



Journal of Environmental Studies

Vol. 47, No. 2, Summer 2021

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Sulfur Dioxide (SO₂) Monitoring Based on MetOp-A/GOME-2 Sensor Observations in the Troposphere of Iran

Document Type
Research Paper

Koohzad Raispour

Received
February 28, 2021

Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan Province, Iran.

Accepted
May 31, 2021

DOI: [10.22059/JES.2021.329512.1008222](https://doi.org/10.22059/JES.2021.329512.1008222)

Abstract

Sulfur dioxide (SO₂) is one of the most important air pollutants, and increasing its concentration can cause the spread of cardiovascular, respiratory, lung function, chronic bronchitis, lung cancer and death. In this study, the concentration of SO₂ between 2007 and 2020 in the troposphere of Iran, which is one of the countries with high SO₂ emissions in the world, was estimated. To achieve this goal, the concentration of SO₂ column in the troposphere of Iran was analyzed using GOME-2 sensor data from MetOp-A satellite. GOME-2 is a MetOp-A satellite-based sensor that can measure daily SO₂ concentrations on a global scale. Based on the results, The mean concentration of SO₂ in the Iranian troposphere was 28.5 µg/m³ and the maximum and minimum values were estimated to be 200.9 µg/m³ and 1.70 µg/m³ with a standard deviation of 15.9 µg/m³, respectively. Spatially, Khuzestan province has the highest average concentration of SO₂ in Iran, followed by Ilam, Bushehr, Tehran, Alborz, Gilan, Mazandaran and south of Kerman. The analysis of the time series of tropospheric distribution of SO₂ (2007-2020) shows a decreasing trend of SO₂ in the troposphere of Iran, so that its average from 35 µg/m³ in 2007 to 26 µg/m³ in 2020 (9µg/m³ or (25%) decreased. The results of seasonal distribution showed that the maximum and minimum of SO₂ occur in cold and warm seasons, respectively. On the other hand, October and September (cold months of the year) had the highest, and Jotun and July (warm months of the year) had the lowest monthly distribution. The higher concentration of SO₂ in the cold period of the year is due to the more active emission foci and the prevailing meteorological conditions in this period.

Keywords: Sulfur dioxide, Pollutant, GOME-2 sensor, Meteorological conditions, Iran

* Corresponding author:

Email: Raispour@znu.ac.ir

Introduction

Today, industrialization, urbanization, and population growth have polluted the environment. As a result, many major cities around the world face a number of environmental problems, most notably air pollution. As a result, exposing citizens to polluted air in large cities is inevitable. The short-term and long-term health effects of air pollution have been proven in the twentieth century. Therefore, there are concerns about the effects of air pollution on human health in developed and developing countries. Sulfur dioxide (SO_2) is one of the most important air pollutants that can threaten human health and cause respiratory problems, headaches, dizziness and previous attacks. SO_2 is the predominant sulfur oxide in the atmosphere, which is non-flammable, non-explosive and colorless, and at concentrations above 3 ppm has a pungent odor and can be fatal. Airway narrowing, bronchospasm, severe cough, eye and respiratory tract irritation, decreased respiratory function and shortness of breath, decreased respiratory depth, and ultimately exacerbated cardiovascular and respiratory complications from the health effects attributed to SO_2 It counts. This pollutant in combination with hydroxide and reducing the pH of precipitation, falls in the form of acid rain on the ground and acidifies water and soil, with adverse environmental consequences. On the other hand, SO_2 plays an important role in atmospheric chemistry, especially air pollution, and is one of the most important Photochemical smoke fog. SO_2 can also alter the earth's radiative balance through photochemical interactions by radiation induction. Therefore, it has a great ability to create climate change by disrupting the energy balance of the Earth system and changing the mechanism of cloud formation. SO_2 is released into the atmosphere through natural and human resources. Volcanic eruptions are the main natural source of SO_2 . More than 80 percent of the world's SO_2 production comes from fossil fuels, 85 percent of which are generated by power plants. Among the non-combustible sources, oil refineries, copper smelters and cement factories are among the most prominent sources of this gas production. The growing need for continuous or instantaneous analysis of air compositions and the study of air pollutants in remote locations through laboratory and terrestrial methods is almost impossible. Remote sensing methods have made it possible to evaluate various types of air pollutants at desired time intervals due to their extensive spatial coverage and high time separation. It is estimated that more than 15 sensors are continuously active in monitoring air pollution and atmospheric chemistry and provide the necessary data to those interested. Therefore, many studies have been performed using remote sensing techniques to monitor SO_2 . The GOME-2 sensor, which was placed on the MetOp-A satellite on October 19, 2006 for data collection of several important gases (O_3 , NO_2 , CO_2 , CO , SO_2), is the basis of research. There was a lot of SO_2 monitoring. Good horizontal resolution along with daily time resolution make this sensor suitable for long-term monitoring purposes. According to the Global Atmospheric Research Database, Iran is the world's largest producer of SO_2 after China, the United States, India, Saudi Arabia, Russia, South Africa, Indonesia and Kazakhstan. SO_2 contamination in Iran has been reported by foreign and domestic researchers. The results of these studies showed that the level of SO_2 emission in some parts of Iran is dangerous. However, although SO_2 has been studied from several aspects in Iran, but due to the health risks to people living in contaminated areas, there are still many questions about temporal-spatial distribution, trends, hotspots, Its spatial differences and similarities are present in the troposphere of Iran. Therefore, the focus of the present study is to analyze the concentration of SO_2 in Iran between 2007 and 2020 using the observations of the GOME-2 sensor of the MetOp-A satellite to answer the questions. Quantifying and evaluating SO_2 emissions and detecting spatio-temporal fluctuations is not only important for environmental protection and citizens' health, but can also help policymakers develop policies to reduce pollution and manage air quality.

Materials and Methods

MetOp-A (from the MetOp series of satellites) is the first polar orbiting satellite and the most advanced European satellite observation satellite, which was launched on October 19, 2006 to increase the accuracy of weather forecasting and better understanding of climate change. MetOp-A satellite is equipped with sensors (IASA, ASCAT, AMSU-A, MHS, ANHRR, GRAS, HIRS, A-DCS, SARSAT, SEM-2, GOME-2) for different parameters Such as temperature, humidity, wind direction and speed, ozone level and air pollutants, it captures information from three terrestrial, atmospheric and ocean

spaces with unparalleled accuracy and quality and provides it to those interested. One of the most important sensors of this satellite, which measures air pollutants such as SO₂, is the GOME-2 sensor. The GOME-2 sensor covers a wide range from 240 to 790 nm, with a spectral resolution of 0.26 to 0.51 nm and has an equatorial the time of the passing of 9:30 local time in the Sun-Orbit. The spatial resolution or size of each pixel of this sensor for the main channels is in the form of 80 × 40 km and scan width of 1920 km and 40 × 40 km with scan width of 960 km, which covers the whole world on a daily basis. The use of GOME-2 sensor SO₂ products, due to good spectral resolution and optimal calibration compared to similar instruments, has been the basis of numerous studies in the world in the direction of atmospheric SO₂ monitoring. In this study, the tropospheric SO₂ observations of the Gome-2 sensor in the period of 2007-2020 were used. The data used is an estimate of the weight of SO₂ in micrograms per cubic meter of tropospheric air, expressed in micrograms per cubic meter (µg/m³). This data was extracted from the website (<http://www.temis.nl>) with monthly and spatial separation of 40 × 40 km and after applying quality control and necessary processing, it was converted into monthly, seasonal and annual values. The number of cells with the above spatial resolution for the GOME-2 sensor in Iran is 1030 pixels. Accordingly, the dimensions of the arrays created are 168 × 1030 for the months and 56 × 1030 for the seasons, respectively. The data used, which is digital and the value of SO₂ is a numerical value per pixels, was converted into network data and data tables by applying geostatistical algorithms in specialized software environment (Arc GIS, ENVI) Necessary was extracted and analyzed as a raster based on the geographical border of Iran.

Discussion of Results

The mean concentration of SO₂ in the troposphere of Iran was 28.5 µg/m³ and the maximum and minimum values were estimated to be 200.9 µg/m³ and 1.70 µg/m³ with a standard deviation of 15.9 µg/m³, respectively. Spatially, Khuzestan province has the highest average SO₂ concentration in Iran, followed by Ilam, Bushehr, Tehran, Alborz, Gilan, Mazandaran and southern Kerman. In Khuzestan province, the highest average concentration of SO₂ with a value of more than 100 µg/m³ is related to the southwest of Khorestan province (Abadan). Khuzestan province is one of the most important industrial areas in Iran, which is considered one of the most polluted areas in the world due to the establishment of oil, refinery, industrial and power plant facilities. The contribution of tropospheric SO₂ along with other pollutants in this province is significant. The amount of SO₂ over Tehran (the capital and largest metropolis of Iran) is also significant. Among the reasons for the high level of tropospheric SO₂ over Tehran, we can mention several factors, including geographical and human factors. The location of the city of Tehran in the semi-enclosed environment of the southern slope of the Alborz highlands, causes the Alborz mountains in the north and east to prevent air conditioning as a barrier and provide conditions for the persistence and continuity of tropospheric SO₂. The dominance of temperature inversion conditions and the continuous establishment of high-pressure systems are other climatic features of the region that create the conditions for intensifying air pollution in Tehran and surrounding areas in some days of the year. In addition to the natural factors mentioned, the establishment of factories and industries in the city (especially in the west and southwest), power plants and refining companies can be added to the amount of tropospheric SO₂. The coastal area of northern Iran (Mazandaran and Gilan provinces) has a high population density due to the location of Neka power plant on the one hand and on the other hand due to the favorable weather conditions and relatively favorable infrastructure development. In addition, the location of this area in the ranks of tourism target areas, creates a high volume of traffic and increases the concentration of SO₂ in this area. Other areas also experience relatively high concentrations of SO₂ during the year due to their industrial nature, dilapidated fleet, and the existence of cement plants and power plants based on diesel or fuel oil (southern Kerman province). These areas are contaminated with tropospheric SO₂ according to air quality standards. Analysis of the tropospheric SO₂ time series during 168 consecutive months (2020-2007) shows the decreasing trend of SO₂ emission in the surface troposphere of Iran. The decrease in tropospheric SO₂ concentration in Iran has occurred while Iran joined the Kyoto Protocol in 2005 and has announced cooperation in reducing greenhouse gases in various sectors of energy, oil and gas, agriculture, natural resources and forestry. On the other hand, the analysis of annual SO₂ fluctuations in Iran shows that its concentration is related to crude oil production (the primary form of

energy production in Iran). The decreasing trend of SO₂ concentration showed a significant relationship ($R^2 = 71\%$) with the decrease in Iran's crude oil production, which intensified in recent years (2015-2020) with US oil sanctions and hindered Iran's oil trade.

Conclusions

SO₂ is one of the most important pollutants that causes irreparable damage to the environment, climate and human health in the present age. Today, due to the increasing development of industries and factories and the excessive consumption of fossil fuels, the concentration of air pollutants, especially SO₂, has increased and has caused many problems for human health. The aim of the present study is to estimate the spatio-temporal distribution of tropospheric SO₂ in Iran using the observations of the GOME-2 sensor of the MetOp-A satellite during the years 2007-2020. The results showed; The average tropospheric SO₂ in Iran is 28.5 µg/m³, among which, the highest/lowest values observed are 200.9 µg/m³ and 1.7 µg/m³, respectively, with a standard deviation of 15 µg/m³ It has been. In terms of spatial distribution, the highest concentration of tropospheric SO₂ pollutant over a continuous range from northwest of Kermanshah province to the west of Hormozgan province and the provinces of Tehran, Alborz, Gilan, Mazandaran, Isfahan and south of Kerman province. Among the mentioned areas, the highest concentration of tropospheric SO₂ is related to the southwest of Khuzestan province (Abadan) with a long-term average of up to 120 µg/m³ and its release in all months and seasons of the year has a high concentration. The analysis of the time series of the average monthly tropospheric SO₂ distribution during 168 consecutive months (2007-2020) shows a decreasing trend of tropospheric SO₂ trend in Iran. The average of this gas has decreased by 25% from 35 µg/m³ in 2007 to 26 µg/m³ in 2020. Analysis of the output related to the seasonal average of SO₂ distribution showed that the seasonal maximum of SO₂ occurs in autumn (31 µg/m³) and its seasonal minimum occurs in summer with 26 µg/m³. The highest average monthly SO₂ emissions were observed in October, November and January (cold months of the year) and the lowest in June and July (warm months of the year), respectively. Higher SO₂ concentrations in the colder months and seasons of the year, on the one hand due to more active sources of emissions such as higher fuel oil consumption, increased traffic volume, increasing the amount of fossil fuel consumption to provide Heating of residential and service spaces and on the other hand due to the prevailing meteorological conditions in this period of the year (occurrence of the phenomenon of temperature inversion and reduction of the thickness of the atmospheric boundary layer). The study of the spatial distribution of tropospheric SO₂ concentration also indicates its significant spatial differences in the geographical area of Iran. The difference is due to the heterogeneous distribution of tropospheric SO₂ production and emission centers in Iran. Because industrial areas and oil-rich areas are often located in the western and southern half of Iran. Therefore, due to the heterogeneous spatial distribution of SO₂ emission centers in the geographical area of Iran, the distribution of the pollutant in different areas is different.

پایش گوگرد دی‌اکسید (SO₂) مبتنی بر مشاهدات سنجنده‌ی GOME-2 ماهواره‌ی MetOp-A در تروپوسفر ایران

کوهزاد رئیس پور*

گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۳/۱۰

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰

چکیده

گوگرد دی‌اکسید یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های معیار هوا است که افزایش غلظت آن می‌تواند سبب شیوع بیماری‌های قلبی-عروقی، تنفسی، کاهش عملکرد ریه، برونشیت مزمن، سرطان ریه و مرگ شود. در این تحقیق غلظت گوگرد دی‌اکسید بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۰ در تروپوسفر ایران از کشورهای با مقدار انتشار SO₂ بالا در جهان برآورد گردید. برای نیل به این هدف، غلظت ستون SO₂ در تروپوسفر ایران با استفاده از داده‌های سنجنده‌ی GOME-2 ماهواره‌ی MetOp-A مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. GOME-2 یک سنجنده مستقر بر روی ماهواره‌ی MetOp-A است که می‌تواند غلظت روزانه SO₂ را در مقیاس جهانی اندازه‌گیری کند. بر اساس نتایج، میانگین غلظت SO₂ تروپوسفر ایران ۲۸/۵ µg/m³ و بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برآورد شده به ترتیب برابر با ۳۰۰/۹ و ۱/۷۰ µg/m³ با انحراف معیار ۱۵/۹ µg/m³ برآورد گردید. به لحاظ مکانی نیز، استان خوزستان دارای بالاترین میانگین غلظت SO₂ در ایران است و پس از آن ایلام، بوشهر، تهران، البرز، گیلان، مازندران و جنوب کرمان قرار دارند. آنالیز حاصل از بررسی سری زمانی توزیع تروپوسفری SO₂ (۲۰۲۰ - ۲۰۰۷)، حاکی از روند کاهشی SO₂ در گستره‌ی تروپوسفر ایران است، به طوری که میانگین آن از ۳۵ µg/m³ در سال ۲۰۰۷ به ۲۶ µg/m³ در سال ۲۰۲۰ (۲۵٪) کاهش یافت. نتایج بررسی پراکنش فصلی نشان داد که بیشینه و کمینه‌ی SO₂ به ترتیب در فصل‌های سرد و گرم سال رخ می‌دهد. از سوی دیگر ماه‌های اکتبر و سپتامبر (ماه‌های سرد سال) از بیش‌ترین، و ماه‌های ژوئن و ژولای (ماه‌های گرم سال) از کم‌ترین پراکنش ماهانه برخوردار بوده‌اند. از سوی دیگر ماه‌های اکتبر و سپتامبر (ماه‌های سرد سال) از بیش‌ترین، و ماه‌های ژوئن و ژولای (ماه‌های گرم سال) از کم‌ترین پراکنش ماهانه برخوردار بوده‌اند. غلظت بیش‌تر SO₂ در دوره‌ی سرد سال به دلیل فعال‌تر بودن کانون‌های انتشار و شرایط هواشناسی حاکم در این دوره است.

کلید واژه

گوگرد دی‌اکسید، آلاینده، سنجنده‌ی GOME-2، شرایط هواشناسی، ایران

سرآغاز

(Ghude et al., 2009; Duncan et al., 2016). در نتیجه، قرار گرفتن شهروندان در معرض هوای آلوده در شهرهای بزرگ امری اجتناب‌پذیر است (Piraino et al., 2006). اثرات بهداشتی کوتاه مدت و بلندمدت آلودگی هوا در قرن بیستم به اثبات رسیده‌است (Jerrett et al., 2008; Nadaffi et al., 2012). بنابراین نگرانی‌هایی در مورد اثرات آلاینده‌ی

امروزه صنعتی شدن، شهرنشینی و افزایش جمعیت سبب آلودگی محیط‌زیست شده است (شرعی پور و علی‌اکبری بیدختی، ۱۳۹۴). به همین دلیل بسیاری از شهرهای بزرگ جهان با مشکلات محیط‌زیستی عدیده‌ای مواجه هستند که در رأس آن‌ها آلودگی هوا قرار دارد

Email: Raispour@znu.ac.ir

* نویسنده مسئول:

DOI: [10.22059/JES.2021.329512.1008222](https://doi.org/10.22059/JES.2021.329512.1008222)

DOR: [20.1001.1.10258620.1400.47.2.1.9](https://doi.org/20.1001.1.10258620.1400.47.2.1.9)

بنابراین توانایی زیادی در ایجاد تغییرات آب و هوایی از طریق برهم زدن تعادل انرژی سیستم زمین و تغییر مکانیسم تشکیل ابر دارد (Krotkov et al., 2015a). SO₂ از طریق منابع طبیعی و انسانی به جو آزاد می‌شود (Katanoda et al., 2013; Lu et al., 2011). فوران آتشفشان‌ها اصلی‌ترین منشأ طبیعی SO₂ است (Beirle et al., 2014). بیش از ۸۰ درصد تولید SO₂ در جهان ناشی از سوخت‌های فسیلی است که ۸۵ درصد آن توسط نیروگاه‌ها و تنها ۲ درصد آن توسط وسایل نقلیه تولید می‌شود (Zallaghi et al., 2015). در میان منابع غیراخراجی نیز، پالایشگاه‌های نفت، کارخانجات ذوب مس و کارخانجات سیمان از شاخص‌ترین منابع تولید این گاز هستند (Fioletov et al., 2016; Fioletov and McLinden, 2015). گرچه نظارت بر آلودگی اتمسفر به طور متداول از طریق مشاهدات زمینی و روش‌های آزمایشگاهی انجام می‌شود که نسبتاً دقیق هستند، اما این روش‌ها به دلیل پوشش مکانی و زمانی محدود دارای ضعف هستند (Jiang et al., 2012). از سوی دیگر، نیاز روزافزون به تحلیل پیوسته یا لحظه‌ای ترکیبات هوا و بررسی روند آلاینده‌های جوی در مکان‌های دور، از طریق این روش‌ها تقریباً غیرممکن است. روش‌های سنجش از دور به دلیل پوشش مکانی وسیع و تفکیک زمانی بالا، امکان ارزیابی انواع آلاینده‌های جوی را در بازه‌های زمانی دلخواه ممکن ساخته‌است. تخمین زده می‌شود بیش از ۱۵ سنجنده به طور مستمر در زمینه‌ی پایش آلودگی هوا و شیمی جو فعال بوده و داده‌های لازم را در اختیار علاقه‌مندان قرار می‌دهند (Abel et al., 2019). بنابراین، مطالعات زیادی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور برای نظارت بر SO₂ انجام شده‌است (Van Der et al., 2017; Li et al., 2017; Zara et al., 2018; Theys et al., 2019; Fioletov et al., 2020; Dimitropoulou et al., 2020; Mariliza et al., 20121; Stefano et al., 2021). سنجنده‌ی GOME-2^f که به منظور داده‌برداری از چند گاز مهم از جمله (O₃, NO₂, CO₂, CO, SO₂) در ۱۹ اکتبر سال ۲۰۰۶ بر روی ماهواره‌ی MetOp-A قرار گرفت،

هوا بر سلامتی انسان‌ها در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه وجود دارد (Fattore et al., 2011; Kumar et al., 2011). در گذشته آلودگی شدید هوا در اروپا (دره میوز)، لندن و آمریکا (دنور) منجر به بیماری و مرگ‌ومیر هزاران نفر شده‌است (Nemery et al., 2001). یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا که می‌تواند سلامتی انسان‌ها را تهدید نموده و باعث مشکلات تنفسی، سردرد، سرگیجه و حملات قلبی شود، گاز سولفور دی‌اکسید (SO₂)^۱ است (Fioletov et al., 2013; Klimont et al., 2013). SO₂ اکسید غالب گوگردی موجود در جو بوده که غیرقابل اشتعال، غیرقابل انفجار و بی‌رنگ است و در غلظت‌های ۰/۳ ppm تا ۱ ppm در هوا ایجاد مزه می‌کند (Cheng et al., 2007). این گاز در غلظت‌های بالای ۳ ppm دارای بوی تند و محرک بوده و می‌تواند منجر به مرگ شود (Geravandi et al., 2015; Mohammadi et al., 2016). اکسیدهای گوگرد در ترکیب با مواد معلق و رطوبت، زیان‌بارترین اثرات مرتبط با آلودگی هوا را ایجاد می‌کنند (Richter et al., 2009). تنگ شدن راه‌های تنفس، اسپاسم برونش^۲، سرفه‌ی شدید، سوزش چشم و مجاری تنفسی، کاهش کارایی تنفسی و تنگی نفس، کم‌شدن عمق تنفس و در نهایت تشدید عوارض قلبی-عروقی و تنفسی از اثرات بهداشتی منتسب به SO₂ به شمار می‌رود (Afif et al., 2008; Smith et al., 2011; Fioletov et al., 2016). این آلاینده در ترکیب با هیدروکسید^۳ و کاهش pH بارش، به صورت باران اسیدی بر سطح زمین ریزش نموده و با اسیدی نمودن آب و خاک، تبعات نامطلوب محیط‌زیستی را به دنبال دارد (Wang et al., 2020a; Li et al., 2014). از جهتی دیگر، SO₂ نقش مهمی در شیمی جو و به ویژه آلودگی هوا داشته (Birk et al., 2018) و یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های مه‌دود فتوشیمیایی محسوب می‌شود (Rix et al., 2009; Hormann et al., 2013). هم‌چنین SO₂ می‌تواند با واداشته‌های تابشی، توازن تابشی زمین را از طریق فعل و انفعالات فتوشیمیایی تغییر دهد (Li et al., 2020b).

روند، نقاط داغ، تفاوت و تشابه مکانی آن در گستره‌ی تروپوسفر ایران مطرح است. بنابراین تمرکز اصلی پژوهش حاضر، تجزیه و تحلیل غلظت SO₂ در ایران بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۰ با استفاده از مشاهدات سنجنده‌ی GOME-2 ماهواره‌ی MetOp-A است تا به پرسش‌های مطرح شده پاسخ دهد. کمی‌کردن و ارزیابی انتشار SO₂ و آشکارسازی نوسانات زمانی- مکانی آن، نه تنها برای حفاظت محیط‌زیست و سلامت شهروندان مهم است، بلکه می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر، در راستای توسعه‌ی استراتژی‌های کاهش آلودگی و مدیریت کیفیت هوا به سیاست‌گذاران کمک نماید.

مواد و روش بررسی

ماهواره‌ی MetOp-A^۵ اولین ماهواره‌ی مدار قطبی و پیشرفته‌ترین ماهواره‌ی اروپایی رصد زمین است که برای افزایش دقت پیش‌بینی اوضاع جوی و شناخت بهتر تغییرات اقلیمی، در ۱۹ اکتبر سال ۲۰۰۶ از پایگاه فضایی روسیه در بایکونور قزاقستان به فضا پرتاب گردید (Callies et al., 2008; De Smedt et al., 2012; Munro et al., 2016). این ماهواره که جهت تکمیل ماهواره‌های متنوست^۶ متعلق به آژانس فضایی اروپا^۷ به فضا پرتاب گردید، پیچیده‌ترین ماهواره در نوع خود بوده و به ده‌ها ابزار برای سنجش آنگوهای آب‌وهوایی و ارسال اطلاعات به زمین مجهز است (Livschitz and Peres, 2006; Theys et al., 2021; Hao et al., 2014; Klaes et al., 2013). ماهواره‌ی MetOp-A مجهز به سنجنده‌هایی متعددی است که در مورد فراسنج‌های متفاوتی مانند دما، رطوبت، جهت و سرعت باد، سطح آزون و آلاینده‌های هوا، اطلاعات را از سه فضای خشکی، جو و اقیانوس، با دقت و کیفیت بی‌نظیری داده‌برداری نموده و در اختیار علاقه‌مندان قرار می‌دهد (Van Geffen et al., 2008; Valks et al., 2011; Nowlan et al., 2011; Van Gent et al., 2013). یکی از مهم‌ترین سنجنده‌های این ماهواره که به اندازه‌گیری

مبنای پژوهش‌های پرشماری در زمینه‌ی پایش SO₂ گردید (De Smedt et al., 2008; Yan et al., 2014; De Smedt et al., 2017; Wang et al., 2015). وضوح افقی خوب در کنار وضوح زمانی روزانه، این سنجنده را برای اهداف نظارت بلندمدت مناسب کرده‌است (Zhang et al., 2017). براساس داده‌های پایگاه تحقیقات جوی جهانی، کشور ایران بعد از کشورهای چین، ایالات متحده، هند، عربستان، روسیه، آفریقای جنوبی، اندونزی و قزاقستان بیش‌ترین تولید کننده‌ی SO₂ در جهان است (Curtis et al., 2006; JRC/PBL, 2017). از میزان انتشار SO₂ برآورد شده از ۴۹۱ منبع قابل توجه در سراسر جهان، حدود ۱۵۰۰ کیلو تن (هر کیلو تن معادل ۱۰۰۰ تن است) از ۱۵ منبع عمده در ایران در سال ۲۰۱۴ تولید گردید (Fioletov et al., 2016). قبلاً نیز، آلودگی SO₂ در ایران توسط پژوهشگران خارجی دیگری گزارش گردید (Fioletov et al., 2013; Krotkov et al., 2015a). هم‌چنین SO₂ تروپوسفری از زوایای گوناگون توسط برخی از پژوهشگران داخلی مورد کنکاش قرار گرفته‌است. از جمله آن‌ها می‌توان؛ به بررسی تغییرات مکانی و زمانی آلاینده‌ی SO₂ و دیگر آلاینده‌های هوا در تهران (نورپور و فیض، ۱۳۹۳)، برآورد مقدار مرگ‌ومیر ناشی از آلاینده‌ی SO₂ تروپوسفری در شهر همدان (لیلی و همکاران، ۱۳۹۵)، بررسی غلظت آلاینده‌های هوا در شهر شیراز (مجلسی‌نصر و همکاران، ۱۳۹۵)، پهنه‌بندی توزیع آلاینده‌های شاخص آلودگی هوا در شهر اصفهان و برآورد مرگ‌ومیر منتسب به آن (جعفری و همکاران، ۱۳۹۵) و بررسی آلاینده‌ی SO₂ و اثرات آن در بروز موارد بیماری و مرگ در بوشهر (گراوندی و همکاران، ۱۳۹۵) مورد واکاوی قرار گرفت. نتایج این مطالعات نشان‌داد، سطح انتشار آلاینده‌ی SO₂ در برخی از مناطق ایران خطرناک است. با این حال، اگرچه SO₂ از جنبه‌های متعددی در ایران مورد مطالعه قرار گرفته‌است، اما با توجه به خطراتی که برای سلامت افراد ساکن در مناطق آلوده دارد، هنوز پرسش‌های زیادی در خصوص توزیع زمانی- مکانی،

رستری بر اساس مرز جغرافیایی ایران استخراج و تحلیل گردید.

نتایج و بحث برآورد بلندمدت

پارامترهای آمار توصیفی و توزیع فضایی SO_2 تروپوسفری ایران طی سال‌های ۲۰۲۰ - ۲۰۰۷ بر حسب میکروگرم بر مترمکعب ($\mu g/m^3$) در جدول ۱ و شکل ۲ آمده‌است. براساس جدول مربوطه، میانگین غلظت SO_2 تروپوسفر ایران $28/5 \mu g/m^3$ و بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار برآورد شده به ترتیب برابر با $200/9 \mu g/m^3$ و $1/70 \mu g/m^3$ با انحراف معیار $15/9 \mu g/m^3$ برآورد گردید (جدول ۱ و شکل ۱: الف). به لحاظ مکانی نیز، استان خوزستان دارای بالاترین میانگین غلظت SO_2 در ایران است و پس از آن ایلام، بوشهر، تهران، البرز، گیلان، مازندران و جنوب کرمان قرار دارند. در استان خوزستان نیز، بیش‌ترین میانگین غلظت SO_2 با مقدار بیش از $100 \mu g/m^3$ مربوط به جنوب غرب استان خوزستان (آبادان) است که انتشار آن تا شعاع چندین کیلومتری گسترش یافته‌است (شکل ۱: ب). استان خوزستان (به‌خصوص شهرهای آبادان، اهواز و ماهشهر) از مهم‌ترین نواحی صنعتی ایران است که به خاطر استقرار تأسیسات نفتی، پالایشگاهی، صنعتی و نیروگاهی، براساس گزارشات ارائه شده از آلوده‌ترین نواحی جهان به شمار می‌رود. سهم SO_2 تروپوسفری در کنار سایر آلاینده‌ها در این استان قابل توجه است. میزان SO_2 بر فراز تهران (پایتخت و بزرگ‌ترین کلان‌شهر ایران) نیز قابل توجه است. از دلایل بالابودن مقدار SO_2 تروپوسفری بر فراز تهران، می‌توان به عوامل متعدد جغرافیایی و انسانی اشاره نمود. استقرار شهر تهران در محیط نیمه محصور دامنه‌ی جنوبی ارتفاعات البرز، سبب می‌شود تا کوه‌های البرز در شمال و شرق آن، همانند سد از تهویه‌ی هوا جلوگیری نموده و شرایط را برای ماندگاری و تداوم SO_2 تروپوسفری فراهم آورد. حاکمیت شرایط وارونگی دما (اینورژن) و استقرار مداوم سیستم‌های پرفشار، از دیگر

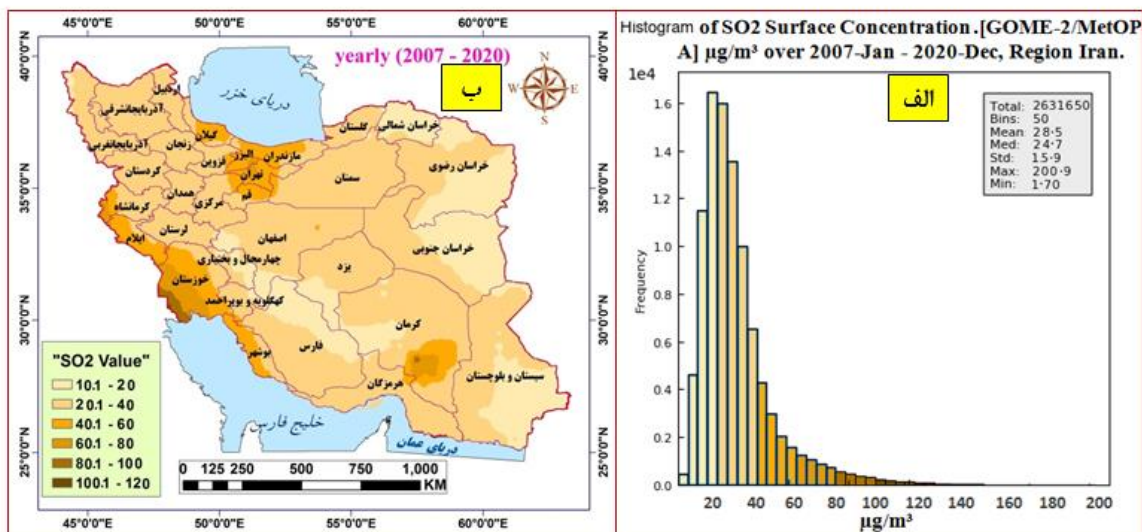
آلاینده‌های جوی از جمله SO_2 می‌پردازد، سنجنده‌ی GOME-2 است. سنجنده‌ی GOME-2 طیف وسیعی از ۲۴۰ تا ۷۹۰ نانومتر، با تفکیک طیفی ۰/۲۶ تا ۰/۵۱ نانومتر را پوشش داده و دارای زمان گذر استوایی ساعت ۹:۳۰ به وقت محلی در مدار خورشیدآهنگ است (Heue et al., 2011; Rix et al., 2012). قدرت تفکیک مکانی این سنجنده برای کانال‌های اصلی به دو صورت 40×80 کیلومتر و عرض اسکن ۱۹۲۰ کیلومتر و 40×40 کیلومتر با عرض اسکن ۹۶۰ کیلومتر است که به صورت روزانه کل جهان را پوشش می‌دهد (Tilstra et al., 2010; Stavrakou et al., 2015). استفاده از محصولات SO_2 سنجنده‌ی GOME-2، به دلیل تفکیک طیفی و خوب و کالیبراسیون بهینه در مقایسه با ابزار مشابه، مبنای مطالعات پرشماری در جهان قرار گرفته‌است (Eisinger et al., 2008; Valks et al., 2011; Irie et al., 2011; Theys et al., 2013; Hewson et al., 2013). در این تحقیق نیز از مشاهدات SO_2 تروپوسفری سنجنده‌ی GOME-2 در بازه‌ی زمانی سال‌های ۲۰۲۰ - ۲۰۰۷ استفاده شد. داده‌های مورد استفاده برآوردی از وزن مولکول‌های SO_2 در یک مترمکعب از هوای تروپوسفر است که بر حسب واحد میکروگرم بر مترمکعب ($\mu g/m^3$) بیان می‌شود. این داده‌ها با تفکیک زمانی ماهانه و مکانی 40×40 کیلومتر استخراج و پس از اعمال کنترل کیفی و پردازش‌های لازم، به مقادیر ماهانه، فصلی و سالانه تبدیل گردید (Timofeev et al., 2019). تعداد یاخته‌های (پیکسل) با تفکیک مکانی فوق برای سنجنده‌ی GOME-2 در ایران ۱۰۳۰ یاخته‌است. بر این اساس، ابعاد آرایه‌های ایجاد شده، به ترتیب 1030×168 برای ماه‌ها و 1030×56 برای فصل‌های سال است (اعداد ۱۶۸ و ۵۶ به ترتیب نمایان‌گر ماه‌ها و فصول سال در طول سری زمانی است). داده‌های مورد استفاده که به صورت رقومی بوده و مقدار SO_2 ارزش عددی به ازای هر یاخته (پیکسل) است، با اعمال الگوریتم‌های زمین آماری در محیط نرم‌افزارهای تخصصی (Arc GIS, ENVI)، به داده‌های شبکه‌ای و جداول اطلاعاتی تبدیل شد و خروجی‌های لازم به صورت

سری زمانی SO₂ تروپوسفری در طی ۱۶۸ ماه متوالی (۲۰۲۰ - ۲۰۰۷)، حاکی از سیر کاهشی روند انتشار SO₂ در تروپوسفر ایران است. به طوری که میانگین آن از ۳۵ μg/m³ در سال ۲۰۰۷ به ۲۶ μg/m³ در سال ۲۰۲۰ (۹ μg/m³ یا ۲۵٪) کاهش یافت (شکل ۴). کاهش غلظت SO₂ تروپوسفری در ایران در حالی اتفاق افتاده است، که ایران در سال ۱۳۸۴ به پروتکل کیوتو ملحق شده و در خصوص کاهش گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف انرژی، نفت و گاز، کشاورزی، منابع طبیعی و جنگلداری اعلام همکاری نموده است. از سوی دیگر، تجزیه و تحلیل نوسان سالانه SO₂ در ایران نشان می‌دهد که غلظت آن با تولید نفت خام (شکل اولیه تولید انرژی در ایران) در ارتباط است. جهت ارتباط سنجی، غلظت سالانه SO₂ و مقدار تولید نفت خام طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۰ (اوپک، ۲۰۲۰) مورد بررسی قرار گرفت. روند کاهشی غلظت SO₂ با کاهش تولید نفت خام ایران که طی سال‌های اخیر (۲۰۲۰-۲۰۱۵) با تحریم نفتی ایالات متحده تشدید و مانع تجارت نفت ایران شد، ارتباط معناداری (R² = ۷۱٪) را نشان داد. در این میان سال‌هایی که به استناد گزارشات اوپک (۲۰۱۸ - ۲۰۱۷ - ۲۰۱۵ - ۲۰۱۳ - ۲۰۱۲) از افزایش تولید نفت در مقایسه با دیگر سال‌ها برخوردار بودند، هم زمان مقادیر SO₂ نیز در این سال‌ها افزایش می‌یافت (شکل ۳).

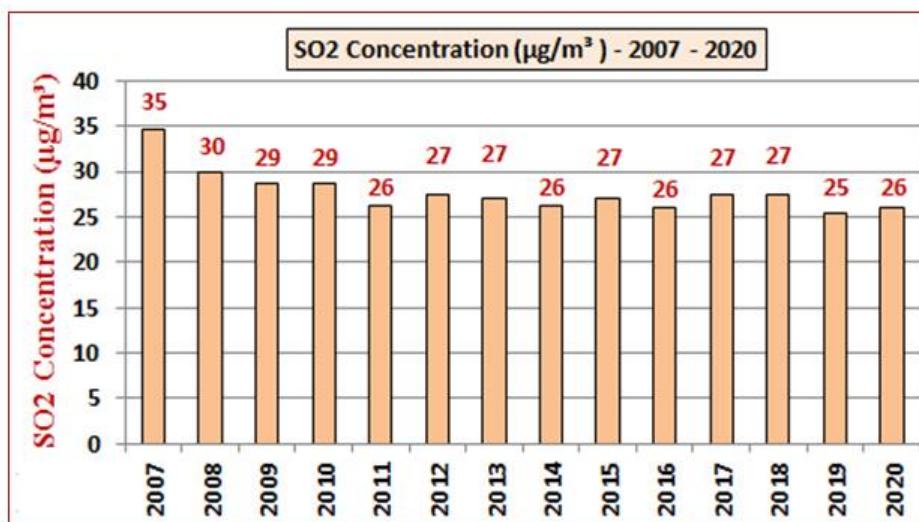
جدول ۱. پایش غلظت SO₂ تروپوسفری (μg/m³) در ایران (۲۰۲۰ - ۲۰۰۷)

مقدار (μg/m ³)	متغیر	ردیف
۲۸/۵	میانگین غلظت آلاینده‌ی SO ₂	۱
۲۰۰/۹	بیشینه‌ی غلظت آلاینده‌ی SO ₂	۲
۱/۷۰	کمینه‌ی غلظت آلاینده‌ی SO ₂	۳
۲۴/۷	میان غلظت آلاینده‌ی SO ₂	۴
۱۵/۹	انحراف معیار غلظت آلاینده‌ی SO ₂	۵

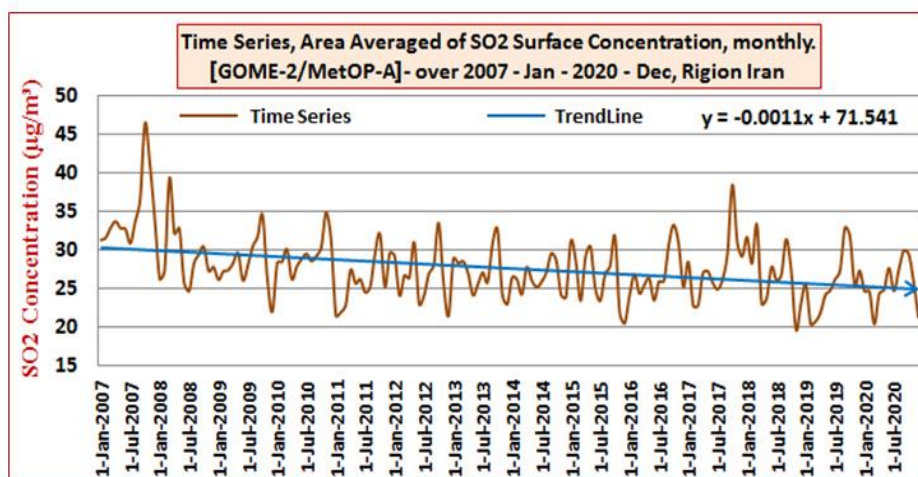
ویژگی‌های اقلیمی منطقه هستند که شرایط را برای تشدید آلودگی هوای شهر تهران و نواحی پیرامونی در برخی از ایام سال ایجاد می‌نماید. در کنار عوامل طبیعی مطرح شده، می‌توان به استقرار کارخانه‌ها و صنایع در سطح شهر (بوئیه در غرب و جنوب غرب آن)، نیروگاه‌های تولید برق و شرکت‌های پالایش نفت اشاره نمود که بر میزان SO₂ تروپوسفری می‌افزاید. ناحیه‌ی ساحلی شمال ایران (استان‌های مازندران و گیلان) هم به دلیل استقرار نیروگاه برق نکا از یک سو و از سوی دیگر به دلیل برخورداری از شرایط مناسب آب‌وهوایی و توسعه‌ی به نسبت مطلوب زیرساختی از تراکم بالای جمعیت برخوردار بوده و علاوه بر این، قرار گرفتن این ناحیه در ردیف مناطق هدف گردشگری، زمینه‌ساز حجم بالای ترافیک و افزایش تمرکز SO₂ در این ناحیه می‌شود. دیگر مناطق اشاره شده نیز، به دلیل صنعتی بودن، ناوگان فرسوده و وجود کارخانه‌های سیمان و نیروگاه‌های برق مبتنی بر سوخت گازوئیل یا مازوت (جنوب استان کرمان) غلظت نسبتاً زیادی از SO₂ را در طول سال تجربه می‌نمایند. نواحی اشاره شده براساس استانداردهای کیفی هوا از نظر SO₂ تروپوسفری آلوده هستند. استانداردهای کیفی هوا به غلظت قابل قبول آلاینده در جوی که جامعه‌ای را احاطه می‌کند اشاره دارد (WHO, 2006). استانداردهای کیفی مختلفی برای میانگین سالانه‌ی SO₂ در برخی از کشورهای جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به استاندارد انگلیس (۸۰ μg/m³)، کانادا و آلبرتا (۳۰ μg/m³)، نواحی مسکونی و روستایی هند (۶۰ μg/m³)، نواحی تجاری و صنعتی هند (۱۲۰ μg/m³)، نواحی مسکونی و روستایی و انتاریو (۵۰ μg/m³)، نواحی صنعتی و تجاری اونتاریو (۱۳۰ μg/m³)، مانیتوبا (۶۰ μg/m³) و .. اشاره نمود. از میان استانداردهای مربوط به آلاینده‌ی SO₂، استاندارد آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) که میانگین سالانه‌ی (۸۰ μg/m³) را مصوب نموده است از کاربرد بیش‌تری در میان کشورهای جهان برخوردار است (عرفان‌منش و افیونی، ۱۳۹۴). واکاوی



شکل ۲. الف: پارامترهای آماری و ب: توزیع فضایی SO₂ تروپوسفری (µg/m³) در ایران (۲۰۰۷-۲۰۲۰)

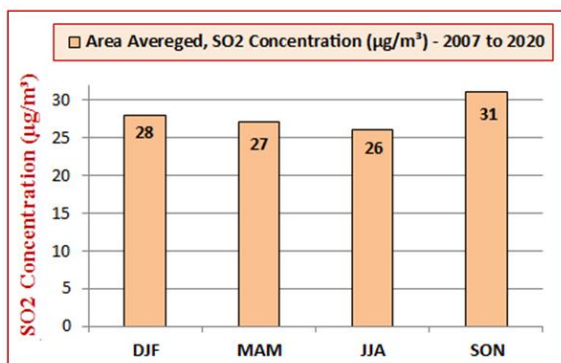


شکل ۳. نمودار میانگین سالانه‌ی SO₂ تروپوسفری (µg/m³) در ایران (۲۰۰۷-۲۰۲۰)



شکل ۴. نمودار سری زمانی میانگین ماهانه‌ی SO₂ تروپوسفری (µg/m³) طی ۱۶۸ ماه متوالی در ایران (۲۰۰۷-۲۰۲۰)

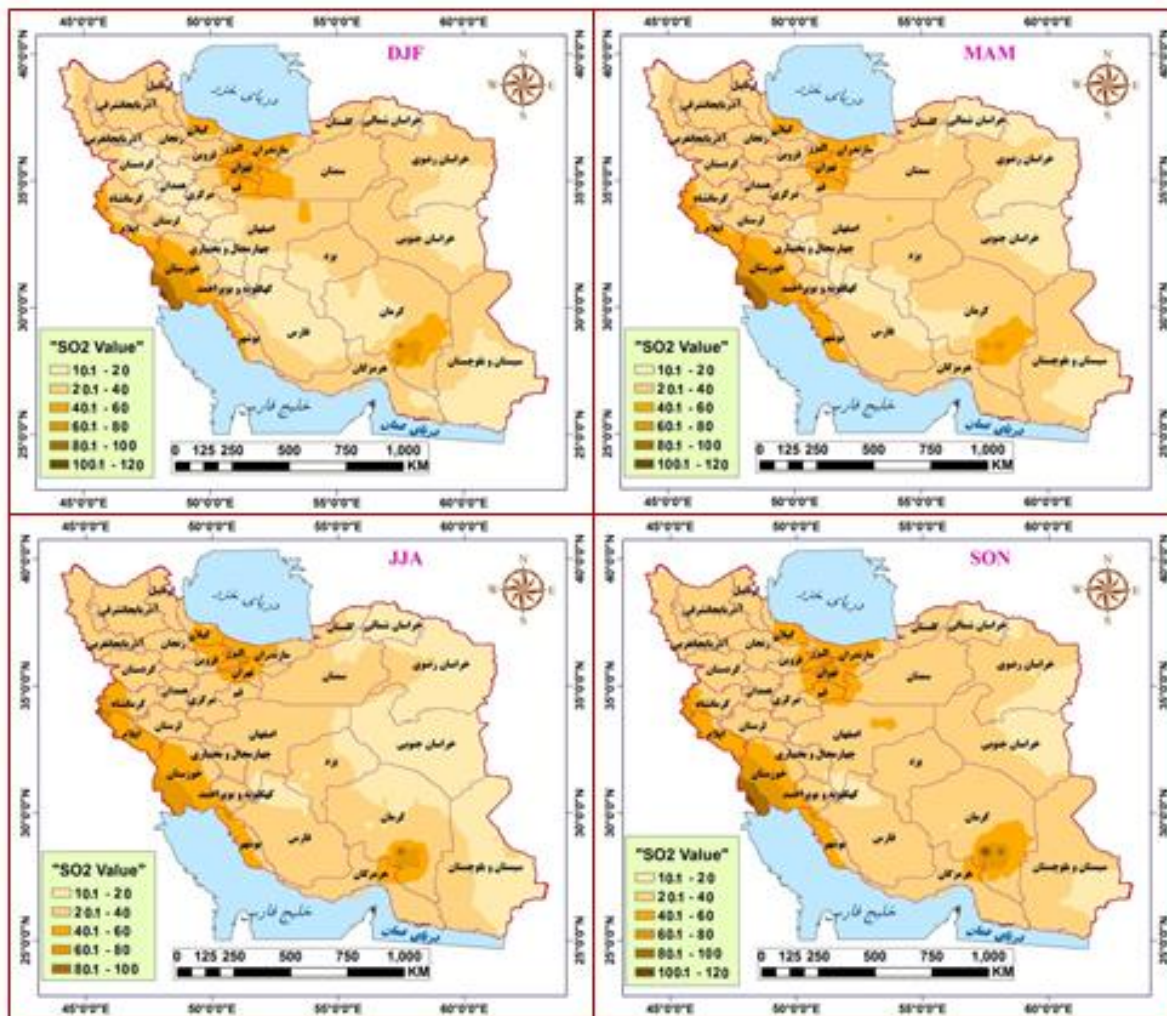
تولید برق در این ناحیه فعالیت می‌کنند. در این میان، بیش‌ترین غلظت SO₂ در استان خوزستان مشاهده شده و به شدت تحت تأثیر غلظت بالای SO₂ قرار دارد. نیروگاه رامین، پتروشیمی مارون و فولاد خوزستان در اهواز به همراه شرکت پتروشیمی بندر امام در ماهشهر، پالایشگاه آبادان، چاه‌های نفت و سوزاندن گازهای ترش سولفور توسط مشعل‌های عظیم (فلرینگ)، اصلی‌ترین منبع SO₂ در این استان هستند. پس از استان خوزستان، غلظت SO₂ در استان بوشهر قابل توجه است که با صنایع نفت و گاز در ارتباط بوده و صناعی از جمله شرکت پتروشیمی خارک، مجتمع پارس جنوبی و مجتمع گاز عسلویه از مهم‌ترین کانون‌های انتشار آن است. پالایش نفت و نیروگاه حرارتی بندرعباس نیز، استان هرمزگان را به عنوان مناطق آلوده معرفی می‌کند. غلظت SO₂ در مناطق دیگری از جمله: تهران، البرز، قزوین، گیلان، مازندران، اصفهان و جنوب کرمان قابل توجه است. نیروگاه‌ها، شرکت پالایش نفت تهران و فعالیت حمل‌ونقل عمدتاً مسئول انتشار SO₂ در تهران هستند. در گیلان و مازندران (نیروگاه نکا)، قزوین (نیروگاه شهید رجایی)، اصفهان (فولاد مبارکه و فولاد اصفهان، شرکت نفت سپاهان، نیروگاه اسلام آباد و فعالیت حمل و نقل) باعث افزایش غلظت SO₂ در اصفهان می‌شوند. نقطه‌ی داغ دیگری در جنوب استان کرمان به دلیل فعالیت نیروگاه سیکل ترکیبی کهنوج مشاهده می‌شود که از مهم‌ترین کانون‌های انتشار SO₂ در تمامی فصل‌ها است.



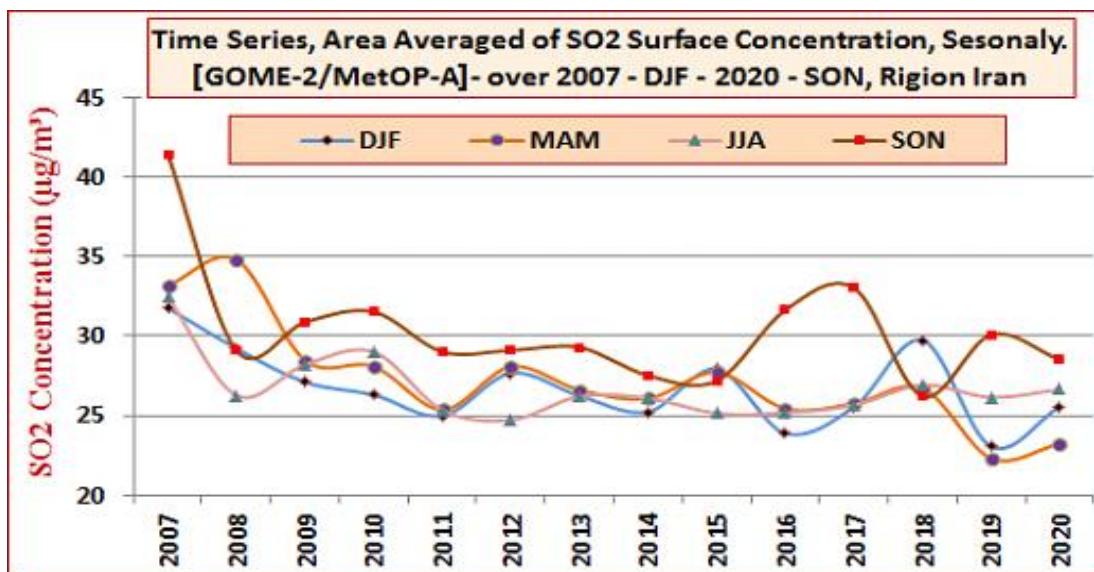
شکل ۵. نمودار میانگین فصلی SO₂ تروپوسفری (µg/m³) در ایران (۲۰۰۷-۲۰۲۰)

برآورد فصلی

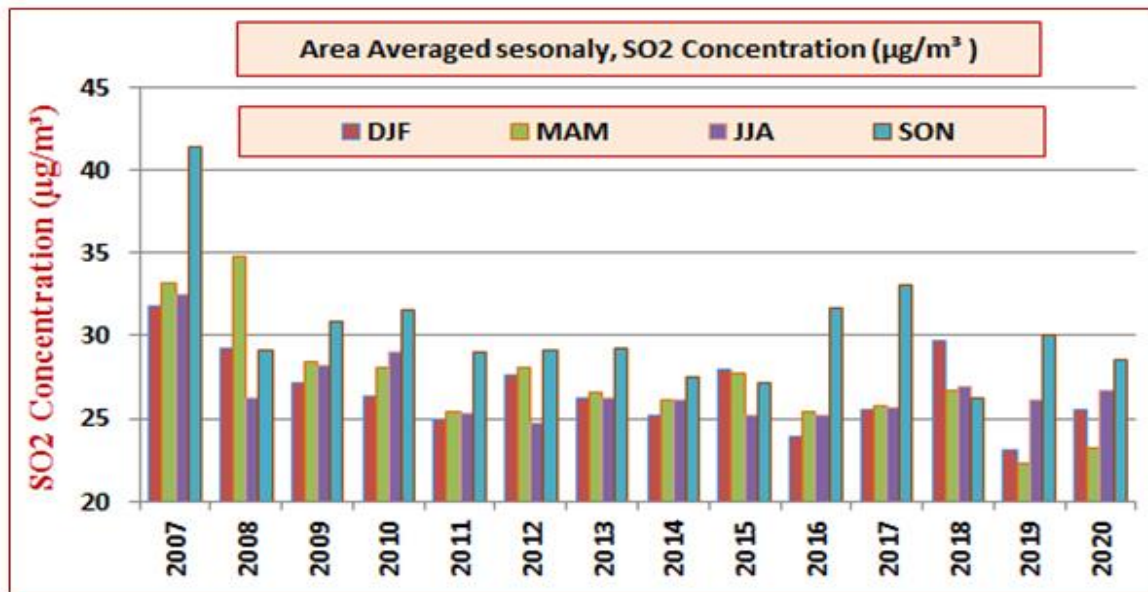
نمودار و نقشه‌های مربوط به مقادیر فصلی SO₂ در ایران برای فصل‌های بهار (MAM)، تابستان (JJA)، پاییز (SON) و زمستان (DJF) در شکل‌های ۵ تا ۸ مشاهده می‌شود. نتایج نشان داد؛ غلظت SO₂ در پاییز (۳۱ µg/m³) و زمستان (۳۱ µg/m³) حداکثر و در تابستان (۲۶ µg/m³) و بهار (۲۷ µg/m³) حداقل است (شکل‌های ۵ و ۸ - ۷). از آن جایی که نیروگاه‌های برق در فصول سرد عمدتاً از مازوت به جای گاز طبیعی استفاده می‌کنند و همچنین عمق لایه‌ی مرزی تروپوسفری در پاییز و زمستان بسیار کم‌تر از تابستان و بهار است، منجر به افزایش غلظت SO₂ در دوره‌ی سرد سال می‌شود (Eelossy et al., 2014). مطالعات انجام شده در ایالات متحده نشان داد؛ ۲۵ درصد SO₂ ناشی از فعالیت‌های انسانی، ۴۵ - ۴۰ درصد از نیروگاه‌های تولید برق و ۳۰ درصد از صنعت است (Georgoulas et al., 2019). بررسی نقشه‌ها نشان داد، توزیع فضایی SO₂ در تمامی فصول ناهمگن بوده و از الگوی توزیع بلندمدت تبعیت می‌نماید. در همه‌ی فصل‌ها غلظت بالای SO₂ مربوط به مناطق استقرار نیروگاه‌های تولید برق، صنایع، پالایشگاه‌ها، تأسیسات نفتی و ... است. از جمله این مناطق می‌توان به ناحیه‌ی پیوسته‌ای از جنوب غرب استان کرمانشاه تا جنوب استان بوشهر، پهنه‌ی حاکم بر استان‌های تهران، البرز، مازندران و گیلان و همچنین ناحیه‌ی در جنوب استان کرمان (کهنوج) اشاره نمود که به فراخور فصل سال، ویژگی‌های جغرافیایی و افزایش یا کاهش فعالیت‌های گوگردزا، غلظت SO₂ بر فراز آنها متغیر است (شکل ۶). براساس طبقه‌بندی، مقادیر SO₂ در تمامی فصل‌ها بر فراز این نواحی بیش از ۸۰ µg/m³ است که به لحاظ استانداردهای کیفی هوا، آلوده محسوب می‌شوند. بالا بودن غلظت SO₂ در این نواحی می‌تواند تبعات نامطلوبی بر سلامت و محیط زیست ساکنان به دنبال داشته‌باشد. بیش‌تر نقاط داغ در جنوب غرب ایران و سواحل خلیج فارس واقع شده‌است که بسیاری از صنایع نفت و گاز و نیروگاه‌های



شکل ۶. توزیع فضایی میانگین فصلی SO₂ تروپوسفری (μg/m³) در گستره‌ی ایران طی دوره‌ی آماری (۲۰۰۷-۲۰۲۰)



شکل ۷. نمودار سری زمانی میانگین فصلی SO₂ تروپوسفری (μg/m³) در ایران (۲۰۰۷-۲۰۲۰)

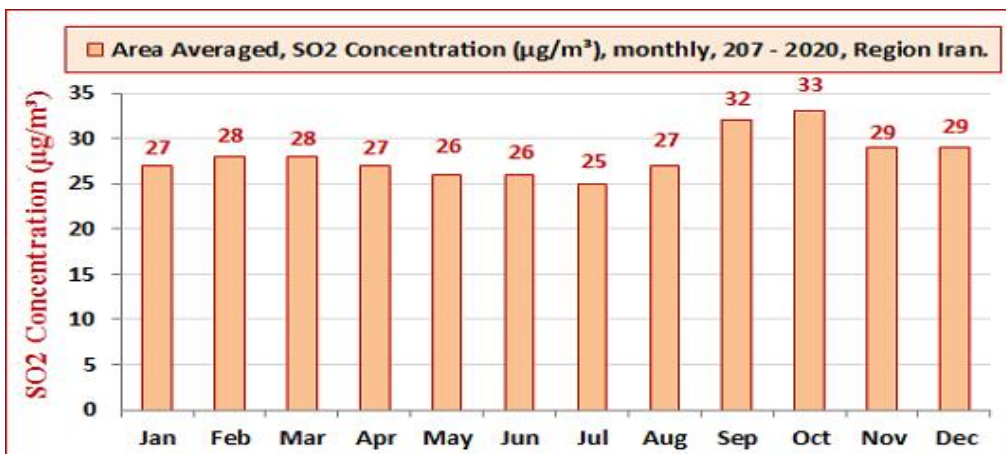


شکل ۸. نمودار میانگین فصلی SO₂ (به تفکیک سال) تروپوسفری (µg/m³) در ایران (۲۰۰۷-۲۰۲۰)

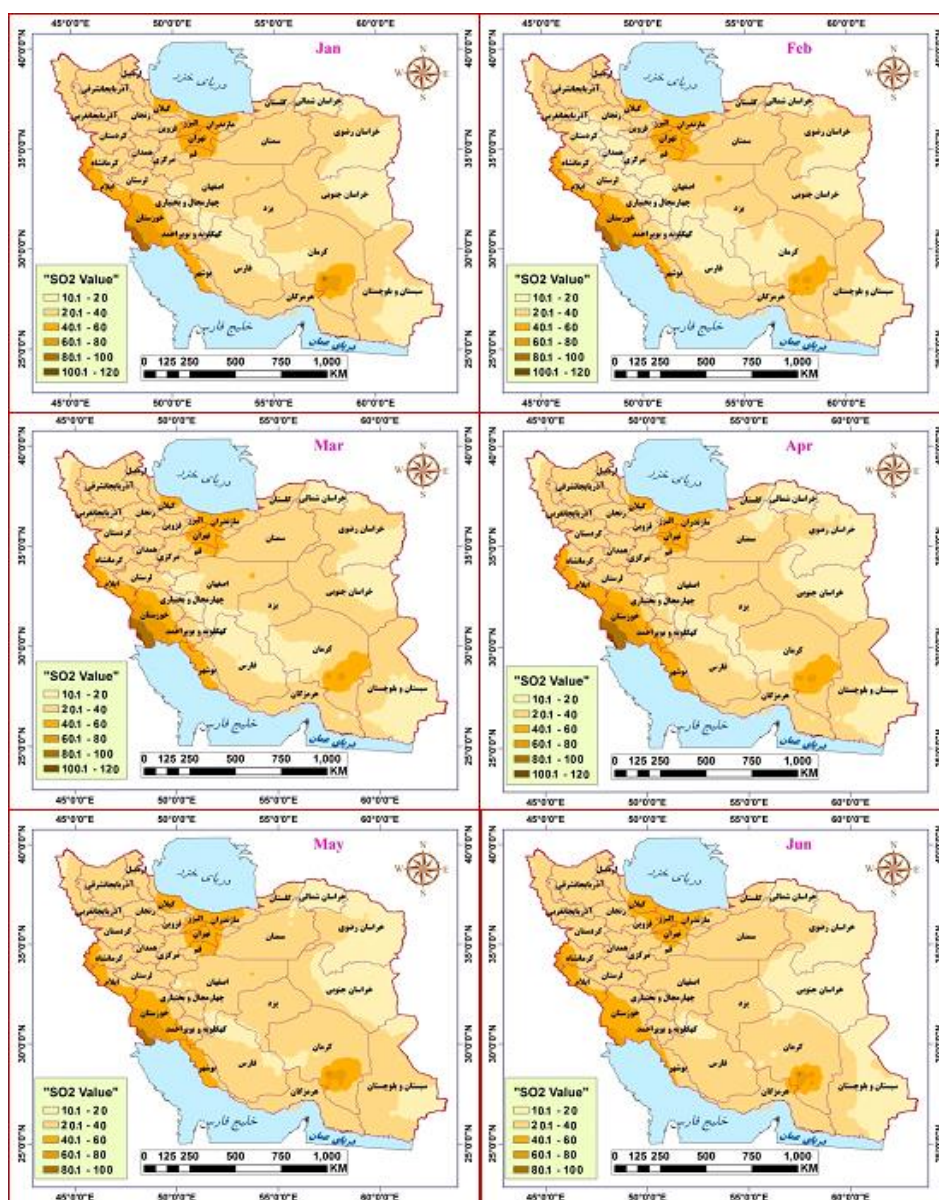
برآورد ماهانه

ایام سال و موقعیت‌های هواشناسی متفاوت است. همان‌طوری که در مباحث بالا اشاره‌گردید، بالا بودن حجم ترافیک (به دلیل باز بودن مدارس، دانشگاه‌ها و ادارات)، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی برای تأمین گرمایش فضاهای مسکونی، اداری، آموزشی و بهداشتی و استفاده از مازوت جهت تأمین سوخت نیروگاه‌های برق از عوامل مؤثر بر افزایش مقدار SO₂ تروپوسفری در دوره سرد سال است. علاوه بر این، از عوامل اقلیمی (جغرافیایی) مؤثر در افزایش SO₂ در دوره سرد سال، می‌توان به وارونگی‌های دمایی (اینورژن) و کاهش ضخامت لایه مرزی سیاره‌ای (ABL) اشاره نمود که بر اثر استقرار سیستم‌های پرفشار پایدار جوی تشکیل می‌شوند. هر دو پدیده از ویژگی‌های اصلی شرایط آب‌وهوایی ایران در دوره سرد سال است. این یافته‌ها با نتایج معدود مطالعات انجام شده در ایران از جمله رئیس پور و خسروی (۱۴۰۰) منطبق است. از آن‌جایی که چشمه‌های اصلی SO₂ تروپوسفری شامل فعالیت‌های انسانی و چشمه‌های طبیعی است (Liu et al., 2018a)، بر همین اساس به خاطر تفاوت در کانون‌های انتشار، غلظت SO₂ تروپوسفری در ایران از مکانی به مکان دیگر متفاوت است.

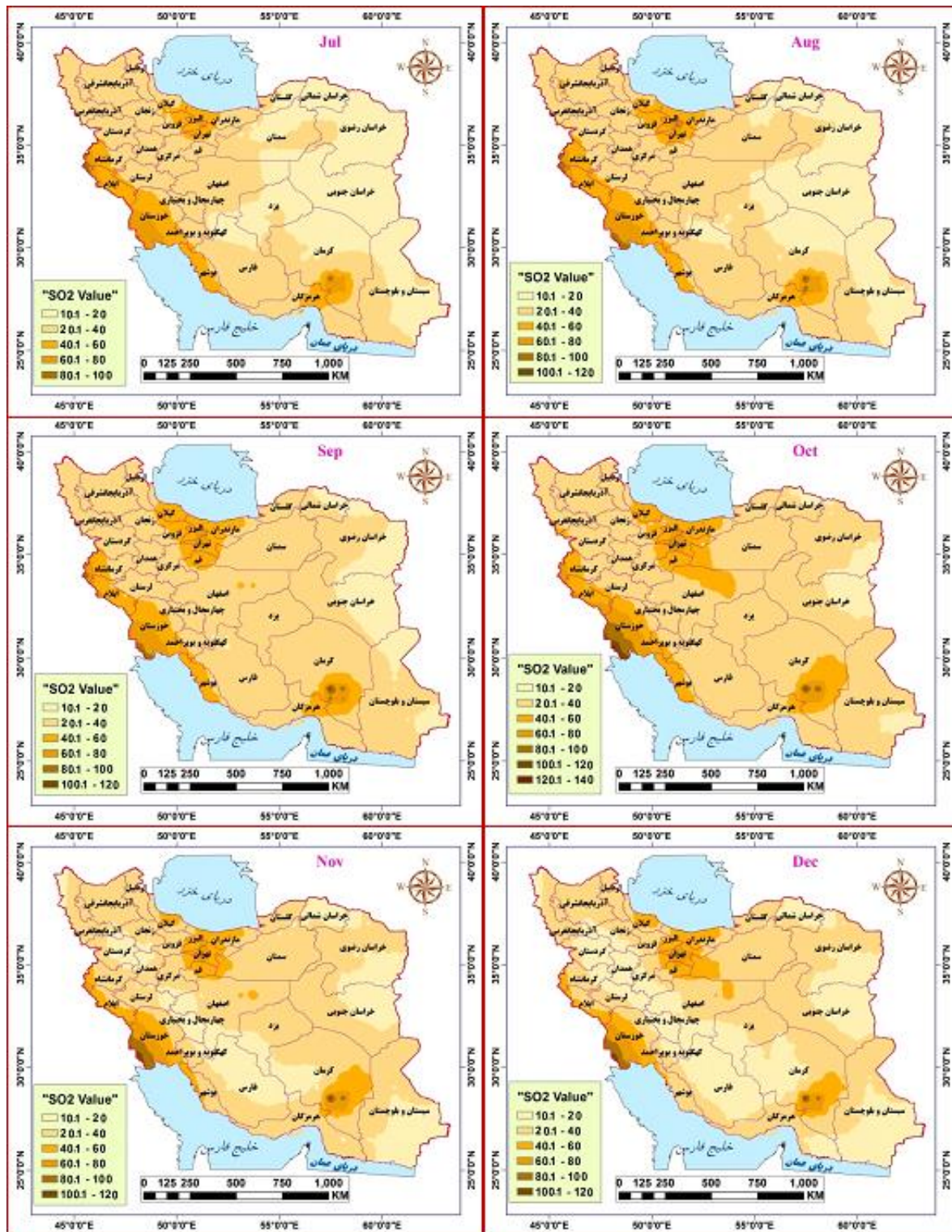
برآورد ماهانه‌ی غلظت SO₂ تروپوسفری طی سال‌های ۲۰۲۰ - ۲۰۰۷ در شکل‌های ۹ تا ۱۱ آمده‌است. براساس این شکل‌ها، بیش‌ترین میانگین ماهانه‌ی SO₂ در ماه‌های اکتبر و سپتامبر (ماه‌های سرد سال)، و کم‌ترین مقدار آن در ماه‌های ژوتن و ژولای (ماه‌های گرم سال) برآورد گردید (شکل ۹). همچنین برآورد فضایی غلظت SO₂ ماهانه، حاکی از توزیع ناهمگن آن در ایران است. این تفاوت در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به خوبی مشاهده می‌شود. اگرچه میانگین ماهانه‌ی توزیع SO₂ تروپوسفری در ماه‌های مختلف از نوسان بالایی برخوردار است، ولی توزیع فضایی آن از لگوی همسانی تبعیت می‌نماید. بررسی الگوهای ماهانه همانند الگوی فصلی نشان‌داد، غلظت بالای SO₂ تروپوسفری مربوط به مناطقی است که با تراکم بالای صنایع، تأسیسات نفت و گاز، نیروگاه‌های برق و ترافیک بالای وسایل نقلیه‌ی موتوری مواجه هستند. از جمله‌ی این مناطق می‌توان به جنوب غرب ایران (از ایلام تا بوشهر)، تهران، البرز، قزوین، مازندران، گیلان، اصفهان و جنوب استان کرمان اشاره نمود. غلظت SO₂ در نواحی اشاره شده و دیگر نواحی ایران، با توجه به فعالیت منابع انتشار SO₂



شکل ۹. نمودار میانگین ماهانه SO₂ تروپوسفری (µg/m³) در گستره‌ی ایران (۲۰۲۰-۲۰۰۷)



شکل ۱۰. توزیع فضایی میانگین ماهانه SO₂ تروپوسفری (µg/m³) در گستره‌ی ایران طی دوره‌ی آماری (۲۰۲۰-۲۰۰۷)



شکل ۱۱. توزیع فضایی میانگین ماهانه SO₂ تروپوسفری (µg/m³) در گستره‌ی ایران طی دوره‌ی آماری (۲۰۲۰-۲۰۰۷)

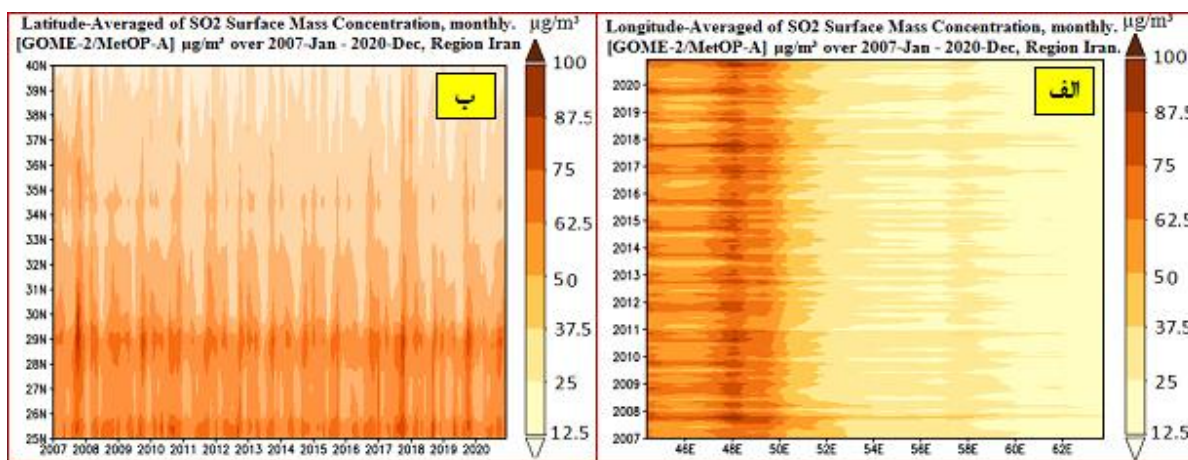
پراکنش مداری- نصف‌النهاری

علاوه بر وجود تفاوت‌های زمانی (سالانه، فصلی و ماهانه) در مقدار SO₂ تروپوسفری ایران، تفاوت این آلاینده

در راستای مدارها و نصف‌النهارها نیز قابل توجه است. بر همین اساس، برآورد مقدار SO₂ در راستای طول و عرض جغرافیایی با استفاده از پروفیل‌های هوفمولر صورت

تروپوسفری در ایران مشهود بوده ولی سیر کاهشی روند آن مشخص است. شدت و ضعف غلظت SO₂ تروپوسفری (تیره و روش بودن رنگ‌های مربوطه) به دلیل افزایش/ کاهش غلظت SO₂ در دوره‌های سرد و گرم متوالی مربوط به سری زمانی است. به طور کلی غلظت SO₂ تروپوسفری ایران هم در راستای طول جغرافیایی (از غرب به شرق) و هم در راستای عرض جغرافیایی (از جنوب به شمال) کاهش می‌یابد. بالا بودن غلظت SO₂ تروپوسفری در نواحی غربی و جنوبی ایران با تمرکز کانون‌های تولید و انتشار SO₂ در این نواحی در ارتباط است. این نواحی از ایران به دلیل استقرار تأسیسات نفت و گاز، نیروگاه‌های تولید برق، پالایشگاه‌ها و ... بیشترین میزان SO₂ را به درون تروپوسفر وارد می‌نمایند.

گرفته‌است تا به آشکارسازی تفاوت‌های موجود کمک نماید. پروفیل‌های هوف‌مولر نیمرخ‌های عمودی و افقی محسوب می‌شوند که برای ارزیابی یا تشخیص رفتار یک متغیر جوی، در راستای طول و عرض جغرافیایی در طی زمان به کار می‌روند. در این نمودارها، ابعاد چهارگانه ژئوفیزیکی شامل؛ طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، تراز و زمان دو به دو به صورت متناظر با هم متغیر یا ثابت هستند. از ترکیب این چهار بُعد به صورت دو به دو، انواع مختلفی از نمودارهای هوف‌مولر ترسیم می‌شود (Hovmoller, 1949). نتایج حاصل از این پروفیل‌ها، به خوبی تبیین‌کننده توزیع و تغییرات SO₂ تروپوسفری در راستای طول و عرض جغرافیایی در ایران است (شکل ۱۲). براساس این نمودارها، اگرچه در طول سری زمانی مورد مطالعه افت‌وخیزهای چشم‌گیری در مقادیر SO₂



شکل ۱۲. الف: پراکنش نصف‌النهاری و ب: پراکنش مداری توزیع SO₂ تروپوسفری (µg/m³) در گستره‌ی ایران (۲۰۲۰-۲۰۰۷)

زمانی - فضایی توزیع SO₂ تروپوسفری در ایران با استفاده از مشاهدات سنجنده‌ی GOME-2 ماهواره‌ی MetOp-A طی سال‌های ۲۰۰۷ - ۲۰۲۰ است. نتایج حاصل نشان داد؛ میانگین SO₂ تروپوسفری در ایران ۲۸/۵ µg/m³ است که در این میان، بیش‌ترین/ کم‌ترین مقدار مشاهده شده به ترتیب ۲۰۰/۹ µg/m³ و ۱/۷ µg/m³ با انحراف معیار ۱۵/۹ µg/m³ بوده‌است. به لحاظ پراکنش مکانی نیز، بیش‌ترین غلظت آلاینده‌ی SO₂ تروپوسفری بر فراز

نتیجه‌گیری

SO₂ یکی از مهم‌ترین آلاینده‌هایی است که سبب بروز خسارات جبران‌ناپذیر به محیط زیست، اقلیم و سلامت انسان‌ها در عصر حاضر می‌شود. امروزه به دلیل توسعه‌ی روزافزون صنایع و کارخانه‌جات و مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی، غلظت آلاینده‌های هوا به ویژه SO₂ تشدید گردیده و سبب بروز مشکلات عدیده‌ای برای سلامتی انسان شده‌است. هدف مطالعه‌ی حاضر، برآورد

فعال‌تر بودن کانون‌های انتشار از قبیل مصرف بیش‌تر سوخت مازوت، بالابودن حجم ترافیک، افزایش مقدار مصرف سوخت‌های فسیلی برای تأمین گرمایش فضاهای مسکونی و خدماتی و از سوی دیگر به دلیل شرایط هواشناسی حاکم در این دوره از سال (وقوع پدیده‌ی وارونگی دما و کاهش ضخامت لایه مرزی اتمسفری) است. بررسی توزیع فضایی غلظت SO₂ تروپوسفری نیز حاکی از تفاوت‌های معنادار فضایی آن در گستره‌ی جغرافیایی ایران است. تفاوت حاصله ناشی از توزیع ناهمگن کانون‌های تولید و انتشار SO₂ تروپوسفری در ایران است. زیرا که نواحی صنعتی و مناطق نفت خیز اغلب در نیمه‌ی غربی و جنوبی ایران واقع شده‌اند. بنابراین به تبعیت از توزیع ناهمگن فضایی کانون‌های انتشار SO₂ در گستره‌ی جغرافیایی ایران، پراکنش آلاینده‌ی مذکور نیز در نواحی مختلف، متفاوت است.

یادداشت‌ها

1. Sulfur dioxide
2. Bronchospasm
3. Hydroxide
4. Global Ozone Monitoring Experiment – 2
5. Meteorological Operational satellite – A
6. Meteorological satellites
7. the European Space Agency

گستره‌ی پیوسته‌ای از شمال غرب استان کرمانشاه تا غرب استان هرمزگان و استان‌های تهران، البرز، گیلان، مازندران، اصفهان و جنوب استان کرمان غالب است. در میان نواحی اشاره شده، بیش‌ترین غلظت SO₂ تروپوسفری مربوط به جنوب غرب استان خوزستان (آبادان) است که میانگین بلندمدت آن تا $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ نیز رسیده و انتشار آن در تمامی ماه‌ها و فصل‌های سال از غلظت بالایی برخوردار است. آنالیز حاصل از بررسی سری زمانی میانگین ماهانه‌ی توزیع SO₂ تروپوسفری در طول ۱۶۸ ماه متوالی (۲۰۲۰ - ۲۰۰۷)، حاکی از سیر کاهشی روند این گاز در گستره‌ی ایران است. به طوری که میانگین آن از $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ در سال ۲۰۰۷ به $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ در سال ۲۰۲۰ با کاهش ۲۵ درصدی همراه بوده است. واکاوی حاصل از خروجی مربوط به میانگین فصلی توزیع SO₂ نشان داد که بیشینه‌ی فصلی SO₂ در فصل پاییز ($31 \mu\text{g}/\text{m}^3$) و کمینه‌ی فصلی آن در فصل تابستان با مقدار $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ رخ می‌دهد. بیش‌ترین مقدار میانگین ماهانه‌ی آلاینده‌ی SO₂ نیز به ترتیب شامل ماه‌های اکتبر، نوامبر و ژانویه (ماه‌های سرد سال)، و کم‌ترین مقدار آن در ماه‌های ژوئن، ژولای (ماه‌های گرم سال) مشاهده شده‌است. غلظت بیش‌تر SO₂ در ماه‌ها و فصل‌های مربوط به دوره‌ی سرد سال، از یک سو به دلیل

فهرست منابع

- جعفری، ن؛ محمدی، ا؛ نعمتی، س؛ حاجی‌زاده، ی؛ شیروانی، ا؛ عبدالله‌نژاد، ع؛ شیروانی، ب (۱۳۹۵). پهنه‌بندی توزیع آلاینده‌های شاخص آلودگی هوا در شهر اصفهان و برآورد مرگ‌ومیر منتسب به آن، *مجله تحقیقات سلامت در جامعه*، ۲(۴)، صص ۲۵-۱۱.
- رئیس‌پور، ک؛ خسروی، ی (۱۳۹۹). بررسی پراکنندگی مکانی - زمانی گاز مونوکسید کربن در اتمسفر ایران با استفاده از داده‌های Aqua/AIRS، *مجله تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۷(۲)، صص ۱۳۷-۱۵۲.
- شرعی‌پور، ز؛ علی اکبری بیدختی، ع (۱۳۹۴). بررسی وضعیت NO₂ تروپوسفری ایران طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲، *مجله محیط‌شناسی*، ۴۰(۱)، صص ۷۸-۶۵.

- گراوندی، س؛ گودرزی، غ؛ وثوقی‌نیری، م؛ محمدی، م. ج (۱۳۹۴). برآورد موارد مرگ ناشی از بیماری‌های قلبی - عروقی و تنفسی و تعداد موارد سکته قلبی در اثر تماس با آلاینده دی اکسید گوگرد شهر اهواز، *مجله محیط‌شناسی*، ۴۱(۲)، صص ۳۵۰ - ۳۴۱.
- لیلی، م؛ بهرامی‌اصل، ف؛ حسام، م؛ ملامحمودی، م؛ سلحشور آرزین، س (۱۳۹۵). برآورد تعداد بیماری و مرگ منتسب به آلاینده‌های NO₂ و SO₂ با استفاده از مدل AirQ در شهر همدان، ۱۳۹۵، *مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی همدان*، ۲۳(۴)، صص ۳۲۲ - ۳۱۴.
- مجلسی‌نصر، م؛ انصاری‌زاده م؛ لیلی، م (۱۳۹۵). بررسی غلظت آلاینده‌های هوا و کیفیت هوا (AQI) در شهر شیراز طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۲، *مجله مهندسی بهداشت محیط*، ۳(۳)، صص ۱۹۲ - ۱۸۲.
- نورپور، ع؛ فیض، م. ع (۱۳۹۵). تعیین تغییرات مکانی و زمانی آلاینده‌های گوگرد دی‌اکسید، نیتروژن دی‌اکسید و انواع ذرات معلق با استفاده از تکنیک‌های GIS در شهر تهران، ۱۳۹۳، *مجله محیط‌شناسی*، ۴۰(۳)، صص ۷۳۸ - ۷۲۳.
- Abel, C., Horion, S., Tagesson, T., Brandt, M., & Fensholt, R. (2019). Towards improved remote sensing based monitoring of dryland ecosystem functioning using sequential linear regression slopes (SeRGS). *Remote Sensing of Environment*, 224, 317-332.
- Afif, C., Chélala, C., Borbon, A., Abboud, M., Adjizian-Gérard, J., Farah, W., & Rizk, T. (2008). SO₂ in Beirut: air quality implication and effects of local emissions and long-range transport. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1(3), 167-178.
- Beirle, S., Hormann, C., Penning de Vries, M., Dorner, S., Kern, C., & Wagner, T. (2014). Estimating the volcanic emission rate and atmospheric lifetime of SO₂ from space: a case study for Kilauea volcano, Hawaii. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(16), 8309-8322.
- Birk, Manfred, & Wagner, Georg. (2018). ESA SEOM-IAS – Measurement and ACS database SO₂ UV region (Version 1) [Data set]. Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1492582>
- Callies, J., Corpaccioli, E., Eisinger, M., Hahne, A., & Lefebvre, A. (2000). GOME-2-Metop's second-generation sensor for operational ozone monitoring. *ESA bulletin*, 102, 28-36.
- Cheng, W. L., Chen, Y. S., Zhang, J., Lyons, T. J., Pai, J. L., & Chang, S. H. (2007). Comparison of the revised air quality index with the PSI and AQI indices. *Science of the Total Environment*, 382(2-3), 191-198.
- Corradini, S., Guerrieri, L., Brenot, H., Clarisse, L., Merucci, L., Pardini, F., & Theys, N. (2021). Tropospheric Volcanic SO₂ Mass and Flux Retrievals from Satellite. The Etna December 2018 Eruption. *Remote Sensing*, 13(11), 2225.
- Curtis, L., Rea, W., Smith-Willis, P., Fenyves, E., & Pan, Y. (2006). Adverse health effects of outdoor air pollutants. *Environment international*, 32(6), 815-830.
- De Smedt, I., Müller, J. F., Stavrou, T., der A, R. V., Eskes, H., & Roozendael, M. V. (2008). Twelve years of global observations of formaldehyde in the troposphere using GOME and SCIAMACHY sensors. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(16), 4947-4963.
- De Smedt, I., Stavrou, T., Hendrick, F., Danckaert, T., Vlemmix, T., Pinardi, G., & Van Roozendael, M. (2015). Diurnal, seasonal and long-term variations of global formaldehyde columns inferred from combined OMI and GOME-2 observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(21), 12519-12545.
- De Smedt, I., Van Roozendael, M., Stavrou, T., Müller, J. F., Lerot, C., Theys, N., & Van Der, A. (2012). Improved retrieval of global tropospheric formaldehyde columns from GOME-2/MetOp-A addressing noise reduction and instrumental degradation issues. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(11), 2933-2949.
- Dimitropoulou, E., Hendrick, F., Pinardi, G., Friedrich, M. M., Merlaud, A., Tack, F., & Van Roozendael, M. (2020). Validation of TROPOMI tropospheric NO₂ columns using dual-scan multi-axis differential

- optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) measurements in Uccle, Brussels. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(10), 5165-5191.
- Duncan, B. N., Lamsal, L. N., Thompson, A. M., Yoshida, Y., Lu, Z., Streets, D. G., & Pickering, K. E. (2016). A space-based, high-resolution view of notable changes in urban NO_x pollution around the world (2005–2014). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(2), 976-996.
- Eisinger, M., & Burrows, J.P. (2008). Tropospheric sulfur dioxide observed by the GOME-2 instrument, 25 (2), 4177-4180.
- European Commission, Joint Research Centre (JRC)/Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL). (2017). Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), release version 4.1 and 4.2.
- Fattore, E., Paiano, V., Borgini, A., Tittarelli, A., Bertoldi, M., Crosignani, P., & Fanelli, R. (2011). Human health risk in relation to air quality in two municipalities in an industrialized area of Northern Italy. *Environmental research*, 111(8), 1321-1327.
- Fioletov, V. E., McLinden, C. A., Cede, A., Davies, J., Mihele, C., Netcheva, S., & O'Brien, J. (2016). Sulfur dioxide (SO₂) vertical column density measurements by Pandora spectrometer over the Canadian oil sands. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(7), 2961-2976.
- Fioletov, V. E., McLinden, C. A., Krotkov, N., Li, C., Joiner, J., Theys, N., & Moran, M. D. (2016). A global catalogue of large SO₂ sources and emissions derived from the Ozone Monitoring Instrument. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(18), 11497-11519.
- Fioletov, V. E., McLinden, C. A., Krotkov, N., Yang, K., Loyola, D. G., Valks, P., & Martin, R. V. (2013). Application of OMI, SCIAMACHY, and GOME-2 satellite SO₂ retrievals for detection of large emission sources. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19), 11-399.
- Fioletov, V. E., McLinden, C., Krotkov, N., & Li, C. (2015). Lifetimes and emissions of SO₂ from point sources estimated from OMI. *Geophysical Research Letters*, 42(6), 1969-1976.
- Fioletov, V., McLinden, C. A., Griffin, D., Theys, N., Loyola, D. G., Hedelt, P., & Li, C. (2020). Anthropogenic and volcanic point source SO₂ emissions derived from TROPOMI on board Sentinel-5 Precursor: first results. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(9), 5591-5607.
- Ghude, S. D., Beig, G., Fadnavis, S., & Polade, S. D. (2009). Satellite derived trends in NO₂ over the major global hotspot regions during the past decade and their inter-comparison. *Environmental Pollution*, 157(6), 1873-1878.
- Hao, N., Koukouli, M. E., Inness, A., Valks, P., Loyola, D. G., Zimmer, W., & Spurr, R. J. D. (2014). GOME-2 total ozone columns from MetOp-A/MetOp-B and assimilation in the MACC system. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(9), 2937-2951.
- Heue, K. P., Brenninkmeijer, C. A. M., Baker, A. K., Rauthe-Schoch, A., Walter, D., Wagner, T., & Ebinghaus, R. (2011). SO₂ and BrO observation in the plume of the Eyjafjallajökull volcano 2010: CARIBIC and GOME-2 retrievals. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(6), 2973-2989.
- Hewson, W., Bösch, H., Barkley, M. P., & Smedt, I. D. (2013). Characterisation of GOME-2 formaldehyde retrieval sensitivity. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(2), 371-386.
- Hormann, C., Sihler, H., Bobrowski, N., Beirle, S., Penning de Vries, M., Platt, U., & Wagner, T. (2013). Systematic investigation of bromine monoxide in volcanic plumes from space by using the GOME-2 instrument. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(9), 4749-4781.
- Huanhuan, Y., Liangfu, C., Lin, S., Jinhua, T., & Chao, Y. (2014, March). SO₂ columns over China: Temporal and spatial variations using OMI and GOME-2 observations. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 17, No. 1, p. 012027). IOP Publishing.
- Irie, H., Boersma, K. F., Kanaya, Y., Takashima, H., Pan, X., & Wang, Z. F. (2012). Quantitative bias estimates for tropospheric NO₂ columns retrieved from SCIAMACHY, OMI, and GOME-2 using a common standard for East Asia. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(10), 2403-2411.
- Jerrett, M., Shankardass, K., Berhane, K., Gauderman, W. J., Künzli, N., Avol, E., & McConnell, R. (2008). Traffic-related air pollution and asthma onset in children: a prospective cohort study with individual exposure measurement. *Environmental health perspectives*, 116(10), 1433-1438.

- Jiang, J., Zha, Y., Gao, J., & Jiang, J. (2012). Monitoring of SO₂ column concentration change over China from Aura OMI data. *International Journal of Remote Sensing*, 33(6), 1934-1942.
- Klaes, K. D., Ackermann, J., Anderson, C., Andres, Y., August, T., Borde, R., & Vazquez-Navarro, M. (2021). The EUMETSAT Polar System: 13+ Successful Years of Global Observations for Operational Weather Prediction and Climate Monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(6), E1224-E1238.
- Klimont, Z., Smith, S. J., & Cofala, J. (2013). The last decade of global anthropogenic sulfur dioxide: 2000–2011 emissions. *Environmental Research Letters*, 8(1), 014003.
- Krotkov, N. A., McLinden, C. A., Li, C., Lamsal, L. N., Celarier, E. A., Marchenko, S. V., & Streets, D. G. (2015). Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2014. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 15(19).
- Kumar, A., & Goyal, P. (2011). Forecasting of daily air quality index in Delhi. *Science of the Total Environment*, 409(24), 5517-5523.
- Leelosy, A., Molnár, F., Izsak, F., Havasi, A., Lagzi, I., & Meszaros, R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Open Geosciences*, 6(3), 257-278.
- Li, C., Krotkov, N. A., Leonard, P. J., Carn, S., Joiner, J., Spurr, R. J., & Vasilkov, A. (2020a). Version 2 Ozone Monitoring Instrument SO₂ product (OMSO₂ V2): new anthropogenic SO₂ vertical column density dataset. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(11), 6175-6191.
- Li, C., Krotkov, N. A., Leonard, P. J., Carn, S., Joiner, J., Spurr, R. J., & Vasilkov, A. (2020b). Version 2 Ozone Monitoring Instrument SO₂ product (OMSO₂ V2): new anthropogenic SO₂ vertical column density dataset. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(11), 6175-6191.
- Li, C., McLinden, C., Fioletov, V., Krotkov, N., Carn, S., Joiner, J., & Dickerson, R. R. (2017). India is overtaking China as the world's largest emitter of anthropogenic sulfur dioxide. *Scientific reports*, 7(1), 1-7.
- Liu, F., van der A, R. J., Eskes, H., Ding, J., & Mijling, B. (2018). Evaluation of modeling NO₂ concentrations driven by satellite-derived and bottom-up emission inventories using in situ measurements over China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(6), 4171-4186.
- Livschitz, Y., & Perez Albinana, A. (2006, June). GOME-2 on Metop: from in-orbit verification to routine operations. In *Proceedings of EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Helsinki, Finland* (pp. 14539-14550).
- Lu, Z., Streets, D. G., de Foy, B., & Krotkov, N. A. (2013). Ozone Monitoring Instrument observations of interannual increases in SO₂ emissions from Indian coal-fired power plants during 2005–2012. *Environmental science & technology*, 47(24), 13993-14000.
- Lu, Z., Streets, D. G., de Foy, B., & Krotkov, N. A. (2013). Ozone Monitoring Instrument observations of interannual increases in SO₂ emissions from Indian coal-fired power plants during 2005–2012. *Environmental science & technology*, 47(24), 13993-14000.
- McLinden, C. A., Fioletov, V., Boersma, K. F., Kharol, S. K., Krotkov, N., Lamsal, L., & Yang, K. (2014). Improved satellite retrievals of NO₂ and SO₂ over the Canadian oil sands and comparisons with surface measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(7), 3637-3656.
- Mohammadi, M. J., Goudarzi, G., Geravandi, S., Yari, A. R., Ghalani, B., Shirali, S., & Esmaili, M. (2016). Dispersion modeling of nitrogen dioxide in ambient air of Ahvaz city. *Health Scope*, 5(2).
- Munro, R., Lang, R., Klaes, D., Poli, G., Retscher, C., Lindstrot, R., & Eisinger, M. (2016). The GOME-2 instrument on the Metop series of satellites: instrument design, calibration, and level 1 data processing—an overview. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(3), 1279-1301.
- Naddafi, K., Hassanvand, M. S., Yunesian, M., Momeniha, F., Nabizadeh, R., Faridi, S., & Gholampour, A. (2012). Health impact assessment of air pollution in megacity of Tehran, Iran. *Iranian journal of environmental health science & engineering*, 9(1), 1-7.
- Nowlan, C. R., Liu, X., Chance, K., Cai, Z., Kurosu, T. P., Lee, C., & Martin, R. V. (2011). Retrievals of sulfur dioxide from the Global Ozone Monitoring Experiment 2 (GOME-2) using an optimal estimation approach: Algorithm and initial validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D18).

- Piraino, F., Aina, R., Palin, L., Prato, N., Sgorbati, S., Santagostino, A., & Citterio, S. (2006). Air quality biomonitoring: Assessment of air pollution genotoxicity in the Province of Novara (North Italy) by using *Trifolium repens* L. and molecular markers. *Science of the Total Environment*, 372(1), 350-359.
- Richter, A., Wittrock, F., Schönhardt, A., & Burrows, J. P. (2009). Quantifying volcanic SO₂ emissions using GOME2 measurements. *Geophys. Res. Abstr.*, EGU2009-7679, EGU General Assembly.
- Rix, M., Valks, P., Hao, N., Loyola, D., Schlager, H., Huntrieser, H., & Inness, A. (2012). Volcanic SO₂, BrO and plume height estimations using GOME-2 satellite measurements during the eruption of Eyjafjallajökull in May 2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D20).
- Rix, M., Valks, P., Hao, N., Van Geffen, J., Clerbaux, C., Clarisse, L., & Emmadi, S. (2009). Satellite monitoring of volcanic sulfur dioxide emissions for early warning of volcanic hazards. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2(3), 196-206.
- Smith, S. J., Aardenne, J. V., Klimont, Z., Andres, R. J., Volke, A., & Delgado Arias, S. (2011). Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(3), 1101-1116.
- Stavrakou, T., Müller, J. F., Bauwens, M., Smedt, I. D., Van Roozendaal, M., Mazière, M. D., & Guenther, A. (2015). How consistent are top-down hydrocarbon emissions based on formaldehyde observations from GOME-2 and OMI?. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(20), 11861-11884.
- Theys, N., Champion, R., Clarisse, L., Brenot, H., Gent, J. V., Dils, B., & Ferrucci, F. (2013). Volcanic SO₂ fluxes derived from satellite data: a survey using OMI, GOME-2, IASI and MODIS. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(12), 5945-5968.
- Theys, N., Champion, R., Clarisse, L., Brenot, H., Gent, J. V., Dils, B., & Ferrucci, F. (2013). Volcanic SO₂ fluxes derived from satellite data: a survey using OMI, GOME-2, IASI and MODIS. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(12), 5945-5968.
- Theys, N., Hedelt, P., De Smedt, I., Lerot, C., Yu, H., Vlietinck, J., & Van Roozendaal, M. (2019). Global monitoring of volcanic SO₂ degassing with unprecedented resolution from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Scientific reports*, 9(1), 1-10.
- Timofeev, Y. M., Polyakov, A. V., Kozlov, D. A., Zavelevich, F. S., Golovin, Y. M., Döhler, W., ... & Spänkuch, D. (2019). Comparison between the Spectra of Outgoing Infrared Radiation for Different Years. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 55(9), 956-962.
- Valks, P., Loyola, D., Hao, N., Rix, M., & Slijkhuis, S. (2011). ATBD for GOME-2 total columns of ozone, NO₂, SO₂, BrO, H₂O, tropospheric NO₂ and cloud properties. *Rep. DLR/GOME-2/ATBD/01*, 2/E.
- Valks, P., Pinardi, G., Richter, A., Lambert, J. C., Hao, N., Loyola, D., & Emmadi, S. (2011). Operational total and tropospheric NO₂ column retrieval for GOME-2. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(7), 1491-1514.
- van der A, R. J., Mijling, B., Ding, J., Koukouli, M. E., Liu, F., Li, Q., & Theys, N. (2017). Cleaning up the air: effectiveness of air quality policy for SO₂ and NO_x emissions in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(3), 1775-1789.
- Van Geffen, J., Van Roozendaal, M., Rix, M., & Valks, P. (2008). *Initial validation of GOME-2 GDP 4.2 SO₂ total columns (OTO/SO₂)-ORR B, O3MSAF validation report*. TN IASB-GOME2-O3MSAF-SO₂-01.1.
- Van Gent, J., Spurr, R., Theys, N., Lerot, C., Brenot, H., & Van Roozendaal, M. (2012, April). SO₂ plume height retrieval from direct fitting of GOME-2 backscattered radiance measurements. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 5718).
- Wang, T., Hendrick, F., Wang, P., Tang, G., Clémer, K., Yu, H., & Van Roozendaal, M. (2014). Evaluation of tropospheric SO₂ retrieved from MAX-DOAS measurements in Xianghe, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(20), 11149-11164.
- Wang, Y., Beirle, S., Lampel, J., Koukouli, M., Smedt, I. D., Theys, N., & Wagner, T. (2017). Validation of OMI, GOME-2A and GOME-2B tropospheric NO₂, SO₂ and HCHO products using MAX-DOAS observations from 2011 to 2014 in Wuxi, China: investigation of the effects of priori profiles and aerosols on the satellite products. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(8), 5007-5033.

- World Health Organization. (2006). WHO. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide. Global update 2005. *World Health Organization*. Available from: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/786, 38, E90038.
- Zara, M., Boersma, K. F., Smedt, I. D., Richter, A., Peters, E., Van Geffen, J. H., & Eskes, H. J. (2018). Improved slant column density retrieval of nitrogen dioxide and formaldehyde for OMI and GOME-2A from QA4ECV: intercomparison, uncertainty characterisation, and trends. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(7), 4033-4058.
- Zhang, Y., Li, C., Krotkov, N. A., Joiner, J., Fioletov, V., & McLinden, C. (2017). Continuation of long-term global SO₂ pollution monitoring from OMI to OMPS. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(4), 1495-1509.