



GIS Techniques in Monitoring the Impact of Sulfur Dioxide on Temperatures

Abolfazl Ghanbari¹ , Fadhaa Abdulrida Abbood^{2*} , Khalil Valizadeh Kamran³

1. Professor in Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: a_ghanbari@tabrizu.ac.ir
2. Ph.D. Student in Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: fadhaa.abdulrida@tabrizu.ac.ir
3. Professor in Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: valizadeh@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 25 April 2025

Received in revised form: 20

August 2025

Accepted: 30 August 2025

Published online: 5 November

2025

Keywords:

Remote Sensing,

GIS,

Sulfur Dioxide (SO₂),

Urban Heat Island,

Climate Resilience,

Baghdad

Abstract

The integration of Geographic Information System (GIS) and remote sensing (RS) technologies has proven instrumental in monitoring the environmental impacts of sulfur dioxide (SO₂), particularly its influence on temperature variations. This study examines the spatiotemporal dynamics of SO₂ emissions in Baghdad during 2023, correlating them with seasonal temperature patterns to evaluate their environmental and climatic implications. Utilizing satellite imagery, GIS tools, and advanced data analysis techniques, the research identifies significant seasonal trends, highlights areas of elevated pollution and temperature, and underscores the critical role of GIS in environmental resilience. The findings reveal an inverse correlation between SO₂ levels and temperature, influenced by atmospheric dispersion, photochemical reactions, and urban heat island effects. The study concludes with actionable recommendations for leveraging GIS-based insights to mitigate the adverse impacts of SO₂ on public health and urban climate.

Cite this article: Ghanbari, A., Abbood, F. R., & Valizadeh Kamran, Kh. (2025). GIS Techniques in Monitoring the Impact of Sulfur Dioxide on Temperatures. *Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 5 (16), 49-68. <http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.66959.1136>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.66959.1136>

Publisher: University of Tabriz.



Extended Abstract

Introduction

Sulfur dioxide (SO₂), a pollutant from fossil fuels and industry, has complex atmospheric impacts. While it forms sulfate aerosols that reflect sunlight and induce localized cooling, it also poses severe health risks like respiratory issues and increased mortality, particularly affecting vulnerable groups during physical activity. Urban areas with heavy industrial activity, such as Baghdad, face heightened exposure due to concentrated emissions from power plants, traffic, and refineries.

Geospatial technologies like GIS and remote sensing enable precise tracking of SO₂ distribution and its correlation with temperature variations. In Baghdad, extreme heat amplifies pollution's health impacts, and studies show SO₂ levels peak in summer, reaching $224 \pm 334 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in industrial zones. Spatial analysis reveals higher concentrations in city centers compared to peripheries, linked to traffic and industrial density.

Temporary cooling from sulfate aerosols does not offset long-term risks like acid rain or chronic respiratory diseases. Mitigation requires policies targeting emission reductions in energy and transportation sectors, informed by real-time geospatial data. Integrating satellite imagery with ground measurements can optimize pollution control strategies and urban resilience planning. For cities like Baghdad, addressing SO₂'s dual role demands balancing short-term climatic effects with sustainable health and environmental safeguards.

Data and Method

The study focuses on Baghdad, Iraq, a densely populated urban center. Data on SO₂ concentrations were obtained from the Sentinel-5P satellite and Land surface temperature data. The raw satellite data were accessed and processed using Google Earth Engine (GEE). Monthly SO₂ concentration levels, measured in Dobson Units (DU), were extracted and correlated with corresponding land surface temperature data. GIS tools were used to integrate and visualize data, they Identifying areas with high SO₂ and temperature levels, Examining monthly SO₂ changes and their link to seasonal temperatures, and finally, Combining SO₂ and temperature layers to highlight zones with both high pollution and extreme heat. Descriptive and inferential statistics analyzed the SO₂-temperature relationship. Correlation coefficients measured the strength and direction of this link, while spatial regression assessed the impact of land use and urbanization on patterns.

Results and Discussion

SO₂ levels in Baghdad show a clear seasonal cycle, peaking in winter (January: 1.7 DU; December: 1.67 DU) due to increased heating, industrial activity, and limited atmospheric mixing, while summer levels drop sharply (August: 0.19 DU) as stronger mixing and photochemical reactions disperse pollutants. Spatial data reveal that highest summer temperatures occur in urban cores where SO₂ is lowest, highlighting an inverse relationship between SO₂ and temperature. In winter, SO₂-derived aerosols reflect sunlight, causing localized cooling; their reduction in summer intensifies the urban heat island effect. This interplay means SO₂ modulates local climate, underscoring the need for winter pollution control to protect health and for urban greening to mitigate summer heat. GIS-based monitoring is crucial for tracking these patterns and guiding effective interventions.

Conclusion

GIS and remote sensing are essential for tracking how SO₂ pollution affects temperature in Baghdad, revealing a complex relationship between SO₂ levels, seasonal temperature shifts, and urban climate. SO₂ acts as both a climate regulator and a hazard. Advanced geospatial tools give policymakers critical insights into where and when SO₂ emissions impact local climates. The study calls for integrated monitoring and policy action, and suggests future research should use IoT and machine learning for real-time, predictive pollution analysis. Proactive interventions and sustainable planning are key to reducing SO₂ impacts and building urban resilience.



References

- Adams, W. J., & Garman, E. R. (2024). Recommended updates to the USEPA framework for metals risk assessment: aquatic ecosystems. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 20(4), 924-951.
- Al-Sheikhly, O. F., Fazaa, N. A., Hammadi, J. A., Habba, M. K., Hammoud, N. M., & Al-Obeidi, L. A. (2022). A Rare Record of an Albino Eurasian Otter *Lutra lutra* in Central Iraq. *IUCN Otter Spec. Group Bull.*, 39, 223-228.
- Al-Sheikhly, O. F., Haba, M. K., Fazaa, N. A., Al-Barazengy, A. N., Al-Haideri, M. L., & Al-Joborey, A. D. (2020). New records of the Iraqi eyelid gecko, *Eublepharis angramainyu* Anderson et Leviton, 1966 (Sauria: Eublepharidae) from Iraq. *Russian Journal of Herpetology*, 27(4), 240-244.
- Cameron, W. D., Bernath, P., & Boone, C. (2021). Sulfur dioxide from the atmospheric chemistry experiment (ACE) satellite. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 258, 107341.
- CENTRES, E. (2020). European Space Agency—ESA. *Organization*.
- Dean, S. (2001). Natural atmospheres: corrosion. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 5930-5938.
- Dilawar, A., Chen, B., Ul-Haq, Z., Amir, M., Arshad, A., Hassan, M., Guo, M., Shafeeque, M., Fang, J., & Song, B. (2023). Investigating the potential climatic effects of atmospheric pollution across China under the National Clean Air Action Plan. *Remote Sensing*, 15(8), 2084.
- Dovrou, E., Bates, K. H., Moch, J. M., Mickley, L. J., Jacob, D. J., & Keutsch, F. N. (2022). Catalytic role of formaldehyde in particulate matter formation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(6), e2113265119.
- Fiore, A. M., Naik, V., & Leibensperger, E. M. (2015). Air quality and climate connections. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(6), 645-685.
- Gad, S. C., & Sullivan Jr, D. W. (2006). Ninth triennial toxicology salary survey. *International journal of toxicology*, 35(2), 243-251.
- Health, U. D. o., & Services, H. (1999). Agency for Toxic Substances and Disease Registry-ATSDR.
- Joslyn, M., & Braverman, J. (1954). The chemistry and technology of the pretreatment and preservation of fruit and vegetable products with sulfur dioxide and sulfites. In *Advances in food research* (Vol. 5, pp. 97-160). Elsevier.
- Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Boucher, O. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419(6903), 215-223.
- Kondratyev, N., Kazantsev, E., Osipov, M., Rudenko, O., & Krylova, E. (2018). Determination of sources of sulfur dioxide in confectionery. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 80(4), 203-208.
- Krishnan, D. D. (2023). Submitted via Email: Kannan. krishnan@ oehha. ca. gov Office of Environmental Health Hazard Assessment California Environmental Protection Agency 1001 I Street, 12th Floor Sacramento, California 95814.
- Krotkov, N. A., Carn, S. A., Krueger, A. J., Bhartia, P. K., & Yang, K. (2006). Band residual difference algorithm for retrieval of SO₂ from the aura ozone monitoring instrument (OMI). *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 44(5), 1259-1266.
- Lerche, D., Van de Plassche, E., Schwegler, A., & Balk, F. (2002). Selecting chemical substances for the UNECE POP protocol. *Chemosphere*, 47(6), 617-630.
- LEVELS, S. R. (2012). California Environmental Protection Agency Office of Environmental Health Hazard Assessment.
- Lo, N. C., Bezerra, F. S. M., Colley, D. G., Fleming, F. M., Homeida, M., Kabatereine, N., Kabole, F. M., King, C. H., Mafe, M. A., & Midzi, N. (2022). Review of 2022 WHO guidelines on the control and elimination of schistosomiasis. *The Lancet Infectious Diseases*, 22(11), e327-e335.
- Matejcek, L. (2005). Spatial modelling of air pollution in urban areas with GIS: a case study on integrated database development. *Advances in geosciences*, 4, 63-68.
- Schlesinger, M. E., Malyshev, S., Rozanov, E. V., Yang, F., Andronova, N. G., De Vries, B., Grubler, A., Jiang, K., Masui, T., & Morita, T. (2000). Geographical distributions of temperature change for scenarios of greenhouse gas and sulfur dioxide emissions. *Technological Forecasting and Social Change*, 65(2), 167-193.



- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.
- Sidharthan, K., Gandhimathi, A., & Akshayaa, M. (2024). Spatial variation of air pollutants by using GIS modelling. *Global Nest Journal*, 26 (2).
- Song, S. (2008). A GIS based approach to spatio-temporal analysis of urban air quality in Chengdu Plain. *The International Achieves of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37.
- Sullivan Jr, J. B., Van Ert, M. D., Krieger, G. R., & Peterson, M. E. (2013). Indoor environmental quality and health. In *Small Animal Toxicology* (pp. 139-158). Elsevier.
- Susetyo, S. H., Abidin, A. U., Nagaya, T., Kato, N., & Matsui, Y. (2024). Environmental health risk assessment and acute effects of sulfur dioxide (SO₂) inhalation exposure on traditional sulfur miners at Ijen Crater Volcano, Indonesia. *Toxicology Reports*, 13, 101772.
- Tikader, M., Mukhopadhyay, D., & Dabhadker, K. (2024). Remote sensing and GIS in air pollution mitigation: a bibliometric review of Chhattisgarh, India. *Int J Environ Climate Change*, 14(4), 174-193.
- Timmermans, R., Segers, A., Curier, L., Abida, R., Attié, J.-L., El Amraoui, L., Eskes, H., De Haan, J., Kujanpää, J & ,Lahoz, W. (2019). Impact of synthetic space-borne NO₂ observations from the Sentinel-4 and Sentinel-5P missions on tropospheric NO₂ analyses. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(19), 12811-12833.
- Ward, P. L. (2009). Sulfur dioxide initiates global climate change in four ways. *Thin solid films*, 517(11), 3188-3203.



روش‌های سیستم اطلاعات مکانی در پایش تأثیر دی‌اکسید گوگرد بر دما

ابوالفضل قنبری^۱ , فضا عبدالرضا عبود^{۲*} , خلیل ولیزاده کامران^۳ 

۱. استاد گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

رایانامه: a_ghanbari@tabrizu.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

رایانامه: saif.abbasfadhhaa.abdulrida@tabrizu.ac.ir

۳. استاد گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: valizadeh@tabrizu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

ادغام سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) به‌طور اثبات‌شده در نظارت بر اثرات زیست‌محیطی دی‌اکسید گوگرد (SO₂) به‌ویژه تأثیر آن بر تغییرات دمایی، نقش مهمی ایفا کرده است. این مطالعه به بررسی پویایی فضایی-زمانی انتشار SO₂ در بغداد در سال ۲۰۲۳ می‌پردازد و آن را با الگوهای دمایی فصلی مرتبط می‌کند تا پیامدهای زیست‌محیطی و اقلیمی آن را ارزیابی کند. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، ابزارهای GIS و تکنیک‌های پیشرفته تحلیل داده‌ها، این تحقیق روندهای فصلی قابل توجهی را شناسایی می‌کند، مناطق آلودگی و دمای بالا را برجسته می‌کند و نقش حیاتی GIS در تاب‌آوری زیست‌محیطی را تأکید می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهند که یک همبستگی معکوس بین سطح SO₂ و دمای هوا وجود دارد که تحت تأثیر پراکندگی جو، واکنش‌های فتوشیمیایی و اثرات جزیره حرارتی شهری قرار دارد. همچنین این مطالعه توصیه‌های عملی مبتنی بر GIS برای کاهش اثرات نامطلوب SO₂ بر سلامت عمومی و اقلیم شهری ارائه می‌دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

کلیدواژه‌ها:

سنجش از دور،

سیستم اطلاعات جغرافیایی،

دی‌اکسید گوگرد،

تاب‌آوری اقلیمی،

جزیره حرارتی شهری،

بغداد.

استناد: قنبری، ابوالفضل؛ عبود، فضا عبدالرضا و ولیزاده کامران، خلیل (۱۴۰۴). روش‌های سیستم اطلاعات مکانی در پایش تأثیر دی‌اکسید گوگرد بر دما. کاربرد سنجش

از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی، ۵ (۱۶)، ۴۹-۶۸.

http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.66959.1136



© نویسنده‌گان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

شهرنشینی و صنعتی‌سازی سریع شهرهای مدرن، چالش‌های زیست‌محیطی قابل توجهی از جمله آلودگی هوا و جزایر حرارتی شهری را به همراه داشته‌اند. دی‌اکسید گوگرد^۱ یک آلوده‌کننده اصلی هوا که عمدتاً از طریق سوختن سوخت‌های فسیلی، فعالیت‌های صنعتی و ترافیک وسایل نقلیه منتشر می‌شود، نقش دوگانه‌ای در تأثیرگذاری بر شرایط جوی و پویایی آب‌وهوایی دارد. دی‌اکسید گوگرد در اتمسفر اکسیده شده و به آیروسل سولفات تبدیل می‌شود که تابش خورشیدی را منعکس کرده و به اثرات خنک‌کننده محلی کمک می‌کند. اگرچه این پدیده ممکن است به طور موقت با روند گرمایش مقابله کند، اما خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی مرتبط با آن، مانند رسوب اسیدی و بیماری‌های تنفسی، چالش‌های طولانی‌مدت را ایجاد می‌کند.

تعامل بین سطح دی‌اکسید گوگرد و تغییرات دمایی به ویژه در محیط‌های شهری مانند بغداد پیچیده است، جایی که دمای شدید، تأثیر آلودگی بر سلامت عمومی و پایداری زیست‌محیطی را تشدید می‌کند.

مطالعات بسیاری بر روی آلاینده‌های جوی صورت گرفته است. برای مثال (Dilawar et al., 2023) تمرکز بر کاهش انتشار ذرات معلق، دی‌اکسید گوگرد و مونوکسید کربن به‌طور قابل توجهی بر بهبود کیفیت هوا و اثرات اقلیمی تأثیر گذاشته است. در این مقاله با تمرکز بر کاهش مصرف زغال سنگ، ارتقای استانداردهای صنعتی و توسعه حمل و نقل پاک، غلظت ذرات معلق در مناطق کلیدی مانند پکتا ۳۴٪ کاهش یافته است. مطالعات قبلی نقش سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲ و فناوری سنجش از دور^۳ را در ردیابی آلاینده‌های جوی و تحلیل اثرات آنها بر اقلیم‌های محلی برجسته کرده‌اند.

مقاله (Song, 2008) به بررسی کیفیت هوا با استفاده از ابزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک‌های آماری می‌پردازد. این مطالعه از داده‌های محیطی نظارت شده و اندازه‌گیری‌های میدانی برای ایجاد لایه‌های دیجیتال استفاده می‌کند تا توزیع مکانی و زمانی آلاینده‌های هوا را در مناطق شهری دشت چنگدو نشان دهد. از روش‌های آماری مانند کریجینگ و مدل ARMA برای پیش‌بینی شاخص کیفیت هوا^۴ در مقاطع زمانی مختلف استفاده شده است. این روش‌ها به ارزیابی و پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در مقاطع زمانی و مکانی مختلف کمک می‌کند و می‌تواند برای نظارت و مدیریت آلودگی هوا در مناطق شهری مفید باشد.

مقاله (Sidharthan et al., 2024) به بررسی توزیع مکانی آلاینده‌های هوا با استفاده از مدل‌سازی GIS می‌پردازد. این مطالعه به تحلیل غلظت آلاینده‌های مختلف مانند SO₂، NO₂، PM_{2.5}، PM₁₀، CO و O₃ در ۱۲ منطقه مختلف می‌پردازد. از داده‌های نظارت شده توسط سازمان کنترل آلودگی تامیل نادو^۵ برای ۳۰ روز جمع‌آوری شده و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS، توزیع مکانی این آلاینده‌ها ترسیم شده است.

فناوری سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور امکان ادغام مجموعه داده‌های فضایی و زمانی را فراهم می‌کنند و بینش‌های حیاتی در مورد پویایی انتشار دی‌اکسید گوگرد و همبستگی آن با روندهای دمایی ارائه می‌دهند.

این مطالعه با هدف بررسی رابطه بین غلظت دی‌اکسید گوگرد و تغییرات دمایی در بغداد در سال ۲۰۲۳، با استفاده از ابزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور برای تحلیل الگوهای فضایی و زمانی، انجام شده است. این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل داده‌های مکانی به دنبال ارائه بینش‌های عملیاتی برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری است تا اثرات نامطلوب دی‌اکسید گوگرد را کاهش داده و پایداری زیست‌محیطی را تقویت کنند.

1. SO₂
2. GIS
3. RS
4. AQI
5. TNPCB

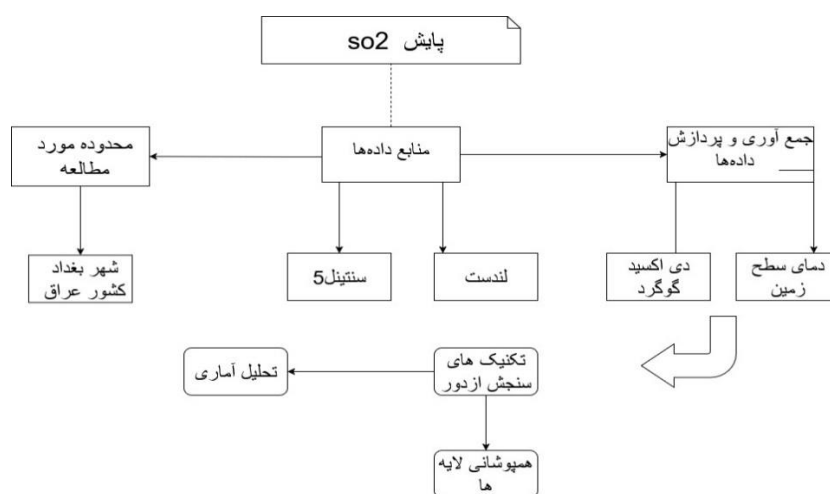
۱. مواد و روش تحقیق

۱-۱. منطقه مورد مطالعه

بغداد، پایتخت کشور عراق و یکی از کهن‌ترین مراکز تمدنی جهان، در بخش مرکزی این کشور و در دو سوی رود دجله واقع شده است. این شهر با مساحتی حدود ۲۲۰۰ کیلومتر مربع و جمعیتی بالغ بر ۸ میلیون نفر، بزرگ‌ترین شهر عراق و یکی از پرجمعیت‌ترین شهرهای جهان عرب به شمار می‌آید. بغداد از نظر جغرافیایی در موقعیتی راهبردی قرار دارد که پیوندهای شمال و جنوب عراق و همچنین شرق و غرب منطقه است. با توجه به سطح بالای آلودگی هوا و نوسانات شدید دمای فصلی شهر بغداد به عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب شده است.

۱-۲. روش پژوهش

همان‌طور که در (شکل ۱) مشاهده می‌شود، برای نمایش دی‌اکسید گوگرد موجود در شهر بغداد-پایتخت کشور عراق و تأثیر آن، ابتدا باید منابعی که بتوان از طریق آن اطلاعاتی در مورد دی‌اکسید گوگرد موجود در هوا را به دست آورد، بررسی نمود. در این پژوهش از داده‌های ماهواره ای لندست و سنتینل استفاده شده است. در ادامه با پردازش این داده‌ها، اطلاعاتی در مورد سطوح دی‌اکسید گوگرد و دمای سطح زمین استخراج می‌شوند. با فناوری سنجش از دور و تکنیک‌های سیستم اطلاعات مکانی، داده‌های جدید تجزیه و تحلیل شده و یک نقشه کلی از آن‌ها ایجاد می‌شود تا بررسی آماری برای میزان و تأثیر دی‌اکسید گوگرد موجود در منطقه مورد نظر به دست آید.



شکل ۱. روش پژوهش

۱-۳. منابع و پردازش داده‌ها

داده‌های مربوط به غلظت دی‌اکسید گوگرد از ماهواره سنتینل-۵^۱ به دست آمده است که قابلیت نظارت اتمسفری با وضوح بالا را فراهم می‌کند. همچنین داده‌های دمای سطح زمین از تصاویر لندست^۲ اخذ شده است که به دقت در نظارت بر محیط زیست شناخته شده است (CENTRES, 2020). داده‌های خام ماهواره‌ای از طریق پلتفرم گوگل ارث انجین^۳ که یک پلتفرم ابری برای تحلیل مکانی است دسترسی و پردازش شده‌اند. سطح غلظت دی‌اکسید گوگرد به صورت ماهانه در واحد دابسون^۴ استخراج شده و با داده‌های دمای سطح زمین همپوشانی شده است.

1. Sentinel-5P

2. landsat

3. Google Earth Engine (GEE)

4. Dobson (DU)

۴-۱. فناوری‌های سیستم اطلاعات مکانی و سنجش از دور

- ابزارهای سیستم اطلاعات مکانی برای ادغام و تجسم داده‌های پردازش شده استفاده شدند. تحلیل فضایی شامل موارد زیر است:
- تحلیل روندهای زمانی: تحلیل تغییرات ماهانه در سطح دی‌اکسید گوگرد و همبستگی آن با الگوهای دمای فصلی.
 - نقشه همپوشانی: ترکیب لایه‌های داده دی‌اکسید گوگرد و دما برای تجسم مناطق که آلودگی بالا با دماهای شدید هم‌زمان می‌شود.

۵-۱. تحلیل آماری

روش‌های آماری توصیفی و استنباطی برای تحلیل رابطه بین سطح دی‌اکسید گوگرد و تغییرات دمای استفاده شدند. ضرایب همبستگی برای کمی کردن قدرت و جهت رابطه محاسبه شدند، در حالی که مدل‌های رگرسیون فضایی تأثیر استفاده از زمین و شهرنشینی را بر الگوهای مشاهده شده بررسی کردند.

۲- مبانی نظری

۲-۱. مبانی مدل‌ها

• تعریف دی‌اکسید گوگرد

دی‌اکسید گوگرد (SO_2) گازی بی‌رنگ و غیرقابل اشتعال است که به دلیل بوی تند و زننده‌اش شناخته شده است، بویی که اغلب با بوی فندک زده شده مقایسه می‌شود. این گاز هم به صورت طبیعی و هم از طریق فعالیت‌های انسانی تولید می‌شود و نقش مهمی در آلودگی محیط زیست و پویایی اتمسفر ایفا می‌کند. این گاز عمدتاً در طول سوختن سوخت‌های فسیلی حاوی گوگرد، مانند زغال سنگ و نفت، و همچنین در طول ذوب سنگ معدن سولفیدی منتشر می‌شود. همچنین به صورت طبیعی در طول فوران‌های آتشفشانی آزاد می‌شود و به عنوان یک آلوده‌کننده مهم اتمسفر شناخته می‌شود (Susetyo et al., 2024).

با توجه به تأثیرات شدید زیست‌محیطی آن، نظارت بر حضور و حرکت آن در اتمسفر بسیار مهم است، به ویژه هنگام ارزیابی تأثیر آن بر نوسانات دما، که می‌توان از طریق تکنیک‌های سیستم اطلاعات مکانی انجام داد. از دیدگاه شیمیایی، دی‌اکسید گوگرد به عنوان یک ترکیب غیرآلی با فرمول مولکولی SO_2 طبقه‌بندی می‌شود (Krishnan, 2023). این گاز هم سمی و هم خورنده است و خطرات جدی برای سلامتی انسان و حیات وحش ایجاد می‌کند. قرار گرفتن طولانی‌مدت یا در معرض غلظت‌های بالا می‌تواند باعث تحریک چشم‌ها، مجاری تنفسی و مخاط‌ها شود. این گاز همچنین سنگین‌تر از هوا است، که به آن اجازه می‌دهد در مناطق پست تجمع یابد و پتانسیل تأثیرگذاری بر دما و کیفیت هوای محلی را افزایش دهد (Health & Services, 1999). تجزیه و تحلیل مبتنی بر سیستم اطلاعات مکانی پراکندگی دی‌اکسید گوگرد در ارتباط با شرایط جوی، یک روش موثر برای درک نقش آن در جزایر حرارتی شهری و تغییرپذیری اقلیمی منطقه‌ای ارائه می‌دهد.

فرآیندهای صنعتی، مانند استخراج مس و تولید اسید سولفوریک، مقادیر قابل توجهی دی‌اکسید گوگرد را به جو آزاد می‌کنند. این گاز به راحتی در آب حل می‌شود و اسید سولفوروز را تشکیل می‌دهد، که به تشکیل باران اسیدی کمک می‌کند و پدیده‌ای با پیامدهای عمیق برای محیط زیست و اقلیم است (LEVELS, 2012; Susetyo et al., 2024).

توانایی ابزارهای سیستم اطلاعات مکانی در تجسم و ردیابی پراکندگی انتشار دی‌اکسید گوگرد به صورت هم‌زمان می‌تواند از توسعه استراتژی‌های کاهش هدفمند، به ویژه در مناطق شهری که تنظیم دما برای رفاه انسان حیاتی است، حمایت کند.

نقش دی‌اکسید گوگرد فراتر از آلودگی است، زیرا برای اهداف صنعتی خاصی استفاده می‌شود. این گاز به عنوان نگهدارنده در صنایع غذایی و نوشیدنی، ضد عفونی‌کننده، و عامل سفیدکننده در تولید کاغذ استفاده می‌شود. با این حال، اهمیت

زیست‌محیطی آن بر کاربردهای صنعتی آن غلبه می‌کند. توانایی این گاز در تأثیرگذاری بر دمای اتمسفر از نقش آن در تشکیل آئروسول‌ها ناشی می‌شود، که می‌توانند تابش خورشیدی را منعکس کنند و به خنک شدن اتمسفر کمک کنند. این نقش دوگانه به عنوان یک آلوده‌کننده و عامل اقلیمی، لزوم تجزیه و تحلیل مکانی دقیق غلظت‌های دی‌اکسید گوگرد را که برای فناوری‌های سیستم اطلاعات مکانی مناسب است برجسته می‌کند (LEVELS, 2012).

اهمیت ردیابی تأثیرات زیست‌محیطی دی‌اکسید گوگرد با تشدید تغییرات آب و هوایی افزایش یافته است. فناوری‌های سیستم اطلاعات مکانی امکان تجسم حرکت و تجمع دی‌اکسید گوگرد در مناطق مختلف را فراهم می‌کنند و بینش‌های ضروری در مورد چگونگی تأثیرگذاری آن بر دمای محلی و منطقه‌ای ارائه می‌دهند. این رویکرد تصمیم‌گیری‌های سیاستی موثرتری در مورد کاهش انتشار و استراتژی‌های سازگاری با اقلیم را تسهیل می‌کند. نیروگاه‌ها و تأسیسات ذوب، که اغلب در مناطق صنعتی قرار دارند، از مهم‌ترین منابع انتشار دی‌اکسید گوگرد هستند. استفاده از سیستم اطلاعات مکانی برای تجزیه و تحلیل الگوهای مکانی منابع انتشار و غلظت‌های جو می‌تواند به شناسایی «نقاط داغ» کمک کند که تأثیر این گاز بر دما در آن‌ها بیشتر است (Susetyo et al., 2024).

دی‌اکسید گوگرد گازی خطرناک و بی‌رنگ است که دارای پیامدهای زیست‌محیطی، بهداشتی و اقلیمی قابل توجهی است. تولید آن از منابع طبیعی و انسانی با سوختن سوخت‌های فسیلی و فوران‌های آتشفشانی به عنوان عوامل اصلی، ناشی می‌شود. پس طبیعی است که درک توزیع و تأثیر آن بر دمای جو برای مدل‌سازی اقلیم و کنترل آلودگی ضروری است. با استفاده از تکنیک‌های سیستم اطلاعات مکانی، محققان می‌توانند رفتار دی‌اکسید گوگرد در جو را نقشه‌برداری، نظارت و پیش‌بینی کنند، که بینش‌های ارزشمندی برای مدیریت محیط زیست و استراتژی‌های سازگاری با اقلیم ارائه می‌دهد.

• منابع دی‌اکسید گوگرد

دی‌اکسید گوگرد از فعالیت‌های طبیعی و انسانی به اتمسفر منتشر می‌شود، و مهم‌ترین منبع آن سوختن سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها و تأسیسات صنعتی است. این فرآیند احتراق، ترکیبات گوگردی را آزاد می‌کند که با اکسیژن واکنش می‌دهند و دی‌اکسید گوگرد را تشکیل می‌دهند. مهم‌ترین عوامل صنعتی در انتشار دی‌اکسید گوگرد شامل نیروگاه‌های تولید برق که زغال سنگ و نفت می‌سوزانند، پالایشگاه‌های نفت، تولید سیمان، تولید خمیر کاغذ، و عملیات ذوب فلزات هستند. علاوه بر این، وسایل نقلیه مختلف مانند کشتی‌های بزرگ، لوکوموتیوها، و تجهیزات دیزلی خارج از جاده، به دلیل سوختن سوخت‌های پرگوگرد، دی‌اکسید گوگرد منتشر می‌کنند (Krishnan, 2023).

فرآیندهای طبیعی نیز به سطوح اتمسفری دی‌اکسید گوگرد کمک می‌کنند. به‌ویژه، فوران‌های آتشفشانی مقادیر قابل توجهی دی‌اکسید گوگرد را مستقیماً به اتمسفر آزاد می‌کنند (Adams & Garman, 2024). این انتشار طبیعی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی، اگرچه موقتی، بر شرایط اتمسفری محلی و جهانی داشته باشد. در حالی که این منابع طبیعی قابل توجه هستند، انتشارهای انسانی، به‌ویژه از سوختن سوخت‌های فسیلی، از مهم‌ترین عامل آلودگی دی‌اکسید گوگرد در سطح جهانی هستند (Kondratyev et al., 2018).

دی‌اکسید گوگرد به عنوان یک آلوده‌کننده اولیه طبقه‌بندی می‌شود به این معنی که مستقیماً به اتمسفر منتشر می‌شود و نه از واکنش‌های شیمیایی برخلاف آلوده‌کننده‌های ثانویه مانند ازن تشکیل می‌شود. فعالیت‌های انسانی تا ۷۰ درصد از کل انتشار جهانی دی‌اکسید گوگرد را تشکیل می‌دهند و سوختن سوخت‌های فسیلی تقریباً نیمی از این مقدار را شامل می‌شود. این امر نه تنها از طریق تولید برق، بلکه از طریق گرمایش مسکونی و تجاری نیز رخ می‌دهد. انتشارها به دلیل اکسایش دی‌اکسید گوگرد به اسید سولفوریک که یک جزء اصلی باران اسیدی است نگران‌کننده هستند. باران اسیدی اثرات منفی بر خاک، آب، و پوشش گیاهی دارد و سطح pH را تغییر می‌دهد و به زندگی آبی آسیب می‌زند (Kondratyev et al., 2018).

دی اکسید گوگرد همچنین خطراتی برای زیرساخت‌ها و سلامت انسان ایجاد می‌کند. این گاز می‌تواند فلزاتی مانند فولاد، روی، و نیکل را در مناطق شهری و صنعتی که غلظت اتمسفری دی اکسید گوگرد بالاتر است، خورده کند. قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض این گاز منجر به تخریب مواد ساختمانی، بناهای تاریخی، و رنگ‌ها می‌شود و خسارات اقتصادی و فرهنگی قابل توجهی ایجاد می‌کند (Dean, 2001). علاوه بر این، محلول بودن دی اکسید گوگرد در آب به تشکیل اسید سولفوروز کمک می‌کند و اثرات خورنده آن را افزایش می‌دهد.

محیط‌های داخلی نیز از قرار گرفتن در معرض دی اکسید گوگرد مصون نیستند. منابع دی اکسید گوگرد در محیط‌های داخلی شامل دود سیگار، شومینه‌های معیوب و بخاری‌های گاز یا کروسین که به درستی تهویه نمی‌شوند هستند. در حالی که غلظت دی اکسید گوگرد در محیط‌های داخلی معمولاً کمتر از محیط‌های خارجی است، قرار گرفتن در معرض آن در فضاهای بسته خطرات بهداشتی به‌ویژه برای جمعیت‌های آسیب‌پذیر ایجاد می‌کند (Sullivan Jr et al., 2013).

علاوه بر تأثیرات زیست‌محیطی، دی اکسید گوگرد کاربردهای تجاری و صنعتی دارد. از آن به عنوان ضدعفونی‌کننده، عامل سفیدکننده، و نگهدارنده استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای قابل توجه آن در میوه‌های خشک است، جایی که قرار گرفتن در معرض دود گوگرد در حال سوختن از تغییر رنگ در طول ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل جلوگیری می‌کند (Joslyn & Braverman, 1954). تولید دی اکسید گوگرد مایع با فشرده‌سازی شکل گازی آن، امکان استفاده از آن در فرآیندهای صنعتی مختلف مانند تولید و مواد غذایی را فراهم می‌کند (Gad & Sullivan Jr, 2016). دی اکسید گوگرد همچنین به عنوان یک محصول جانبی در تولید سیمان سیلیکات کلسیم آزاد می‌شود و به حضور آن در محیط زیست کمک می‌کند.

در حالی که مقررات جهانی و پیشرفت‌های فناوری منجر به کاهش انتشار دی اکسید گوگرد در برخی از مناطق صنعتی شده است، نقش آن در آلودگی محیطی هنوز یک نگرانی عمده است. معرفی سیستم‌های کنترل انتشار در نیروگاه‌ها و مقررات بین‌المللی سختگیرانه‌تر، تأثیر دی اکسید گوگرد بر اکوسیستم‌ها و سلامت عمومی را کاهش داده است. با این حال، با توجه به تداوم آن در محیط‌های داخلی و خارجی، نظارت و کنترل مداوم برای حفاظت از سلامت انسان و محیط زیست ضروری است (Dean, 2001).

• خواص شیمیایی دی اکسید گوگرد

دی اکسید گوگرد دارای طیفی از خواص شیمیایی است که بر رفتار آن در محیط‌های زیستی و صنعتی تأثیر می‌گذارد. درک این ویژگی‌ها برای مقابله با تأثیرات زیست‌محیطی و بهبود عملکرد فناوری‌هایی مانند سلول‌های سوختی اکسید جامد^۱ ضروری است.

یکی از مهمترین اثرات دی اکسید گوگرد، تأثیر آن بر کاتدهای سلول‌های سوختی اکسید جامد است. حتی در غلظت‌های جوی پایین -حدود ۷۵ ppb مطابق با استانداردهای اولیه ساعتی دی اکسید گوگرد می‌تواند با واکنش‌های کاهش اکسیژن^۲ که برای عملکرد این سلول‌ها حیاتی هستند، تداخل ایجاد کند. هنگامی که دی اکسید گوگرد با سطح کاتد تماس پیدا میکند، تمایل به جذب سطحی دارد و مانعی تشکیل می‌دهد که دسترسی اکسیژن به محل‌های فعال را مسدود می‌کند. این انسداد، بازدهی واکنش کاهش اکسیژن را کاهش داده و در نتیجه بازده تبدیل انرژی سلول سوختی را کم می‌کند. با گذشت زمان، جذب دی اکسید گوگرد می‌تواند منجر به تشکیل ترکیبات حاوی گوگرد مانند سولفات‌ها شود که در ساختار متخلخل کاتد جای می‌گیرند. این فرایند باعث انسداد منافذ شده و جریان اکسیژن را بیشتر مختل می‌کند.

علاوه بر انسداد فیزیکی، دی اکسید گوگرد تغییرات شیمیایی در مواد کاتد ایجاد می‌کند. دی اکسید گوگرد می‌تواند در واکنش‌های حالت جامد با مواد کاتدی مبتنی بر پروسکایت شرکت کرده و ترکیبات سولفات تشکیل دهد. این فرایند که

1. SOFCs
2. ORR

سولفاتاسیون نامیده میشود، ساختار بلوری کاتد را تغییر داده و باعث تغییرات دائمی در عملکرد الکتروشیمیایی آن می‌شود. چنین تغییرات ساختاری، توانایی کاتد در تسهیل واکنش‌های کاهش اکسیژن را تضعیف می‌کند. برای مقابله با این مشکلات، تحقیقات بر توسعه مواد و پوشش‌های مقاوم به گوگرد متمرکز شده است.

ویژگی شیمیایی مهم دیگر دی‌اکسید گوگرد، اکسید شدن آن به تری‌اکسید گوگرد^۱ در اتمسفر است. این فرایند اکسیداسیون چالش زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد می‌کند زیرا تری‌اکسید گوگرد با بخار آب واکنش داده و اسید سولفوریک^۲ تشکیل می‌دهد. تشکیل اسید سولفوریک به باران اسیدی کمک می‌کند که بر اکوسیستم‌ها تأثیر منفی گذاشته، زیرساخت‌ها را تخریب و فلزات را خورده می‌کند. حضور اسید سولفوریک برای سلول‌های سوختی اکسید جامد به‌ویژه مشکل‌زا است زیرا می‌تواند اجزای سیستم را خورده و پایداری عملیاتی را کاهش دهد.

دما نقش محوری در رفتار شیمیایی دی‌اکسید گوگرد دارد، به‌ویژه در تبدیل آن به سولفات. تعادل بین دی‌اکسید گوگرد فاز گاز و سولفات فاز ذره، وابستگی قابل توجهی به دما نشان می‌دهد. مطالعات مبتنی بر پرواز نشان می‌دهد در دماهای زیر ۲۶۵ کلوین، بیش از ۹۰ درصد گوگرد به‌صورت سولفات وجود دارد. در مقابل، در دماهای بالای ۲۸۵ کلوین، دی‌اکسید گوگرد و سولفات نسبت متعادل‌تری دارند که احتمالاً به‌دلیل فرایندهای اکسیداسیون ناهمگن از مرتبه شبه‌دوم در پلوم‌های جوی است.

تبدیل دی‌اکسید گوگرد به سولفات عموماً در دماهای پایین‌تر تسریع می‌شود. این موضوع به افزایش محتوای آبی آئروسول نسبت داده می‌شود که اکسیداسیون فاز آبی دی‌اکسید گوگرد را تسهیل می‌کند. همچنین حلالیت هر دو ماده دی‌اکسید گوگرد و اکسیدان‌ها در دماهای پایین‌تر بیشتر است که باعث تسریع واکنش‌ها می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد در محدوده دمایی ۲۶۵ تا ۲۸۳ کلوین، نرخ تبدیل دی‌اکسید گوگرد به سولفات افزایش یافته و سهم سولفات از کل محتوای گوگرد بیشتر می‌شود (Schlesinger et al., 2000).

تأثیر گونه‌های ارگانوسولفور نیز در فرایند تبدیل گوگرد نقش دارد. تحقیقات دوره‌هایی را در مطالعات پرواز شناسایی کرده که ترکیبات ارگانوسولفور بخش قابل توجهی از اندازه‌گیری‌های سولفات را تشکیل می‌دادند، به‌ویژه در محدوده دمایی ۲۷۰ تا ۲۸۵ کلوین. حضور این ترکیبات، تبدیل دی‌اکسید گوگرد به سولفات را حدود ۲۳ درصد نسبت به شرایط بدون آنها تسریع می‌کند. اثرات ترکیبی دما، حضور گونه‌های ارگانوسولفور و نزدیکی به منبع انتشار، پیچیدگی شیمی جوی دی‌اکسید گوگرد را برجسته می‌کند.

با توجه به اثرات نامطلوب دی‌اکسید گوگرد بر سلول‌های سوختی، سلامت انسان و محیط‌زیست، نیاز فوری به تدابیر کاهش‌ی مؤثر وجود دارد. در زمینه سلول‌های سوختی اکسید جامد، استراتژی‌ها شامل توسعه مواد کاتدی مقاوم به گوگرد و کاربرد پوشش‌های پیشرفت‌های است که از جذب دی‌اکسید گوگرد جلوگیری می‌کنند. راهکارهای زیست‌محیطی بر کاهش انتشار از احتراق سوخت‌های فسیلی، ترویج منابع انرژی پاک و استفاده از فناوری‌های گوگردزدایی در فرایندهای صنعتی متمرکز است (Ward, 2009).

ویژگی‌های شیمیایی دی‌اکسید گوگرد، به‌ویژه توانایی جذب سطحی، واکنش با مواد کاتدی و تبدیل به اسید سولفوریک، پیامدهای قابل توجهی برای سیستم‌های زیست‌محیطی و صنعتی دارد. رفتار آن شدیداً تحت تأثیر دما است، به طوری که شرایط سردتر از طریق اکسیداسیون فاز آبی، تبدیل دی‌اکسید گوگرد به سولفات را تقویت می‌کند. این فرایندها نیاز به راهبردهای کاهش‌ی جامع برای حفاظت از سلامت محیط‌زیست و حفظ بازدهی فناوری‌هایی مانند سلول‌های سوختی اکسید جامد را تأکید می‌کنند.

1. SO₃2. H₂SO₄

• اهمیت مطالعه تأثیر دی‌اکسید گوگرد بر پایداری محیطی و دما (بررسی وضعیت محیطی بغداد)

درک تأثیر دی‌اکسید گوگرد بر دما و بارش برای ارزیابی نقش گسترده‌تر آن در پایداری محیطی ضروری است. این تحقیق در زمینه‌های مختلفی مانند علوم جوی، بهداشت عمومی و کاربردهای صنعتی انجام می‌شود. با تحلیل رفتار دی‌اکسید گوگرد در رابطه با دما، محققان می‌توانند استراتژی‌های کاهش اثرات مؤثر را توسعه دهند که پایداری بوم‌شناختی را ارتقا بخشیده و توسعه پایدار را ترویج کنند.

دی‌اکسید گوگرد نقش مهمی در فرآیندهای جوی و تغییرات آب‌وهوایی دارد. پس از انتشار در اتمسفر، دی‌اکسید گوگرد اکسید شده و به آئروسول‌های سولفات تبدیل می‌شود که تابش خورشیدی را منعکس کرده و اثر خنک‌کننده‌ای بر سطح زمین ایجاد می‌کنند. این پدیده می‌تواند الگوهای دمایی محلی و جهانی را تغییر دهد و شرایط آب‌وهوایی و پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی را تحت تأثیر قرار دهد. داده‌های دقیق در مورد این تعاملات برای توسعه مدل‌های آب‌وهوایی و استراتژی‌های کنترل انتشار ضروری هستند (Al-Sheikhly et al., 2020).

دی‌اکسید گوگرد همچنین یک آلوده‌کننده اصلی هوا با پیامدهای بهداشتی‌ویژه در مناطق شهری پرجمعیت است. پس از انتشار در هوا، می‌تواند بیماری‌های تنفسی مانند برونشیت و آسم را در جمعیت‌های آسیب‌پذیر مانند کودکان و سالم‌خوردگان تحریک کند. تغییرات دمایی بر چگونگی پراکندگی دی‌اکسید گوگرد در اتمسفر تأثیر می‌گذارد به طوری که وارونگی‌های دمایی اغلب آلوده‌کننده‌ها را نزدیک به سطح زمین به دام می‌اندازند و خطرات بهداشتی را تشدید می‌کنند. درک این پویایی‌ها برای تدوین سیاست‌های بهداشتی عمومی با هدف محافظت از جوامع آسیب‌پذیر حیاتی است (Al-Sheikhly et al., 2022).

از دیدگاه بوم‌شناختی، دی‌اکسید گوگرد می‌تواند با نقش خود در تشکیل باران اسیدی، به طور قابل توجهی بر اسیدی بودن خاک و آب تأثیر بگذارد. اکسیداسیون دی‌اکسید گوگرد برای تشکیل اسید سولفوریک می‌تواند pH خاک و آب را کاهش دهد، که باعث اختلال در اکوسیستم‌های آبی و تأثیر بر حاصلخیزی خاک می‌شود. باران اسیدی به تنوع زیستی آسیب می‌زند، محصولات کشاورزی را تخریب می‌کند و اکوسیستم‌ها را تغییر می‌دهد، که در نتیجه پایداری محیطی را کاهش می‌دهد. درک چگونگی تأثیر تغییرات دمایی بر سرعت و وسعت این واکنش‌ها می‌تواند از توسعه استراتژی‌های کاهش اثرات مؤثر حمایت کند (Lerche et al., 2002). این دانش برای محافظت از بهره‌وری کشاورزی و حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی ضروری است.

در زمینه‌های صنعتی، رفتار دی‌اکسید گوگرد در شرایط دمایی مختلف دارای پیامدهای مستقیم برای بهینه‌سازی فرآیندها است. تولید اسید سولفوریک و سایر فرآیندهای صنعتی به شدت به کنترل شرایط حرارتی که در آن دی‌اکسید گوگرد واکنش می‌دهد، وابسته است. آگاهی از این تعاملات حرارتی می‌تواند بازدهی تولید را افزایش دهد، هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد و انتشار دی‌اکسید گوگرد را به حداقل برساند، که از شیوه‌های صنعتی پایدار حمایت می‌کند.

• وضعیت محیطی بغداد

شهر بغداد، پایتخت کشور عراق، با چالش‌های زیست‌محیطی جدی ناشی از افزایش سطح دی‌اکسید گوگرد در اتمسفر مواجه است. وابستگی شدید این کشور به احتراق سوخت‌های فسیلی، به‌ویژه استخراج و پالایش نفت، منجر به انتشار بسیار بالای دی‌اکسید گوگرد شده است. بر اساس سازمان بهداشت جهانی^۱ غلظت سالانه دی‌اکسید گوگرد در بغداد ۰/۰۵۹ ppm است که به طور قابل توجهی از حد ایمنی فراتر رفته و از مناطق دیگر مانند بابل که ۰/۰۰۸ ppm است، بیشتر است. این اختلاف، نیاز فوری به مداخله در مدیریت کیفیت هوای بغداد را برجسته می‌کند (Lo et al., 2022).

منابع آلودگی دی‌اکسید گوگرد در بغداد متنوع هستند و شامل انتشار از پالایشگاه‌های نفت، اگزوز خودرو، ژنراتورهای دیزل و سوزاندن مواد زائد است. وابستگی به ژنراتورهای دیزل، که نتیجه آسیب به زیرساخت‌های انرژی است، این مشکل را تشدید

می‌کند. ژنراتورهای دیزل مقادیر بسیار بالاتری از دی اکسید گوگرد نسبت به نیروگاه‌های گازی منتشر می‌کنند. با توجه به استفاده گسترده از این ژنراتورها در بخش‌های مسکونی، تجاری و صنعتی، تأثیر تجمعی بر کیفیت هوا بسیار شدید است.

اثرات بهداشتی ناشی از قرار گرفتن در معرض دی اکسید گوگرد به‌خوبی مستند شده است. قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض سطوح بالای دی اکسید گوگرد می‌تواند سیستم تنفسی را تحریک کند و منجر به برونشیت، حملات آسم و بیماری‌های مزمن ریه شود. گروه‌های آسیب‌پذیر، از جمله کودکان، سالخوردگان و افراد دارای شرایط تنفسی از پیش موجود، در دوره‌های آلودگی شدید دی اکسید گوگرد در معرض خطر بیشتر قرار دارند (Lerche et al., 2002). مقابله با این بحران بهداشتی نیازمند کنترل انتشار و همچنین ایجاد سیستم‌های هشدار زودهنگام و کمپین‌های آگاهی‌بخش عمومی است.

آلودگی دی اکسید گوگرد همچنین بر پوشش گیاهی و کشاورزی بغداد تأثیر می‌گذارد. غلظت‌های بالای دی اکسید گوگرد می‌تواند به‌طور مستقیم به گیاهان آسیب رسانده و منجر به نکروز برگ (مرگ برگ) و کاهش فتوسنتز شوند. قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض غلظت‌های پایین‌تر ممکن است رشد و محصول گیاهان را تحت تأثیر قرار داده و منجر به کاهش بهره‌وری کشاورزی شود. این امر پیامدهای گسترده‌ای برای امنیت غذایی و سلامت اکوسیستم دارد، زیرا گیاهان نقش حیاتی در حفظ پایداری محیطی دارند.

برای مقابله با اثرات دی اکسید گوگرد بر دما، بارش و پایداری محیطی کلی، رویکرد چندوجهی مورد نیاز است. نظارت مؤثر بر غلظت‌های دی اکسید گوگرد و نوسانات دمایی برای پیش‌بینی مناطق داغ آلودگی و ارزیابی خطرات بهداشتی ضروری است. پیشرفت‌های تکنیک‌های سیستم اطلاعات مکانی می‌توانند از نظارت و تجسم زمان واقعی پراکندگی دی اکسید گوگرد حمایت کنند و به سیاست‌گذاران امکان تصمیم‌گیری آگاهانه را بدهد.

استراتژی‌های کاهش باید شامل مقررات سختگیرانه‌تر بر انتشار صنعتی، انتقال به منابع انرژی پاک‌تر و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پیشرفته کنترل آلودگی باشد. برای بغداد، کاهش وابستگی به ژنراتورهای دیزل و ترویج استفاده از جایگزین‌های انرژی پاک، تأثیر مثبت فوری بر کیفیت هوا خواهد داشت. علاوه بر این، تقویت سیستم‌های نظارت بهداشتی و ابتکارات آگاهی‌بخش عمومی، جمعیت‌های آسیب‌پذیر را از خطرات بهداشتی مرتبط با قرار گرفتن در معرض دی اکسید گوگرد محافظت خواهد کرد.

نظارت مداوم، چارچوب‌های قانونی پیشرفته‌تر و استفاده از فناوری‌های مبتنی بر سیستم اطلاعات مکانی برای کاهش اثرات نامطلوب دی اکسید گوگرد ضروری هستند. با درک چگونگی تعامل دی اکسید گوگرد با دما و بارش، ذینفعان می‌توانند مداخلات هدفمند را توسعه دهند که از پایداری محیطی، سلامت عمومی و توسعه پایدار حمایت کنند.

۲-۲. نقش سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در پایش اثر دی اکسید گوگرد بر دما به عنوان عنصری از تاب-آوری محیط زیست (رابطه بین دما و دی اکسید گوگرد)

ترکیب سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور زمینه نظارت بر محیط زیست را متحول کرده است و ابزارهای قدرتمندی برای ردیابی و تحلیل آلاینده‌های جوی مانند دی اکسید گوگرد فراهم کرده است. دی اکسید گوگرد، که یکی از عوامل اصلی آلودگی هوا است، بر دمای اتمسفر و پویایی آب‌وهوایی تأثیر می‌گذارد. درک رابطه بین دی اکسید گوگرد و دما برای ارتقای تاب‌آوری محیطی و توسعه استراتژی‌های کاهش اثرات ضروری است. فناوری‌های سنجش از دور نقش حیاتی در این زمینه دارند و امکان جمع‌آوری، تحلیل و تجسم داده‌های جامع را فراهم می‌کنند (Matejicek, 2005).

دی اکسید گوگرد از طریق مسیرهای مختلف بر دمای اتمسفر تأثیر می‌گذارد. یکی از تأثیرات برجسته آن تشکیل آئروسول‌های سولفات است که در هنگام اکسایش دی اکسید گوگرد در جو رخ می‌دهد. این آئروسول‌ها تابش خورشیدی را منعکس می‌کنند و منجر به یک اثر خنک‌کننده به نام «تاریکی جهانی» می‌شوند (Fiore et al., 2015). اگرچه این اثر خنک‌کننده

ممکن است در مقابله با گرمایش جهانی مفید به نظر برسد، اما الگوهای طبیعی آب‌وهوایی را مختل می‌کند و می‌تواند به وقوع حوادث جوی شدید منجر شود. علاوه بر این، تبدیل دی‌اکسید گوگرد به اسید سولفوریک در حضور رطوبت به بارش اسیدی کمک می‌کند که بر اکوسیستم‌های خشکی و آبی تأثیر می‌گذارد (Dovrou et al., 2022).

رابطه بین دما و غلظت دی‌اکسید گوگرد پیچیده است و بر اساس موقعیت جغرافیایی، شرایط جوی و منابع انتشار متفاوت است. دماهای بالاتر می‌توانند واکنش‌های فتوشیمیایی را که دی‌اکسید گوگرد را به آنروسل‌های سولفات تبدیل می‌کنند، افزایش دهند و در نتیجه اثرات آب‌وهوایی آن را تقویت کنند (Cameron et al., 2021). برعکس، وارونگی‌های دمایی، که در آن لایه‌ای از هوای گرم هوای سردتر را در زیر خود محبوس می‌کند، می‌تواند غلظت دی‌اکسید گوگرد را در نزدیکی سطح زمین افزایش دهند و آلودگی هوا و خطرات بهداشتی مرتبط با آن را تشدید کنند.

استفاده ترکیبی از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور قابلیت‌های بی‌مانندی برای نظارت بر تأثیرات محیطی دی‌اکسید گوگرد فراهم می‌کند. پلتفرم‌های سنجش از دور مانند ماهواره‌ها و پهپادها داده‌های بزرگ‌مقیاس و زمان‌حقیقی از آلاینده‌های جوی را ثبت می‌کنند. این پلتفرم‌ها از حسگرها برای تشخیص غلظت دی‌اکسید گوگرد، دمای سطح زمین و سایر پارامترهای محیطی استفاده می‌کنند. مأموریت‌های ماهواره‌ای مانند ابزار نظارت بر ازن ناسا^۱ و سنتینل ۵ آژانس فضایی اروپا داده‌های جهانی را فراهم می‌کنند که انتشار دی‌اکسید گوگرد از فوران‌های آتشفشانی، فعالیت‌های صنعتی و سایر منابع انسان‌ساز را ردیابی می‌کنند (Timmermans et al., 2019).

سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی به عنوان یک ابزار تحلیلی و تجسمی عمل می‌کند که داده‌های جمع‌آوری شده از پلتفرم‌های سنجش از دور را پردازش، نقشه‌برداری و تحلیل می‌کند. با همپوشانی لایه‌های داده متعدد، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی به محققان امکان می‌دهد تا توزیع فضایی غلظت دی‌اکسید گوگرد را در ارتباط با تغییرات دمایی تجسم کنند. به عنوان مثال، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی می‌تواند مناطق را مشخص کند که در آن غلظت‌های بالای دی‌اکسید گوگرد با دماهای بالاتر هم‌زمان هستند، و این امکان را برای مداخلات هدفمند برای کاهش آلودگی و حفاظت از جوامع آسیب‌پذیر فراهم می‌کند.

ترکیب داده‌های سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور بینش‌های ارزشمندی در مورد پویایی‌های فضایی-زمانی دی‌اکسید گوگرد و تأثیر آن بر دما فراهم می‌کند. داده‌های سنجش از دور از ماهواره‌ها پردازش شده و به نرم‌افزار سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی تغذیه می‌شوند، جایی که با داده‌های جوی، استفاده از زمین و جمعیتی ترکیب می‌شوند. این ادغام امکان تحلیل جامع عوامل مؤثر بر انتشار دی‌اکسید گوگرد و اثرات آب‌وهوایی آن را فراهم می‌کند.

ابزارهای پیشرفته مانند Google Earth Engine (GEE) و کتابخانه‌های سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی مبتنی بر پایتون امکان پردازش خودکار داده‌ها و انجام تحلیل‌های فضایی در مقیاس بزرگ را فراهم می‌کنند. GEE امکان تحلیل داده‌های سری زمانی ماهواره‌ای را می‌دهد که به محققان امکان می‌دهد تغییرات در انتشار دی‌اکسید گوگرد را در طول زمان ردیابی کنند و آن را با روندهای دمایی مرتبط کنند. کتابخانه‌های پایتون مانند GeoPandas و Rasterio از تحلیل فضایی پشتیبانی می‌کنند، در حالی که الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند روندهای آلودگی آینده و تأثیرات بالقوه تغییرات دمایی بر غلظت دی‌اکسید گوگرد را پیش‌بینی کنند (Tikader et al., 2024).

فناوری سامانه اطلاعات جغرافیایی نظارت و تحلیل پدیده‌های محیطی را متحول کرده است و قابلیت‌های بی‌مانندی برای ادغام داده‌های فضایی و زمانی فراهم کرده است. در زمینه این مطالعه، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی نقش مرکزی در:

۱. ادغام و تجسم داده‌ها داشت. ابزارهای سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی امکان ادغام داده‌های ماهواره‌ای از سنتینل ۵ و لندست را فراهم کرد و ایجاد نقشه‌های حرارتی و نمودارهایی زمانی را ممکن ساخت. این تجسم‌ها نمایانگر یک نمای واضح از روندهای دی‌اکسید گوگرد و توزیع فضایی آن در بغداد بود.

۲. تحلیل نقاط داغ با شناسایی مناطق با بالاترین غلظت دی‌اکسید گوگرد و دماها، ابزارهای سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی امکان شناسایی نقاط آلودگی و گرما را فراهم کردند. این اطلاعات برای مداخلات هدفمند، مانند کاشت فضاهای سبز شهری یا تنظیم انتشار صنعتی در مناطق خاص، حیاتی است.
۳. تحلیل روندهای زمانی امکان تحلیل تغییرات ماهانه در سطوح دی‌اکسید گوگرد و همبستگی آن با تغییرات دمایی از طریق تحلیل سری زمانی مبتنی بر سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی فراهم شد. این رویکرد بینش‌های ارزشمندی در مورد الگوهای فصلی و رانندگان آن‌ها ارائه می‌دهد.
۴. پشتیبانی از سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی خروجی‌های سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، مانند نقشه‌های موضوعی و تحلیل‌های روندها، به عنوان ورودی‌های ضروری برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری محیطی عمل می‌کنند. این خروجی‌ها به ذینفعان کمک می‌کند تا وسعت فضایی آلودگی را درک کنند و اقدامات کاهش را در مناطق تحت تأثیر بیشترین آلودگی اولویت‌بندی کنند.

۲-۳. کاربردهای سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در تاب‌آوری محیطی

۱. مدیریت کیفیت هوا: سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور از پایش غلظت دی‌اکسید گوگرد در مناطق شهری و صنعتی حمایت می‌کنند، جایی که معمولاً سطح آلودگی بالاتر است. با نقشه‌برداری از داغ‌سپاری‌های دی‌اکسید گوگرد، تصمیم‌گیران می‌توانند مناطق را برای اقدامات کنترل آلودگی مانند استانداردهای سختگیرانه‌تر انتشار برای کارخانه‌ها و وسایل نقلیه اولویت‌بندی کنند (Tikader et al., 2024).
 ۲. پژوهش در مورد تغییرات آب‌وهوایی: از آنجایی که آئروسول‌های سولفات بر تعادل تابش زمین تأثیر می‌گذارند، درک تأثیر دی‌اکسید گوگرد بر دما به بهبود مدل‌های آب‌وهوایی کمک می‌کند. داده‌های سنجش از دور در مورد غلظت‌های جوی دی‌اکسید گوگرد به پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی کمک می‌کنند و تلاش‌ها برای پیش‌بینی و کاهش اثرات تغییرات آب‌وهوایی را پشتیبانی می‌کنند.
 ۳. پاسخ به شرایط اضطراری: سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور نقش حیاتی در ردیابی فوران‌های آتشفشانی که مقادیر زیادی دی‌اکسید گوگرد منتشر می‌کنند، دارند. پایش در زمان واقعی به مقامات اجازه می‌دهد تا هشدارهای زودهنگام و دستورالعمل‌های تخلیه را صادر کنند، که در نتیجه قرار گرفتن انسان در معرض آلاینده‌های خطرناک را کاهش می‌دهد.
 ۴. سلامت عمومی و ارزیابی ریسک: نقشه‌های ریسک مبتنی بر سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی غلظت دی‌اکسید گوگرد را با داده‌های بهداشتی مرتبط می‌کنند و جمعیت‌های آسیب‌پذیر در معرض سطوح بالای آلودگی را شناسایی می‌کنند. این رویکرد به سیاست‌گذاران امکان می‌دهد تا مداخلات هدفمند مانند توصیه‌های بهداشتی یا برنامه‌های جابجایی برای جوامع در خطر را توسعه دهند.
- بغداد با چالش‌های قابل توجهی در کیفیت هوا روبرو است که به دلیل غلظت بالای دی‌اکسید گوگرد از انتشار صنعتی، تولید برق و ترافیک وسایل نقلیه است. با استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، محققان می‌توانند آلودگی دی‌اکسید گوگرد را در شهر ردیابی کنند و تأثیر آن را بر دماهای محلی ارزیابی کنند. تصاویر ماهواره‌ای از مأموریت‌های OMI و سنتینل ۵ امکان تشخیص داغ‌سپاری‌های آلودگی را فراهم می‌کند، در حالی که ابزارهای سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی توزیع فضایی دی‌اکسید گوگرد را در ارتباط با کاربری زمین و تراکم جمعیت تحلیل می‌کنند.
- با ادغام داده‌های جوی، محققان می‌توانند نقش وارونگی‌های دمایی را در به دام انداختن آلاینده‌ها در نزدیکی سطح زمین ارزیابی کنند. این تحلیل مناطق را نشان می‌دهد که ساکنان در آن به سطوح بالای دی‌اکسید گوگرد در معرض هستند، که از

مداخلات بهداشتی عمومی پشتیبانی می‌کند. علاوه بر این، تحلیل زمانی غلظت‌های دی‌اکسید گوگرد در طول زمان به مقامات اجازه می‌دهد تا تلاش‌های کاهش آلودگی مانند تغییر از ژنراتورهای دیزلی به منابع انرژی پاک‌تر را ردیابی کنند.

پیشرفت‌های فناوری ماهواره‌ای، محاسبات ابری و یادگیری ماشین کارایی سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور را برای نظارت بر محیط زیست افزایش می‌دهند. حسگرهای با وضوح بالا اکنون داده‌های دقیق‌تری از غلظت دی‌اکسید گوگرد ارائه می‌دهند، در حالی که پلتفرم‌های مبتنی بر ابر مانند Google Earth Engine امکان پردازش داده‌های مقیاس بزرگ را فراهم می‌کنند. مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی غلظت‌های آینده دی‌اکسید گوگرد استفاده می‌شوند و بینش‌های ارزشمندی برای مدیریت محیطی پیشگیرانه ارائه می‌دهند.

پژوهش‌های آینده باید بر ادغام حسگرهای اینترنت اشیا^۱ با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی برای پایش در زمان واقعی کیفیت هوا در محیط‌های شهری تمرکز کنند. دستگاه‌های IoT می‌توانند اندازه‌گیری‌های محلی و زمینی از دی‌اکسید گوگرد را که مکمل داده‌های ماهواره‌ای هستند، فراهم کنند. این رویکرد یک سیستم پایش جامع و چندمقیاسی برای تحلیل کیفیت هوا و دما ایجاد خواهد کرد.

فناوری‌های سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور نقش حیاتی در نظارت بر تأثیر دی‌اکسید گوگرد بر دماها و حمایت از تلاش‌های تاب‌آوری محیطی دارند. با استفاده از سنجش از دور برای جمع‌آوری داده‌ها و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی برای تحلیل فضایی، محققان و سیاست‌گذاران می‌توانند رابطه بین دی‌اکسید گوگرد و دما را بهتر درک کنند. این بینش‌ها از استراتژی‌های کاهش اثرات، حفاظت از سلامت عمومی، و انطباق با تغییرات آب‌وهوایی پشتیبانی می‌کنند. با پیشرفت فناوری، ادغام یادگیری ماشین، محاسبات ابری و دستگاه‌های IoT قابلیت‌های سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور را برای نظارت بر محیط زیست بیشتر تقویت خواهد کرد. ادامه استفاده از این فناوری‌ها برای ایجاد یک آینده پایدارتر و تاب‌آورتر ضروری است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. بررسی سطح دی‌اکسید گوگرد

درک پویایی بین آلاینده‌های هوا و الگوهای دمایی برای حل چالش‌های زیست‌محیطی مناطق شهری مانند بغداد بسیار مهم است. این مطالعه سطح دی‌اکسید گوگرد را در بغداد در سال ۲۰۲۳ بررسی می‌کند و رابطه آن را با تغییرات دمایی فصلی مورد بررسی قرار می‌دهد. با استفاده از ابزارهای پیشرفته مانند موتور زمین گوگل، تصاویر ماهواره‌ای از سنتینل-۵ و لندست، و تحلیل داده‌های فضایی، این مطالعه بینش‌هایی در مورد چگونگی تعامل آلودگی با متغیرهای آب‌وهوایی در این شهر پرجمعیت ارائه می‌دهد (Tikader et al., 2024).

بغداد به عنوان یک مرکز شهری بزرگ، با دو چالش زیست‌محیطی مواجه است: دمای بالا و افزایش آلودگی هوا. دی‌اکسید گوگرد، که یک محصول جانبی از سوختن سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی است، نه تنها برای سلامتی مضر است، بلکه از طریق خواص تابشی خود بر شرایط آب‌وهوایی نیز تأثیر می‌گذارد. این مطالعه تغییرات زمانی و مکانی در غلظت دی‌اکسید گوگرد در بغداد و همبستگی آن با روندهای دمایی را بررسی می‌کند. تحلیل با هدف ارائه بینش‌های عملی که می‌توانند برنامه‌ریزی و تلاش‌های کاهش آلودگی آینده را آگاهانه‌تر کنند، انجام شده است.

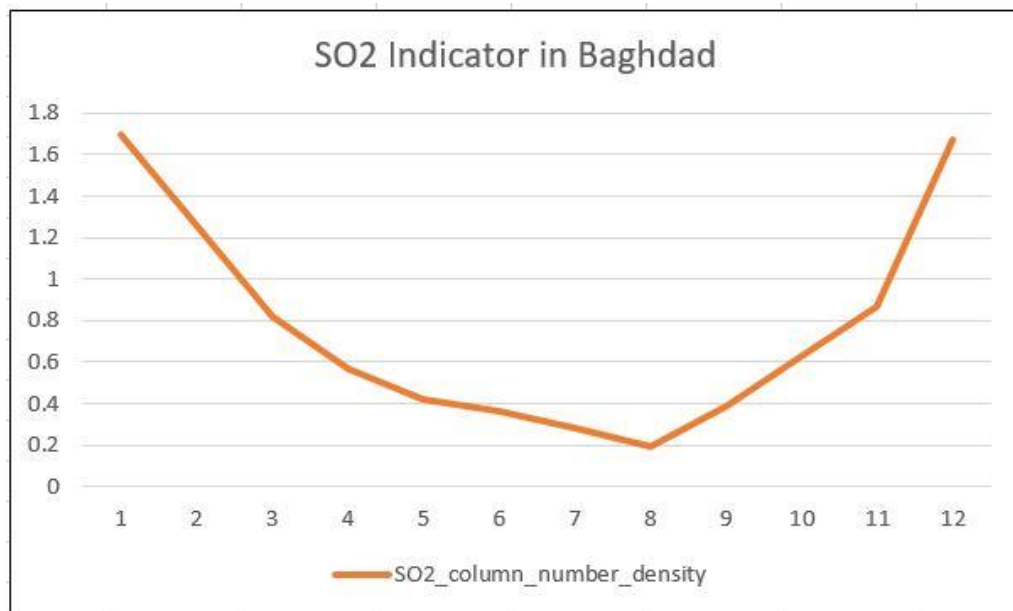
داده‌های دی‌اکسید گوگرد از ماهواره سنتینل-۵ جمع‌آوری شد که به دلیل نظارت جو با وضوح بالا مشهور است. تصاویر لندست برای محاسبه میانگین و حداکثر دمای سطح استفاده شد. این مجموعه داده‌ها با استفاده از موتور زمین گوگل استخراج شدند که امکان پردازش و پیش‌پردازش کارآمد داده‌ها را فراهم می‌کند.

داده‌های خام در معرض پاکسازی و تبدیل گسترده قرار گرفتند. برای دی‌اکسید گوگرد، تراکم عددی ستونی (اندازه‌گیری شده در واحدهای دوبسون^۱) به صورت ماهانه محاسبه شد. در حالی که داده‌های دمایی پردازش شدند تا نقشه‌های حرارتی فضایی نمایانگر الگوهای سالانه و فصلی را تولید کنند. شاخص‌هایی برای سطوح دی‌اکسید گوگرد و تأثیر آنها بر دما استخراج و تحلیل شدند تا روندها را آشکار کنند.

نتایج به شکل نمودار خطی برای غلظت‌های ماهانه دی‌اکسید گوگرد و نقشه‌های تماتیک نمایش‌دهنده توزیع دما تجسم شد. این ترکیب از تحلیل‌های زمانی و فضایی درک کاملی از تعامل بین آلودگی و دمای هوا را فراهم می‌کند.

نمودار تراکم دی‌اکسید گوگرد نشان‌دهنده روندهای فصلی متمایز است:

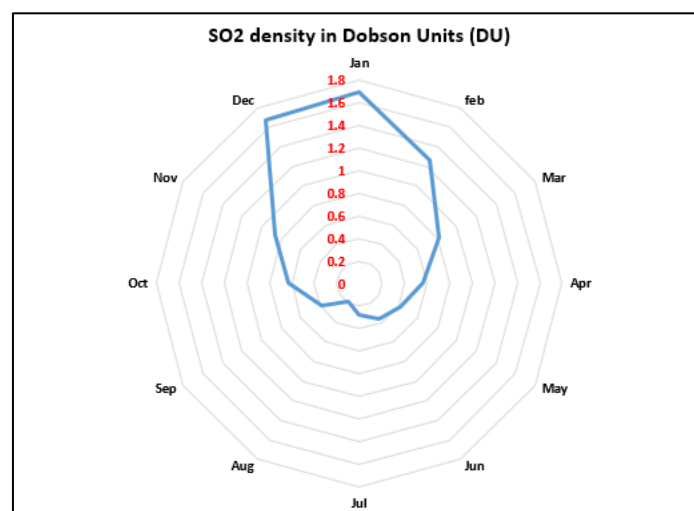
- سطح بالای دی‌اکسید گوگرد در زمستان: بالاترین غلظت‌ها در ژانویه (1.7 DU) و دسامبر (1.67 DU) ثبت شد. این اوج‌ها با افزایش فعالیت صنعتی و گرمایش خانگی در ماه‌های سردتر، همراه با پراکندگی کمتر جو، مطابقت دارد.
- سطح پایین دی‌اکسید گوگرد در تابستان: پایین‌ترین غلظت در آگوست (0.19 DU) رخ داد که نشان‌دهنده پراکندگی بیشتر به دلیل دمای بالاتر و اختلاط قوی‌تر جو است.



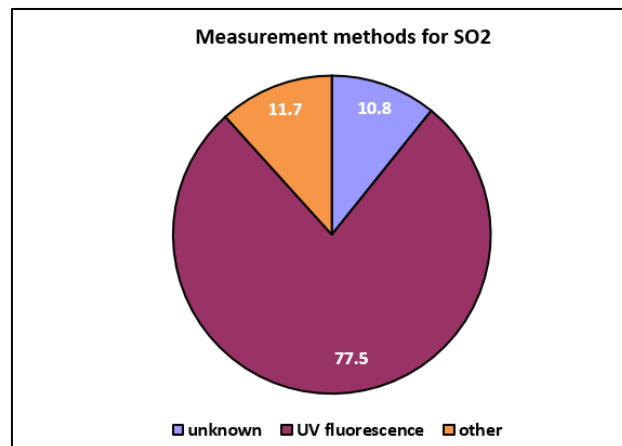
شکل ۲. نمودار شاخص SO_2 در واحد دوبسون (DU) در سال ۲۰۲۳ از گوگل ارث انجین (GEE)

جدول ۱. نمودار شاخص SO_2 اندازه‌گیری شده به واحد دوبسون (DU) در سال ۲۰۲۳

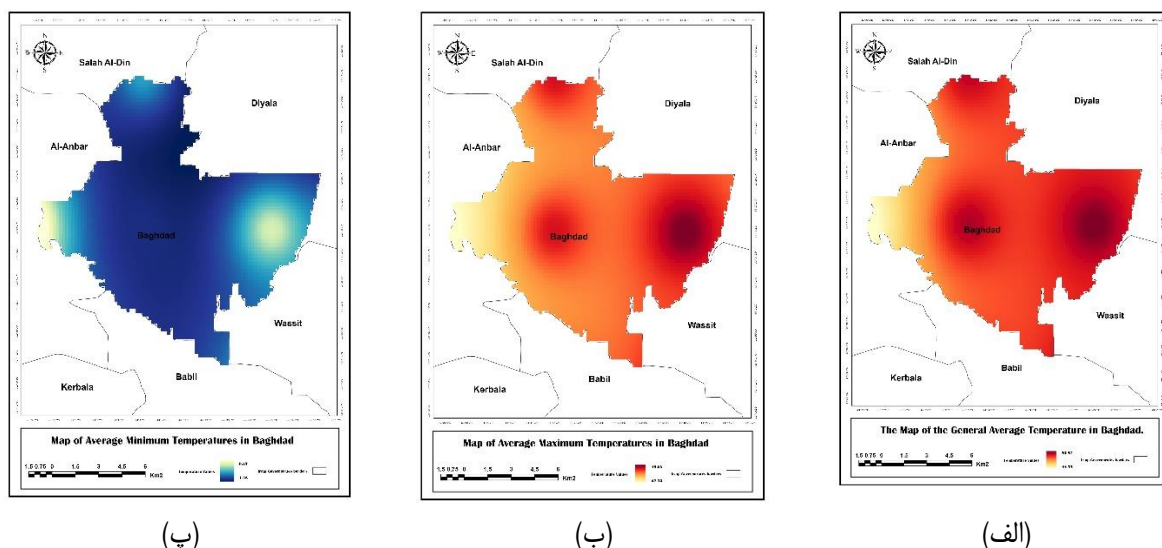
Month	SO2 density in Dobson Units (DU)
Jan	1.7
feb	1.26
Mar	0.82
Apr	0.57
May	0.42
Jun	0.36
Jul	0.28
Aug	0.19
Sep	0.39
Oct	0.63
Nov	0.87
Dec	1.67

شکل ۳. نمودار شاخص SO_2 اندازه‌گیری شده به واحد دوبسون (DU) در سال ۲۰۲۳

نقشه‌های حرارتی میانگین و حداکثر دما نشان دادند که دمای بالا در هسته شهری بغداد متمرکز شده‌است، به ویژه در ماه‌های تابستان. مناطق با دمای بالاتر عموماً با نواحی دارای غلظت کمتر دی‌اکسید گوگرد هم‌راستا هستند، که نشان‌دهنده یک رابطه معکوس است.



شکل ۴. نمودار نشان‌دهنده منابع اندازه‌گیری دی‌اکسید گوگرد بر اساس داده‌های پیش‌بینی منابع انرژی در سراسر جهان



شکل ۵. نقشه‌ی میانگین دمای شهر بغداد در سال ۲۰۲۳. الف: میانگین دما ب: حداکثر دما پ: حداقل دما

همان‌طور که از شکل‌ها و جدول‌های نمایش داده شده بر می‌آید، یک رابطه معکوس بین سطوح دی‌اکسید گوگرد و دمای هوا مشاهده شد. در ماه‌های تابستان، کاهش غلظت دی‌اکسید گوگرد ممکن است ناشی از افزایش واکنش‌های فتوشیمیایی و اختلاط اتمسفری باشد، در حالی که شرایط خنک‌تر زمستانی منجر به تجمع آلاینده‌ها می‌شود. جالب توجه است که اثرات خنک‌کنندگی آئروسول‌ها تأثیر موضعی بر توزیع دما دارد، به ویژه در دوره‌های آلودگی بالا.

این تحلیل تعامل پیچیده بین آلودگی هوا و شرایط آب‌وهوایی در بغداد را برجسته می‌کند. رابطه معکوس بین سطوح دی‌اکسید گوگرد و دما نشان می‌دهد که آلودگی هوای شهری می‌تواند الگوهای آب‌وهوایی محلی را تعدیل کند، به ویژه از طریق اثرات آئروسول. در تابستان که سطوح دی‌اکسید گوگرد در کمترین حد خود است، اثر جزیره حرارتی شهری به دلیل افزایش تابش خورشیدی رسیده به سطح تشدید می‌شود. در مقابل، در زمستان، دی‌اکسید گوگرد و سایر آئروسول‌ها احتمالاً با بازتابش تابش خورشیدی به خنک‌سازی موضعی کمک می‌کنند.

این یافته‌ها نیاز به اقدامات هدفمند کنترل آلودگی، به ویژه در ماه‌های زمستان را برای کاهش اثرات نامطلوب بر کیفیت هوا و سلامت عمومی تأکید می‌کنند. علاوه بر این، مقابله با گرمایش شهری از طریق طرح‌های سبزشازی و برنامه‌ریزی شهری پایدار می‌تواند به خنثی‌سازی افزایش دمای مشاهده‌شده در دوره‌های کم‌آلودگی کمک کند.

۳-۲. تحلیل یافته‌ها و تأثیر سطوح دی‌اکسید گوگرد بر دما و محیط زیست در بغداد

تعامل بین سطوح دی‌اکسید گوگرد و پویایی دما در محیط‌های شهری موضوعی در حال رشد است، به ویژه در مناطق مانند بغداد که آلودگی و دماهای شدید چالش‌های زیست‌محیطی و بهداشتی قابل توجهی را به همراه دارند. تحلیل روندهای دی‌اکسید گوگرد در سال ۲۰۲۳ با استفاده از تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی، بینش‌های ضروری در مورد تأثیرات آنها بر میکروکلیمای شهر و سلامت زیست‌محیطی کلی آن ارائه کرده است. این بخش به نتایج عمیق‌تر می‌پردازد و تأکید می‌کند که چگونه آلودگی دی‌اکسید گوگرد بر تغییرات دمایی، پایداری زیست‌محیطی و پتانسیل راه‌حل‌های مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی برای نظارت و کاهش این تأثیرات تأثیر می‌گذارد.

غلظت دی‌اکسید گوگرد در بغداد الگوی فصلی واضحی را نشان می‌دهد که در زمستان به اوج خود می‌رسد و در ماه‌های تابستان به حداقل می‌رسد. این الگو را می‌توان به عوامل زیر نسبت داد:

- پراکندگی جوئی: در زمستان، پایداری جوئی و کاهش ارتفاع اختلاط به تجمع آلاینده‌هایی مانند دی‌اکسید گوگرد کمک می‌کند. در مقابل، ماه‌های تابستان با ناپایداری جوئی بیشتر همراه هستند که باعث پراکندگی آلاینده‌ها و کاهش غلظت دی‌اکسید گوگرد می‌شود (Seinfeld & Pandis, 2016).
- منابع انتشار: افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی برای گرمایش در ماه‌های زمستان از عوامل اصلی افزایش سطوح دی‌اکسید گوگرد است. فعالیت‌های صنعتی، انتشار خودروها و تولید برق این مشکل را تشدید می‌کنند (Krotkov et al., 2006).
- واکنش‌های فتوشیمیایی: در تابستان، افزایش فعالیت فتوشیمیایی منجر به تجزیه آلاینده‌ها در جو، از جمله دی‌اکسید گوگرد، می‌شود. این فرآیند که توسط تابش خورشیدی بیشتر رانده می‌شود، توضیح‌دهنده کاهش شدید غلظت دی‌اکسید گوگرد در آگوست (0.19 DU) است.

این پویایی فصلی اهمیت در نظر گرفتن زمان در نظارت و مدیریت آلودگی را برجسته می‌کند. تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی نقش حیاتی در این زمینه دارند، زیرا امکان ادغام داده‌های زمانی با تحلیل‌های فضایی را فراهم می‌کنند و بینش‌های عملی برای تصمیم‌گیران به ارمغان می‌آورند.

۳-۳. تأثیر دی‌اکسید گوگرد بر پویایی دما

تعامل بین سطوح دی‌اکسید گوگرد و دماها در بغداد یک رابطه پیچیده را نشان می‌دهد که تحت تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی دی‌اکسید گوگرد قرار دارد:

• اثر خنک‌کنندگی آئروسول

دی‌اکسید گوگرد به تشکیل آئروسول‌های سولفات کمک می‌کند که دارای آلبدو بالایی هستند و می‌توانند تابش خورشیدی ورودی را به فضا منعکس کنند. این پدیده منجر به خنک‌سازی موضعی می‌شود، به ویژه در ماه‌های زمستان که غلظت دی‌اکسید گوگرد در بالاترین سطح خود است. اثر خنک‌کنندگی در توزیع دمای زمستانی بغداد مشهود است، جایی که مناطق با سطوح بالاتر دی‌اکسید گوگرد با دماهای سطحی اندکی پایین‌تر مطابقت دارند (Kaufman et al., 2002).

• اثر جزیره حرارتی شهری^۱

اثر جزیره حرارتی شهری که ناشی از شهرنشینی و کاهش پوشش گیاهی است، در دوره‌های کمبود دی‌اکسید گوگرد تشدید می‌شود. در تابستان، کاهش غلظت دی‌اکسید گوگرد، اثر خنک‌کنندگی آئروسول را از بین می‌برد و اجازه می‌دهد تابش خورشیدی بیشتری به سطح برسد. این امر به تشدید اثر جزیره حرارتی شهری کمک می‌کند، همان‌طور که در نقشه‌های حرارتی توزیع دما حداکثر بغداد منعکس شده است.

• همبستگی زمانی

همبستگی معکوس بین سطوح دی‌اکسید گوگرد و دمای هوا نقش آلودگی را در تعدیل پویایی آب‌وهوایی شهری برجسته می‌کند. برای مثال، در دسامبر و ژانویه، زمانی که سطوح دی‌اکسید گوگرد از ۱۶ DU فراتر می‌رود، اثر خنک‌کنندگی به اندازه کافی قوی است که می‌تواند بر دمای میانگین شهر تأثیر بگذارد. در مقابل، در آگوست، عدم وجود دی‌اکسید گوگرد منجر به ثبت دماهای بالاتر از ۵۰ درجه سانتیگراد در برخی مناطق می‌شود.

این یافته‌ها نقش دوگانه دی‌اکسید گوگرد را به عنوان هم یک آلودگی و هم یک تنظیم‌کننده آب‌وهوایی نشان می‌دهد. در حالی که اثرات خنک‌کنندگی آن ممکن است در کوتاه‌مدت مفید به نظر برسد، پیامدهای درازمدت آلودگی دی‌اکسید گوگرد، از جمله تأثیر آن بر کیفیت هوا و سلامت، هرگونه تسکین موقت از گرما را تحت الشعاع قرار می‌دهد.

۳-۴. پیامدهای زیست‌محیطی آلودگی دی‌اکسید گوگرد

پیامدهای زیست‌محیطی آلودگی دی‌اکسید گوگرد در بغداد فراتر از پویایی دما است:

• خطرات بهداشتی

دی‌اکسید گوگرد یک آلودگی هوا مهم است که خطرات جدی بهداشتی، به ویژه برای جمعیت‌های آسیب‌پذیر مانند کودکان و سالم‌خوردگان، ایجاد می‌کند. قرار گرفتن مزمن در معرض دی‌اکسید گوگرد با بیماری‌های تنفسی و قلبی-عروقی مرتبط است، با خطرات افزایش‌یافته در ماه‌های زمستان که غلظت‌ها در بالاترین سطح خود است.

• گیاهان و اکوسیستم‌ها

سطوح بالای دی‌اکسید گوگرد می‌توانند منجر به رسوب اسیدی شوند که به پوشش گیاهی، کیفیت خاک و اکوسیستم‌ها آسیب می‌زند. در بغداد، این تأثیر به ویژه در مناطق حاشیه‌ای شهر که فعالیت‌های کشاورزی به شرایط خاک حساس وابسته است، برجسته است. نقشه‌برداری فناوری‌های سیستم اطلاعات مکانی از مناطق آسیب‌پذیر می‌تواند به شناسایی مناطق در خطر و هدایت استراتژی‌های کاهش کمک کند.

• مشارکت در تغییرات آب‌وهوایی

در حالی که آئروسول‌های سولفات حاصل از دی‌اکسید گوگرد دارای اثر خنک‌کنندگی کوتاه‌مدت هستند، نقش آنها در رسوب اسیدی و تعامل با سایر گازهای گلخانه‌ای به تغییرات آب‌وهوایی درازمدت کمک می‌کند. این امر لزوم یک رویکرد متعادل برای کنترل آلودگی را که هم تأثیرات محلی و هم جهانی را در نظر می‌گیرد، برجسته می‌کند.

تحلیل سطوح دی‌اکسید گوگرد و تغییرات دمایی در بغداد تعامل پیچیده بین آلودگی و آب‌وهوا را نشان می‌دهد. با استفاده از تکنیک‌های فناوری‌های سیستم اطلاعات مکانی، این مطالعه پویایی زمانی و مکانی این پدیده‌ها را برجسته می‌کند و چارچوبی قوی برای درک و حل مشکلات آنها فراهم می‌کند. در حالی که اثرات خنک‌کنندگی دی‌اکسید گوگرد ممکن است تسکین موقت از حرارت شهری را ارائه دهد، پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی گسترده‌تر لزوم اقدام فوری برای کاهش انتشار و

کاهش اثرات آن را ضروری می‌کند. از طریق مداخلات هدفمند و برنامه‌ریزی شهری پایدار، بغداد می‌تواند مسیر را برای آینده‌ای سالم‌تر و انعطاف‌پذیرتر هموار کند.

۴. نتیجه‌گیری

این مطالعه نقش حیاتی فناوری‌های فناوری‌های سیستم اطلاعات مکانی و سنجش از دور را در پایش تأثیرات زیست‌محیطی دی‌اکسید گوگرد بر پویایی دمایی بغداد نشان می‌دهد. یافته‌ها تعامل پیچیده بین سطوح دی‌اکسید گوگرد، تغییرات دمایی فصلی و الگوهای آب‌وهوای شهری را آشکار می‌سازد و نقش دوگانه این آلاینده را هم به عنوان تنظیم‌کننده آب‌وهوایی و هم تهدید زیست‌محیطی برجسته می‌کند. با استفاده از ابزارهای پیشرفته تحلیل مکانی، سیاست‌گذاران می‌توانند بیش ارزشمندی از پویایی‌های زمانی-مکانی انتشار دی‌اکسید گوگرد و اثرات آن بر آب‌وهوای محلی به دست آورند.

این مطالعه بر ضرورت رویکردهای یکپارچه برای نظارت بر آلودگی و تاب‌آوری آب‌وهوایی تأکید می‌کند که ترکیبی از پیشرفت‌های فناوری و اقدامات سیاستی هدفمند است. پژوهش‌های آینده باید بر بهبود ادغام داده‌ها از طریق حسگرهای حسگرهای اینترنت اشیا و الگوریتم‌های یادگیری ماشین تمرکز کنند تا امکان تحلیل لحظه‌ای و مدل‌سازی پیش‌بینانه از روندهای آلودگی فراهم شود. از طریق مداخلات پیشگیرانه و برنامه‌ریزی شهری پایدار، شهرهایی مانند بغداد می‌توانند اثرات نامطلوب دی‌اکسید گوگرد را کاهش دهند، سلامت عمومی را حفظ کنند و آینده‌ای مقاوم‌تر بسازند.

پیشنهادهای

• نظارت و ادغام داده‌های پیشرفته

در پیاده‌سازی حسگرهای اینترنت اشیا برای تکمیل داده‌های ماهواره‌ای سرمایه‌گذاری کنید تا نظارت لحظه‌ای بر سطوح دی‌اکسید گوگرد و تغییرات دمای محلی را ممکن سازد. ادغام اندازه‌گیری‌های مبتنی بر زمین با داده‌های دورسنجی می‌تواند دقت و وضوح تحلیل‌های زیست‌محیطی را بهبود بخشد.

• راهبردهای کاهش آلودگی

قوانین سختگیرانه‌تری برای انتشار صنعتی وضع کنید و از انرژی‌های پاک‌تر برای کاهش سطوح دی‌اکسید گوگرد حمایت کنید. مداخلات هدفمند، مانند استفاده از خودروهای برقی و ایجاد مناطق سبز، می‌توانند تأثیر آلودگی بر آب‌وهوا را بیشتر کاهش دهند.

• برنامه‌های سبزسازی شهری

فضاهای سبز شهری را گسترش دهید تا اثر جزیره حرارتی شهری را خنثی کنید و کیفیت هوا را بهبود بخشید. پوشش گیاهی می‌تواند به عنوان یک مخزن طبیعی برای آلاینده‌ها عمل کند و غلظت دی‌اکسید گوگرد را کاهش دهد و دمای محلی را تعدیل کند.

• ایجاد ظرفیت و آگاهی عمومی

برنامه‌های آموزشی برای برنامه‌ریزان شهری و سیاست‌گذاران در مورد استفاده از فناوری سیستم اطلاعات مکانی و سنجش از دور برای نظارت زیست‌محیطی ایجاد کنید. افزایش آگاهی عمومی در مورد خطرات بهداشتی مرتبط با آلودگی دی‌اکسید گوگرد می‌تواند به اقدامات سطح جامعه برای کاهش انتشار منجر شود.

• برنامه‌ریزی شهری انعطاف‌پذیر در برابر تغییرات آب‌وهوایی

بیش‌های مبتنی بر فناوری‌های سیستم اطلاعات مکانی را در فرآیندهای برنامه‌ریزی شهری ادغام کنید تا شهرهای انعطاف‌پذیر طراحی شوند. تحلیل‌های فضایی روندهای آلودگی و دمایی می‌تواند توسعه زیرساخت‌ها را هدایت کنند و اطمینان حاصل کنند که رشد شهری با اهداف پایداری هماهنگ است.

References

- Adams, W. J., & Garman, E. R. (2024). Recommended updates to the USEPA framework for metals risk assessment: aquatic ecosystems. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 20(4), 924-951.
- Al-Sheikhly, O. F., Fazaa, N. A., Hammadi, J. A., Habba, M. K., Hammod, N. M., & Al-Obeidi, L. A. (2022). A Rare Record of an Albino Eurasian Otter *Lutra lutra* in Central Iraq. *IUCN Otter Spec. Group Bull.*, 39, 223-228.
- Al-Sheikhly, O. F., Haba, M. K., Fazaa, N. A., Al-Barazengy, A. N., Al-Haideri, M. L., & Al-Joborey, A. D. (2020). New records of the Iraqi eyelid gecko, *Eublepharis angramainyu* Anderson et Leviton, 1966 (Sauria: Eublepharidae) from Iraq. *Russian Journal of Herpetology*, 27(4), 240-244.
- Cameron, W. D., Bernath, P., & Boone, C. (2021). Sulfur dioxide from the atmospheric chemistry experiment (ACE) satellite. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 258, 107341.
- CENTRES, E. (2020). European Space Agency—ESA. *Organization*.
- Dean, S. (2001). Natural atmospheres: corrosion. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 5930-5938.
- Dilawar, A., Chen, B., Ul-Haq, Z., Amir, M., Arshad, A., Hassan, M., Guo, M., Shafeeque, M., Fang, J., & Song, B. (2023). Investigating the potential climatic effects of atmospheric pollution across China under the National Clean Air Action Plan. *Remote Sensing*, 15(8), 2084.
- Dovrou, E., Bates, K. H., Moch, J. M., Mickley, L. J., Jacob, D. J., & Keutsch, F. N. (2022). Catalytic role of formaldehyde in particulate matter formation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(6), e2113265119.
- Fiore, A. M., Naik, V., & Leibensperger, E. M. (2015). Air quality and climate connections. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(6), 645-685.
- Gad, S. C., & Sullivan Jr, D. W. (۲۰۱۶). Ninth triennial toxicology salary survey. *International journal of toxicology*, 35(2), 243-251.
- Health, U. D. o., & Services, H. (1999). Agency for Toxic Substances and Disease Registry-ATSDR.
- Joslyn, M., & Braverman, J. (1954). The chemistry and technology of the pretreatment and preservation of fruit and vegetable products with sulfur dioxide and sulfites. In *Advances in food research* (Vol. 5, pp. 97-160). Elsevier.
- Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Boucher, O. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419(6903), 215-223.
- Kondratyev, N., Kazantsev, E., Osipov, M., Rudenko, O., & Krylova, E. (2018). Determination of sources of sulfur dioxide in confectionery. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 80(4), 203-208.
- Krishnan, D. D. (2023). Submitted via Email: Kannan. krishnan@ oehha. ca. gov Office of Environmental Health Hazard Assessment California Environmental Protection Agency 1001 I Street, 12th Floor Sacramento, California 95814.
- Krotkov, N. A., Carn, S. A., Krueger, A. J., Bhartia, P. K., & Yang, K. (2006). Band residual difference algorithm for retrieval of SO₂ from the aura ozone monitoring instrument (OMI). *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 44(5), 1259-1266.
- Lerche, D., Van de Plassche, E., Schwegler, A., & Balk, F. (2002). Selecting chemical substances for the UN-ECE POP protocol. *Chemosphere*, 47(6), 617-630.

- LEVELS, S. R. (2012). California Environmental Protection Agency Office of Environmental Health Hazard Assessment.
- Lo, N. C., Bezerra, F. S. M., Colley, D. G., Fleming, F. M., Homeida, M., Kabatereine, N., Kabole, F. M., King, C. H., Mafe, M. A., & Midzi, N. (2022). Review of 2022 WHO guidelines on the control and elimination of schistosomiasis. *The Lancet Infectious Diseases*, 22(11), e327-e335.
- Matejicek, L. (2005). Spatial modelling of air pollution in urban areas with GIS: a case study on integrated database development. *Advances in geosciences*, 4, 63-68.
- Schlesinger, M. E., Malyshev, S., Rozanov, E. V., Yang, F., Andronova, N. G., De Vries, B., Grubler, A., Jiang, K., Masui, T., & Morita, T. (2000). Geographical distributions of temperature change for scenarios of greenhouse gas and sulfur dioxide emissions. *Technological Forecasting and Social Change*, 65(2), 167-193.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.
- Sidharthan, K., Gandhimathi, A., & Akshayaa, M. (2024). Spatial variation of air pollutants by using GIS modelling. *GLOBAL NEST JOURNAL*, 26(۲).
- Song, S. (2008). A GIS based approach to spatio-temporal analysis of urban air quality in Chengdu Plain. *The International Achieves of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37.
- Sullivan Jr, J. B., Van Ert, M. D., Krieger, G. R., & Peterson, M. E. (2013). Indoor environmental quality and health. In *Small Animal Toxicology* (pp. 139-158). Elsevier.
- Susetyo, S. H., Abidin, A. U., Nagaya, T., Kato, N., & Matsui, Y. (2024). Environmental health risk assessment and acute effects of sulfur dioxide (SO₂) inhalation exposure on traditional sulfur miners at Ijen Crater Volcano, Indonesia. *Toxicology Reports*, 13, 101772.
- Tikader, M., Mukhopadhyay, D., & Dabhadker, K. (2024). Remote sensing and GIS in air pollution mitigation: a bibliometric review of Chhattisgarh, India. *Int J Environ Climate Change*, 14(4), 174-193.
- Timmermans, R., Segers, A., Curier, L., Abida, R., Attié, J.-L., El Amraoui, L., Eskes, H., De Haan, J., Kujanpää, J & ,Lahoz, W. (2019). Impact of synthetic space-borne NO₂ observations from the Sentinel-4 and Sentinel-5P missions on tropospheric NO₂ analyses. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(19), 12811-12833.
- Ward, P. L. (2009). Sulfur dioxide initiates global climate change in four ways. *Thin solid films*, 517(11), 3188-3203.