

Original Article



Modeling the Concentration Distribution of NO₂ and O₃ Pollutants with an Appropriate Spatial Resolution by Combining Ground and Satellite Data

Amir Hadian¹ and Mina Moradzadeh^{2*} 

Affiliation

1. MSc student, Department of Geomatics, Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran
2. Assistant Professor, Department of Geomatics, Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

ABSTRACT

Introduction: Air pollution represents one of the most important challenges currently facing the majority of countries, largely as a consequence of the advancement of industry and technology. It is evident that the country of Iran, and in particular the city of Tehran, is not exempt from this phenomenon. The impact of urban air pollution on the environment and human health has raised increasing concerns among researchers, policy makers, and citizens. In order to minimize the adverse effects on human health, it is of paramount importance to monitor air pollution at high temporal and spatial resolution. On the other hand, air pollution measurement stations in the urban areas, despite their high accuracy in pollutant measurement, are not generalisable due to temporal and spatial limitations and point measurement. An alternative solution is the use of remote sensing and satellite data, which is a suitable method for monitoring air pollution due to the optimal cost and wide coverage. Nitrogen dioxide (NO₂) and ozone (O₃) pollutants are among the most important indicators of air pollution. Therefore, the objective of this research, is to develop a for the concentration distribution of these pollutants in Tehran with an equal spatial resolution (approximately one kilometer) and a higher level of accuracy than satellite data.

Material and methods: In order to model the concentration distribution of two pollutants, NO₂ and O₃, with appropriate accuracy and resolution, an innovative method based on the kriging interpolation method has been employed. This modeling method has been developed by simultaneously utilizing the advantages of both pollution measurement station data and high resolution Sentinel-5P satellite data. The former comprises 21 active air pollution measurement stations that have been identified as offering the highest accuracy in measuring parameters in different parts of Tehran. The Google Earth Engine system, has been employed to generate concentration distribution maps of the two pollutants in all 22 districts of Tehran on a monthly basis. Additionally, the system has been used to generate point satellite data of the two pollutants in the spatial coordinates of the ground stations on an hourly, daily and monthly basis. The data was prepared and collected in the Google Earth system over the course of one year, from 1 April 1400 to 1 April 1401. Following the correlation between the satellite data and the ground measurement station data and removal of the bias from the satellite data, different stages of innovative kriging interpolation modeling were employed to model the concentration distribution of the two parameters.

Results and discussion: In order to validate the output data from pollutant distribution modeling, 70% of the stations were selected as training data (Train) and 30% of the stations were selected as test data (Test). The points were randomly selected for each month of the year. The final modeling of pollutant distribution was conducted using the training data with the model subsequently validated using the test data. Validation was conducted using both the average error between the predicted data by the model and the station data extracted from the Tehran Air Quality Control Company (in ppb units) and also calculating the RMSE index. The results demonstrate that the average monthly error of the proposed model has decreased from 16.8 to 1.73% for NO₂ pollutant and from 21.9 to 2.53% for O₃ pollutant compared to the data of the Sentinel 5P satellite. Additionally, the root mean square error (RMSE) of this model is equal to 2.79 ppb and 0.86 ppb for NO₂ and O₃ pollutant, respectively. In a comparable scenario, the RMSE index of the Sentinel 5P satellite output map in relation to the pollution measurement station data for NO₂ and O₃ pollutants is 10.083 ppb and 6.238 ppb, respectively.

Conclusion: Considering that the proposed integrated model has performed very well in modeling the concentration distribution of the two pollutants throughout the year with an accuracy and spatial resolution of almost one kilometer, it is recommended that the simultaneous use of satellite and ground data be employed in the estimation of pollutants.

Keywords: Air pollution, Traffic pollutants, Kriging interpolation, Sentinel5P satellite, NO₂ pollutant, O₃ pollutant.

Citation: Hadian, A., and Moradzadeh, M., Modeling the Concentration Distribution of NO₂ and O₃ Pollutants with an Appropriate Spatial Resolution by Combining Ground and Satellite Data, *Iran J Remote Sens GIS*. 16(2):85-104.

* Corresponding Author: m.moradzadeh@eng.ui.ac.ir
DOI: <https://doi.org/10.48308/GISJ.2023.103726>

Received: 2023.02.21
Accepted: 2023.07.15





مدل سازی توزیع غلظت آلاینده های NO_2 و O_3 با توان تفکیک مکانی مناسب با استفاده از تلفیق داده های زمینی و ماهواره ای

امیر هادیان^۱ و مینا مرادی زاده^{۲*}

سمت

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
۲. استادیار گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

سابقه و هدف: آلودگی هوا یکی از مهم ترین بحران هایی است که امروزه اکثر کشورها با توجه به پیشرفت صنعت و فناوری با آن روبه رو هستند. کشور ایران و به ویژه شهر تهران نیز از این پدیده مستثنا نیست. تأثیر آلودگی هوای شهری بر محیط زیست و سلامت انسان نگرانی های فزاینده ای را برای محققان، سیاست گذاران و شهروندان برانگیخته است. برای کاهش تأثیرات منفی آلودگی هوا بر سلامت، اندازه گیری، به موقع آن در وضوح زمانی و مکانی بالا اهمیت فراوانی دارد. از طرفی، ایستگاه های سنجش آلودگی هوا در سطح شهر به رغم صحت بالا در اندازه گیری آلاینده ها، به دلیل محدودیت های زمانی و مکانی و اندازه گیری نقطه ای قابلیت تعمیم پذیری ندارند. راهکار مکمل و بعضاً جایگزین استفاده از سنجش از دور و داده های ماهواره ای است که با توجه به هزینه پهنه و پوشش وسیع روشی مناسب برای پایش آلودگی هوا به شمار می رود. آلاینده های دی اکسید نیتروژن (NO_2) و ازن (O_3) از مهم ترین شاخص های آلودگی هوا هستند که در این پژوهش برای مدل سازی توزیع غلظت آن ها در سطح شهر تهران با توان تفکیک مکانی برابر (تقریباً یک کیلومتر) و صحتی بالاتر از داده های ماهواره ای تلاش خواهد شد.

مواد و روش ها: به منظور مدل سازی توزیع غلظت دو آلاینده NO_2 و O_3 با دقت و توان تفکیک مناسب، از روش نوآورانه مبتنی بر روش درون یابی کریجینگ استفاده شده است. این روش با بهره گیری هم زمان از مزایای داده های ایستگاهی سنجش آلودگی از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران، که با بهره گیری از ۲۱ ایستگاه سنجش آلودگی هوای فعال که در نقاط مختلف شهر تهران مستقر است، بالاترین دقت در اندازه گیری پارامترها را دارند و داده های ماهواره ای سنیتل 5P که از توان تفکیک مکانی بالا برخوردارند، مدل سازی را انجام می دهد. با توجه به قابلیت های سامانه گوگل ارت انجین، نقشه های توزیع غلظت دو آلاینده در کل مناطق ۲۲ گانه شهر تهران به صورت ماهانه و همچنین داده های ماهواره ای نقطه ای دو آلاینده در مختصات مکانی ایستگاه های زمینی، به صورت ساعتی، روزانه و ماهانه به مدت یک سال از تاریخ ۱ فروردین ۱۴۰۰ تا ۱ فروردین ۱۴۰۱ در سامانه گوگل ارت تهیه و جمع آوری شد. پس از بررسی همبستگی بین داده های ماهواره ای و داده های ایستگاه های سنجش زمینی و حذف بایاس از داده های ماهواره ای، مراحل مختلف مدل سازی نوآورانه درون یابی کریجینگ به منظور مدل سازی توزیع غلظت دو پارامتر به کار گرفته شد.

نتایج و بحث: به منظور صحت سنجی داده های خروجی حاصل از مدل سازی توزیع آلاینده ها، ۷۰ درصد ایستگاه ها به عنوان داده های آموزش (Train) و ۳۰ درصد ایستگاه ها به عنوان داده های آزمون (Test) انتخاب شدند. این نقاط به صورت تصادفی و برای هر ماه از سال ۱۴۰۰ انتخاب شدند. مدل سازی نقشه نهایی توزیع آلاینده ها با استفاده از داده های آموزش و صحت سنجی مدل سازی انجام شده با استفاده از داده های آزمون انجام شد. این کار با استفاده از محاسبه میانگین خطای بین داده های پیش بینی شده توسط مدل و داده های ایستگاهی مستخرج از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (با واحد ppb) و همچنین محاسبه شاخص RMSE صورت گرفته است. نتایج نشان می دهد که میانگین خطای ماهانه مدل پیشنهادی، نسبت به داده های ماهواره سنیتل 5P از ۱۶.۸ به ۱.۷۳ درصد برای آلاینده NO_2 و از ۲۱.۹ به ۲.۵۳ درصد برای آلاینده O_3 کاهش یافته است. همچنین خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) این مدل نسبت به داده های ایستگاهی سنجش آلودگی برای آلاینده NO_2 و O_3 به ترتیب برابر با ۲.۷۹ ppb و ۰.۸۶ ppb است. این در حالی است که در حالت مشابه شاخص RMSE نقشه خروجی ماهواره سنیتل 5P نسبت به داده های ایستگاهی سنجش آلودگی برای آلاینده NO_2 و O_3 به ترتیب برابر با ۱۰.۸۳ ppb و ۶.۲۳۸ ppb است.

نتیجه گیری: با توجه به اینکه مدل تلفیقی پیشنهادی عملکرد بسیار مطلوبی در مدل سازی غلظت توزیع آلاینده های مورد نظر در طول سال ۱۴۰۰ با دقت و توان تفکیک مکانی تقریباً یک کیلومتری داشته است، به کارگیری هم زمان داده های ماهواره ای و زمینی در برآورد آلاینده ها توصیه می شود.

واژه های کلیدی: آلودگی هوا، آلاینده های ترافیکی، درون یابی کریجینگ، ماهواره Sentinel-5P، آلاینده NO_2 ، آلاینده O_3 .

استناد: هادیان، ا. و مرادی زاده، م.، مدل سازی توزیع غلظت آلاینده های O_3 و NO_2 با توان تفکیک مکانی مناسب با استفاده از تلفیق داده های زمینی و ماهواره ای، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳: ۱۰۴-۸۵.

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴

* نویسنده عهده دار مکاتبات: m.moradzadeh@eng.ui.ac.ir

شماره دیجیتال مقالات: https://doi.org/10.48308/GISJ.2023.103726



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

۱- مقدمه

آلودگی هوا یکی از مهم ترین مخاطرات در شهرها قلمداد شده که مطالعه اثرات آن یکی از اولویت های عمده در مدیریت کلان شهری به شمار می رود (Bilgili et al., 2015). مرگومیر و بیماری های انسان تا حد زیادی به الگوهای هوا و آب و هوا وابسته است (de Kok et al., 2006). براساس مطالعات انجام شده در خصوص آلاینده های هوا، بین میزان غلظت آلاینده ها و اثرات سوء بهداشتی همچون علائم تنفسی، حمله های آسمی و برونشیت حاد، سرطان و همچنین افزایش میزان مرگومیر رابطه مستقیمی وجود دارد (Fallahizadeh et al., 2018). آلاینده های ازن (O₃) و دی اکسید نیتروژن (NO₂) از جمله مهم ترین آلاینده های خطرناک برای سلامت انسان محسوب می شوند (Najafpoor et al., 2015). حیوانات و انسان ها با قرارگیری در معرض مقادیر کمی از آلاینده O₃ دچار آسیب های تنفسی متعددی چون حملات آسمی، کاهش عملکرد ریه و همچنین نقض در سیستم بینایی می شوند (Zhang and Batterman, 2013). همچنین آلاینده دی اکسید نیتروژن بیشترین غلظت را در هوای آزاد دارد و بیماری های تنگی نفس و درد سینه، خلط خونی و بیماری های ریوی از بیماری های مرتبط با قرارگیری در معرض این آلاینده هستند (Lockhart et al., 2015). بنابراین کنترل آلاینده های ناشی از جریان های ترافیکی و مؤثر در آلودگی هوا مانند NO₂ و O₃ اهمیت بسزایی در سلامت انسان و محیط زیست دارد. از این رو، مدل سازی و تهیه نقشه توزیع غلظت آلاینده های مؤثر در کیفیت هوا با توان تفکیک مکانی و صحت مناسب، به منظور پیش، مدیریت، برنامه ریزی و تصمیم گیری های لازم، به خصوص در مناطق شهری امری بسیار ضروری است (Ghanbari and Isazadeh, 2021). به منظور بررسی آلاینده های هوا، دو روش مرسوم اندازه گیری زمینی و ماهواره ای وجود دارد. رایج ترین روش اندازه گیری زمینی آلاینده ها، نصب ایستگاه های زمینی پیش آلودگی هوا در سطح شهر است (Mihăiță et al., 2019). داده های

ایستگاه های زمینی پیش آلودگی به دلیل صحت و دقت بالا بهترین گزینه برای پیش مستمر آلاینده ها به شمار می روند (Kaffash Charandabi et al., 2012). همچنین به منظور بهبود این روش در جهت پیش بینی و تخمین کلی از منطقه مطالعاتی نیز از تلفیق اطلاعات ایستگاه های سنجش آلودگی و روش های درون یابی استفاده می شود. روش درون یابی کریجینگ یکی از رایج ترین روش های درون یابی است که البته عوامل مهمی مانند تعداد و توزیع مکانی نقاط نمونه برداری و همچنین توانایی مدل درون یابی نقش مؤثری در دقت تهیه نقشه پهنه بندی دارند (Safari, 2007). از نمونه مطالعات انجام شده در ارتباط با این روش می توان به پژوهش میری و همکاران در سال ۱۳۹۴ با موضوع تحلیل و پهنه بندی آلودگی هوا در شهر مشهد با استفاده از سه مدل درون یابی کریجینگ معمولی (OK)^۱، کریجینگ جهانی (UK)^۲ و مدل وزن دهی معکوس فاصله (IDW)^۳ انجام داده اند. در این پژوهش برای مقایسه و انتخاب بهترین مدل از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۴ و ضریب تعیین (R²)^۵ استفاده شده است. نتایج حاکی از برتری مدل OK نسبت به دو روش دیگر با کمترین میزان RMSE (۱۰۶۰۱ μg/m³) است و بیشترین میزان ضریب همبستگی (۷۶.۵ درصد) است (Miri, et al., 2016). برمن^۶ و همکاران نیز در سال ۲۰۱۵ مطالعه ای با موضوع پهنه بندی غلظت آلاینده O₃ در کشور آمریکا انجام دادند. در این پژوهش داده های آلاینده O₃ برای سال ۲۰۰۶ از سازمان محیط زیست این کشور و متغیرهای فاصله تا جاده های اصلی، ترافیک، دما، ارتفاع و جمعیت نیز از سازمان های مربوطه دریافت شد. سپس از چهار رویکرد مدل رگرسیون کاربری زمین (LUR)^۷، مدل وزن دهی

1. Ordinary Kriging
2. Universal Kriging
3. Inverse Distance Weighting
4. Root Mean Squared Error
5. R-squared correlation
6. Berman
7. Land Use Regression

دادند، برای سه دوره ۱۳۸۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷ از دو روش مدل درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله و داده‌های ماهواره‌ای سنتینل 5P استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌سازی مکانی با استفاده از پروداکت سنتینل 5P در مقایسه با روش وزن‌دهی معکوس فاصله به‌نحو مطلوب‌تری توانسته آلاینده‌ی O_3 از دی‌اکسید نیتروژن را برای شهر تهران به‌صورت پیکسل به پیکسل برای تمامی ایستگاه‌ها مدل‌سازی کند (Ghanbari and Isazadeh, 2021). قنادی و همکاران نیز در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای با هدف ارزیابی قابلیت سنجنده‌ی سنتینل 5P در پایش آلودگی هوا و همچنین بررسی روند تغییرات آلاینده‌های NO_2 ، دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و مونواکسید کربن (CO) در شهرهای بزرگ و صنعتی ایران در دو سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ انجام داده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داده است که مقادیر پایش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی سنتینل 5P حداقل ۷۸ درصد با مقادیر پایش‌شده توسط ایستگاه‌های زمینی همبستگی دارد و همچنین شهر تهران آلوده‌ترین هوا را به‌لحاظ مجموع آلاینده‌ها داشته است (Ghannadi et al., 2022). شایان ذکر است که با توجه به وضعیت هوای غالب بر کشور و احتمال ابری بودن تصاویر در ماه‌های سرد سال تهیه‌ی این نقشه‌ها با محدودیت مواجه است و نمی‌تواند دقتی همانند ایستگاه‌های زمینی پایش آلودگی هوا ارائه کند.

با توجه به مزایا و معایب هر یک از دو روش پایش آلودگی هوا که در بالا گفته شد، توسعه‌ی روش‌هایی که قادر به مدل‌سازی دقیق‌تر پایش آلاینده‌های مؤثر در آلودگی هوا همچون O_3 و NO_2 باشند، مبتنی بر تلفیق داده‌های ایستگاه‌های زمینی پایش آلودگی و داده‌های با پوشش وسیع ماهواره‌ای است. در این پژوهش هدف مدل‌سازی توزیع غلظت آلاینده‌های NO_2 و O_3 با استفاده از روشی نوآورانه با بهره‌گیری هم‌زمان از داده‌های مستخرج از ایستگاه‌های زمینی پایش آلودگی هوا و داده‌های سنجش‌از‌دور است. بدین منظور از

معکوس فاصله، مدل کریجینگ معمولی و مدل کریجینگ جهانی برای پهنه‌بندی استفاده شد. همچنین با استفاده از روش اعتبارسنج مونت کارلو^۱ این چهار رویکرد ارزیابی شد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی نشان داد که مدل کریجینگ معمولی کارایی بالاتری در پهنه‌بندی غلظت آلاینده‌ی O_3 دارد و دما، ارتفاع و فاصله تا جاده‌های اصلی با غلظت آلاینده‌ی O_3 بسیار مرتبط بوده‌اند (Berman et al., 2015). به‌رغم توانایی روش‌های درون‌یابی در مدل‌سازی و نمایش تغییرات زمانی آلاینده‌ها، به‌علت محدود بودن تعداد ایستگاه‌ها، استفاده از این روش در اغلب اوقات به‌دلیل توان تفکیک مکانی پایین اعتبار بالایی ندارد (Basu et al., 2004). در کنار روش‌های اندازه‌گیری زمینی، راهکار مکمل و بعضاً جایگزین به‌منظور پایش آلودگی هوا، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و سنجش‌از‌دوری است که با توجه به هزینه‌های پایین و پوشش وسیع روشی مناسب برای پایش آلودگی هوا به‌شمار می‌آید (You et al., 2015). از جمله مطالعات انجام‌شده در این زمینه نیز می‌توان به پژوهش عمرانی و همکاران در سال ۲۰۲۰ اشاره کرد. این مطالعه با هدف ارزیابی چگونگی توزیع زمانی- مکانی آلاینده‌ی NO_2 کشور فرانسه در بازه‌ی زمانی بین مه ۲۰۱۸ تا ژوئن ۲۰۱۹ انجام گرفت. برای این منظور به‌دلیل کمبود شبکه‌های ایستگاه مانیتورینگ زمینی در اغلب مناطق کشور فرانسه و همچنین پوشش وسیع تصاویر سنجش‌از‌دور، برای استخراج داده‌های آلاینده‌ی NO_2 از تصاویر ماهواره‌ی سنتینل 5P استفاده کرده‌اند. به‌این ترتیب چگونگی توزیع غلظت آلاینده‌ی NO_2 این کشور به‌صورت هفتگی، ماهانه و سالانه تحلیل و بررسی شده و برای اعمال سیاست‌های مبنی بر کاهش آلودگی هوا به‌سازمان محیط‌زیست این کشور ارائه شده است (Omran et al., 2020). همچنین در مطالعه‌ی دیگری که قنبری و عیسی‌زاده در سال ۱۴۰۰ با موضوع مدل‌سازی تغییرات زمانی و مکانی غلظت آلاینده‌های NO_2 و دی‌اکسید نیتروژن در کلان‌شهر تهران انجام

1. Monte Carlo Cross-Validation

شمال شرق شهر تهران مانع از جریان بادهایی می‌شوند که از سمت غرب و جنوب تهران می‌وزند و لذا باعث انباشتگی آلاینده‌ها در سطح شهر، به‌ویژه در مناطق مرکزی و شرقی تهران می‌شود (Heger and Sarraf, 2018). با توجه به اینکه بادهای غالب شهر تهران غربی است و بیشتر صنایع این شهر نیز در محدوده غربی این شهر مستقرند، بنابراین می‌توان انتظار داشت که هوای شهر در اغلب مواقع آلوده باشد (Soleymani and Malekhoseini, 2021). شیب عمومی شمال به جنوب شهر تهران به‌خصوص زمانی که بادهای جنوبی وزیده می‌شوند، به پدیده وارونگی دما منجر می‌شود که تنفس شهروندان را در ماه‌های سرد سال با مشکل مواجه می‌کند (Akbaribidokht and Sharipour, 2014). به‌منظور اندازه‌گیری و پایش پارامترهای مرتبط با کیفیت هوا، تعدادی ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا در شهر تهران احداث شده است. موقعیت کشوری و استانی شهر تهران در شکل ۱ نمایش داده شده است. همچنین شهر تهران دارای ۲۱ ایستگاه سنجش کیفیت هوای شهری است که در این میان ۱۸ ایستگاه آلاینده NO₂ و ۱۹ ایستگاه آلاینده O₃ را اندازه‌گیری می‌کنند. اطلاعات ایستگاه‌ها نیز در جدول ۱ آورده شده است.

ماهواره سنتینل 5P که توانایی پایش آلاینده‌های آلودگی هوا را با توان تفکیک مکانی تقریباً یک کیلومتری دارد و همچنین ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا که می‌توانند آلاینده‌ها را با صحت بالایی به‌صورت نقطه‌ای اندازه‌گیری کنند، به‌صورت تلفیقی استفاده شده است. برای این کار از روش درون‌یابی کریجینگ در دو مرحله استفاده شده و در هر مرحله نیز خطای این روش در تخمین و مدل‌سازی رفع شده است. در نهایت پس از اعتبار سنجی داده‌های مستخرج از این مدل، مناطق بحرانی و دارای آلودگی زیاد از غلظت هریک از آلاینده‌ها در سطح شهر تهران به‌صورت ماهانه در سال ۱۴۰۰ و با توان تفکیک مکانی تقریباً یک کیلومتری (۱۱۳.۲ متر) و صحت بالا مدل‌سازی شده است.

۲- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

تهران یکی از بزرگ‌ترین شهرهای غرب آسیا بوده و از نظر جغرافیایی در محدوده ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است (Bahari et al., 2016). کوه‌های البرز در شمال و



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه

جدول ۱. اطلاعات ایستگاه های سنجش آلودگی هوا

تاریخ تأسیس	نوع آلاینده اندازه گیری شده	منطقه	ایستگاه
۱۳۸۹	NO ₂ - O ₃	۱۴	اتوبان. محلاتی. منطقه ۱۴
۱۳۷۹	NO ₂ - O ₃	۱	اقدسیه. منطقه ۱
۱۳۹۶	NO ₂ - O ₃	۲۲	پارک. رز. منطقه ۲۲
۱۳۸۶	NO ₂ - O ₃	۵	پونک. منطقه ۵
۱۳۹۰	NO ₂ - O ₃	۱۳	پیروزی. منطقه ۱۳
۱۳۹۱	NO ₂ - O ₃	۶	تربیت. مدرس. منطقه ۶
۱۳۸۹	NO ₂ - O ₃	۳	دروس. منطقه ۳
۱۳۹۰	NO ₂ - O ₃	۷	ستاد. بحران. منطقه ۷
۱۳۹۰	NO ₂ - O ₃	۱۸	شادآباد. منطقه ۱۸
۱۳۹۱	NO ₂ - O ₃	۲	شریف. منطقه ۲
۱۳۸۴	NO ₂ - O ₃	۲۰	شهرری. منطقه ۲۰
۱۳۸۸	O ₃	۱۰	شهرداری. منطقه ۱۰
۱۳۸۸	NO ₂ - O ₃	۱۱	شهرداری. منطقه ۱۱
۱۳۸۸	NO ₂ - O ₃	۱۹	شهرداری. منطقه ۱۹
۱۳۹۶	NO ₂ - O ₃	۲۲	شهرداری. منطقه ۲۲
۱۳۹۴	NO ₂ - O ₃	۳	صدر. منطقه ۳
۱۳۸۷	NO ₂ - O ₃	۸	گلبرگ. منطقه ۸
۱۳۹۲	NO ₂ - O ₃	۱۵	مسعودیه. منطقه ۱۵
۱۳۸۹	NO ₂ - O ₃	۹	میدان. فتح. منطقه ۹

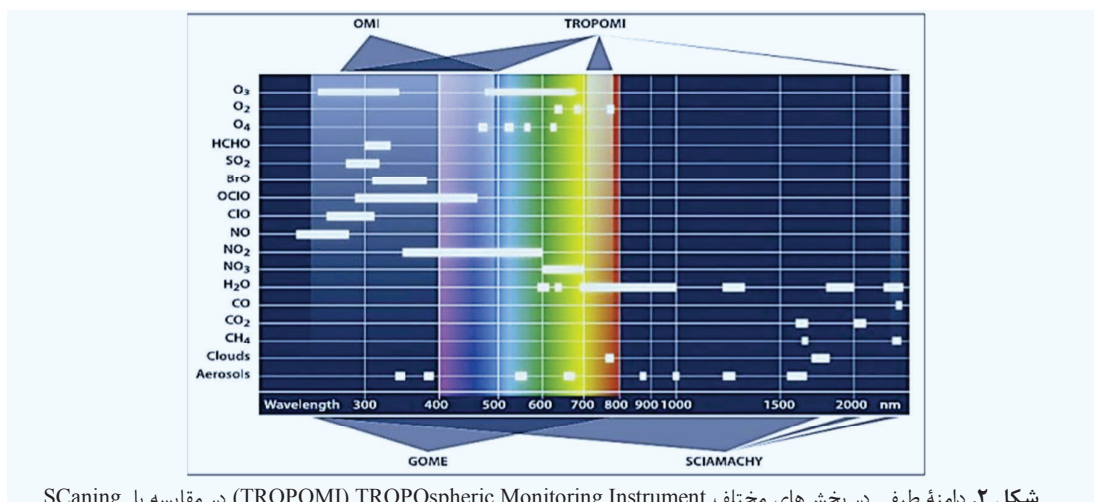
۲-۲- داده های مورد استفاده

۲-۲-۱- داده های ماهواره سنتینل 5P

استفاده از سنجش از دور و داده های ماهواره ای روشی نوآورانه برای پایش پدیده های سطح زمین است (Sohrabinia and Khorshiddoust, 2007). ماهواره سنتینل 5P را سازمان فضایی اروپا به منظور نظارت بر محیط زیست و پایش آلاینده های هوا در سراسر زمین معرفی کرده است و به همین منظور سنجنده این ماهواره با نام TROPOMI^۱ در تاریخ ۱۳ اکتبر سال ۲۰۱۷ به منظور پایش تروپوسفر به فضا پرتاب شد. این سنجنده با هندسه تصویربرداری Pushbroom، اتمسفر

زمین را در سه محدوده فرابنفش و مرئی (UV)^۲ (۲۷۰ تا ۴۹۰ نانومتر)، مادون قرمز نزدیک (NIR)^۳ (۶۷۵ تا ۷۷۵ نانومتر) و مادون قرمز کوتاه (SWIR)^۴ (۲۳۰۵ تا ۲۳۸۵ نانومتر) تصویربرداری می کند (شکل ۲). همچنین اطلاعات کامل باندهای ماهواره سنتینل 5P در جدول ۲ آورده شده است.

1. Tropospheric Monitoring Instrument
2. Ultraviolet
3. Near-Infrared
4. Short-Wavelength-Infrared



شکل ۲. دامنه طیفی در بخش های مختلف TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) در مقایسه با SCanning Global Ozone Monitoring (SCIAMACHY) Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric Cartography (OMI) Ozone Monitoring Instrument و (GOME) Experiment

جدول ۲. اطلاعات باندهای سنجنده سنتینل 5P

SWIR (Short-wavelength-infrared)	NIR (Near-infrared)		UVIS (Ultraviolet Imaging Spectrograph)		UV (Ultraviolet)		آشکارساز
۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	باند
۲۳۰۵-۲۳۸۵	۷۲۵-۷۷۵	۶۷۵-۷۲۵	۴۰۵-۵۰۰	۳۱۰-۴۰۵	۳۰۰-۳۲۰	۲۳۰-۳۰۰	دامنه طیفی
۰.۲۵	۰.۵۰	۰.۵۰	۰.۵۵	۰.۵۵	۰.۵۰	۱.۰۰	توان تفکیک
							طیفی (نانومتر)
							توان تفکیک
۷*۷	۷*۷	۷*۷	۷*۷	۷*۷	۷*۷	۲۸*۲۱	مکانی (Km)

و مرئی اندازه گیری می شوند (Veeffkind et al., 2012). در مطالعه حاضر غلظت آلاینده های NO₂ و O₃ از تاریخ ۱ فروردین ۱۴۰۰ تا ۱ فروردین ۱۴۰۱ به صورت ساعتی، روزانه و ماهانه استخراج شده است. داده های ماهواره ای آلاینده NO₂ پس از استخراج با ضرب در $10^{15} \times 6.022$ به واحد molec/cm² و داده های آلاینده O₃ پس از استخراج با ضرب در ۲۲۴۱.۱۵ به واحد DU¹ تبدیل شد. این تبدیل ها مطابق با دستورالعمل شرکت کوپرنیک تبدیل یافته است (Eskes et al., 2022). باند مورد استفاده ماهواره سنتینل 5P برای اندازه گیری هر آلاینده در جدول ۳ مشخص شده است.

1. Dobson unit

از مزایای این سنجنده می توان به تفکیک مکانی بالا، پوشش جهانی روزانه و نسبت سیگنال به نویز بالا اشاره کرد (Veeffkind et al., 2012).

این ماهواره در حال حاضر جدیدترین ماهواره به منظور پایش آلودگی هوا بوده که با برخورداری از سنجنده TROPOMI، می تواند از سنجنده های مشابه با فتاوری های پیشرفته تر مانند OMI و SCIAMACHY برای ثبت و ضبط اطلاعات بهره ببرد و همچنین اطلاعات بروز را با توان تفکیک طیفی، مکانی و زمانی بهتر در اختیار کاربران قرار دهد (Veeffkind et al., 2012).

یکی از اهداف اصلی این ماهواره، اندازه گیری غلظت آلاینده های NO₂ و O₃ است که از بخش های فرابنفش

جدول ۳. باندهای مورد استفاده از تصاویر سنجنده (Tropomi) ماهواره سنتینل 5P در پالایش آلاینده ها

آلاینده	توضیحات باند مورد استفاده	توان تفکیک مکانی (متر)
دی اکسید نیتروژن (NO ₂)	غلظت ستون عمودی تروپوسفری آلاینده دی اکسید نیتروژن با واحد mol/m ² (NO ₂ _Column_number_Density)	۱۱۱۳.۲
اوزن (O ₃)	غلظت ستون عمودی تروپوسفری آلاینده ازن با واحد mol/m ² (O ₃ _Column_number_Density)	۱۱۱۳.۲

مزیت استفاده از این سیستم این است که نیازی به بارگیری داده ها نیست و داده ها برای استفاده در این سیستم در دسترس است (Amani et al., 2020). علاوه بر این، در مواردی که حجم داده ها زیاد است، دیگر نیازی به سیستم پردازنده قوی نیست و هر سیستمی با امکانات سخت افزاری در دسترس خود، می تواند تمامی داده های موجود را در کمترین زمان ممکن فراخوانی و پردازش کند. شایان ذکر است که مطالعات در سطح جهانی، مناسب بودن برآورد این سنجنده در تخمین آلاینده های جوی را برای کشور ایران تأیید کرده اند (Borsdorff et al., 2019). بنابراین در این پژوهش نقشه های توزیع غلظت دو آلاینده در کل مناطق ۲۲ گانه شهر تهران به صورت ماهانه و همچنین داده های ماهواره ای نقطه ای دو آلاینده در مختصات مکانی ایستگاه های زمینی سنجنش آلودگی هوای شهر تهران به صورت ساعتی، روزانه و ماهانه توسط ماهواره ای سنتینل 5P و محصول ستون NO₂ و O₃ با استفاده از برنامه نویسی در سامانه گوگل ارت انجین از تاریخ ۱ فروردین ۱۴۰۰ تا ۱ فروردین ۱۴۰۱ به مدت یک سال تهیه و جمع آوری شد. پس از استخراج داده های توزیع آلاینده ها، باید پردازش هایی بر این محصولات اعمال شود تا برای تجزیه و تحلیل آماده شوند. بدین منظور تمامی نقشه ها در نرم افزار Arc Map فراخوانی شد و سیستم مختصات لایه ها به WGS 1984 انتقال یافت. داده های ایستگاه های سنجنش آلودگی زمینی آلاینده های ذکر شده نیز از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران به صورت ساعتی، روزانه و ماهانه دریافت شده است.

۲-۲-۲- داده های ایستگاه های سنجنش آلاینده های هوا
داده های ایستگاه های زمینی آلاینده های NO₂ و O₃ از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران دریافت شده است. این شرکت به طور عمده با بهره گیری از ۲۱ ایستگاه سنجنش آلودگی هوای فعال که در نقاط مختلف شهر تهران مستقرند، مجموعه ای از آلاینده های گازی موجود در هوای شهر تهران را اندازه گیری می کند. سپس وضعیت آلودگی هوای برخط شهر تهران پس از پردازش اطلاعات، با استفاده از وبسایت شرکت، برنامه های کاربردی گوشی های هوشمند، شبکه های اجتماعی، تابلوهای نمایشگر شهری و خبرگزاری ها به اطلاع عموم می رسد. راه اندازی سیستم پیش بینی آلودگی هوای شهر تهران در شرکت کنترل کیفیت هوا از سال ۱۳۹۱ آغاز شده و در حال حاضر مدل های هواشناسی و مدل های آلودگی هوا به صورت روزانه و به منظور پیش بینی وضعیت آلودگی هوا در حال اجرا هستند. ۱۸ ایستگاه در شهر تهران آلاینده NO₂ و ۱۹ ایستگاه آلاینده O₃ را اندازه گیری می کنند.

۳- روش شناسی

۳-۱- آماده سازی داده های ماهواره ای

سامانه رایگان و متن باز گوگل ارت انجین از سال ۲۰۰۸ به صورت سامانه ابری و برخط به منظور پردازش داده های ماهواره ای راه اندازی شد. این سامانه یک ابزار قدرتمند سنجنش از دور برای استخراج اطلاعات کاربردی از تصاویر ماهواره ای است که پردازش هایی از توان تفکیک مکانی ۱۰ متر تا چند کیلومتر را برای انواع مکان ها در سطح زمین در اختیار کاربران قرار می دهد.

در این رابطه P_i مقدار پیش بینی شده و O_i مقدار مشاهده شده و n تعداد داده هاست.

در این مطالعه قبل از انجام مدل سازی به بررسی همبستگی بین داده های ماهواره ای و داده های ایستگاه های سنجش آلودگی زمینی به صورت ماهانه اقدام شده است. بدین منظور پس از دریافت داده های غلظت آلاینده های NO₂ و O₃ مستخرج از ماهواره سنتینل 5P و ایستگاه های سنجش آلودگی زمینی در مختصات مکانی ایستگاه های سنجش، با توجه به زمان منطقه ای^۱ شهر تهران، به معادل سازی ساعت اندازه گیری های این دو نوع داده اقدام و سپس به بررسی همبستگی این دو نوع داده به صورت ماهانه پرداخته شده است. جدول ۴ نشان دهنده میزان شاخص R² میان دو نوع داده در طول سال ۱۴۰۰ است.

۳-۲- بررسی همبستگی بین داده های ماهواره ای و داده های

ایستگاه های سنجش زمینی قبل از انجام مدل سازی

یکی از مهم ترین معیارهای ارزیابی ارتباط میان دو متغیر x و y، شاخص ضریب تعیین است که به صورت بی بعد نمایش داده می شود. شاخص ضریب تعیین نسبت تغییرات متغیر وابسته به متغیر مستقل است. به بیان ساده تر می توان گفت ضریب تعیین نشان می دهد که چند درصد تغییرات متغیرهای وابسته در یک مدل رگرسیونی با متغیر مستقل تبیین می شود. و یا به عبارتی دیگر چه میزان یا مقدار از تغییرات متغیر وابسته تحت تأثیر متغیر مستقل بوده است. این شاخص به صورت رابطه (۱) محاسبه خواهد شد.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n O_i^2 \sum_{i=1}^n P_i^2}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

جدول ۴. همبستگی بین داده های ماهواره ای و زمینی آلاینده های NO₂ و O₃ در طول سال ۱۴۰۰

ایستگاه	شاخص ضریب تعیین آلاینده NO ₂	شاخص ضریب تعیین آلاینده O ₃
اقدسیه	۰.۶۵	۰.۶۴
دانشگاه صنعتی شریف	۰.۸۰	۰.۷۳
دانشگاه تربیت مدرس	۰.۸۱	۰.۶۲
دروس	۰.۷۶	۰.۶۹
گلبرگ	۰.۵۰	۰.۷۴
محلانی	۰.۸۳	۰.۶۲
مسعودیه	۰.۹۲	۰.۶۸
میدان فتح	۰.۵۸	۰.۶۳
پارک رز	۰.۵۳	۰.۶۲
پیروزی	۰.۷۰	۰.۶۴
پونک	۰.۴۵	۰.۶۸
ستاد بحران	۰.۸۶	۰.۷۱
شادآباد	۰.۶۹	۰.۷۳
شهر ری	۰.۵۵	۰.۷۱
شهرداری منطقه ۲	۰.۸۷	۰.۶۷
شهرداری منطقه ۱۰	ندارد	۰.۶۸
شهرداری منطقه ۱۱	۰.۶۹	۰.۶۷
شهرداری منطقه ۱۹	۰.۶۴	۰.۶۵
تهرانسر	۰.۴۹	۰.۵۴
میانگین سالانه (۱۴۰۰)	۰.۶۸۴۴	۰.۶۶۸۹

1. Zone Time

۳-۳- اندازه‌گیری آلاینده‌های هوا

آژانس حفاظت محیط‌زیست (EPA)^۱ به‌منظور ایجاد هماهنگی، واحدهایی را برای اندازه‌گیری ذرات جامد و آلاینده‌های گازی معرفی کرده است. اندازه‌گیری‌های ماهواره سنتینل 5P برای آلاینده‌های NO₂ و O₃ با واحد mol/m² انجام می‌گیرد و همچنین برای تبدیل واحد mol/m² به واحد ppb از رابطه (۴) و برای تبدیل واحد DU به ppb از رابطه (۵) استفاده می‌شود (Eskes et al., 2022).

$$\text{رابطه (۴)} \quad 1\text{ppb} = \frac{60221.4 \times 10^{15}}{2.5 \times 10^{15}} \text{ mol/m}^2$$

$$\text{رابطه (۵)} \quad 1\text{ppb} = 3447.92 \times \text{mol/m}^2$$

۳-۴- حذف بایاس از داده‌های ماهواره‌ای

خطای کلی مرتبط با داده‌های آموزشی بایاس^۲ نامیده می‌شود. هنگامی که خطای داده‌های آموزشی افزایش می‌یابد یا دقت داده‌های آموزشی کاهش می‌یابد، به آن بایاس بالا و زمانی که خطای داده‌های آموزشی کاهش می‌یابد یا دقت داده‌های آموزشی افزایش می‌یابد، به آن بایاس کم گفته می‌شود. فرمول بایاس به‌صورت زیر محاسبه شده است (رابطه ۶).

$$\text{رابطه (۶)} \quad \text{BIAS} = O_i - P_i$$

O_i: مقدار داده مشاهده‌شده (واقعی)

P_i: مقدار پیش‌بینی‌شده (توسط مدل)

در این پژوهش مطابق با رابطه (۴) و (۵)، داده‌های ایستگاهی مستخرج از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران را از واحد ppb به واحد مولکول بر سانتی‌متر مربع برای آلاینده NO₂ و به واحد DU برای آلاینده O₃ تبدیل و سپس مطابق با رابطه (۷) نسبت به داده‌های ماهواره‌ای نرمال‌سازی می‌کنیم.

$$\text{رابطه (۷)} \quad X_{\text{Normal}} = X_{\text{min}} + \frac{Y_i - Y_{\text{min}}}{(Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}) / (X_{\text{max}} - X_{\text{min}})}$$

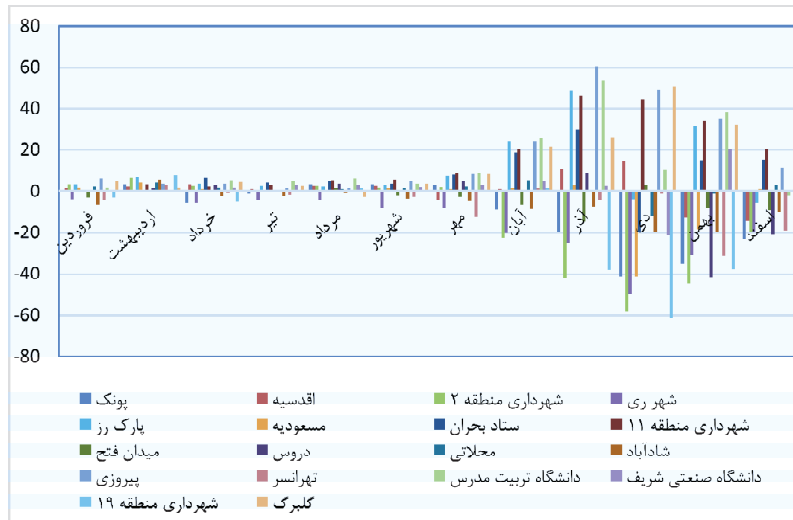
در فرمول بالا X_{Normal} داده ایستگاهی نرمال‌شده، X_{min} مینیمم داده ماهواره‌ای، Y_i داده ایستگاهی سنجش

آلودگی، Y_{min} مینیمم داده ایستگاهی، Y_{max} ماکسیمم داده ایستگاهی و X_{max} ماکسیمم داده ماهواره‌ای است. سپس ابتدا به‌منظور برآورد میزان بایاس میان داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاه‌های سنجش آلودگی زمینی، داده‌های ماهواره‌ای غلظت آلاینده‌های NO₂ و O₃ مستخرج از ماهواره سنتینل 5P در مختصات مکانی ایستگاه‌های سنجش آلودگی به‌عنوان داده پیش‌بینی و داده‌های ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا مستخرج از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران به‌عنوان داده واقعی در نظر گرفته شده است. نمودار میزان بایاس آلاینده‌های NO₂ و O₃ هر ایستگاه در هر ماه در شکل ۳ و ۴ مشخص شده است. در این نمودارها محور افقی مقادیر آلاینده‌ها و محور عمودی ماه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ و ۴ نمایش داده شده است، بیشترین اختلاف بین داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاه‌های سنجش آلودگی زمینی در شش ماه دوم سال بوده و همچنین در ماه‌های سرد سال این اختلاف به بیشینه مقدار خود رسیده است. علت این موضوع می‌تواند ناشی از وقوع پدیده وارونگی دما و تغییرات اقلیمی بیشتری باشد که در فصول سرد سال اتفاق می‌افتد (Akbaribidokht and Sharipour, 2014).

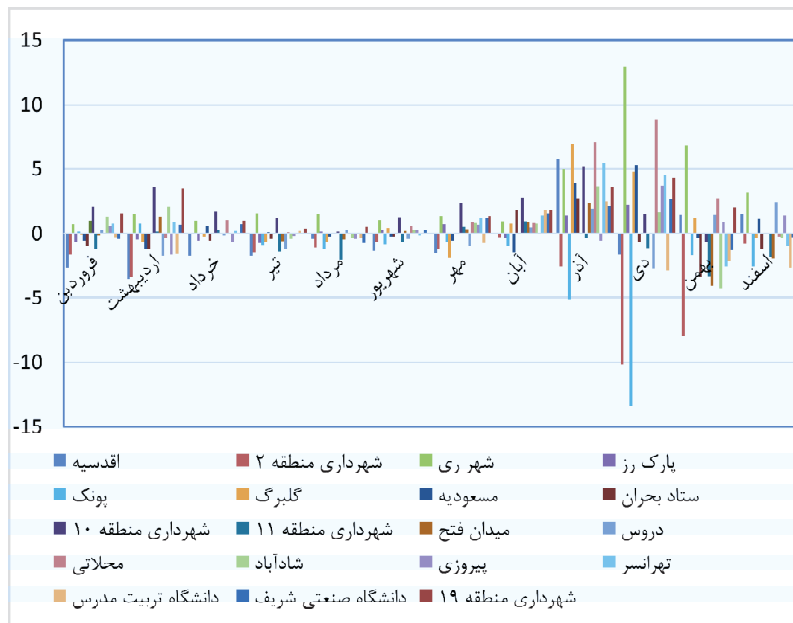
طبق اطلاعیه شرکت کنترل کیفیت هوای تهران به‌صورت تقریبی در هر منطقه از ۲۲ منطقه شهر تهران یک ایستگاه سنجش آلودگی هوا وجود دارد که اندازه‌گیری‌های آن ایستگاه، کیفیت هوای آن منطقه را تعیین می‌کند. در نهایت کیفیت هوای شهر تهران براساس اندازه‌گیری‌های این ایستگاه‌ها سنجیده خواهد شد (Ahmadi and Roshani, 2021). در نتیجه در این پژوهش به‌منظور حذف بایاس از داده‌های ماهواره‌ای، مرکز هر سلول از نقشه توزیع غلظت آلاینده‌ها را که با توان تفکیک مکانی تقریباً یک کیلومتری (۱۱۱۳.۲ متر) توسط ماهواره سنتینل 5P به‌صورت ماهانه استخراج شد، نماینده کل سلول در نظر می‌گیریم.

1. Environmental Protection Agency

2. Bias



شکل ۳. میزان بایاس بین داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی آلاینده NO₂ با واحد mole/cm² در طول سال ۱۴۰۰



شکل ۴. میزان بایاس بین داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی آلاینده O₃ با واحد DU در طول سال ۱۴۰۰

می‌شود. بنابراین با اعمال حذف بایاس بین داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی به‌صورت زمانی-مکانی و منطقه‌ای از مناطق ۲۲گانه شهر تهران، نقشه‌ای با حداقل میزان بایاس و با توان تفکیک مکانی تقریباً یک کیلومتری خواهیم داشت.

سپس با توجه به اینکه که هر ایستگاه سنجش آلودگی زمینی نماینده کل منطقه متناظرش در نظر گرفته شده است، بنابراین مقدار بایاس هر ایستگاه به کل مراکز سلول‌های منطقه متناظرش در نقشه توزیع غلظت آلاینده‌ها مستخرج از ماهواره سنتینل 5P اعمال

۳-۵- استفاده از مدل درون یابی کریجینگ و مدل سازی نقشه توزیع غلظت آلاینده‌ها

روش درون یابی کریجینگ یک روش برآورد زمین آماری است که بر پایه رگرسیون بنا شده است. در این روش اختصاص وزن به داده‌ها براساس فاصله بین نقاط اطراف و همچنین همبستگی میان نقاط اندازه گیری شده انجام می شود (Coburn, 2006). مدل کریجینگ معمولی یک روش برآورد زمین آماری است که بر پایه میانگین متحرک وزن دار بنا شده است. این مدل را می توان بهترین برآورد کننده خطی ناریب معرفی کرد که به صورت زیر تعریف می شود (Peng et al., 2014). مدل ریاضی این روش به صورت رابطه (۷) محاسبه می شود.

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (7)$$

در رابطه (۱) $Z^*(x_i)$ معیار برآوردی، λ_i وزن یا اهمیت کمیت وابسته به نمونه نام و $Z(x_i)$ مقدار متغیر اندازه گیری شده است.

این نوع کریجینگ را کریجینگ خطی می نامند، زیرا ترکیب خطی از n داده است. به منظور استفاده از این مدل درون یابی، متغیر Z باید دارای توزیع نرمال باشد. در غیر این صورت یا باید از کریجینگ غیرخطی استفاده کرد و یا اینکه به صورتی توزیع متغیرها را به نرمال تبدیل کرد. در این مقاله از روش خطی استفاده شده است. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها باید شاخص چولگی^۱ و کشیدگی^۲ داده‌ها را حساب کنید. در حالت کلی چنانچه چولگی و کشیدگی در بازه (۲، -۲) باشند داده‌ها از توزیع نرمال برخوردارند.

جدول ۵. شاخص چولگی و کشیدگی داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی آلاینده NO₂ و O₃

آلاینده ازن		آلاینده دی اکسید نیتروژن		داده های ماهواره ای		داده های ایستگاهی		ماه
kurtosis	skewness	kurtosis	skewness	kurtosis	skewness	kurtosis	skewness	
۱.۴۱۴۹۷	-۱.۰۲۶۱۵۳	۱.۷۱۱۳۵۱	-۱.۱۶۲۱۲۳	۰.۹۸۷۲۶	-۰.۳۸۰۳۸۸	۱.۳۱۱۰۹	-۰.۴۴۲۰۶	فروردین
۱.۴۶۲۳۹	-۱.۲۷۸۰۷	۱.۵۱۴۸۵	-۰.۰۸۸۴۸۶	۱.۱۶۸۶۴	۰.۲۴۶۹۷	۰.۹۶۷۱۵	۰.۴۰۰۹۴	اردیبهشت
۱.۷۹۷۳۲	-۱.۴۰۹۴۰۸	۱.۸۷۳۰۷	-۰.۴۱۵۹۹	۱.۵۹۷۴۸	۰.۰۰۵۷۹۲	۱.۸۶۶۰۹	۱.۰۹۰۸۳	خرداد
۰.۹۹۳۵۱	۰.۲۸۹۴۵	۱.۶۵۶۸۵	-۰.۳۱۲۹۹	۱.۳۱۵۵۳	-۰.۲۴۴۰۷	۱.۳۱۰۰۶	۰.۲۶۵۶۳۹	تیر
۱.۴۶۷۲۳	۰.۲۰۲۴۸۷	۱.۴۹۶۰۴	۰.۳۲۷۰۴۸	۱.۷۷۸۲۹	-۰.۷۱۶۳۲	۱.۶۷۸۳۹	۰.۹۶۱۸۲۱	مرداد
۱.۷۱۷۰۸۴	-۱.۰۳۷۲۶۸	۱.۳۳۰۹۲۵	-۰.۸۲۸۷۱	۱.۷۰۰۵۷	-۰.۶۲۲۵۹	۱.۵۴۳۶۶	-۰.۱۵۸۰۹	شهریور
۱.۶۸۲۴۷	-۰.۰۳۷۰۲۲	۱.۷۴۳۵۶	-۰.۴۹۹۱۴۳	۱.۸۷۶۳۲	-۰.۱۱۴۲۹۹	۱.۰۴۰۳۴۵	۰.۴۳۱۴۲۳	مهر
۱.۱۷۹۳۵	-۰.۲۹۳۷۰۱	۱.۲۲۴۶۴	۰.۸۴۳۴۶	۱.۲۳۶۴۵	۰.۲۳۹۸۹	۰.۹۵۹۵۲	۰.۵۳۱۹۶۷	آبان
۱.۷۷۰۹۶	-۱.۱۵۶۷۲۷	۱.۴۴۹۷۱۷	-۰.۸۳۳۸۹	۱.۹۵۸۴۴	۰.۰۷۶۲۵	۱.۲۴۳۸۷	۰.۱۸۱۱۱۸	آذر
۱.۸۰۶۱۴۹	-۱.۶۲۸۴۵۱	۱.۸۱۶۵۹	-۰.۷۸۲۴۵	۱.۴۱۳۰۰۳	۱.۰۷۴۲۲	۱.۵۹۴۸۱	۰.۴۵۱۰۵۶	دی
۱.۷۴۸۱۳	-۰.۷۸۴۵۱	۱.۴۸۸۷۷۱	۰.۰۹۸۶۲۵	۱.۷۹۹۳۵۸	۰.۲۸۰۲۹۶	۱.۷۱۵۶	۰.۴۷۱۸۶۶	بهمن
۱.۱۹۵۰۸	۰.۵۶۵۲۹	۱.۳۷۰۸۳۹	۰.۱۹۵۷۳۷	۱.۴۳۶۱۴	۰.۷۸۰۱۱	۱.۲۸۶۷۸	-۰.۳۳۸۲۵	اسفند

1. Skewness

2. Kurtosis

در این رابطه ΔX_i اختلاف بین مقادیر در سطح هر سلول، X_i مقدار داده نقطه‌ای پیش‌بینی شده توسط ماهواره سنتینل 5P پس از حذف بایاس و X_j مقدار داده نقطه‌ای مستخرج از نقشه مدل سازی شده توسط مدل درون‌یابی کریجینگ از داده‌های ماهواره‌ای مختصات مکانی ایستگاه‌های زمینی در سطح هر سلول برای کل مناطق ۲۲ گانه شهر تهران است. واحد ΔX_i در این قسمت مولکول بر سانتی‌متر مربع برای آلاینده NO₂ و DU برای آلاینده O₃ است.

در مرحله بعد این‌بار با استفاده از داده‌های ایستگاهی مستخرج از ایستگاه‌های کنترل کیفیت هوای تهران و همچنین مدل درون‌یابی کریجینگ، نقشه‌ای با توان تفکیک مکانی برابر با نقشه مستخرج از ماهواره سنتینل 5P (۱۱۱۳.۲ متر)، به صورت ماهانه مدل سازی می‌شود. اکنون باید خطای درون‌یابی به دست آمده از مرحله قبل به نقشه جدید اعمال شود. برای این کار ابتدا خطای به دست آمده از مرحله قبل را در سطح هر سلول نرمال سازی کرده (مطابق با رابطه ۹) و سپس اقدام به تبدیل واحد مطابق با رابطه‌های (۴) و (۵) از مولکول بر سانتی‌متر مربع به PPb برای آلاینده NO₂ و از DU به PPb برای آلاینده O₃ می‌شود.

$$X_{\text{finally}} = Y_j - (\Delta X_i \times (\max Y_j - \min Y_j)) / (\max X_j - \min X_j) \quad (9)$$

در فرمول بالا X_{finally} داده نهایی با واحد ppb در سطح هر سلول، Y_j مقدار داده نقطه‌ای مستخرج از نقشه مدل سازی شده توسط مدل درون‌یابی کریجینگ از داده‌های ایستگاهی مستخرج از ایستگاه‌های کنترل کیفیت هوای تهران با واحد ppb است.

در این پژوهش با استفاده از روش بالا، نقشه توزیع هریک از آلاینده‌های NO₂ و O₃ شهر تهران به صورت ماهانه برای کل سال ۱۴۰۰ مدل سازی شده است که در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده است.

در این پژوهش با توجه به توزیع نرمال داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی مطابق با جدول ۵، برای تهیه نقشه توزیع آلاینده‌ها از روش درون‌یابی کریجینگ خطی استفاده شده است. همان‌طور که در قسمت قبل توضیح داده شد، به منظور انجام فرایند مدل سازی، ابتدا نقشه ماهانه توزیع آلاینده‌های NO₂ و O₃ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده سنتینل 5P با توان تفکیک مکانی تقریباً یک کیلومتری (۱۱۱۳.۲ متری) استخراج شد و سپس مرکز هر سلول نماینده کل سلول در نظر گرفته شده و عملیات حذف بایاس برای کل مراکز سلول‌ها در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران انجام شده است. همچنین مقادیر کمی آلاینده‌های NO₂ و O₃ از داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی مختصات مکانی ایستگاه‌های زمینی نیز در دسترس می‌باشد. بنابراین با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای توزیع غلظت آلاینده‌های NO₂ و O₃ مختصات مکانی ایستگاه‌های زمینی و همچنین مدل درون‌یابی کریجینگ، نقشه‌ای با توان تفکیک مکانی برابر با نقشه مستخرج از ماهواره سنتینل 5P (۱۱۱۳.۲ متر)، به صورت ماهانه مدل سازی می‌شود. سپس مقادیر هر سلول از نقشه مدل سازی شده نیز با استفاده از مراکز سلولی که در مراحل قبل به عنوان نماینده هر سلول در نظر گرفته شدند، استخراج می‌شود. هدف مقایسه نقشه مدل سازی شده با استفاده از مدل درون‌یابی کریجینگ داده‌های ماهواره‌ای توزیع غلظت آلاینده‌های NO₂ و O₃ مختصات مکانی ایستگاه‌های زمینی و نقشه تولید شده از مرحله ۳-۴ که هر دو با توان تفکیک مکانی مشابه‌اند، به منظور برآورد خطای مدل درون‌یابی کریجینگ است. بنابراین با توجه به مقادیر نقطه‌ای هر سلول از دو نقشه مدل سازی شده، مقدار خطای روش درون‌یابی کریجینگ در سطح هر سلول مطابق با رابطه (۸) برآورد شده است.

$$\Delta X_i = X_i - X_j \quad (8)$$

۳-۶- صحت سنجی نقشه توزیع آلاینده های NO₂ و O₃ با استفاده از تلفیق داده های ایستگاهی و ماهواره ای

در پژوهش حاضر برای صحت سنجی داده های خروجی حاصل از مدل سازی توزیع آلاینده ها، ۷۰ درصد ایستگاه ها به عنوان داده های آموزش (Train) و ۳۰ درصد ایستگاه ها را به عنوان داده های آزمون (Test) انتخاب شدند. این نقاط به صورت تصادفی و برای هر ماه از سال ۱۴۰۰ انتخاب شدند. سپس همان طور که در مراحل قبل به صورت کامل توضیح داده شد، تمامی مراحل مدل سازی بر روی داده های آموزش انجام گرفت. پس از مدل سازی نقشه نهایی توزیع آلاینده ها، از داده های آزمون برای صحت سنجی مدل سازی انجام شده استفاده شد. این کار با استفاده از محاسبه

میانگین خطای بین داده های پیش بینی شده توسط مدل و داده های ایستگاهی مستخرج از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (با واحد ppb) و همچنین محاسبه شاخص RMSE (مطابق با رابطه ۱۰) محاسبه شده است.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

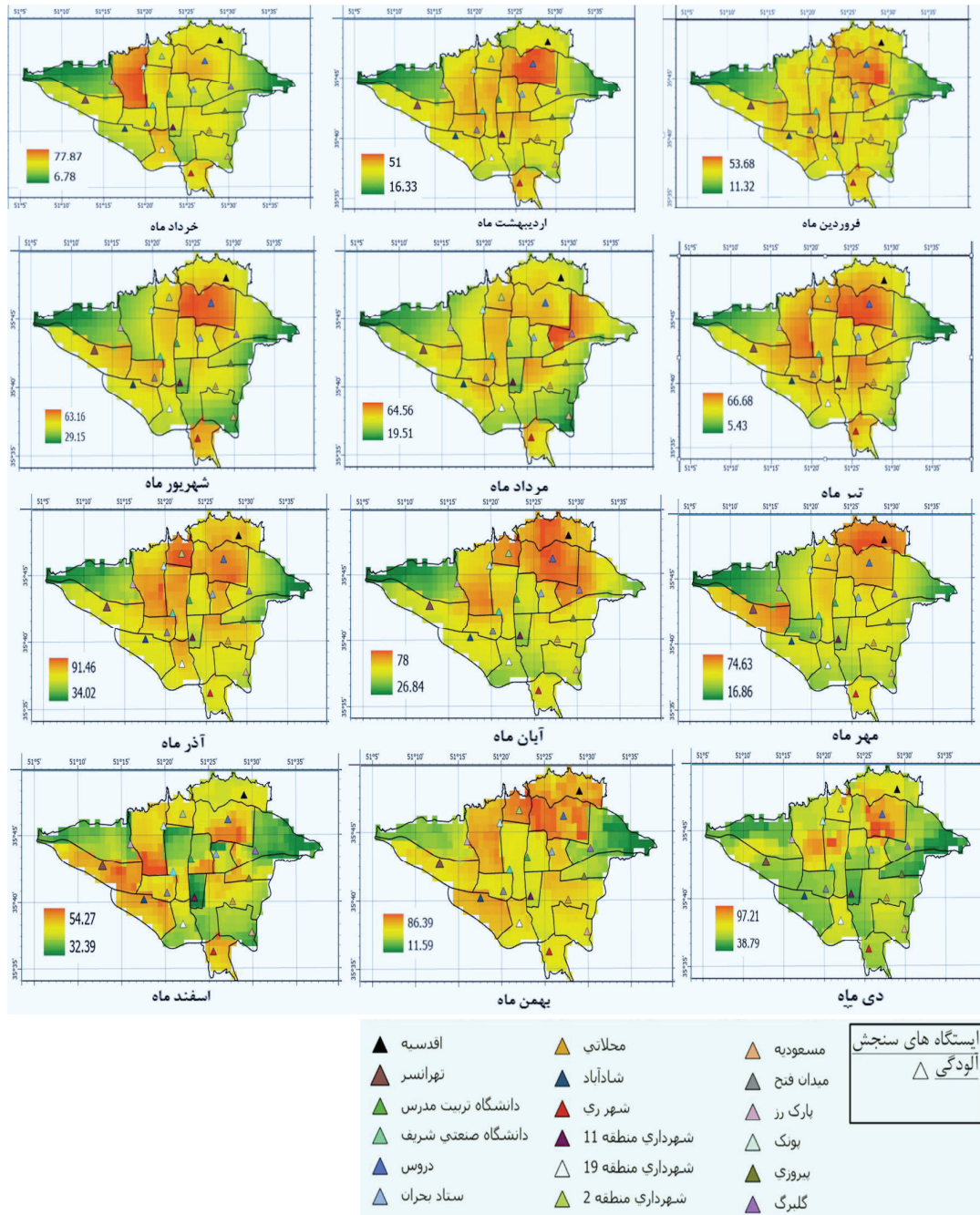
همان طور که در قسمت های قبل توضیح داده شد، O_i: مقدار داده مشاهده شده (واقعی) و P_i: مقدار پیش بینی شده (توسط مدل) و n تعداد مشاهدات است. همچنین صحت این مدل با صحت مقادیر توزیع غلظت آلاینده های اندازه گیری شده توسط ماهواره سنتینل 5P مقایسه شده است. نتایج صحت سنجی در طول کل سال ۱۴۰۰ در جداول ۶ و ۷ نشان داده شده است.

جدول ۶. میانگین بایاس بین داده های پیش بینی شده مدل و داده های ایستگاهی مستخرج از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران در طول سال ۱۴۰۰

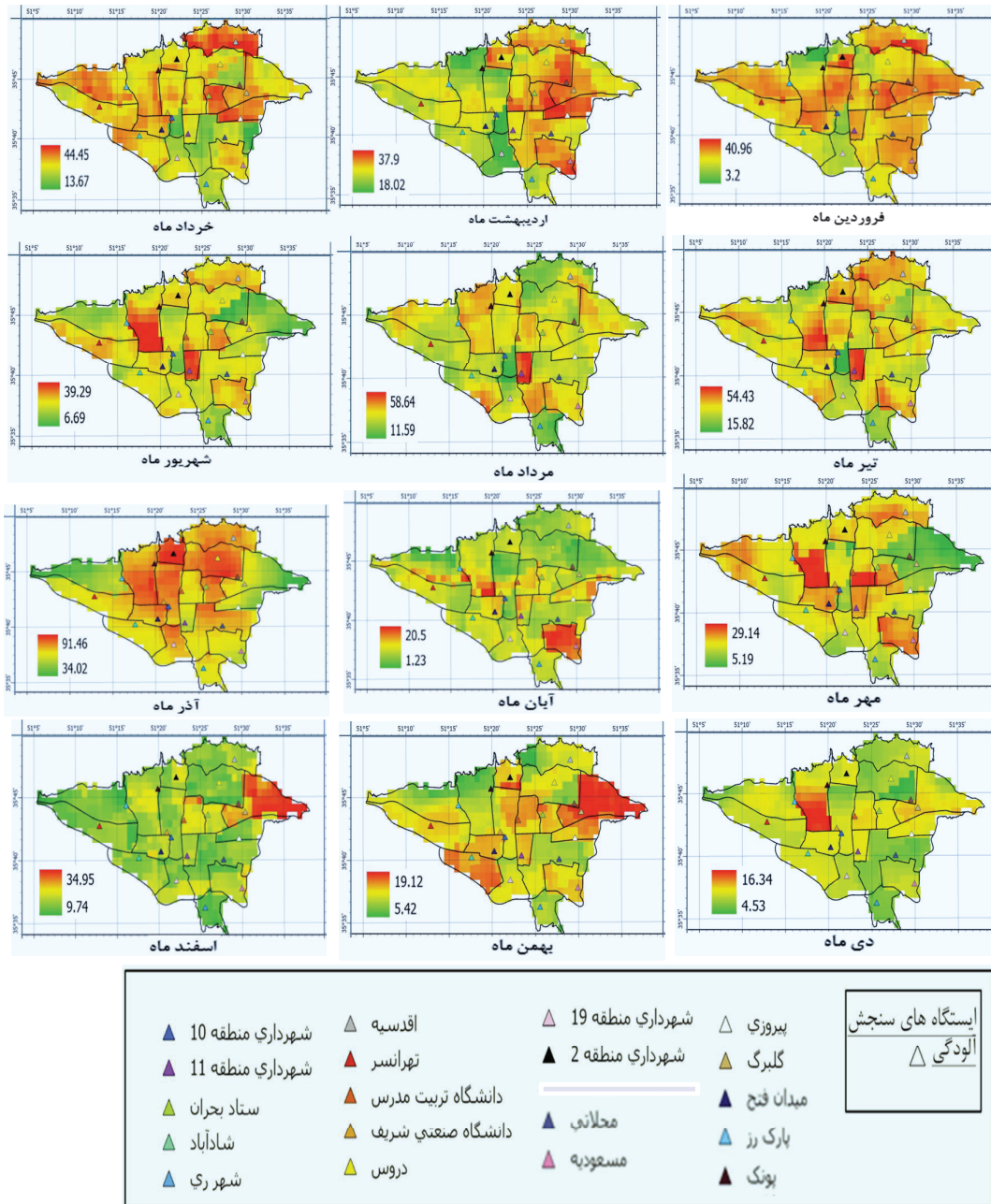
میانگین ماهانه	آلاینده NO ₂	آلاینده O ₃
ماه	میانگین بایاس داده پیش بینی شده مدل و داده های ایستگاهی (%)	میانگین بایاس داده پیش بینی شده مدل و داده های ایستگاهی (%)
فروردین	۰.۰۱۰۵۹	۱.۷۴۰۶۴
اردیبهشت	۰.۰۰۰۳۲	۰.۸۴۴۴۵
خرداد	۰.۰۱۷۹۴	۵.۵۶۶۶۷
تیر	۰.۰۲۰۹۹	۲.۱۱۲۸۱
مرداد	۰.۰۲۰۸۵	۲.۴۹۸۷۶
شهریور	۰.۰۱۵۸۵	۲.۹۰۷۷۷
مهر	۰.۰۱۵۳۵	۲.۸۱۸۹۷
آبان	۰.۶۶۳۳۳	۱.۰۷۳۰۹
آذر	۰.۰۰۲۱۵	۷.۴۹۳۸۳
دی	۰.۴۳۰۲۲	۱.۷۵۲۵۷
بهمن	۱۲.۳۷۸۳۷	۰.۰۰۰۱۹
اسفند	۷.۲۶۲۷۴	۱.۶۰۲۴۲
میانگین سالانه	۱.۷۳۶۵۶	۲.۵۳۴۳۵

جدول ۷. مقایسه صحت سنجی داده های سنتینل 5P و مدل نسبت به داده های ایستگاهی مستخرج از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران در طول سال ۱۴۰۰

میانگین سالانه (۱۴۰۰)	آلاینده NO ₂		آلاینده O ₃	
	صحت سنجی داده های ماهواره سنتینل 5P	صحت سنجی داده های پیش بینی شده مدل	صحت سنجی داده های ماهواره سنتینل 5P	صحت سنجی داده های پیش بینی شده مدل
خطای جذر میانگین مربعات (ppb)	۱۰.۰۸۳	۲.۷۹۰	۶.۲۳۸	۰.۸۵۹۸۲
میانگین بایاس (ppb)	۸.۱۷۳	۰.۹۲۰	۴.۵۱۴	۵۵۳۶۲
میانگین بایاس (%)	۱۶.۸۲۲۴	۱.۷۳۶۵	۲۱.۸۶۹۷	۲.۵۳۴۳۵



شکل ۵. نقشه توزیع غلظت آلاینده NO₂ ماهانه مناطق ۲۲گانه شهر تهران در طول سال ۱۴۰۰



شکل ۶. نقشه توزیع غلظت آلاینده O₃ ماهانه مناطق ۲۲گانه شهر تهران در طول سال ۱۴۰۰

۴- بحث و نتیجه‌گیری

تأثیر آلودگی هوای شهری بر محیط زیست و سلامت انسان نگرانی‌های فزاینده‌ای برای پژوهشگران، سیاست‌گذاران و شهروندان ایجاد کرده است. برای کاهش تأثیرات منفی آلودگی هوا بر سلامت، اندازه‌گیری به‌موقع در وضوح زمانی و مکانی بالا اهمیت فراوانی دارد. به‌طور کلی آلودگی هوا با استفاده از ابزارهای اختصاصی در ایستگاه‌های پایش ثابت، که به‌صورت پراکنده در مناطق شهری قرار می‌گیرند، اندازه‌گیری می‌شود. با این حال، پایش آلودگی هوا با استفاده از این ایستگاه‌های ثابت به‌رغم دقت بالا وضوح مکانی پایینی دارد که ممکن است به ارزیابی نادرست از کل منطقه مطالعاتی منجر شود (Basu et al., 2004). روش مکمل تلفیق اطلاعات ایستگاه‌های سنجش آلودگی و روش‌های درون‌یابی است. قدرت تفکیک مکانی این روش نیز به‌رغم نمایش تغییرات زمانی آلودگی هوا، به‌دلیل محدود بودن تعداد ایستگاه‌های سنجش آلودگی، پایین است (Basu et al., 2004). روش دیگر برای تخمین آلودگی هوا استفاده از سنجش‌ازدور و داده‌های ماهواره‌ای است که این اندازه‌گیری‌ها به‌رغم در دسترس بودن و توان تفکیک مکانی بالا نمی‌توانند دقتی همچون ایستگاه‌های سنجش آلودگی ارائه کنند (Veefkind et al., 2012). در این پژوهش با استفاده از تلفیق داده‌های ماهواره‌ای سنتینل 5P و داده‌های ایستگاهی مستخرج از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران و همچنین با استفاده از مدل درون‌یابی کریجینگ توزیع غلظت آلاینده‌های NO_2 و O_3 با توان تفکیک مکانی تقریباً یک کیلومتری (برابر با توان تفکیک مکانی نقشه‌های مستخرج از ماهواره‌ی سنتینل 5P) و دقت نزدیک به دقت داده‌های ایستگاهی سنجش آلودگی هوا را مدل‌سازی کرده‌ایم. در قسمت زیر نتایج این پژوهش تحلیل شده است.

۴-۱- تحلیل همبستگی بین داده‌های ماهواره‌ای و

ایستگاه‌های سنجش زمینی قبل از انجام مدل‌سازی همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، اندازه‌گیری‌های غلظت ماهواره‌ای مستخرج از سنتینل 5P و داده‌های ایستگاه‌های سنجش آلودگی آلاینده NO_2 و O_3 در مجموع در طول سال ۱۴۰۰ در ایستگاه‌های دانشگاه صنعتی شریف، دانشگاه تربیت مدرس، دروس، ستاد بحران، شهرداری منطقه ۲ و مسعودیه دارای بالاترین همبستگی و ایستگاه‌های پارک رز، تهرانسر، پونک و شهر ری دارای همبستگی کمتر اما قابل قبولی بوده‌اند. همچنین میانگین کل ایستگاه‌ها، ضریب همبستگی ۰.۶۸۴۴ برای آلاینده NO_2 و ۰.۶۶۸۹ برای آلاینده O_3 را نشان می‌دهد. این تحلیل همبستگی با مطالعه قنبری و عیسی‌زاده با موضوع مدل‌سازی و مقایسه توزیع غلظت آلاینده‌های ازن و دی‌اکسید نیتروژن مستخرج از داده‌های ایستگاهی سنجش آلودگی و پروداکت سنتینل 5P که به‌صورت سالانه (۲۰۱۸/۱۱/۰۱ تا ۲۰۲۰/۰۳/۲۸) در مناطق ۲۲گانه شهر تهران انجام شده است، تا حد زیادی مطابقت دارد (Ghanbari and Isazadeh, 2021).

۴-۲- تحلیل بایاس بین داده‌های ماهواره‌ای سنتینل

5P و ایستگاه‌های سنجش آلودگی

همان‌طور که شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهند، بایاس بین داده‌های ماهواره‌ای در فصول سرد سال و به‌خصوص فصل زمستان به مقدار بیشینه خود رسیده‌اند. این موضوع می‌تواند به‌علت پدیدهٔ اینورژن یا وارونگی دما در این فصل‌ها باشد (Alavi et al., 2020). با حاکم شدن وارونگی هوا در سطح زمین، به‌ویژه در مناطق شهری بزرگ و صنعتی، آلودگی‌های تولیدشده از منابع آلاینده مانند خودروها، کارخانه‌ها و لوازم گرمای منازل به‌دلیل سنگین بودن هوای سرد و عدم تمایل این هوا به صعود و انبساط و ترکیب آن با هوای فوقانی در سطح زمین متراکم و سبب افزایش غلظت آلاینده‌ها در درون هوای استنشاقی انسان می‌شود و در نتیجه، مشکلات تنفسی برای شهروندان ایجاد می‌کند (Nameni et al., 2020).

شهر تهران تا حد زیادی مطابقت دارد. همچنین شرعی پور و بیدختی نیز در مطالعه‌ای با موضوع بررسی وضعیت NO₂ تروپوسفری شهر تهران طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲ پراکنش آلاینده NO₂ و تجمع این آلاینده را با استفاده از ماهواره OMI با توان تفکیک مکانی بسیار پایین‌تر نسبت به مدل‌سازی این پژوهش تأیید کرده‌اند (Akbaribidokht and Sharipour, 2013).

منابع

- Ahmadi S., M. Roshani, "Tehran air and noise quality report in 2021," *Envi. Res.*, 2021.
- Alavi C., S. Kianejad, and S. A. Sabbagh, "Preparation of Air Pollution Mapping by Interpolating Kriging Method in GIS, Case Study: Tehran Metropolis," *J. Urban Ecol. Res.*, vol. 10, no. 20, pp. 171–184, 2020, doi: <https://doi.org/10.30473/grup.2020.7086>.
- Amani M. et al., "Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 13, pp. 5326–5350, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>.
- Bahari R.A., A. R. Abaspour, and P. Pahlavani, "Zoning of Particulate Matters (PM) Pollution Using Local Statistical Models in GIS (Case Study: Tehran Metropolises)," *ISSGE*, vol. 5, no. 3, pp. 165–174, Feb. 2016.
- Basu, R., T. J. Woodruff, J. D. Parker, L. Saulnier, and K. C. Schoendorf, "Comparing exposure metrics in the relationship between PM_{2.5} and birth weight in California," *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.*, vol. 14, no. 5, pp. 391–396, Sep. 2004, doi: <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500336>.
- Berman, J.D., P. N. Breyse, R. H. White, D. W. Waugh, and F. C. Curriero, "Evaluating methods for spatial mapping: Applications for estimating ozone concentrations across the contiguous United States," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 3, pp. 1–10, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2014.10.003>.

۳-۴- نتایج صحت‌سنجی نقشه توزیع آلاینده‌های NO₂ و O₃ با استفاده از تلفیق داده‌های ایستگاهی و ماهواره‌ای در این پژوهش از مدلی کاربردی برای توزیع غلظت آلاینده‌های NO₂ و O₃ با توان تفکیک مکانی تقریباً یک کیلومتری با استفاده از تلفیق داده‌های زمینی و ماهواره‌ای و همچنین مدل درون‌یابی کریجینگ در طول سال ۱۴۰۰ برای شهر تهران استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد که شاخص RMSE و درصد بایاس این مدل نسبت به داده‌های ایستگاهی سنجش آلودگی برای آلاینده NO₂ به ترتیب برابر با ۲.۷۹ ppb و ۱.۷۳ درصد و برای آلاینده O₃ برابر با ۰.۸۶ ppb و ۲.۵۳ درصد است. این در حالی است که در حالت مشابه شاخص RMSE و درصد بایاس نقشه خروجی ماهواره سنتینل 5P نسبت به داده‌های ایستگاهی سنجش آلودگی برای آلاینده NO₂ برابر با ۱۰.۰۸۳ و ۱.۷۳ درصد و برای آلاینده O₃ برابر با ۶.۲۳۸ و ۲.۵۳ درصد است. بنابراین این مدل عملکرد بسیار مطلوبی در مدل‌سازی غلظت توزیع غلظت آلاینده‌های NO₂ و O₃ در طول سال ۱۴۰۰ با دقت و توان تفکیک مکانی تقریباً یک کیلومتری داشته است.

۴-۴- شناسایی مناطق آلوده شهر تهران

همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، بیشترین آلودگی ناشی از غلظت آلاینده‌های NO₂ و O₃ مربوط به مناطق مرکزی و شمال شرقی شهر تهران (ایستگاه دروس و اقدسیه) بوده است و مناطق غربی (ایستگاه پارک رز) کمترین آلودگی را در طول سال تجربه کرده‌اند. نقشه توزیع آلاینده‌ها در این پژوهش در توان تفکیک مکانی تقریبی یک کیلومتری مدل‌سازی شده است که می‌تواند در تشخیص مناطق آلوده و اتخاذ تصمیمات مهم مدیریتی در جهت کاهش آلودگی هوای شهر تهران بسیار مفید واقع شود. همچنین این نتایج با مطالعه صفر راد و یوسفی در ارتباط با تجمع بیشتر آلودگی‌ها در نیمه مرکزی، شرق و شمال شرقی

- Bilgili, F., E. Koçak, and Ü. Bulut, "The dynamic impact of renewable energy consumption on CO2 emissions: A revisited Environmental Kuznets Curve approach," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 838–845, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.080>.
- Borsdorff T. et al., "Carbon monoxide air pollution on sub-city scales and along arterial roads detected by the Tropospheric Monitoring Instrument," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 19, no. 6, pp. 3579–3588, 2019, doi: <https://doi.org/10.5194/acp-19-3579-2019>.
- Coburn T.C., "Statistical Methods for Spatial Data Analysis," *Math. Geol.*, vol. 38, no. 4, pp. 511–513, 2006, doi: <https://doi.org/10.1007/s11004-006-9035-y>.
- De Kok, T. M. C. M., H. A. L. Drieece, J. G. F. Hogervorst, and J. J. Briedé, "Toxicological assessment of ambient and traffic-related particulate matter: A review of recent studies," *Mutat. Res. Mutat. Res.*, vol. 613, no. 2, pp. 103–122, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2006.07.001>.
- Eskes H., J. V. Geffen, F. Boersma, K. Eichmann, A. Apituley, M. Pedernana, M. Sneep, J. P. Veefkind, and D. Loyola, "Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Nitrogen dioxide," Royal Netherlands Meteorological Institute, no. 4.1.0, p. 164, 2022.
- Fallahzadeh, S., M. R. Zarei, N. Karami, H. Foruzan, M. Alamdari, and I. Parseh, "Quantification of Health Effects of Ambient PM10 in Gachsaran City, Iran, in Year 2015, Using the AirQ Software," *Heal. Syst. Res.*, vol. 14, no. 1, 2018, doi: <https://doi.org/10.22122/jhsr.v14i1.3127>.
- Ghanbari. A., V. Isazadeh, "Modeling the concentration of ozone and nitrogen oxides in GIS environment and comparing their concentrations with Sentinel-5 product in Google Earth Engine - Study area: Tehran," *Sci. Res. Q. Geogr. Data (SEPEHR)*, vol. 30, no. 118, pp. 247-261, 2021, doi: <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.246154>.
- Ghannadi M.A., M. Shahri, and A.R. Moradi, "Air pollution monitoring using Sentinel-5 (Case study: Big industrial cities of Iran)," *Environ. Sci.*, vol. 20, no. 2, 2022, doi: <https://doi.org/10.52547/envs.2022.1026>.
- Heger M.P., and M. Sarraf, "Air Pollution in Tehran: Health Costs, Sources, and Policies," 2018.
- Kaffash Charandabi, N., A. A. Alesheikh, and M. Karimi, "Using Autranking Methods for Optimum Setting of Air Pollution Monitoring Stations," *J. Environ. Stud.*, vol. 38, no. 2, pp. 69–82, 2012, doi: <https://doi.org/10.22059/jes.2012.29101>.
- Lockhart, D. L., M. Vaganay, S. MacIntyre, and P. Joseph, "A meta-analysis of the impact of traffic-related air pollution on health and the factors affecting exposure," *Artif. Intell. Rev.*, vol. 198, pp. 193–204, 2015, doi: <https://doi.org/10.2495/AIR150161>.
- Mihăiță, A. S., L. Dupont, O. Chery, M. Camargo, and C. Cai, "Evaluating air quality by combining stationary, smart mobile pollution monitoring and data-driven modelling," *J. Clean. Prod.*, vol. 221, pp. 398–418, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.179>.
- Miri, M., M. T. Ghaneian, A. Gholizadeh, M. Y. Avval, and A. Nikoonahad, "Assessment of Spatial Analysis Methods in Mapping of Air Pollution in Mashhad," *J. Environ. Heal. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 143–154, 2016, doi: <https://doi.org/10.18869/acadpub.jehe.3.2.143>.
- Najafpoor, A.A., A. Jonidi, and Sina Dousti, "Trend analysis of Air Quality Index criteria pollutants (CO, NO2, SO2, PM10 and O3) concentration changes in Tehran metropolis and its relationship with meteorological data, 2001-2009," *J. Heal. F.*, vol. 3, 2015.
- Nameni A., S. M. Tayebi Sani, A. Fahimi Nejad, and B. Morsal, "Investigating the Distribution and Emission of Air Pollutants in Relation to the Location of Urban Sports Complexes Using GIS," *Strateg. Stud. YOUTH Sport.*, vol. 18, no. 46 #T001420, pp. 137–158, 2020.

- Omrani H., and Bilel Omrani and Benoit Parmentier and Marco Helbich, "**Spatio-temporal data on the air pollutant nitrogen dioxide derived from Sentinel satellite for France**," Data Br., 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.105089>.
- Peng X., K. Wang, and Q. Li, "**A new power mapping method based on ordinary kriging and determination of optimal detector location strategy**," Ann. Nucl. Energy, vol. 68, pp. 118–123, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.01.002>.
- Safari. H., "**Comparison of two interpolation methods IDW and Kriging**" Shahrnegar, vol. 7, no. 40, 2007.
- Sharipour Z., A. AkbariBidokhti, "**Investigating the situation of NO₂ in the troposphere of Iran during the years 2004 to 2012**," Environ. Sci., vol. 40, no. 1, pp. 65-78, 2013.
- Sharipour Z., A. AkbariBidokhti, "**Investigation of spatial and temporal distributions of air pollutants over Tehran in cold months of 2011-2013**," J. Environ. Sci. Tech., vol. 16, no. 1, pp. 146-166, 2014.
- Sohrabinia M., and A. M. Khorshiddoust, "**Application of satellite data and GIS in studying air pollutants in Tehran**," Habitat Int., vol. 31, no. 2, pp. 268–275, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2007.02.003>.
- Soleymani F., A. Malekhoseini, "**The Zoning of Air Quality in 22 Districts of Tehran Using GIS and Geostatistical Methods**," Environmental Based Territorial Planning, vol. 14, no. 52, pp. 19-44, 2021.
- Veefkind J.P. et al., "**TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications**," Remote Sens. Environ., vol. 120, pp. 70–83, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>.
- You W., Z. Zang, X. Pan, L. Zhang, and D. Chen, "**Estimating PM_{2.5} in Xi'an, China using aerosol optical depth: A comparison between the MODIS and MISR retrieval models**," Sci. Total Environ., vol. 505, pp. 1156–1165, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.024>.
- Zhang K. and S. Batterman, "**Air pollution and health risks due to vehicle traffic**," Sci. Total Environ., vol. 450–451, pp. 307–316, Apr. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.074>.