظت آلاینده‌ها بود، با این حال کاهش محسوس در سال ۱۴۰۱ به دلیل محدودیت‌های ناشی از کرونا مشاهده شد که تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی بر آلودگی هوا را نشان می‌دهد.

تحلیل داده‌های زمینی و ماهواره‌ای نشان داد که NO₂ بیشترین غلظت را در مناطق پرتراکم و پرجمعیت دارد، در حالی که SO₂ پراکنشی ناهمگن اما با تمرکز در شمال و شمال غرب شهر دارد. ذرات معلق (PM_{2.5}) و UVAI نیز در شمال، شمال شرقی و بخش‌هایی از مرکز

شهر بیشترین میزان را نشان دادند، در حالی که نواحی جنوبی و جنوب‌غرب کیفیت هوای بهتری دارند. مدل‌سازی با استفاده از رگرسیون خطی معمولی (OLS) و رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) نشان داد که تراکم جمعیت، تراکم ساختمانی و دمای سطح زمین رابطه مثبت و معنی‌داری با غلظت آلاینده‌ها دارند، در حالی که رطوبت خاک (NDWI) و پوشش گیاهی (NDVI) رابطه منفی داشته و نقش تعدیلی در کاهش آلاینده‌ها ایفا می‌کنند. این یافته‌ها نشان‌دهنده تعامل پیچیده عوامل طبیعی و انسانی در شکل‌گیری آلودگی هوا است.

مطالعات مشابه در دیگر کلان‌شهرهای ایران نشان می‌دهد که الگوهای فضایی آلاینده‌ها تقریباً مشابه اصفهان است؛ مناطق صنعتی و پرتراکم جمعیتی بیشترین غلظت را تجربه می‌کنند و نواحی کم‌تراکم کیفیت هوای بهتری دارند. این همسویی، اعتبار یافته‌های پژوهش حاضر را افزایش می‌دهد و نشان می‌دهد که الگوهای پراکنش فضایی آلاینده‌ها تحت تأثیر تراکم جمعیتی، فعالیت صنعتی و ساخت‌وسازهای متراکم هستند. نتایج مدل GWR تأکید می‌کند که سیاست‌ها و اقدامات مدیریت آلودگی باید به‌صورت منطقه‌ای و متناسب با ویژگی‌های هر ناحیه شهری تدوین شوند تا اثر بخشی بیشتری داشته باشند.

پیشنهادات:

۱. سطح سیاست‌گذاری کلان و مدیریت شهری

- تدوین نقشه‌های اولویت کاهش آلودگی و حرارت شهری

داده‌های سنجش از دور و مدل GWR می‌توانند مناطق بحرانی از نظر غلظت آلاینده‌ها و دمای سطح زمین را مشخص کنند. شهرداری و سازمان محیط‌زیست می‌توانند از این نقشه‌ها برای تعیین نقاط تمرکز سیاست‌های کنترل آلودگی (مثلاً محدودیت ترافیک، توسعه فضای سبز یا تغییر کاربری صنعتی) استفاده کنند.

- طراحی برنامه‌های منطقه‌ای کاهش جزایر حرارتی

مناطق با تراکم بالای آلاینده‌ها و دمای سطح زیاد می‌توانند هدف پروژه‌های ایجاد کمربند سبز، سطوح خنک‌کننده ((Cool Roofs، پوشش‌های بازتابنده و افزایش سایه‌اندازی در بافت‌های شهری قرار گیرند.

- بازنگرایی در جانمایی صنایع و توسعه شهری

با شناسایی خوشه‌های صنعتی دارای بیشترین سهم در افزایش آلاینده‌ها و دمای محیط، می‌توان طرح‌های جابه‌جایی یا تعدیل فعالیت‌های صنعتی را در اطراف شهر اصفهان پیشنهاد کرد تا از تمرکز آلودگی در مناطق خاص جلوگیری شود.

- استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به عنوان ابزار نظارتی دوره‌ای

سازمان‌های نظارتی می‌توانند داده‌های Sentinel-5 و لندست را به صورت ماهانه برای پایش برخط کیفیت هوا و کنترل دقیق‌تر فعالیت صنایع بزرگ استخراج کنند؛ اقدامی که جایگزینی کم‌هزینه و علمی برای پایش سنتی محسوب می‌شود.

۲. سطح محیط‌زیست و سلامت عمومی

- توسعه سامانه هشداردهنده کیفیت هوا بر پایه مدل‌های یادگیری ماشین

با استفاده از نتایج مدل‌سازی‌های این پژوهش، می‌توان سامانه‌ای طراحی کرد که با پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در مناطق مختلف، به شهروندان، مدارس و مراکز درمانی هشدارهای به‌موقع بدهد.

-برنامه‌ریزی برای کاهش مواجهه گروه‌های حساس

مناطق شناسایی شده با آلاینده‌های بالا می‌توانند در مدیریت بیمارستان‌ها، مدارس یا فضاهای ورزشی لحاظ شوند. مثلاً تنظیم ساعات فعالیت مدارس یا ورزشگاه‌ها بر اساس پیش‌بینی روزهای آلوده.

-توسعه زیرساخت پایش خودکار صنعتی و انتشار عمومی داده‌ها

پیشنهاد می‌شود کارخانه‌ها ملزم به اتصال پایش‌های محلی خود به سامانه‌های ملی شوند تا داده‌ها به صورت عمومی (و نه فقط برای نهادهای دولتی) در دسترس قرار گیرد؛ این شفافیت سبب افزایش پاسخ‌گویی صنایع می‌شود.

۳. سطح پژوهشی و فناوری

-ایجاد بانک داده شهری به صورت بلندمدت (۲۰۱۸-۲۰۲۳ و پس از آن)

داده‌های گردآوری شده در این پژوهش می‌توانند پایه‌ای برای ایجاد «پایگاه داده هوای اصفهان» باشند تا پژوهشگران بعدی بتوانند تحلیل‌های پیش‌بینی، الگوهای فصلی و حتی مدل‌های اقلیم شهری را توسعه دهند.

-ادغام نتایج با سامانه‌های GIS شهری و طرح‌های هوشمند شهری (Smart City)

نقشه‌های حاصل می‌توانند در پلتفرم‌های هوشمند شهرداری یا اپلیکیشن‌های اطلاع‌رسانی عمومی برای پایش لحظه‌ای وضعیت حرارتی و آلودگی مناطق مختلف استفاده شوند.

-گسترش چارچوب پژوهش برای سایر کلان‌شهرهای صنعتی ایران

مدل تلفیقی داده‌های Sentinel-5، لندست و ایستگاه‌های زمینی می‌تواند برای شهرهایی چون تهران، تبریز، کرج و اهواز نیز به کار رود تا مقایسه منطقه‌ای و ملی صورت گیرد.

-توسعه مدل‌های ترکیبی تصمیم‌یار برای برنامه‌ریزی شهری

نتایج این پژوهش می‌تواند ورودی مدل‌های تصمیم‌یار شهری باشد که سناریوهای مختلف (مثلاً افزایش فضای سبز یا محدودیت ترافیک) را از نظر تأثیر بر آلاینده‌ها و دمای سطح زمین شبیه‌سازی می‌کند.

حامی مالی

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره "۴۰۳۷۳۴۷" انجام شده است.

References:

Bauwens, M., Compernelle, S., Stavrakou, T., Müller, J. F., van Gent, J., Eskes, H., ... & Zehner, C. (2020). Impact of coronavirus outbreak on NO₂ pollution assessed using TROPOMI and OMI observations. *Geophysical Research Letters*, 47(11), e2020GL087978. <https://doi.org/10.1029/2020GL087978>

Fotheringham, A. S., Brunson, C., & Charlton, M. (2002). Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships. John Wiley & Sons. <https://www.wiley.com/en>

- Hoek, G., Beelen, R., de Hoogh, K., Vienneau, D., Gulliver, J., Fischer, P., & Briggs, D. (2008). A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution. *Atmospheric Environment*, 42(33), 7561–7578. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.05.057>
- Jerrett, M., Arain, M. A., Kanaroglou, P. S., Beckerman, B., Potoglou, D., Sahuvaroglu, T., ... & Gilbert, N. L. (2005). A review and evaluation of intraurban air pollution exposure models. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 15(2), 185–204. <https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500376>
- 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>
- Kashki, A., Karami, M., Zandi, R., & Roki, Z. (2021). Evaluation of the effect of geographical parameters on the formation of the land surface temperature by applying OLS and GWR, A case study Shiraz City, Iran. *Urban Climate*, 37, 100832. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100832>
- Li, J., Shao, X., & Zhao, H. (2018). An online method based on random forest for air pollutant concentration forecasting. In *Proceedings of the 37th Chinese Control Conference (CCC)*, Wuhan, China, p. 9641. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8483621>
- Liu, Y., Wang, Y., & Li, J. (2020). Urban form, air pollution and public health: Evidence from Chinese cities. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123183>
- Lu, J., Li, B., Li, H., & Al Barakani, A. (2021). Expansion of city scale traffic modes traffic con ed Difference Vegetated Index: A case study of Wuhan City. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 574–581. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2021.01.073>
- Mamkhezri, J., Bohara, A. K., & Islas Camargo, A. (2020). Air pollution and daily mortality in the Mexico City metropolitan area. *Atmósfera*, 33(3), 249–267. <https://doi.org/10.20937/ATM.52557>
- Nasiri, A., Shafiee, N., & Zandi, R. (2021). Spatial analysis of factors influencing land subsidence using the OLS Model (Case Study: Fahlian Aquifer). *Earth Science Informatics*, 14(4), 2133-2144. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12145-021-00688-1>
- Nasiri, A., Zandi, R., & Khosravian, M. (2022). Evaluating urban heat islands using the urban viability index (Case study: Karaj Metropolis). *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 50(5), 833-847. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01489-1>
- Roki, Zohreh, Mohammadi, Hossein and Zandi, Rahman. (2022). The role of land use changes on the formation of land surface temperature in cities. Case study: Isfahan city. *Physical Geography Research*, 55(3), 1-17. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jphgr.2023.361681.1007779>
- Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007>
- World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240062068>
- Zandi, R., Sadeghi, H., Ghaedi, S., & Far, G. S. P. (2026). Comparative evaluation of artificial neural network (ANN) applications in analysing factors influencing air pollution in metropolitan areas: A case study of Iran. *Urban Climate*, 65, 102751. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102751>
- Zandi, R., Zanganeh, Y., Karami, M., & Khosravian, M. (2022). Analysis of the Spatio-temporal variations of thermal patterns of Shiraz city by satellite images and GIS processing. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(4), 1069-1088. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.11.005>

- Zandi, Rahman, & Shahriar. (2025). Evaluating the relationship between time series of land use changes and land surface temperature in cities in desert regions (Case study: Yazd city). *Geography and Planning*, 29(91), 467-441. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/GP.2024.60544.3237>
- Zandi, Rahman, Salmani Moghaddam, Mohammad and Roki, Zohreh. (2022). Measuring the spatial autocorrelation of land surface temperature with land use, study sample: Isfahan city. *Geography and Environmental Planning*, 34(1), 61-76. . [In Persian] <https://doi.org/10.22108/gep.2022.132524.1488>
- Zhou, W., Qian, Y., Li, X., Li, W., & Han, L. (2014). Relationships between land cover and the structure of the urban land surface: Evidence from selected Chinese cities. *Remote Sensing of Environment*, 152, 339–349. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.017>