



## پایش پراکنش مکانی و زمانی گاز دی‌اکسید گوگرد جو با به کارگیری سری زمانی محصول ماهواره سنتینل - 5P (مطالعه موردی: استان تهران)

نادیا عباس‌زاده طهرانی<sup>۱</sup>، کیمیا خمسه<sup>۲</sup>، سیده ندا رسولی<sup>۳</sup>، میلاد جانعلی‌پور<sup>۴</sup> 

۱. استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم و تحقیقات و فناوری، تهران، ایران.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه محیط زیست شهری، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه محیط زیست شهری، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۴. استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم و تحقیقات و فناوری، تهران، ایران. نویسنده مسئول: milad\_janalipour@ari.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌ها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷	دی‌اکسید گوگرد یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های هوای شهرهای ایران به‌ویژه شهر تهران است که سلامت شهروندان را تهدید می‌کند. میزان آسیب‌رسانی این آلاینده به میزان پراکنش آن در جو بستگی دارد. هدف این پژوهش، تحلیل مکانی و زمانی میزان گاز دی‌اکسید گوگرد در استان تهران در سال ۲۰۲۳ با استفاده از اطلاعات اخذشده از سری زمانی محصول سنجش‌ازدور و تحلیل آن در نرم‌افزارهای مرتبط است. پس از اخذ محصول دی‌اکسید گوگرد از ماهواره سنتینل-5P، تحلیل داده‌های مربوطه در محیط نرم‌افزار ENVI انجام شد. برای تعیین خودهمبستگی مکانی در داده‌ها و خوشه‌بندی داده‌ها، از تحلیل آماره موران I و شاخص موران محلی و برای تعیین لکه‌های داغ و سرد این آلاینده از آماره گتیس-آرد-جی در استان تهران استفاده شد و نهایتاً با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی تأثیر کاربری بر میزان غلظت آلاینده‌ها به دست آمد. نتایج حاصل از پهنه‌بندی و خودهمبستگی مکانی محلی و جهانی به همراه تحلیل لکه‌های داغ غلظت آلاینده دی‌اکسید گوگرد نشان داد که غلظت این آلاینده در مناطق جنوب و جنوب شرق استان در فصول سرد سال روند افزایشی دارد. استفاده هم‌زمان از چند تحلیل مکانی نشان داد که استان تهران به دو بخش شرقی تقریباً غیر آلوده و غرب و جنوب آلوده تقسیم می‌شود و در بخش‌های مرکزی آلودگی کمتری دیده می‌شود. همچنین در بین انواع کاربری اراضی، بیشترین میزان غلظت آلاینده دی‌اکسید گوگرد و بیشینه پراکنش نقاط داغ متعلق به کاربری صنعتی و کارخانه‌هاست.
واژگان کلیدی: استان تهران دی‌اکسید گوگرد سنتینل سنجش‌ازدور شاخص موران	

استناد: عباس‌زاده طهرانی، نادیا، خمسه، کیمیا، رسولی، سیده ندا، جانعلی‌پور، میلاد (۱۴۰۴). پایش پراکنش مکانی و زمانی گاز دی‌اکسید گوگرد جو با به کارگیری سری زمانی محصول ماهواره سنتینل - 5P (مطالعه موردی: استان تهران). *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲)، ۹۸۸۵. <https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045629.1061>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).




# Innovative Approaches in Human – Environment Studies



Vol. 2, Issue 2  
Autumn & Winter 2026  
Online ISSN: 2821-1812

## Monitoring the distribution of atmosphere pollutants by using time series of the sulfur dioxide product of Sentinel-5P satellite (Case Study: Tehran province)

Nadia Abbaszadeh Tehrani<sup>1</sup>, Kimai Khamseh<sup>2</sup>, Seyedeh Neda Rasouli<sup>3</sup>, Milad Janalipour<sup>4</sup> 

1. Assistant Professor, Aerospace Research Institute (ARI), Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran.
2. MSc Student, Department of Urban Environment, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran
3. MSc Student, Department of Urban Environment, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran
4. Assistant Professor, Aerospace Research Institute (ARI), Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran.  
Corresponding Author: milad\_janalipour@ari.ac.ir

### Article Info

#### History

Received: September 02, 2025

Accepted: November 28, 2025

#### Keywords

Moran Index  
Remote Sensing  
Sulfur Dioxide  
Sentinel  
Tehran Province

### Abstract

Sulfur dioxide is one of the most important pollutants in Iranian cities, especially in Tehran, which threatens the health of its citizens. The degree of damage of this pollutant depends on its temporal-spatial distribution in the atmosphere. The purpose of this research is to analyze the spatial and temporal amount of sulfur dioxide gas in Tehran province in 2023 using the time series of remote sensing products. After obtaining the sulfur dioxide product from the Sentinel-5p satellite, the relevant data analysis was performed. The presence of spatial autocorrelation and data clustering by analyzing Moran's I statistic and local Moran's index, and to determine the hot and cold spots of this pollutant, Getis-Ord Gi statistic was used in Tehran province, and finally, using the Geographic Information System, the impact of land use on the concentration of pollutants was obtained. The results of zoning and local and global spatial autocorrelation along with hot spot analysis of sulfur dioxide pollutant concentration showed that the concentration of this pollutant in the south and southeast regions of the province is increasing in the cold seasons of the year. The simultaneous use of several spatial analyzes showed that Tehran province was divided into two parts, the east, which was almost unpolluted, and the west and south, which were polluted, and less pollution was seen in the central parts. Also, among the types of land use, the highest concentration of sulfur dioxide pollutant and the maximum distribution of hot spots belong to industrial use and factories.

**Citation:** Abbaszadeh Tehrani, N., Khamseh, K., Rasouli, N., & Janalipour, M. (2025). Monitoring the distribution of atmosphere pollutants by using time series of the sulfur dioxide product of Sentinel-5P satellite (Case Study: Tehran province). *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 85-98.  
<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045629.1061>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

**Publisher:** The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

## مقدمه

رشد سریع شهرهای بزرگ و افزایش فعالیت‌های شهری، موجب افزایش بی‌رویه آلودگی هوا در اکثر کشورهای جهان شده است. از آنجاکه آلودگی هوا تأثیر مستقیم بر سلامت انسان‌ها و موجودات دیگر دارد، شدت یافتن مشکلات مربوط به افزایش آلاینده‌ها در شهرها، توجه مدیران و محققان را به این معضل جلب کرده است (Alireza & Feyz, 2014). به‌طور کلی آلاینده‌های هوا را می‌توان بر اساس منشأ، ترکیب شیمیایی و حالت فیزیکی‌شان طبقه‌بندی کرد. آلاینده‌ها بسته به منشأ آن‌ها به دو گروه اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند (Pourmollaie, Mohammadi, Bazrafshan, Ismailnejad, & Lahijanian, 2021). آلاینده‌های اولیه مانند دی‌اکسید گوگرد ( $SO_2$ )، اکسیدهای نیتروژن ( $NO_2$ ) و هیدروکربن‌ها (HC) آن دسته از آلاینده‌هایی هستند که مستقیماً وارد اتمسفر شده و به همان شکل آزادشده نیز در اتمسفر یافت می‌شوند. آلاینده‌های ثانویه نظیر اوزون و پراکسی استیل نترات (PAN) آن دسته از آلاینده‌ها هستند که در اتمسفر توسط یک واکنش فتوشیمیایی در اثر هیدرولیز و یا اکسیداسیون تشکیل می‌شوند (Atai & Hashemi Nasab, 2011). در شهرهای بزرگ دی‌اکسید گوگرد یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا محسوب می‌شود. دی‌اکسید گوگرد، گازی است بی‌رنگ، غیرقابل انفجار، حلال در آب و خفه‌کننده که تقریباً دو برابر هوا وزن دارد و روی سطوح بسیاری از مواد جامد مایع و ذرات هوا واکنش نشان می‌دهد و به تری‌اکسید گوگرد و نهایتاً اسیدسولفوریک تبدیل می‌شود. همچنین تخمین زده می‌شود که دی‌اکسید گوگرد به‌طور متوسط بین ۲ تا ۴ روز در هوا باقی می‌ماند. ایالات متحده روسیه و چین، نیمی از کل دی‌اکسید گوگرد انسان‌ساخت را وارد جو نیمکره شمالی می‌کنند (Khan & Siddiqui, 2014). بیش از ۸۰ درصد دی‌اکسید گوگرد عمدتاً از مصرف سوخت‌های فسیلی به دست بشر وارد جو می‌شود. از جمله شایع‌ترین آثار دی‌اکسید گوگرد بر روی انسان‌ها، می‌توان به تنگ شدن راه‌های هوایی تنفس، اسپاسم برونش، سوزش چشم و مجاری تنفسی، کاهش کارایی تنفسی و تنگی نفس و کم شدن عمق تنفس، کاهش سیستم دفاعی ریه و درنهایت تشدید عوارض قلبی و تنفسی اشاره کرد (Goudarzi et al., 2015). یکی از ابزارهای اندازه‌گیری گوگرد دی‌اکسید جو، استفاده از محصولات سنجش از دور است. مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد.

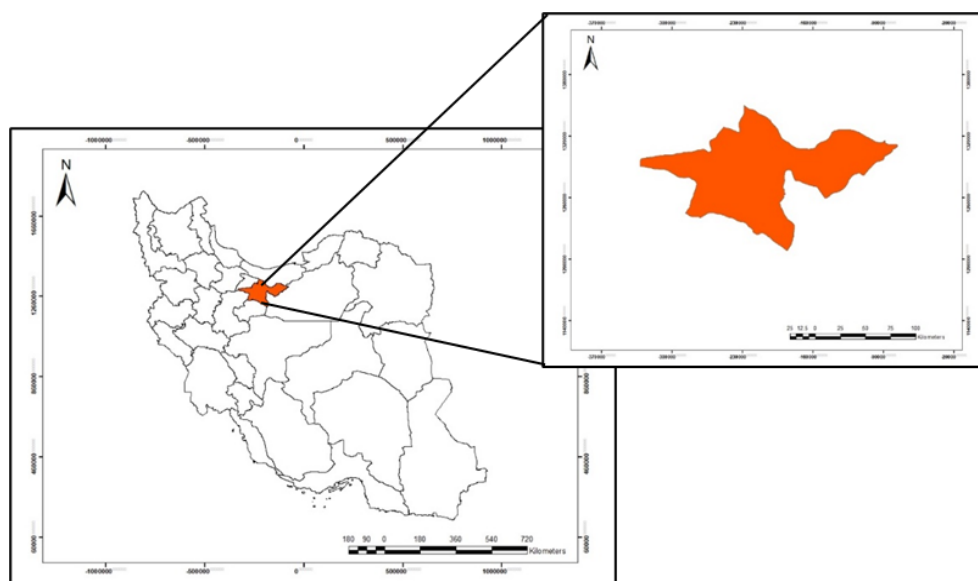
با توجه به مطالعات شمسی‌پور و همکاران در سال ۱۳۹۲، با واکاوی آماری حجم ترافیک در واحد زمان، میزان مصرف بنزین و حجم گاز خروجی CO محاسبه شده و به شبیه‌سازی الگوی پراکنش CO بخش‌هایی از تهران در محیط ENVI-met پرداختند. نتایج به‌دست آمده گویای تمرکز بیشینه آلودگی در بخش‌های با تراکم بالای بافت شهری مانند چهارراه ولیعصر و ضلع شرقی میدان آزادی به‌ویژه در ساعات‌های آغازین روز و کمترین مقادیر در معبرهای باز مانند ضلع غربی میدان آزادی، ضلع جنوبی سه‌راه تهران‌پارس، فضاهای سبز و نواحی دور از کانون انتشارات به‌خصوص ساعات میانی روز است (شمسی‌پور & امینی, ۲۰۱۳).

نورپور و همکاران در سال ۱۳۹۳ روش‌های مختلف درون‌یابی جهت تولید نقشه‌های کیفیت هوای حاصل از آلاینده‌های ذرات معلق دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن را ارزیابی کردند. سپس با استفاده از روش‌های درون‌یابی بهینه، نقشه‌های کیفیت هوای حاصل از این آلاینده‌ها برای روزهای سال ۱۳۹۱ تولید شد. نتایج حاصل نشان داد که برای درون‌یابی داده آلاینده‌های دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن، روش کوکریجینگ همراه با سه پارامتر دما، جهت باد و سرعت باد، مناسب‌ترین روش است. درحالی‌که برای آلاینده‌های ذرات معلق  $PM_{2.5}$  و  $PM_{10}$  روش Spline نتایج بهتری ارائه می‌دهد (Alireza & Feyz, 2014). محمدی و همکاران ۱۳۹۷ با استفاده از مدل خرد آب و هوایی ENVI-met، تأثیر پارامترهای جوی در پراکنش آلاینده  $PM_{2.5}$  در محدوده‌هایی از خیابان ولیعصر موردبررسی قرار دادند نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در پراکنش آلاینده‌های منتشرشده در خیابان ولیعصر بین تجمع و پراکنش آلاینده‌ها با سرعت و جهت باد رابطه محسوسی وجود دارد (محمدی & یاسیان, ۲۰۱۸). نادیان و همکاران ۱۳۹۷ به‌منظور پهنه‌بندی غلظت PM از درون‌یابی وزن دهی معکوس فاصله استفاده کردند. وجود خودهمبستگی مکانی در داده‌ها توسط شاخص موران

بررسی شد و خوشه‌بندی داده‌ها توسط شاخص‌های موران جهانی و محلی صورت پذیرفت و نهایتاً جهت تعیین لکه‌های داغ این آلاینده در شهر تهران از شاخص Getis-Ord-Gi استفاده شد. یافته‌ها نتایج حاصل از پهنه‌بندی و خودهمبستگی مکانی محلی و جهانی به همراه تحلیل لکه‌های داغ غلظت آلاینده‌ی PM نشان داد که غلظت این آلاینده از سمت شمال به جنوب تهران روند افزایشی دارد (Nadian, Mirzaei, & Soltani Mohammadi, 2018). Yanti و همکاران در سال ۲۰۲۴ با استفاده از محصولات سنتینل 5-p به بررسی تغییرات آلاینده SO<sub>2</sub> در یکی از شهرهای کشور اندونزی پرداختند. نتایج بدست آمده نشان دهنده کاهش حدود ۴۰ درصدی این آلاینده در بازه مورد مطالعه است (Yanti et al., 2024). Shikwambana و همکاران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از تحلیل سری زمانی من-کندال و محصولات سنتینل 5-p به بررسی پراکنش گوگرد دی اکسید و سولفور دی اکسید در آفریقای جنوبی پرداختند. بر اساس نتایج بدست آمده بیشترین پراکنش این آلاینده‌ها در فصل زمستان مشاهده می‌شود (Shikwambana, Mhangara, & Mbatha, 2020). طی سال‌های گذشته از محصولات سنجش‌ازدور برای پایش وضعیت آلودگی هوای شهرها مکرر استفاده شده است. تهرانی و همکاران، جهت پایش سلامت اکوسیستم شهر سندج از محصول گوگرد دی اکسید سنتینل 5-p استفاده کردند (N Abbaszadeh Tehrani, Janalipour, & Hosseini, 2024). همچنین، تهرانی و همکاران از محصول گوگرد دی اکسید سنتینل 5-p برای بررسی اثر فعالیت انسانی بر شهر تهران استفاده کردند (Nadia Abbaszadeh Tehrani, Farhanj, & Janalipour, 2023). در مطالعات دیگری، تأثیر محصول گوگرد دی اکسید در نرخ بیماری کووید-۱۹ و ریسک آن مورد بررسی قرار گرفته است (Tehrani, Mollalo, Farhanj, Pahlevanzadeh, & Janalipour, 2021). در این مقاله، هدف بررسی تغییرات مکانی و زمانی آلاینده دی اکسید گوگرد در استان تهران و ماه‌های مختلف سال ۲۰۲۳ میلادی با محصولات سنجش‌ازدور سنتینل 5-p است.

### روش پژوهش

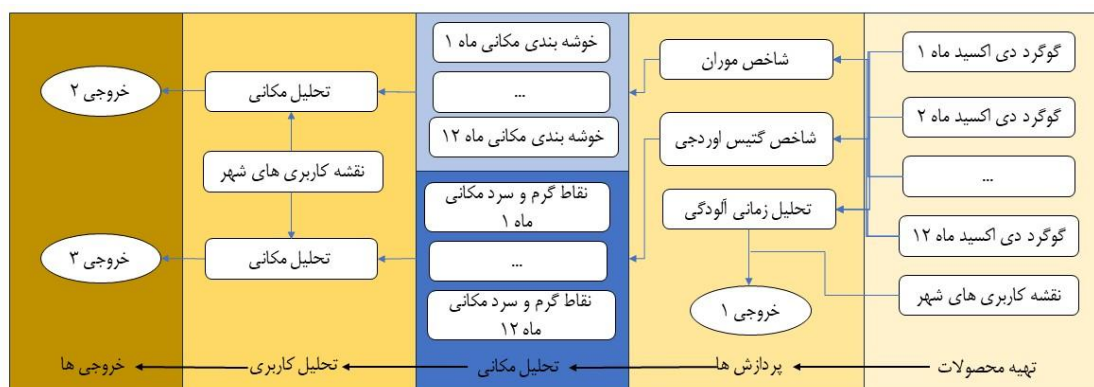
استان تهران به عنوان منطقه مورد مطالعه در این پژوهش انتخاب شده است. استان تهران به‌عنوان پایتخت کشور ایران، درصد زیادی از جمعیت آن کشور را در خود جای داده است. به دلیل وجود مراکز صنعتی و تجاری زیاد و همچنین جمعیت بالا در محدوده مکانی حدود ۱۳۰۰۰ کیلومتر مربع انواع آلاینده‌های هوا روزانه وارد جو می‌شوند که ضرورت پایش آن را برای اخذ تصمیمات مدیریتی اجتناب ناپذیر می‌کند. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی استان تهران را نشان می‌دهد.



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی استان تهران

sentinel\_5p یک ماهواره دیده‌بان زمین است که توسط آژانس فضایی اروپا توسعه یافته‌است تا فاصله بین پایان ماموریت ENVISAT و پرتاب سنتینل-۵ را پر کند. این ماهواره ابزار نظارت تروپوسفریک (TROPOMI) را حمل می‌کند که یک طیف‌سنجی تصویربرداری در حال مشاهده نادر است که برای نظارت بر آلودگی هوا با اندازه‌گیری طول موج‌های طیفی الکترومغناطیسی از ماورای بنفش (UV) تا مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) طراحی شده‌است (Reshi, Pichuka, & Tripathi, 2024; Veeffkind et al., 2012)).

هدف این پژوهش، بررسی تغییرات آلاینده دی‌اکسید گوگرد در استان تهران در بازه ۱۲ ماهه سال ۲۰۲۳ هست. لذا ابتدا میانگین ماهانه محصولات ماهواره sentinel\_5p در بازه یک‌ساله دریافت شد. بدین منظور محصولات از طریق سامانه گوگل ارث انجین اخذ شده و سپس، تحلیل تغییرات زمانی و مکانی با به‌کارگیری نرم‌افزار ENVI انجام شد. در محیط نرم‌افزار ENVI با استفاده از آماره‌های گتیس آرد جی<sup>۱</sup> و موران I<sup>۲</sup>، نقشه‌های پراکنش مکانی آلاینده تولید و تحلیل‌های لازم انجام شد. توسعه فناوری‌ها و مدل‌های آماری و تحلیلی جدید، باعث ارتقاء توانمندی پژوهشگران در واکاوی‌های علمی از جمله آلودگی هوا شده‌است؛ از این رو به‌کارگیری روش‌های تحلیلی توأمان آماری-فضایی کاربرد وسیعی پیدا کرده‌است. مهم‌ترین ویژگی تحلیل فضایی تأکید بر بعد فضایی داده‌هاست (بهلول، ۲۰۱۵). در شکل ۲ فلوچارت مراحل تحقیق نمایش داده شده‌است.



شکل ۲ فلوچارت مراحل تحقیق

در این تحقیق به منظور تحلیل فضایی لکه‌های داغ<sup>۳</sup> غلظت SO<sub>2</sub>، از تحلیل خودهمبستگی فضایی موران استفاده شد. خودهمبستگی فضایی روشی مبتنی بر آمار فضایی است که برای شناسایی شباهت پدیده‌های نزدیک به هم از طریق ارزیابی توزیع جغرافیایی مجموعه مشخصی از ویژگی‌ها به صورت خوشه‌ای، پراکنده یا تصادفی استفاده می‌کند. از خودهمبستگی فضایی به عنوان یک ابزار مهم تحلیلی در علوم محیط‌زیست برای شناسایی لکه‌های داغ آلاینده‌های مختلف استفاده می‌شود (Nadian et al., 2018).

جهت محاسبه خودهمبستگی فضایی موران ابتدا باید نمره استاندارد Z score و P value به دست آید تا در مرحله بعد به ارزیابی و معنادار بودن تحلیل خودهمبستگی فضایی موران پرداخته شود. دو نوع شاخص موران جهت مشخص نمودن همبستگی فضایی بین متغیرها وجود دارد که کارایی آن‌ها از یکدیگر متفاوت است. شاخص موران

1. Getis-Ord Gi
2. Moran I
3. Hot spots

جهانی<sup>۱</sup>، پارامتر جهانی جهت اندازه گیری همبستگی فضایی است و شاخص موران محلی<sup>۲</sup> که برای کشف توزیع فضایی محلی استفاده می شود. رابطه شماره ۱ فرمول آماره موران محلی را نمایش می دهد (Anselin, 1995).

$$I_i = n(X_i - \bar{X}) \sum_{j=1, j \neq i}^n W_{ij} (X_j - \bar{X})$$

N تعداد کل متغیرها،  $X_i$  و  $X_j$  مقادیر SO2 در مکانهای i و j و  $W_{ij}$  مقدار وزن فضایی عارضه های i و j را نشان می دهد. مقدار ضریب خودهمبستگی فضایی محلی باید بزرگ تر از ضریب مورد انتظار باشد تا الگوی پراکنش فضایی مورد قبول باشد. ضریب مورد انتظار موران توسط رابطه ی زیر به دست می آید:

$$E(I_i) = -W / (N - 1)$$

آزمون اهمیت موران توسط نمره ی z اندازه گیری می شود تا از آن برای آزمون معنی داری آماری نتایج استفاده شود. نمره ی z به عنوان مقدار استاندارد شده ی I در نظر گرفته می شود که توسط رابطه ی زیر به دست می آید.

$$Z_i = \frac{I - E(I)}{SD(I)}$$

E (I) و SD (I)

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} X_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n W_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n W_{ij}\right)^2}{n-1}}}$$

در این فرمول  $X_j$ ، مقدار خصیصه برای عارضه j،  $W_{ij}$  وزن فضایی بین عارضه i و j، و n تعداد کل عارضه ها را نشان می دهد.

## نتایج و بحث

در این مطالعه به منظور شناسایی خوشه بندی آلاینده SO2 در سطح استان تهران از آماره موران محلی و برای شناسایی لکه های داغ و سرد از آماره گنیس اردجی استفاده شد. به دلیل اینکه هدف بررسی مکانی تمامی پیکسل های محدوده استان تهران است، از آماره موران و گنیس اردجی محلی استفاده شد.

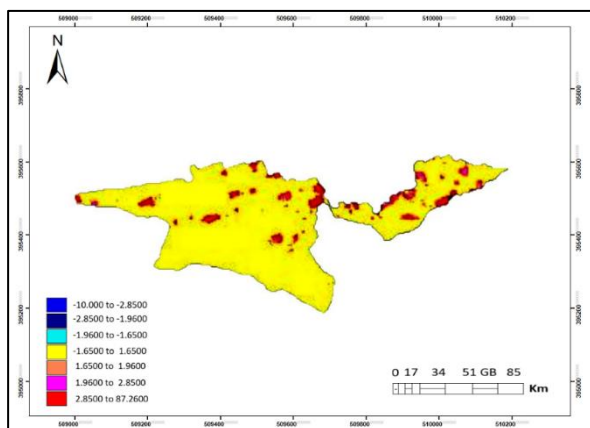
غلظت آلاینده‌ی SO<sub>2</sub>، با توجه به نتایج به‌دست آمده در فصل‌های پاییز و زمستان در مناطق جنوب و جنوب غربی استان دارای پراکنش و غلظت بالایی است. همچنین با توجه به آمار توصیفی و پهنه‌بندی غلظت آلاینده می‌توان به این نتیجه رسید که شهرستان‌های قرچک، شمیرانات و شهر تهران دارای بیشترین میزان غلظت آلاینده SO<sub>2</sub> هستند.

نتایج نشان می‌دهد که مناطق محدوده قرچک دارای بار آلودگی بیشتری است. همچنین بررسی میزان تأثیر غلظت آلاینده در کاربری اراضی نیز نشان‌دهنده‌ی آلودگی بیشتر در مناطق دارای کاربری صنعتی شامل کارخانه‌ها هست که در ماه‌های آخر سال روند افزایشی آلاینده در آن مناطق مشاهده می‌شود. این پژوهش تنها برای یک آلاینده هوا انجام شده است و نیاز است وضعیت سایر آلاینده‌ها نیز مشخص شود تا شناخت جامع‌تری از وضعیت آلودگی هوای استان تهران به‌دست آید. میزان غلظت آلاینده در ۱۶ شهرستان استان به‌صورت جدول ۱ جمع‌آوری شده است.

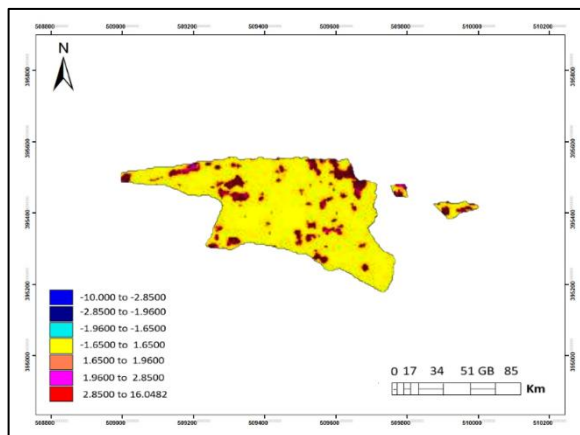
جدول ۱ توصیف آماری غلظت آلاینده SO<sub>2</sub> در شهرستان‌های استان تهران در سال ۲۰۲۳

شهرستان	میانگین غلظت SO <sub>2</sub> (مول بر مترمربع)	حداکثر غلظت SO <sub>2</sub> (مول بر مترمربع)	حداقل غلظت SO <sub>2</sub> (مول بر مترمربع)
بهارستان	0.001002	0.001854	0.000035
دماوند	0.001185	0.003526	-0.000253
اسلامشهر	0.001246	0.002216	0.000236
فیروزکوه	0.001331	0.005311	-0.000725
قرچک	0.001580	0.002352	0.000495
قدس	0.001341	0.002230	0.000708
ملارد	0.001286	0.002822	0.000022
پاکدشت	0.001149	0.002523	-0.000155
پردیس	0.000837	0.002001	-0.000452
پیشوا	0.001442	0.002523	0.000213
ری	0.001146	0.002520	-0.000200
رباط کریم	0.000997	0.001802	-0.000155
شهریار	0.001206	0.002423	0.000194
شمیرانات	0.000908	0.002568	-0.000210
تهران	0.001026	0.002940	-0.000842
ورامین	0.001029	0.002274	-0.000294

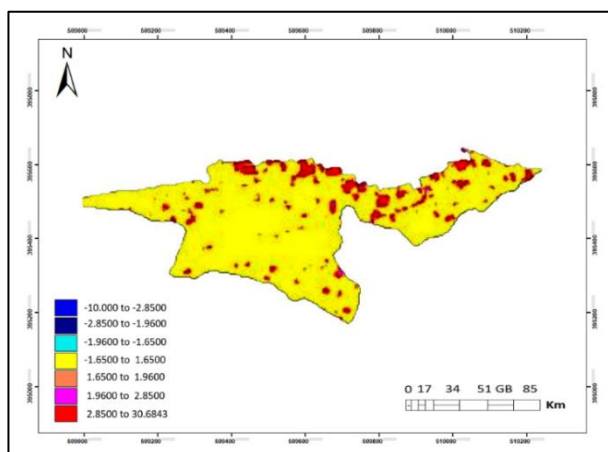
نتایج حاصل از تحلیل خودهمبستگی فضایی محلی برای غلظت ماهانه‌ی آلاینده SO<sub>2</sub> نشان داد بالاترین میانگین غلظت در تمامی شهرستان‌های استان تهران در ماه دسامبر (۱۱ آذر تا ۱۱ دی ماه) است، به‌جز شهرستان پردیس که بیشترین غلظت آلاینده آن در ماه ژانویه (۱۱ دی تا ۱۱ بهمن) است. همچنین بیشترین میانگین آن در بین تمامی شهرستان‌ها مربوط به شهرستان قرچک و کمترین آن مربوط به شهرستان پردیس است و همین‌طور کمترین میزان پراکنش بین این شهرستان‌ها مربوط به شهر تهران است. پس می‌توان نتیجه گرفت بالاترین غلظت SO<sub>2</sub> در شهرستان قرچک قابل ملاحظه است (جدول ۱). شکل شماره ۳ پراکنش غلظت SO<sub>2</sub> در هوای استان تهران در ماه‌های مختلف سال ۲۰۲۳ را نمایش می‌دهد.



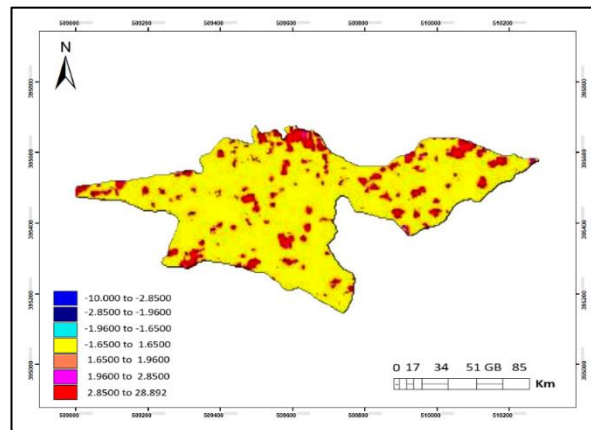
ژانویه



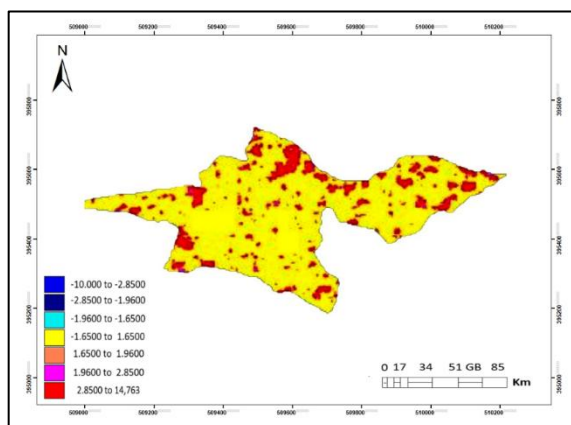
فوریه



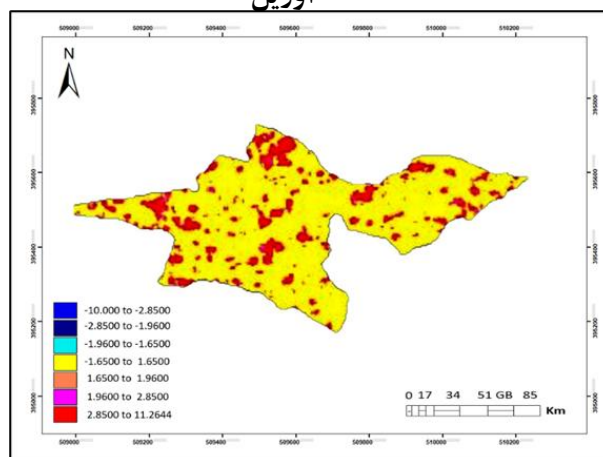
مارچ



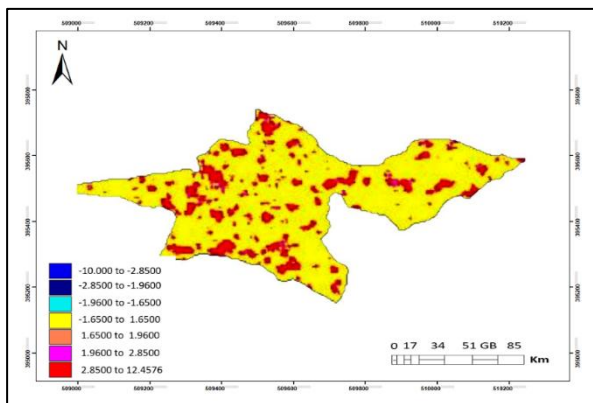
آوریل



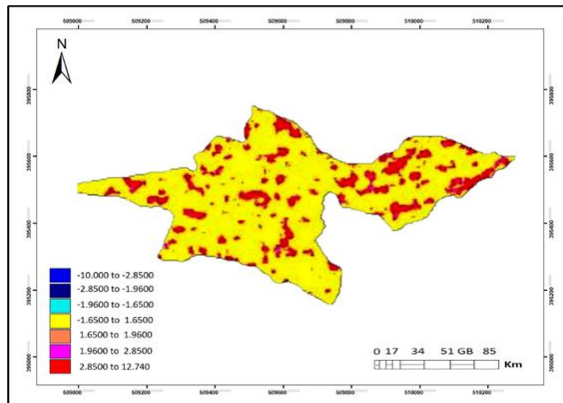
می



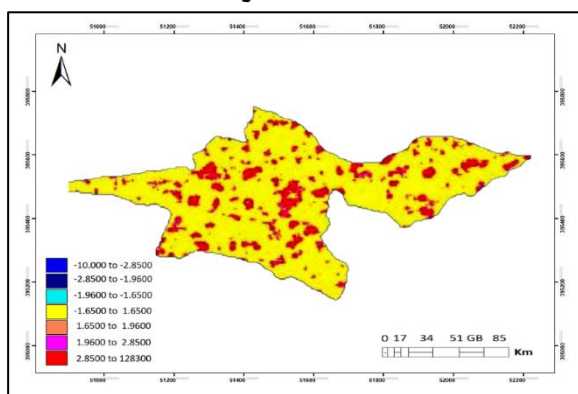
ژوئن



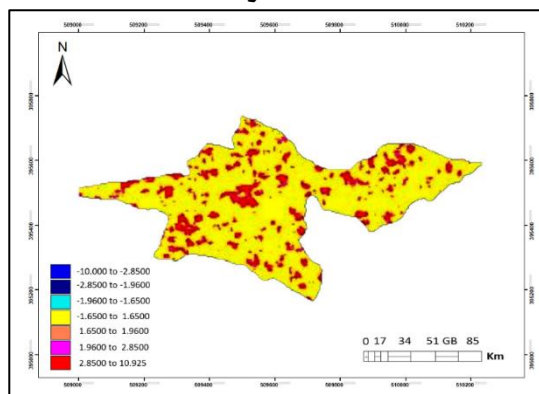
جولای



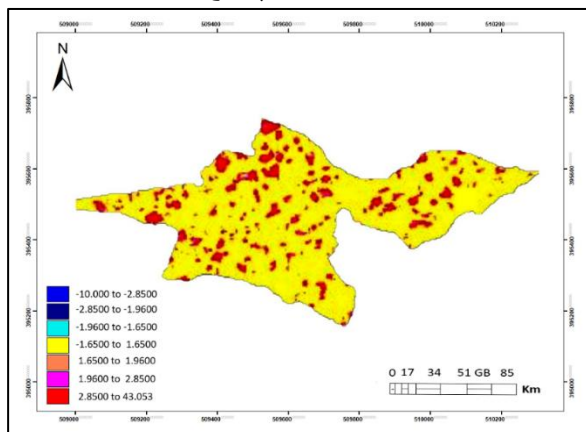
آگوست



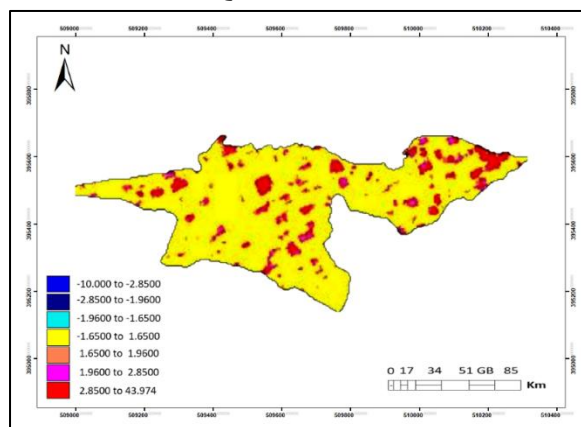
سپتامبر



اکتبر



نوامبر



دسامبر

شکل ۳ پهنه بندی غلظت SO<sub>2</sub> در هوای استان تهران در ماه های مختلف

توصیف لکه های داغ

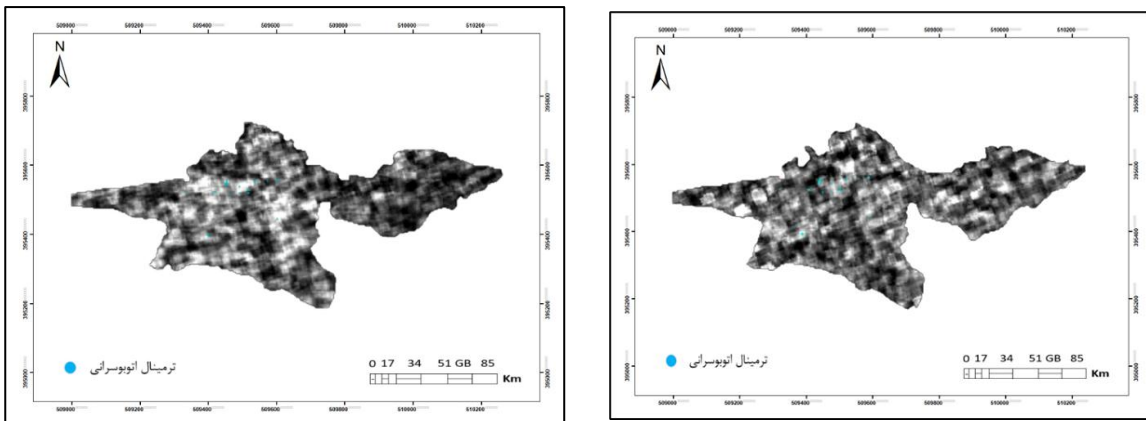
نتایج پهنه بندی غلظت گوگرد دی اکسید در استان تهران با توجه به نقشه های به دست آمده در فصول مختلف سال نیز نشان داد بیشترین لکه های داغ (بیشترین میزان معنی دار آلاینده SO<sub>2</sub>) متعلق به شهر تهران، شمیرانات و در بعضی فصول، بخش های جنوبی استان هست. همین طور نقاط سرد (کمترین میزان معنی دار آلاینده SO<sub>2</sub>) فقط در ماه دسامبر و در

قسمتی از شمیرانات، فیروزکوه و بخش کوچکی از جنوب استان دیده می‌شود. همچنین نتایج نشان داد غلظت این آلاینده در دو فصل سرد سال افزایش می‌یابد. در ماه‌های ژوئیه تا اکتبر بیشترین میزان آلاینده را در محدوده مکانی جنوب و جنوب شرق استان همچنین بخش‌های غربی استان مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۲ نشان‌دهنده روند افزایشی غلظت  $SO_2$  از شمال به جنوب استان است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل فضای همبستگی گتیس ارد-جی نشان داد در فصل‌های سرد سال (پاییز و زمستان) میزان پراکنش آلاینده نسبت به فصل‌های گرم‌تر افزایش می‌یابد.

### بررسی کاربری اراضی و میزان آلاینده گوگرد دی‌اکسید

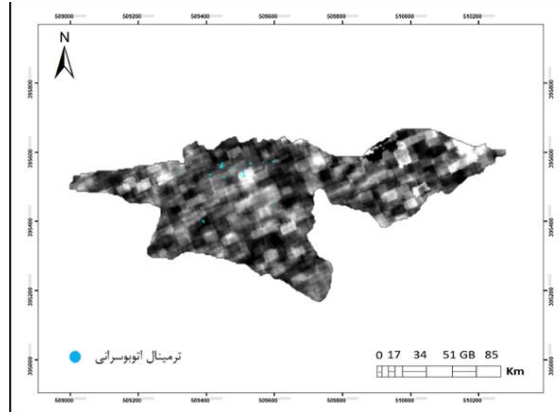
با توجه به شکل‌ها و نمودارها که به تفکیک ۱۲ ماه سال ۲۰۲۳ استخراج شده است از میان کاربری‌های اثرگذار که از منابع پخش آلاینده دی‌اکسید گوگرد در استان هستند، فرودگاه‌ها، مراکز صنعتی و کارخانه‌ها و پایانه اتوبوس‌رانی بیشترین نقش را دارند.

شکل ۴ نشان می‌دهد که میزان پراکنش کارخانه‌ها در بخش مرکزی و غربی استان تهران هست و غلظت آلاینده  $SO_2$  بین ماه‌های سوم تا هشتم روند تقریباً ثابت و نزدیک به هم دارند (۰,۰۰۰۳۴۲ تا ۰,۰۰۰۳۵۴ مول بر مترمربع) و در ماه نهم تا دوازدهم روند به‌شدت افزایشی دارد و در ماه دوازدهم به اوج خود می‌رسد (۰,۰۰۲۱۱۷ مول بر مترمربع) و کمترین میزان آلاینده در ماه دوم مشاهده می‌شود. شکل شماره ۳ و ۴ و ۵ به ترتیب پراکنش کاربری پایانه‌های اتوبوس‌رانی، کاربری صنعتی و کاربری فرودگاه و غلظت  $SO_2$  در سطح استان تهران در ماه‌های مختلف نشان می‌دهند.



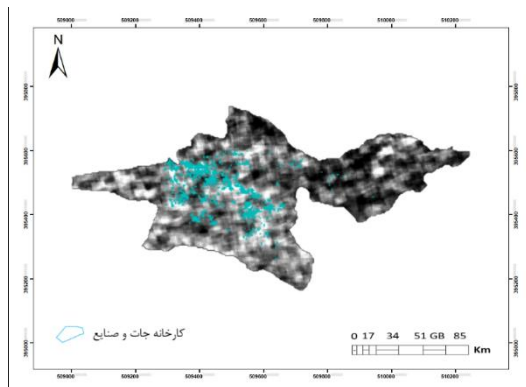
سپتامبر

نوامبر

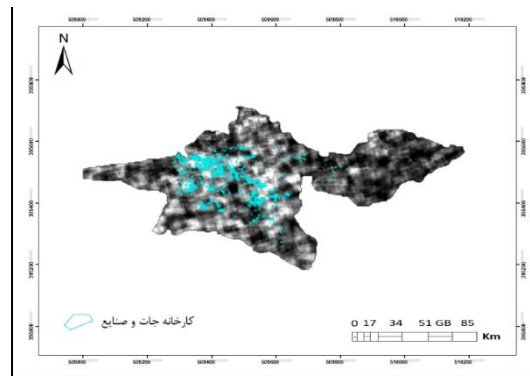


دسامبر

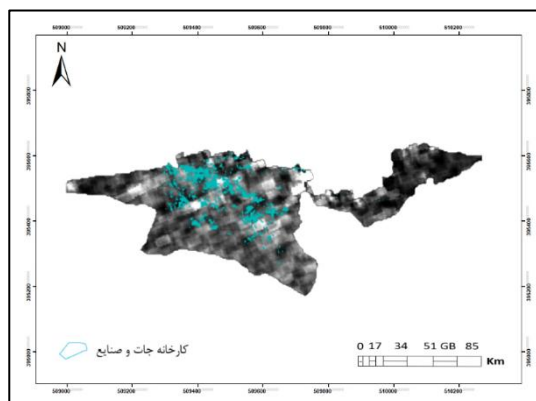
شکل ۳ پراکنش کاربری پایانه‌های اتوبوس‌رانی و غلظت  $SO_2$  در سطح استان تهران در ماه‌های مختلف



آگوست

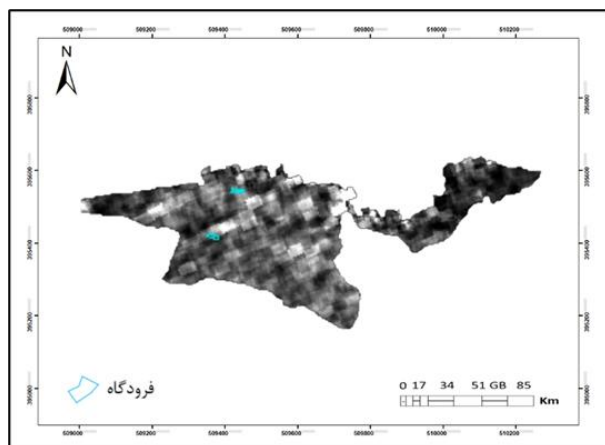


سپتامبر

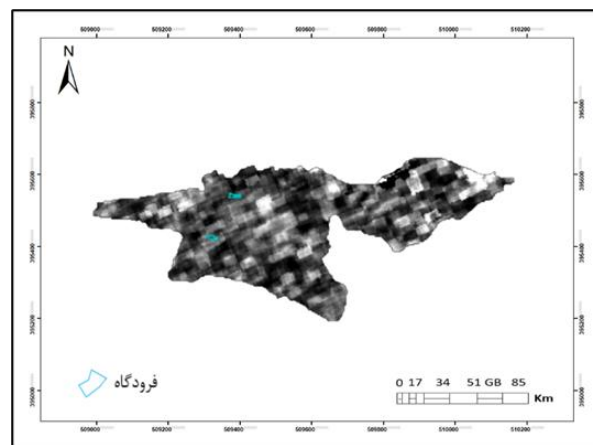


نوامبر

شکل ۴ پراکنندگی کاربری صنعتی و غلظت SO<sub>2</sub> در سطح استان تهران در ماه‌های مختلف



ژانویه

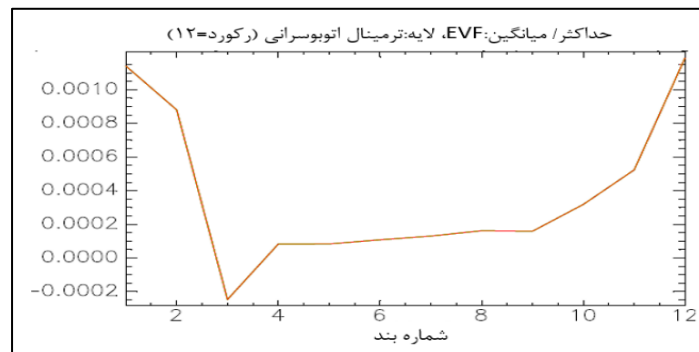


دسامبر

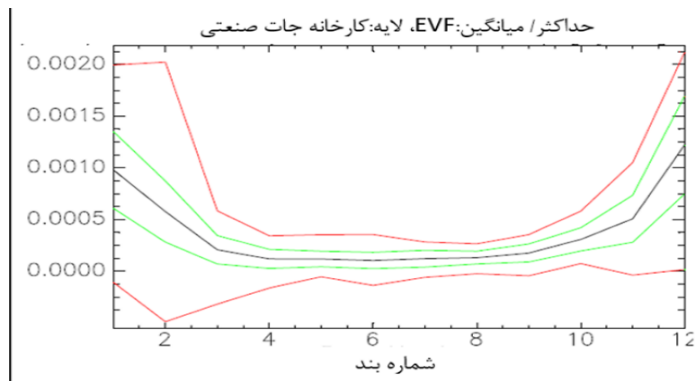
شکل ۵ پراکنندگی کاربری فرودگاه و غلظت SO<sub>2</sub> در سطح استان تهران در ماه‌های مختلف

نمودار ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب روند تغییرات آلاینده SO<sub>2</sub> در کاربری پایانه اتوبوس رانی، کارخانه‌ها/صنایع و فرودگاه‌ها را در ماه‌های سال ۲۰۲۳ را نمایش می‌دهند. با توجه به آن‌ها، فقط در ماه‌های ژانویه و فوریه میزان غلظت آلاینده‌ی SO<sub>2</sub> روند کاهشی دارد و از ماه می تا ماه سپتامبر روند نوسانی دارد و در دو ماه آخر به شدت روند افزایشی هست و از میزان ۰,۰۰۰۲۵۹ به ۰,۰۰۱۳۶ مول بر مترمربع در این ماه می‌رسد. به‌طور کلی در بین پلیگونی‌های کاربری اراضی، بیشترین میزان غلظت آلاینده و

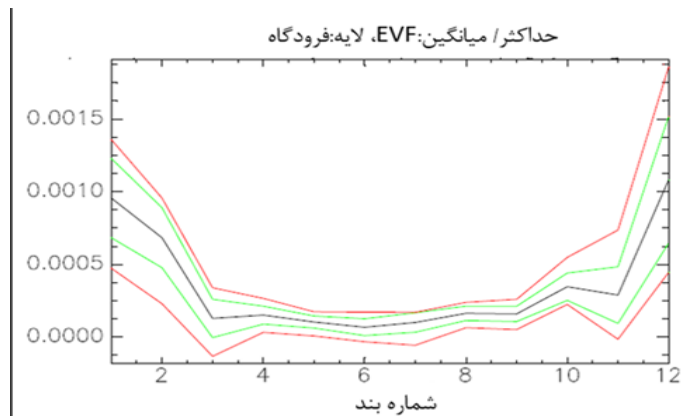
بیشینه پراکنش نقاط داغ متعلق به کاربری صنعتی و کارخانه‌ها هست. نقشه‌های به‌دست آمده همچنین نشان می‌دهد پراکنش پایانه اتوبوس‌رانی در شهرستان‌های پاکدشت، ری، شمیرانات و تهران است که تغییرات میزان غلظت آلاینده در پلیگن شهر ری در ماه‌های اول کم و در ماه پنجم تا هفتم روند افزایشی دارد تا در ماه یازده و دوازده به اوج خود یعنی میزان  $0,001189$  مول بر مترمربع می‌رسد. در پاکدشت نیز در اواخر سال میزان غلظت آلاینده بیشینه است. در شهر تهران نیز در ماه‌های اول میزان آلاینده به‌صورت پراکنده است و در ماه‌های آخر سال میزان غلظت  $SO_2$  روند افزایشی دارد. به‌طور کلی روند میزان غلظت آلاینده  $SO_2$  در ماه‌های اول تا سوم کاهشی، از ماه چهارم تا هشتم تقریباً ثابت و از ماه نهم تا آخر سال افزایشی بوده و بیشترین میزان آلاینده و تغییرات آن در شهر تهران و ری بوده‌است.



نمودار ۱ روند تغییرات آلاینده  $SO_2$  در کاربری پایانه‌های اتوبوس‌رانی



نمودار ۲ روند تغییرات آلاینده  $SO_2$  در کاربری‌های صنعتی



نمودار ۳ روند تغییرات آلاینده  $SO_2$  در کاربری فرودگاه

## نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، جهت تحلیل مکانی-زمانی آلاینده گوگرد دی‌اکسید سطح استان تهران از روش خوشه‌بندی فضایی موران استفاده شد. همچنین به‌منظور شناسایی لکه‌های داغ آلاینده SO<sub>2</sub> در سطح استان تهران از آماره موران و گتیس اوردجی محلی استفاده شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده غلظت آلاینده SO<sub>2</sub> در فصل‌های پاییز و زمستان در مناطق جنوب و جنوب غربی استان دارای پراکنش و غلظت بالایی است. همچنین با توجه به آمار توصیفی و پهنه‌بندی غلظت آلاینده می‌توان به این نتیجه رسید که شهرستان‌های قرچک، شمیرانات و شهر تهران در سال ۲۰۲۳ دارای بیشترین میزان غلظت آلاینده SO<sub>2</sub> هستند. نتایج روش‌های مختلف استفاده‌شده در این پژوهش نشان داد که مناطق جنوبی استان به‌ویژه مناطق محدوده قرچک دارای بار آلودگی بیشتری است. همچنین بررسی میزان تأثیر غلظت آلاینده در کاربری اراضی نیز نشان‌دهنده آلودگی بیشتر در مناطق دارای کاربری صنعتی من جمله کارخانه‌هاست که در ماه‌های آخر سال روند افزایشی آلاینده در آن مناطق به بیشینه خود می‌رسد. نتایج حاصل از تحقیق حاضر می‌تواند توسعه داده‌شده و با افزودن اطلاعات مربوط به سایر آلاینده‌های هوا به‌صورت یک سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری مکانمند جهات پایش پراکنش آلاینده‌های هوا، مورد استفاده برنامه‌ریزان و مدیران شهری قرار گیرد.

## منابع

- بهلول، ع. ج. (۲۰۱۵). تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۷(۲)، ۱-۱۴.
- شمسی پور، ع. ا.، & امینی، ژ. (۲۰۱۳). شبیه‌سازی الگوی پراکنش CO با مدل خرداقلیمی Envi-met در مسیر آزادی - تهران پارس. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۰(۳)، ۲۳۵۸۲. doi:10.22067/geo.v10i0.235882
- محمدی، ح. و، & یاسیان، ا. (۲۰۱۸). تاثیر عناصر جوی در پراکنش آلاینده PM<sub>2.5</sub> مطالعه موردی: خیابان ولیعصر تهران. نشریه مطالعات علوم محیط زیست، ۳(۱)، ۶۳۲-۶۴۲. Retrieved from <https://www.magiran.com/paper/1919698642>

- Abbaszadeh Tehrani, N., Farhanj, F., & Janalipour, M. (2023). Monitoring the Impacts of Human Activities on Urban Ecosystems Based on the Enhanced UCCLN (EUCCLN) Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(4), 170.
- Abbaszadeh Tehrani, N., Janalipour, M., & Hosseini, S. B. (2024). Monitoring the urban ecosystem health by introducing a spatial model based on pressure-state-impact-response framework (study area: Sanandaj city). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-18.
- Alireza, N., & Feyz, S. M. A. (2014). Determining the spatial and temporal changes of sulfur dioxide, nitrogen dioxide and suspended particles using GIS technique in Tehran. *Quarterly Journal of Environmental Studies*(3), 723-738.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical analysis*, 27(2), 93-115.
- Atai, H., & Hashemi Nasab, S. (2011). Identification and analysis of atmospheric mid-level patterns affecting air pollution in Isfahan. *Journal of Research and Urban Planning*, 2(4), 97-113.
- Goudarzi, G., Geravandi, S., Mohammadi, M. J., Salmanzadeh, S., Vosoughi, M., & Sahebalzamani, M. (2015). The relationship between air pollution exposure and chronic obstructive pulmonary disease in Ahvaz, Iran. *Chronic Diseases Journal*, 3(1), 14-20.
- Khan, R. R., & Siddiqui, M. (2014). Review on effects of particulates: sulfur dioxide and nitrogen dioxide on human health. *Int Res J Environl Sci*, 3(4), 70-73.
- Nadian, M., Mirzaei, R., & Soltani Mohammadi, S. (2018). Application of Moran'sI Autocorrelation in Spatial-Temporal Analysis of PM<sub>2.5</sub> Pollutant (A case Study: Tehran City). *Journal of Environmental Health Engineering*, 5(3), 197-213. doi:10.29252/jehe.5.3.197
- Pourmollaie, N., Mohammadi, A., Bazrafshan, E., Ismailnejad, M., & Lahijanian, A. A.-M. (2021). Investigation of Temporal Changes in the Dust Particle Concentration in Zabol City Air Using Air Quality Index. *Journal of health research in community*, 6(4), 40-50.
- Reshi, A. R., Pichuka, S., & Tripathi, A. (2024). Applications of sentinel-5p tropomi satellite sensor: A review. *IEEE Sensors Journal*, 24(13), 20312-20321.

- Shikwambana, L., Mhangara, P., & Mbatha, N. (2020). Trend analysis and first time observations of sulphur dioxide and nitrogen dioxide in South Africa using TROPOMI/Sentinel-5 P data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91, 102130.
- Tehrani, N. A., Mollalo, A., Farhanj, F., Pahlevanzadeh, N., & Janalipour, M. (2021). Time-series analysis of COVID-19 in Iran: A remote sensing perspective. In *COVID-19 pandemic, geospatial information, and community resilience* (pp. 277-290): CRC Press.
- Veeffkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., De Vries, J., Otter, G., . . . Kleipool, Q. (2012). 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 Sensing of Environment*, 120, 70-83.
- Yanti, J., Tampubolon, T., Liu, C.-Y., Alonge, T. A., Qaiyimah, D., Abidin, M. R., . . . Saputra, R. R. (2024). Measuring The Spatio-Temporal Distribution of Sulfur Dioxide (SO<sub>2</sub>) with Copernicus Sentinel-5P Near Real Time in Medan City. *Jurnal Geografi-Vol*, 16(1), 101-110.