

Comparison of Correlation between Climatic Clements Affecting the Time Dispersion of CO and SO₂ in Mazandaran Province¹

Aliasghar Shirzad

PhD student in Climatology and Environmental Planning, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Ali Mohammad Khorshiddoost 

Professor, Department of Climatology and Planning, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Saeid Jahanbakhsh Asl

Professor, Department of Climatology and Planning, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 24 November 2024 Revised: 26 December 2024 Accepted: 28 December 2024

Abstract

Urban air pollution currently stands as one of the most significant global environmental challenges, with extensive research confirming its detrimental effects on human health and ecosystems. Recent advancements in computer and atmospheric sciences have unveiled new opportunities for assessing the health impacts associated with air pollution. In line with this approach, the present study investigates the relationship between influential climatic elements and key air pollutants, i.e. carbon monoxide (CO) and sulfur dioxide (SO₂). This applied research employs an analytical-software-based methodology. Satellite imagery from various sensors, including Sentinel-5, was utilized across different time scales. After filtering out cloudy days, data pertaining to CO and SO₂ pollutants were coded and extracted on a monthly basis using the Google Earth Engine

1. This paper is extracted from the first author's doctoral dissertations submitted to the University of Tabriz

2. Corresponding Author. Email: khorshid@tabrizu.ac.ir



©2024 The author(s). This is an open access article under the CC BY license: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

How to cite this article: Shirzad, A., Khorshiddoost, A. M. and Jahanbakhsh Asl, S. (2026). Comparison of Correlation between Climatic Clements Affecting the Time Dispersion of CO and SO₂ in Mazandaran Province. Journal of Geography and Regional Development, 23(4), 61-79. Doi: 10.22067/jgrd.2024.90939.1496

platform. Subsequently, the extracted data was subject to analysis in the Minitab software using Pearson correlation coefficients. The results suggest that among the climatic elements studied, monthly precipitation (31%) demonstrated the highest correlation with carbon monoxide, while albedo (9.5%) exhibited the lowest. For sulfur dioxide, the highest and the lowest correlation was found for the latent heat flux (34%), and shortwave radiation (14%), respectively. Furthermore, the findings suggest that certain climatic variables have a low impact on the distribution of these pollutants within the province. Considering the escalating population growth, comprehensive development, and multifaceted environmental changes in the province, the results underscore the importance of addressing air pollution and the role of atmospheric pollutants. This highlights further attention from officials, policymakers, and the public alike.

Keywords: CO and SO₂ Pollutants, Temporal Analysis of Air Pollution, Influential Climatic Elements, Mazandaran Province.

بررسی مقایسه میزان همبستگی عناصر اقلیمی مؤثر بر پراکندگی زمانی آلاینده‌های CO و SO₂ در استان مازندران^۱

علی‌اصغر شیرزاد (دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران)

a.shirzad@tabrizu.ac.ir

علی محمد خورشید دوست  (استاد گروه اقلیم‌شناسی و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، نویسنده

مسئول)

khورشid@tabrizu.ac.ir

سعید جهانبخش اصل (استاد گروه اقلیم‌شناسی و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران)

s_jahan@tabrizu.ac.ir

چکیده

آلودگی هوای شهرها امروزه یکی از چالش‌های اساسی و گسترده زیست‌محیطی در جهان به‌شمار می‌رود و آثار مخرب آن بر سلامت انسان، کیفیت زندگی و پایداری محیط‌زیست به‌طور مستند در بسیاری از پژوهش‌ها گزارش شده است. پیشرفت‌های اخیر در علوم رایانه و علوم جوی امکان تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تر آلاینده‌های جوی و نقش عوامل اقلیمی مؤثر بر آن‌ها را فراهم کرده است. پژوهش حاضر نیز با هدف بررسی ارتباط میان عناصر اقلیمی و دو آلاینده مهم یعنی منواکسید کربن (CO) و دی‌اکسید گوگرد (SO₂) در استان مازندران انجام شده است. این تحقیق از نظر ماهیت در زمره تحقیقات کاربردی و از نظر روش در گروه مطالعات تحلیلی-نرم‌افزاری قرار می‌گیرد. در این پژوهش داده‌های ماهواره‌ای سنجنده‌های مختلف، به‌ویژه Sentinel-5، برای دوره‌های زمانی متفاوت جمع‌آوری شد. پس از فیلترگذاری روزهای دارای پوشش ابری، داده‌های آلاینده‌های CO و SO₂ در محیط Google Earth Engine پردازش و استخراج گردید. داده‌ها به‌صورت ماهانه تهیه و سپس در نرم‌افزار Minitab با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که برای آلاینده CO، عنصر بارش ماهانه با ۳۱ درصد بالاترین همبستگی و آلبدو با ۹.۵ درصد کمترین میزان همبستگی را داشتند. همچنین برای SO₂، بیشترین همبستگی مربوط به شار گرمای نهان با ۳۴ درصد و کمترین مقدار مربوط به تابش موج‌کوتاه با ۱۴ درصد بود. این نتایج بیانگر آن است که برخی عناصر اقلیمی نقش محدودی در پراکنش آلاینده‌ها در سطح استان دارند. با توجه به رشد جمعیت، توسعه گسترده تغییرات

۱. این مقاله مستخرج از رساله دکتری نویسنده اول در دانشگاه تبریز است.

محیطی در استان، نتایج پژوهش ضرورت توجه ویژه به مدیریت آلودگی هوا و ارتقای آگاهی عمومی را نشان می‌دهد و بر لزوم اقدام جدی مسئولان و برنامه‌ریزان در این حوزه تأکید دارد.

واژگان کلیدی: آلاینده‌های CO و SO₂، تحلیل زمانی آلودگی هوا، عناصر اقلیمی مؤثر، استان مازندران.

۱. مقدمه

امروزه آلاینده‌های گوناگونی که بر اثر فعالیت‌های طبیعی و انسانی مثل فعالیت‌های بیولوژیکی (بارهان و اندرسون^۱، ۲۰۰۴) یا غیره وارد جو می‌شوند، به‌حدی هستند که سیر صعودی افزایش پدیده آلودگی جوی از نظر غلظت و نوع آلاینده از منظر سازمان‌ها چون سازمان حفاظت محیط‌زیست به مرز هشداردهنده‌ای رسیده است (شفیع‌پور، ۱۳۸۷، ص. ۴۰). منبع اصلی آلودگی و گرم شدن کره زمین قطعاً ناشی از فعالیت‌های صنعتی، خودروها و تولید انرژی، به‌ویژه احتراق سوخت‌ها، بیوگاز، سوخت‌های زیستی و سوخت‌های فسیلی است (ارشد و همکاران^۲، ۲۰۲۴) طبق برآورد سازمان بهداشت جهانی هر ساله سه میلیون نفر در سراسر جهان در اثر تأثیر مستقیم آلودگی هوا جان خود را از دست می‌دهند (کرمانی و همکاران، ۱۳۹۵، ص. ۱۳) و تخمین زده می‌شود این مقدار تا ۷ میلیون نفر هم برسد (کیم و همکاران^۳، ۲۰۲۰؛ یلدریم^۴، ۲۰۲۳). در سال‌های اخیر مطالعات انجام‌گرفته در نواحی مختلف جهان نشان می‌دهد که در مقیاس جهانی میزان مرگ‌ومیر، مراجعه‌کننده به مراکز درمانی در ارتباط با موج‌های گرما، یا هنگام غلظت‌های بالای آلاینده جوی در شرایط آب و هوایی تنش‌زا در حال افزایش است (خورشید دوست و همکاران، ۱۳۹۲، ص. ۱۰۴). برای نمونه ذرات معلق در فضای باز (PM) به‌عنوان ششمین عامل اصلی بیماری در جهان است که مسئول مرگ زودرس سالانه حدود ۴.۱ میلیون نفر است (مؤسسه اثرات سلامت، ۲۰۱۸).

1. Burnham & Anderson
2. Arshad, K
3. Kim, M.
4. Yildirim

افزایش میزان آلاینده‌ها از سطوح مجاز در سطح کوتاه‌مدت و بلندمدت بر محیط‌زیست اثرگذار بوده که اثرگذاری کوتاه‌مدت به‌صورت بروز و تشدید بیماری‌های چشمی، تنفسی، ریوی، سرطان و اثرگذاری بلندمدت آلودگی هوا به‌صورت تأثیر بر نقشه ژنتیکی بدن جانداران، میزان هوش و فیزیولوژی بدن ظاهر می‌شود. هوای آلوده، آب‌وخاک را آلوده ساخته و آبزیان و گیاهان را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد و این مواد با قرارگیری در زنجیره غذایی موجب آسیب‌رسانی می‌شود (عزتیان و هاشمی‌نسب، ۱۳۹۰، ص. ۱۴۵).

اپیزودهای شدید آلودگی در محیط شهری معمولاً به افزایش ناگهانی انتشار آلاینده‌ها نسبت داده نمی‌شود، بلکه به شرایط هواشناسی خاصی که توانایی جو برای پراکندگی آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد نسبت داده می‌شود (چنگ و همکار، ۲۰۰۰). در اکثر مواقع افزایش سیر صعودی آلودگی هوا با عملکرد پارامترهای اقلیمی مانند تابش، سرعت و جهت باد، میزان افت اتمسفری و غیره درهم‌آمیخته شده و بر شدت عملکرد آن افزوده می‌شود. مانند عملکرد باد و تغییر درجه حرارت که با حرکت افقی و قائم، آلاینده‌ها را جابه‌جا کرده و باعث افزایش غلظت آلاینده‌ها می‌شود. تأثیر آلودگی هوا بر دمای شدید موجب تغییر میزان مرگ‌ومیر شده و بر سلامت انسان مؤثر است (رومن و اسچویترو^۲ ۲۰۰۷، ص. ۸۲۵). در سراسر دنیا تحقیقات انجام‌شده بر روی آلاینده‌های هوا و عناصر اقلیمی نیز علاوه بر تأیید مطالب فوق حاکی از وجود ارتباط بین این دو عامل و میزان بروز بیماری‌ها و مرگ‌ومیرها است (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۹، ص. ۲۴۷۸).

به نظر می‌رسد علاوه بر کنترل آلودگی‌ها، مطالعه نقش آلاینده‌ها به‌خصوص از نظر اقلیمی در اقلیم کره زمین در آینده از اهمیت زیادی برخوردار باشد؛ چراکه روزه‌روز بر میزان آلودگی‌های انسانی و طبیعی افزوده‌شده و شرایط به‌گونه‌ای پیش می‌رود که بر اثر افزایش آلودگی هوا زندگی کل انسان‌ها و حتی سایر موجودات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سلامت انسان به روش‌های پیچیده‌ای با عوامل آب و هوایی مرتبط است و تغییرات آب‌وهوایی می‌تواند تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم عمیقی بر

1. Cheng, S

2. Ramón & J. Schwartz

وضعیت سلامت هر منطقه داشته باشد (نیرا و همکاران^۱، ۲۰۲۳) و این امر مستلزم مطالعات کامل و دقیق‌تری از منابع آلودگی‌ها و منشأ آن‌ها، مدلسازی آن در بعد زمان و مکان برای پیش‌بینی در آینده است.

یکی از نکات قابل توجه این است که روش‌های میدانی اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌های هوا که توسط ایستگاه‌های زمینی سنجش آلودگی هوا صورت می‌گیرد، باتوجه به تعداد ایستگاه‌ها نسبت به وسعت شهرها بسیار اندک بوده و توزیع یکنواختی ندارند. استفاده از تکنولوژی‌های نوین سنجش از دور ماهواره‌ای می‌تواند جایگزین مناسب و کم‌هزینه‌ای برای اندازه‌گیری‌های زمینی باشد (احسانی و بیگدلی، ۱۳۹۹، ص. ۹۹). از این رو باتوجه به در دسترس بودن امکانات ماهواره‌ای در کشور در سال‌های اخیر نیاز به پایش و کنترل آلاینده‌ها هوا، در سطح وسیع با روش‌هایی که از سرعت و دقت بیشتر و هزینه کمتری برخوردار باشند، احساس می‌شود (قربانی‌سالخورد، ۱۳۸۹)؛ به‌خصوص اینکه این احساس نیاز زمانی بیشتر نمود پیدا می‌کند که ما بدانیم پایش و پیش‌بینی پارامترهای کیفی هوا در مناطق شهری یکی از چالش‌های محیط‌زیست شهری محسوب می‌گردد و برای مطالعات آن به اطلاعات با وضوح فضایی بسیار بالایی نیاز است تا متغیرهای مکانی و زمانی شرایط اقلیمی و آلودگی هوا در یک شهر را به تصویر بکشند (والاری و منوت^۲، ۲۰۰۸). این مسئله به عوامل متعددی از جمله توپوگرافی، اقلیم، جمعیت و شبکه حمل‌ونقل وابسته بوده که نحوه تعامل این عوامل پدیده‌های دینامیک، غیرخطی و پیچیده است. از طرفی از آنجایی که پدیده آلودگی هوا به دلیل پیچیدگی و وابستگی به عوامل مختلف، دارای دینامیک غیرخطی است بنابراین ابتدا باید زمینه‌های دقیق آلودگی هوا برای کمی‌سازی (آلیمیسز و همکاران^۳، ۲۰۱۸، ص ۲۰۵)، چگونگی انتشار و پراکندگی مواد آلاینده در جو مشخص شود، سپس اقدام به مدلسازی مانند (مدل کیفیت چندمنظوره

1. Neira, M.

2. Valari & L. Menut

3. Alimissis et al 2018

هوا، مدل پیش‌بینی با شیمی، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) (ژانگ و همکاران^۱، ۲۰۱۶) کرد؛ چراکه مدلسازی آلودگی به‌منظور محاسبه غلظت و توزیع زمانی- مکانی آلاینده‌ها امری ضروری بوده و پیش‌بینی بلندمدت شاخص کیفیت هوا (AQI) یک رویکرد مؤثر برای هشدار زودهنگام و واکنش سریع به رویدادهای آلودگی است. هرچند در کنار اهمیتی که مسیریابی و منشأیابی حرکت آلاینده‌های جوی در شرایط رخداد آلودگی‌های حادی دارد (زرگری و همکاران، ۱۳۹۸)، از طرفی این یافته‌ها بینش‌های ارزشمندی را برای حفاظت از محیط‌زیست، انتقال انرژی‌های تجدیدپذیر، بهره‌وری انرژی، برنامه‌ریزی کاربری پایدار زمین و آگاهی عمومی ارائه می‌دهد (المبیدین و همکاران^۲، ۲۰۲۴). اما رویکردهای موجود برای پیش‌بینی کیفیت هوا در بلندمدت نیاز به پیشرفت بیشتری دارند (ژانگ و همکاران^۳، ۲۰۲۰).

استان مازندران با بیش از سه و نیم میلیون جمعیت ثابت و چند میلیون جمعیت متغیر در طول سال علاوه بر اینکه یکی از پرتعدادترین استان‌های ایران محسوب می‌شود، از نظر صنعت کشاورزی، لبنیاتی، تولیدات صنایع سبک و غیره نیز جزو استان‌های فعال بوده و دارای منابع بسیار زیادی جهت توسعه در سطح کشور است، اما در طی سال‌های اخیر به دلیل استفاده‌های غیراصولی از سوخت‌های فسیلی، ساخت‌وسازهای بی‌رویه، مهاجرت و سکن‌گزینی افراد سالخورده و بازنشسته سایر استان‌ها در کنار نوسانات اقلیمی، وضعیت جوی این استان از نظر آلودگی هوا دچار تغییراتی شده است که در برخی از روزهای سال به‌خوبی می‌توان اثرات آن را مشاهده نمود و اگر از همین ابتدای کار فکری به حالش نشود در آینده نزدیک شاهد موارد مشابه آنچه امروز در کلان‌شهرها مشاهده می‌شود در شهرهای این استان خواهیم بود. از طرفی باتوجه به اینکه تأثیر آلودگی بر گیاهان و محصولات کشاورزی در طی سال‌های اخیر به‌کرار مورد توجه محققین قرار گرفته و مشخص گردید که عملکرد گیاهانی که در برابر آلودگی قرار می‌گیرند، به‌شدت کاهش یافته مانند (لکه‌های ایجاد شده برگ

1. Zhang, Y

2. MA Almubaidin,

3. Zhang, et al 2020

گیاهان و ریزش برگ‌ها زودتر از موعد) و خسارات اقتصادی فراوانی به بخش کشاورزی وارد شده است (عبدالمنافی جهرمی و همکاران، ۱۳۹۱، ص. ۵۲۳). این تأثیرگذاری در استان مازندران که جزو استان‌های سرآمد کشور از نظر کشاورزی و تولید مواد غذایی جامعه به مراتب شرایط حادثتری در آینده ایجاد خواهد کرد. اما متأسفانه این مسئله مذکور تاکنون در استان مازندران چندان مورد توجه قرار نگرفته است و یا چندان جدی گرفته نشده است؛ درحالی که به نظر می‌رسد مطالعه این پدیده جوی در استان مازندران که یکی از استان‌های استراتژیک از جنبه‌های مختلف امنیت غذایی، صنعت گردشگری و غیره محسوب می‌شود لازم و ضروری باشد، به‌ویژه آنکه انجام چنین کارهایی با به‌کارگیری روش‌های نوین مدلسازی و با استفاده از تحلیل کامپیوتری مثل یادگیری ماشین و کدنویسی می‌توان نتایج به مراتب دقیق‌تر و کامل‌تری در جهت شناخت وضعیت اقلیمی استان از نظر آلاینده‌های جوی ارائه دهد.

با وجود تنوع گسترده آلاینده‌های جوی، این تحقیق به دلیل اهمیت راهبردی استان مازندران و وجود کانون‌های متعدد انتشار، بر ارزیابی دو آلاینده کلیدی دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و مونوکسید کربن (CO) تمرکز دارد. انتخاب این دو پارامتر متأثر از فعالیت‌های صنعتی و انسانی گسترده در استان است؛ به‌گونه‌ای که نیروگاه برق نکا، حجم بالای حمل‌ونقل جاده‌ای در چهار شاهراه اصلی متصل به پایتخت و دیگر کلان‌شهرها، فعالیت‌های وسیع کشاورزی و دامپروری، و همچنین مصارف گرمایشی، منابع اصلی تولید و انتشار این آلاینده‌ها محسوب می‌شوند که عمدتاً از طریق احتراق سوخت‌های حاوی گوگرد نظیر زغال‌سنگ و برخی فرآورده‌های نفتی در محیط آزاد می‌شوند. در بُعد بهداشتی، مطالعات اپیدمیولوژیکی متعددی (نظیر آسی‌کانیان و همکاران، ۲۰۱۶؛ برودل و همکاران، ۲۰۱۷) بر اثرات مخرب این آلاینده‌ها بر سیستم قلبی-عروقی و دستگاه تنفسی تأکید دارند؛ در این میان، SO_2 به‌عنوان محرک قدرتمند مجاری تنفسی، در بسیاری از حوادث جهانی آلودگی هوا نقشی تعیین‌کننده داشته و با افزایش نرخ مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های تنفسی و سرطان

ریه مرتبط است (یانگ و همکاران، ۲۰۱۴). از سوی دیگر، مونوکسید کربن به عنوان گازی بی رنگ، دارای بویی خفه کننده و چگالی حدود دو برابر هوا، نه تنها یکی از آلاینده های اصلی با ماندگاری ۲ تا ۴ روز در اتمسفر است، بلکه به عنوان یک گاز گلخانه ای پیشرو در تغییرات اقلیمی شناخته می شود که ضرورت پایش مستمر آن در گستره جغرافیایی مازندران را دوچندان می سازد.

۲. روش پژوهش

استان مازندران بین ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ قرار گرفته است. این استان در قسمت شمال مرکزی ایران واقع و از شمال به دریای مازندران، از جنوب و جنوب شرقی به استان های تهران و سمنان، از غرب و جنوب غربی به گیلان و از شرق به استان گلستان محدود است. استان مازندران با مساحت ۲۳۷۵۶ کیلومتر مربع وسعت، ۱/۴۶ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است (سالنامه آماری استان مازندران، ۱۳۹۵). در شکل شماره ۱ محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.



نقشه ۱. محدوده مورد مطالعه

منبع: یافته های نگارنده، ۱۴۰۳

۳. داده‌های پژوهش

در تحقیق حاضر به جهت نبود ایستگاه‌های زمینی کافی و مناسب از یک سو، نبود اطلاعات جامع و کافی از سوی دیگر و همچنین با توجه به این که رفتار آلاینده‌ها در واحدهای زمانی کوچک (نظیر روز) بسیار نامنظم و متغیر است از واحد زمانی ماهانه برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان و با ثبات بیشتر و نیل به الگوی رفتاری مشخص استفاده شده است. در همین راستا، هدف پژوهش حاضر بررسی زمانی و مکانی رفتار آلاینده‌های مونوکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن، ازن تروپوسفری، ذرات معلق، و دی‌اکسید گوگرد است. با توجه به این که رفتار آلاینده‌ها در واحدهای زمانی کوچک (نظیر روز) بسیار نامنظم و متغیر است، در این پژوهش واحد زمانی فصل برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان و با ثبات بیشتر و نیل به الگوی رفتاری مشخص انتخاب شده است (رنجبر و همکار، ۱۳۹۸، ص. ۷۴). این داده‌ها براساس تصاویر ماهواره‌ای مانند سنجنده Sentinel-5P، NASA/GLDAS و داده‌های بازتحلیل شده موجود پس از کدنویسی در محیط googleearthengine استخراج گردید و سپس با استفاده از مدلسازی آماری و تحلیل نرم‌افزاری به تجزیه و تحلیل پرداخته شده است. داده‌های استفاده شده در تحقیق حاضر شامل موارد زیر است.

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده در تحقیق

منبع: یافته‌های نگارنده، ۱۴۰۳

نام متغیر	نوع داده	واحد	کد دریافتی
حداقل دما	مستقل	C	"IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE"
حداکثر دما	مستقل	C	"IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE"
بارش	مستقل	mm	"IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE"
برف	مستقل	mm	"IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE"
تبخیر و تعرق	مستقل	mm	"IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE"
باد	مستقل	C	"IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE"
آلییدو	مستقل	%	"NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H"

نام متغیر	نوع داده	واحد	کد دریافتی
تابش کوتاه	مستقل	W/m^2	"NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H"
دمای خاک	مستقل	K	"NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H"
میانگین دما	مستقل	K	"NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H"
سرعت باد	مستقل	m/s	"NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H"
میانگین تابش	مستقل	W/m^2	"NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H"
شار حرارتی	مستقل	W/m^2	"NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H"
فشار	مستقل	H	"NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H"
تابش موج بلند	مستقل	W/m^2	"NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H"
شار گرمای نهان	مستقل	W/m^2	"NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H"
دی اکسید گوگرد	وابسته	mol/m^2	"COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_CO"
مونو اکسید کربن	وابسته	mol/m^2	"COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_CO"

پس از دریافت داده‌های مورد نیاز و انتخاب مدل و روش مناسب برای تجزیه و تحلیل در ادامه از نرم افزار MINITAB استفاده گردید. در این مرحله با توجه به نوع داده‌ها و استاندارد نبودن و غیرنرمال بودن برخی از داده‌ها در ابتدا تمامی داده‌ها با مدل Johnson Transformation استاندارد گردید.

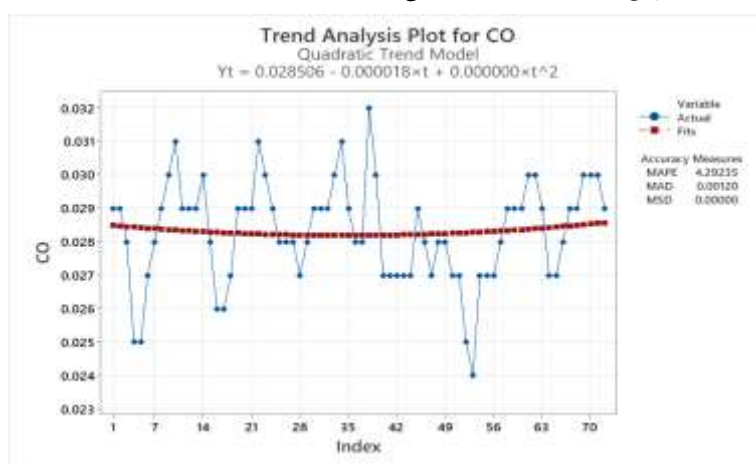
الگوریتم تبدیل جانسون به این صورت است که ابتدا پارامترهای مورد نیاز توابع تبدیل را تخمین می‌زند، سپس همه متغیرهای غیرنرمال را با هر سه تابع تبدیل از سه خانواده توابع توزیع موجود در سیستم جانسون، تبدیل می‌کند سپس آزمون فرض اندرسون دارلینگ را برای هر سه سری متغیر تبدیل یافته انجام می‌دهد و هر کدام از آزمون فرض‌ها که بیشترین p-value را داشته باشد را به عنوان بهترین تبدیل استفاده می‌کند. توابع توزیع تبدیل به شرح زیر هستند:

SB	$\gamma + \eta \ln [(x - \varepsilon) / (\lambda + \varepsilon - x)]$	$\eta, \lambda > 0, -\infty < \gamma < \infty, -\infty < \varepsilon < \infty,$ $\varepsilon < x < \varepsilon + \lambda$
SL	$\gamma + \eta \ln (x - \varepsilon)$	$\eta > 0, -\infty < \gamma < \infty, -\infty < \varepsilon < \infty,$ $\varepsilon < x$
SU	$\gamma + \eta \sinh^{-1} [(x - \varepsilon) / \lambda]$	$\eta, \lambda > 0, -\infty < \gamma < \infty, -\infty < \varepsilon < \infty,$ $-\infty < x < \infty$
$\sinh^{-1}(x) = \ln [x + \sqrt{1 + x^2}]$		

پس از تبدیل داده‌ها و نرمال‌سازی آنها در ادامه به بررسی ارتباط بین دی‌اکسید کربن و گوگرد با متغیرهای وابسته اقلیمی پرداخته و در نهایت مقایسه نتایج دو گاز آلوده‌کننده جو مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۴. یافته‌های پژوهش

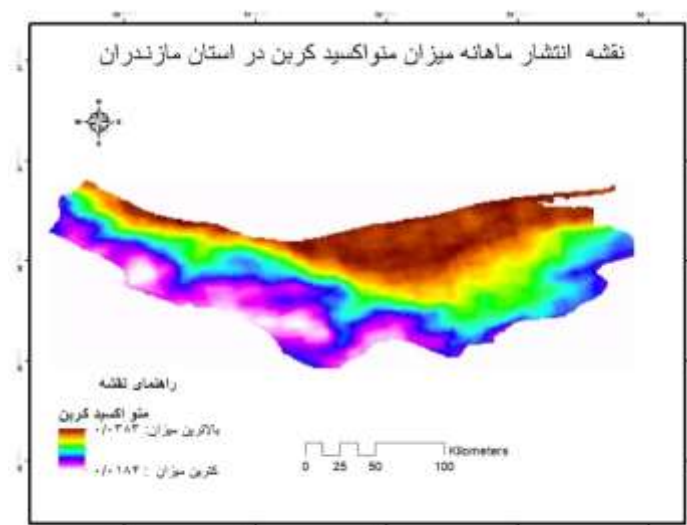
پس از دریافت داده‌ها مورد نیاز از طریق کدنویسی در محیط برنامه googleearthengine در ادامه نمودار تحلیل و خطی مبتنی بر روند تغییرات متغیرهای مستقل ترسیم شد، شکل شماره ۲ نمودار روند منواکسید کربن را در استان نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمودار تحلیل روند منواکسید کربن در استان مازندران طی ۷۳ ماه مورد تحقیق

منبع: یافته‌های نگارنده، ۱۴۰۳

براساس نمودار تحلیل روند نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که وضعیت منواکسید کربن در استان مازندران طی یک دوره مطالعه ۷۳ ماهه دارای یک روند ثابتی بوده و براساس مدل‌های پیش‌بینی‌کننده این روند ادامه خواهد داشت. همچنین براساس داده‌های دریافتی کمترین میزان دریافتی مربوط به نوامبر ۲۰۲۲ و بیشترین میزان مربوط به آگوست سال ۲۰۲۱ بوده است. با توجه به اینکه فصل آگوست (مرداد ماه) فصل برداشت برنج در مازندران بوده و از آنجای که در این فصل معمولاً کشاورزان بعد از برداشت برنج اقدام به سوزاندن کاه و کلش جهت کشت مجدد می‌کنند این افزایش منواکسید کربن در این استان را به آن نسبت داد.

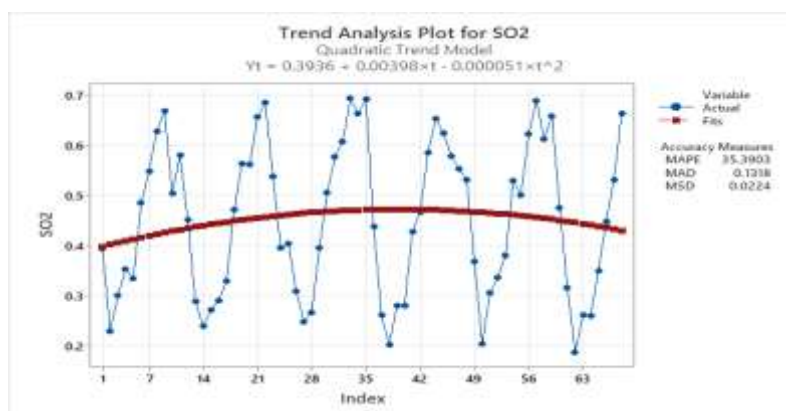


شکل ۳: نقشه انتشار میزان منواکسید کربن در استان مازندران

منبع: یافته‌های نگارنده، ۱۴۰۳

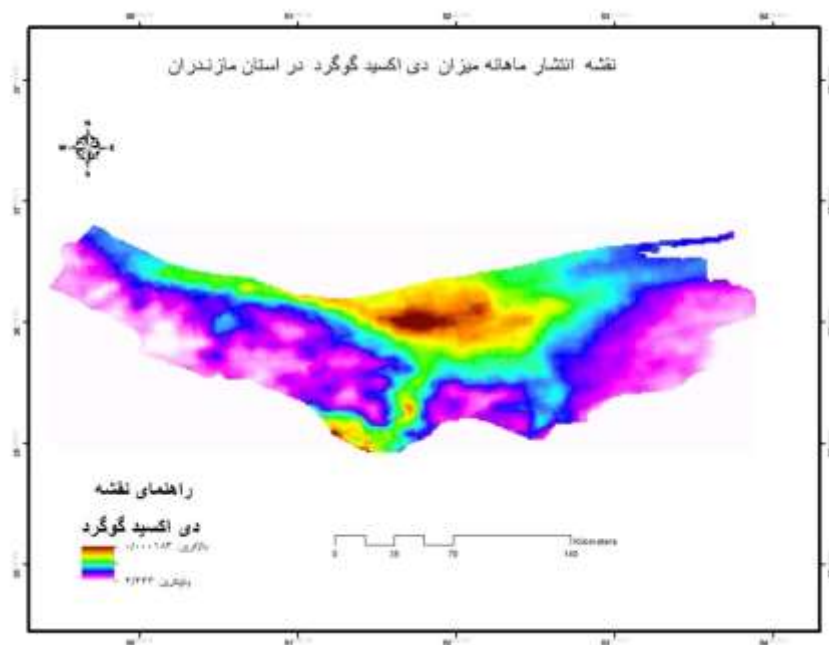
براساس نقشه شماره ۳ می‌توان بیان کرد که پایین‌ترین میزان منواکسید کربن در نواحی کوهستانی و به خصوص البرز میانی بوده و بالاترین میزان در نواحی شهری وجود دارد. بنابراین براساس نقشه

پراکندگی میزان گاز منواکسید کربن در سطح استان می‌توان این گونه تفسیر نمود که نواحی پست‌تر و مناطقی با تراکم جمعیتی بالا مهم‌ترین محل انتشار گاز منواکسید کربن در مازندران هستند. از منظر دی‌اکسید گوگرد نیز براساس شکل شماره ۳ می‌توان گفت که میزان دی‌اکسید گوگرد نیز در استان مازندران از یک روند متناوب کاهشی و افزایش پیروی می‌کند، به‌طوری که در ماه‌های سرد سال مقدار آن کمتر بوده و هر چه به سمت فصول گرم و ماه‌های گرم می‌رویم، بر میزان دی‌اکسید گوگرد افزوده می‌شود. (شکل شماره ۴). اما براساس شکل شماره ۵ که نقشه پراکندگی دی‌اکسید گوگرد را در سطح استان مازندران نشان می‌دهد، نمایانگر نقش عوامل انسانی در انتشار این گاز است، به‌طوری که هسته اصلی آن بر روی شهرهای پرجمعیت و به نوعی در متراکم‌ترین محدوده قرار دارد، به‌خصوص در محدوده شهرهای چون آمل و بابل که قطب صنعتی این استان شناخته می‌شوند. همچنین براساس نقشه پراکندگی ماهانه دی‌اکسید گوگرد محدوده دره هراز که نزدیک‌ترین راه ارتباطی استان مازندران به شهر تهران (یکی از آلوده‌ترین شهرهای ایران) است، نیز درصد تراکم بالایی دارد.



شکل ۴. نمودار تحلیل روند دی‌اکسید گوگرد در استان مازندران طی ۶۵ ماه مورد تحقیق

منبع: یافته‌های نگارنده، ۱۴۰۳



شکل ۵. نقشه انتشار میزان دی اکسید گوگرد در استان مازندران

منبع: یافته‌های نگارنده، ۱۴۰۳

در ادامه پژوهش پس از بررسی روند تغییرات منواکسید کربن و دی اکسید گوگرد با استفاده از داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای در ادامه کار به بررسی نقش عوامل و متغیرهای اقلیمی مؤثر بر پراکنش این گازها در استان مازندران پرداخته شد، برخی متغیرهای اقلیمی به مقایسه عملکرد این متغیرهای وابسته در افزایش یا کاهش ماهانه منواکسید کربن و دی اکسید گوگرد در سطح استان پرداخته شد. بر همین اساس از بین متغیرهای موجود ۱۶ متغیر (جدول شماره ۱) انتخاب و با روش تحلیل همبستگی در محیط MINITAB مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

جدول ۲. بررسی میزان همبستگی CO و SO_2 با متغیرهای اقلیمی

منبع: یافته‌ها نگارنده، ۱۴۰۳

نام متغیر	co	P- Value	So2	P- Value	نوع همبستگی
حداقل دما	-۰.۱۱۱	۰.۰۳۹۷	۰.۵۵۹	۰.۰۰۰	معکوس - مستقیم
حداکثر دما	-۰.۱۱۵	۰.۳۸۳	۰.۵۵۶	۰.۰۰۰	معکوس - مستقیم
بارش	۰.۳۱۱	۰.۰۱۶	-۰.۲۶۸	۰.۰۳۸	مستقیم - معکوس
برف	۰.۱۴۵	۰.۲۶۹	۰.۶۶۱	۰.۰۰۰	معکوس - معکوس
تبخیر و تعرق	-۰.۱۴۳	۰.۲۷۵	-۰.۴۱۳	۰.۰۰۱	معکوس - معکوس
باد	-۰.۳۴۸	۰.۰۰۶	-۰.۴۰۲	۰.۰۰۱	معکوس - معکوس
آلایدو	۰.۰۹۵	۰.۴۶۹	-۰.۵۸۴	۰.۰۰۰	مستقیم - معکوس
تابش کوتاه	-۰.۳۷۱	۰.۰۰۴	۰.۱۴۲	۰.۲۸۰	معکوس - مستقیم
دمای خاک	-۰.۱۱۵	۰.۳۸۱	۰.۵۶۰	۰.۰۰۰	معکوس - مستقیم
میانگین دما	-۰.۱۳۲	۰.۳۱۳	۰.۵۶۳	۰.۰۰۰	معکوس - مستقیم
سرعت باد	-۰.۲۸۷	۰.۰۳۶	-۰.۴۳۵	۰.۰۰۱	معکوس - معکوس
فشار	-۰.۱۶۶	۰.۲۰۴	۰.۵۳۹	۰.۰۰۰	معکوس - مستقیم
شار حرارتی	-۰.۵۲۷	۰.۰۰۰	-۰.۲۳۶	۰.۰۷۰	معکوس - مستقیم
میانگین تابش	-۰.۳۴۶	۰.۰۰۷	۰.۲۲۳	۰.۰۸۶	معکوس - مستقیم
تابش موج بلند	-۰.۱۵۷	۰.۲۳۱	۰.۴۹۲	۰.۰۰۰	معکوس - مستقیم
شار گرمای نهان	-۰.۵۲۹	۰.۰۰۰	-۰.۳۴۱	۰.۰۰۸	معکوس - مستقیم

براساس جدول شماره ۲ نتایج نشان می‌دهد که در مورد منواکسید کربن از بین ۱۶ متغیر وابسته متغیر بارش ماهانه به میزان ۰.۳۱۱ در سطح معناداری ۰.۰۵ درصد بالاترین همبستگی مثبت را داشته

که و کمترین میزان همبستگی نیز مربوط به متغیر آلودگی به میزان ۰.۰۹۵ بوده است. همچنین در مورد متغیرهای شار گرمای نهان، میانگین تابش و شار حرارتی باتوجه به معنادار نبودن در سطح معناداری ۹۵ درصد همبستگی مشاهده نشده است. در مورد دی اکسید گوگرد نیز بالاترین همبستگی مربوط به شار گرمای نهان به میزان ۰.۳۴۱- و از نوع همبستگی معکوس و کمترین میزان همبستگی تابش موج کوتاه به میزان ۰.۱۴۲ و از نوع مستقیم بوده است. همچنین در مورد متغیرهای چون تابش موج بلند، فشار، میانگین دما، دمای سطح خاک، آلودگی، باد، تبخیر و تعرق، میانگین برف، حداقل دما و حداکثر دما نتایج معنادار نبوده و همبستگی وجود ندارد.

۵. نتیجه گیری

امروزه با توجه به توسعه روزافزون صنایع و کارخانه ها و مصرف بی رویه سوخت های فسیلی، غلظت آلاینده های هوا به ویژه SO_2 ، افزایش یافته و سلامت انسان را با مشکلات زیادی مواجه کرده است. SO_2 یکی از مهم ترین آلاینده هایی است که در عصر حاضر خسارات جبران ناپذیری به محیط زیست، اقلیم و سلامت انسان وارد می کند. هدف از تحقیق در ابعاد گوناگون تدوین شده که شامل بررسی وضعیت استان مازندران از منظر آلاینده های هوا دی اکسید گوگرد و منواکسید کربن، پهنه بندی و ترسیم نقشه پراکندگی ماهانه این گازها در اقلیم مازندران، مقایسه تأثیرگذاری عناصر اقلیمی گوناگون در پراکنش SO_2 و CO بوده که با استفاده از روش های تحقیقاتی نوین و به شیوه کدنویسی در محیط googleearthengine و دریافت داده های مستخرج از سنجنده های ماهواره ای و تجزیه و تحلیل بر مبنای مدل های آماری و ضریب همبستگی بوده است. بر همین اساس از ۱۶ متغیر اقلیمی وابسته برای سنجش دو متغیر آلاینده هوا مستقل استفاده شده است. براساس نتایج به دست آمده بیشترین میزان منواکسید کربن انتشار یافته در نواحی شهری و جلگه ای پست استان مازندران قرار داشته و هر چه به نواحی کوهستانی حرکت کنیم، از میزان انتشار آن کاسته شده است. همچنین در سطح کل استان میزان منواکسید کربن طی دوره مورد مطالعه از مقدار 0.0183 تا 0.383 mol/m^2 در نوسان بوده است، اما برای دی اکسید گوگرد وضعیت کمی متفاوت بوده و سطح انتشار آن

متفاوت‌تر از سطح انتشار منواکسید کربن است؛ به‌طوری که بالاترین میزان در محدوده مرکزی استان یعنی شهرهای صنعتی مانند آمل، بابل تا ساری و شهرهای مهاجرپذیر و مسافرخیز ساحلی بوده است. نکته‌ای که در تحلیل دی‌اکسید گوگرد برای منطقه مازندران باید به آن توجه نمود وضعیت انتشار آن در دره هراز است که دلیل اصلی آن می‌تواند تردد وسایل نقلیه از یک سو و وجود معادن شن و ماسه و تردد ماشین‌های سنگین و حتی نفوذ آلاینده‌ها از محدوده خارج از استان مانند تهران باشد.

در نتیجه براساس جدول و شکل ۲ و ۳ میانگین غلظت مونوکسید کربن در فصل زمستان بسیار زیاد و تابستان و برخی از سال‌ها در بهار به حداقل می‌رسد. همچنین نرخ افزایش و کاهش این آلاینده روند خاصی را دنبال نمی‌کند. در بررسی تغییرات فصلی دی‌اکسید گوگرد (شکل شماره ۴ و ۵) نیز رفتار منظمی را نشان نمی‌دهد. مقادیر بیشینه در ابتدای دوره مطالعه در زمستان و پاییز مشاهده می‌شود. با توجه به شرایط موجود به نظر نمی‌رسد که بتوان الگوی رفتاری منظمی برای این آلاینده در نظر گرفت.

نتایج حاصل از مقایسه ضریب همبستگی بین دو متغیر مستقل SO_2 و CO و ۱۶ متغیر اقلیمی وابسته نشان داد که بالاترین همبستگی مربوط به بارش ماهانه بوده و باتوجه به اینکه حجم زیاد این گاز، تأثیر مهمی در شکل‌گیری باران‌های اسیدی و بروز مشکلات زیست‌محیطی متعدد دارد، لذا می‌توان صحت اطلاعات را نیز مورد تأیید قرار داد. در مورد دی‌اکسید گوگرد نیز شار گرمای نهان بالاترین همبستگی را داشته و کمترین میزان تابش موج کوتاه بوده است.

براساس نتایج به‌دست آمده دیر یا زود استان سرسبز مازندران مانند بسیاری از استان‌های دیگر دارای چالش آلودگی هوا شده و در آینده نزدیک مناطق پرتراکم آن و حتی ساکنین و افرادی که از سایر استان‌ها به این خطه مهاجرت می‌کنند با آن درگیر خواهند شد. از این رو باتوجه به اینکه لزوم حفاظت از محیط‌زیست به‌صورت اصل انکارناپذیر در جهان پذیرفته شده است و توسعه سیاست‌های

کاهش آلودگی نیازمند داشتن اطلاعاتی درخصوص پتانسیل کاهش آلودگی و هزینه آن است. لذا اقداماتی برای افزایش استفاده از سوخت پاک، به‌ویژه در این مناطق، تضمین منظم کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای در تأسیسات صنعتی، وضع قوانین جدید برای مشاغل و ایجاد مقررات زیست‌محیطی برای افزایش مناطق سبز در نتیجه، برخی از مقررات و سیاست‌ها باید توسط دولت‌ها در رابطه با غلظت آلاینده‌های زیست‌محیطی که همه دولت‌ها با آن مواجه هستند، تدوین شوند.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل رساله دکتری با عنوان "تحلیل و مدل‌سازی عناصر اقلیمی مؤثر بر پراکندگی زمانی و مکانی آلاینده‌های هوا در استان مازندران" بوده که در سال ۱۴۰۱ مورد تصویب دانشگاه تبریز قرار گرفته است. بدین‌وسیله از کلیه دوستانی که در انجام این تحقیق ما را یاری نمودند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

کتابنامه

۱. احسانی، ا. ه؛ و بیگدلی، م. (۱۳۹۹). تخمین غلظت ذرات PM_{2.5} در تهران با استفاده از داده‌های دورسنجی عمق نوری هواویزها. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۴۳(۱۱)، ۹۹-۱۰۸.
۲. امیدوار، ک؛ شهبان، س؛ و امیری‌اسفندقه، م. (۱۳۹۹). بررسی ارتباط غلظت آلاینده‌ها و برخی پارامترهای اقلیمی با میزان مرگ‌های ناشی از بیماری‌های قلبی و تنفسی در شهر شیراز. *مجله علمی پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد*، ۲۸(۳)، ۲۴۶۷-۲۴۷۸.
۳. خورشیددوست، ع. م؛ محمدپور، ک؛ و بیورانی، ح. (۱۳۹۲). تأثیر عناصر اقلیمی و آلاینده‌ها بر روی بیماری‌های سکنه قلبی و آسم. *فصلنامه علمی پژوهشی فضای جغرافیایی*، ۱۳(۴۲)، ۱۰۵-۱۲۰.
۴. شفیع‌پور، م. (۱۳۸۷). *مهندسی آلودگی هوا*. چاپ اول. تهران: مؤسسه نشر شهر.

۵. عبدالمنافی جهرمی، ن؛ موسوی بایگی م؛ و ضیایی، ع. (۱۳۹۲). برآورد خسارت ناشی از آلاینده‌های جوی بر محصولات کشاورزی در شرایط مختلف هواشناسی. *فصلنامه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۶(۲)، ۵۳۲-۵۲۳.

۶. عزتیان، و؛ و هاشمی نسب، س. (۱۳۹۲). انتشار آلاینده‌های جوی چالش زیست محیطی شهر اصفهان. *مطالعات و پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای*، ۴(۱۶)، ۱۶۰-۱۴۵.

۷. فرجی، ع؛ و رحیمی، ن. (۱۴۰۱). واکاوی پراکنش زمانی-مکانی آلاینده CO در دوران همه‌گیری COVID-19 (مطالعه موردی: استان خوزستان، اصفهان، تهران). *جغرافیا و پایداری محیط (پژوهشنامه جغرافیایی)*، ۱۲(۴۳)، ۹۵-۱۰۸.

۸. قربانی سالخورد، ر. (۱۳۸۹). *اعتبارسنجی داده‌های سنجنده مودیس در رابطه با آلودگی جوی در مناطق شهری*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

9. Alimissis, A., Philippopoulos, K., Tzanis, C., & Deligiorgi, D. (2018). Spatial estimation of urban air pollution with the use of artificial neural network models. *Atmospheric environment*, 191, 205-213.
10. Almubaidin, M. A., binti Ismail, N. S., Latif, S. D., Ahmed, A. N., Dullah, H., El-Shafie, A., & Sonne, C. (2024). Machine learning predictions for carbon monoxide levels in urban environments. *Results in Engineering*, 22, 102114.
11. Arshad, K., Hussain, N., Ashraf, M. H., & Saleem, M. Z. (2024). Air pollution and climate change as grand challenges to sustainability. *Science of The Total Environment*, 172370.
12. Asikainen, A., Carrer, P., Kephelopoulous, S., Fernandes. Ede O., Wargocki, P., Hanninen, O. (2016). Reducing burden of disease from residential indoor air exposures in Europe (HEALTHVENT project) *Environ Health*, 15 (Suppl 1): 35 - PMC – PubMed, 62-72.
13. Bourdrel, T., Bind, M. A., Béjot, Y., Morel, O., & Argacha, J. F. (2017). Cardiovascular effects of air pollution. *Archives of cardiovascular diseases*, 110(11), 634-642.

14. Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2004). Multimodel Inference Understanding AIC and BIC in Model Selection. *Sociological Methods & Research*, 33(2), 261-304.
15. Hannah, L. (2014). Carbon Sinks and Sources in: L, Hannah. *Climate change biology* Second Edition ,Elsevier: Academic Press, pp. 403-422.
16. Kim, J. B., Prunicki, M., Haddad, F., Dant, C., Sampath, V., Patel, R., ..., & Nadeau, K. C. (2020). Cumulative Lifetime Burden of Cardiovascular Disease From Early Exposure to Air Pollution. *Journal of the American Heart Association*, 9(6), e014944. <https://doi.org/10.1161/JAHA.119.014944>
17. Neira, M., Erguler, K., Ahmady-Birgani, H., Al-Hmoud, N. D., Fears, R., Gogos, C., ... & Christophides, G. (2023). Climate change and human health in the Eastern Mediterranean and Middle East: Literature review, research priorities and policy suggestions. *Environmental research*, 216, 114537.
18. Rosenzweig, C., Solecki, W., Hammer, S. A., & Mehrotra, S. (2010). Cities lead the way in climate-change action. *Nature*, 467(7318), 909-911.
19. Valari, M., & Menut, L. (2008). Does an increase in air quality models' resolution bring surface ozone concentrations closer to reality?. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(11), 1955-1968.
20. Yıldırım, E. (2023). The relationship between PM10 and SO2 exposure and Covid-19 infection rates in Turkey using nomenclature of territorial units for statistics level 1 regions. *Heliyon*, 9(11), e21795.
21. Zhang, K., Thé, J., Xie, G., & Yu, H. (2020). Multi-step ahead forecasting of regional air quality using spatial-temporal deep neural networks: A case study of Huaihai Economic Zone. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123231.
22. Zheng, C., Zhang, H., Cai, X., Chen, L., Liu, M., Lin, H., & Wang, X. (2021). Characteristics of CO2 and atmospheric pollutant emissions from China's cement industry: A life-cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124533.