

Assessment of the Role of the Neka Power Plant in Atmospheric Pollutant Emissions Using Remote Sensing Data

Alireza Yousefi Kebria¹  | Mehdi Nadi^{2✉}  | Mohammad Ali Maleki³ 

1- PhD, Agricultural Meteorology, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari

2- Associate Professor, Agricultural Meteorology, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari

3- Head of Applied Meteorology Development Group, Mazandaran Meteorological Directorate, Sari

Corresponding Author E-mail: mehdi.nadi@gmail.com

(Received: 24 Apr 2025, Revised: 28 Apr 2025, Accepted: 07 May 2025, Published online: 11 Nov 2025)

Abstract

Air pollution stands as one of the most pressing environmental challenges of the modern era, imposing adverse effects on human health, ecosystems, and the global climate system. Among the major anthropogenic sources of atmospheric pollutants are thermal power plants, which differ considerably in their emission profiles depending on the type of fuel employed. This study investigates the influence of fuel type on the levels and spatial distribution of atmospheric pollutants emitted from the Neka thermal power plant in northern Iran. Satellite datasets from Sentinel-5 and MODIS were analyzed for the period 2018–2023 to quantify the temporal and spatial variations of sulfur dioxide (SO₂), nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO), ozone (O₃), and aerosol optical depth (AOD) under three operational fuel scenarios: natural gas, heavy fuel oil (mazut), and a mixed operation mode. Results indicate that natural gas consumption, while slightly increasing CO and O₃ due to incomplete combustion and photochemical reactions, significantly reduces SO₂ and AOD emissions compared to mazut. In contrast, mazut combustion results in marked increases in SO₂ concentrations, with pollution plumes extending roughly 65 km eastward and 15 km southward. Seasonal analyses reveal peak O₃ concentrations in winter, elevated CO during March and August, and high AOD values during warmer months. The persistence of these patterns over five years underscores the combined influence of fuel type, climatic conditions, and energy consumption behavior on air quality. The findings highlight the urgent need for policies promoting cleaner fuels, advanced combustion technology, and satellite-based monitoring systems as essential tools for sustainable air quality management.

Keywords: Sentinel-5, MODIS, Fuel Oil Burning, Atmospheric Pollutants, Seasonal Patterns, Spatiotemporal Analysis

Cite this article: Yousefi Kebria, A., Nadi, M. and Malaki, M. A. (2025). Investigating the role of Neka Power Plant in the emission of atmospheric pollutants using remote sensing data. (e234023). *Nivar*, (), e234023 doi: 10.30467/nivar.2025.234023

E-mail: (1) alirezau3fikrbriya@gmail.com (3) m_ali_malaki@yahoo.com



بررسی نقش نیروگاه نکا در انتشار آلاینده‌های جوی با استفاده از داده‌های سنجش از دور

علیرضایوسفی کبریا^۱ | مهدی نادی^۲ | محمدعلی ملکی^۳

۱. دکتری، هواشناسی کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری

۲. دانشیار، هواشناسی کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری

۳. رئیس گروه توسعه هواشناسی کاربردی اداره کل هواشناسی مازندران، ساری

رایانامه نویسنده مسئول: mehdi.nadi@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۴، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰)

چکیده

آلودگی هوا به‌عنوان یکی از جدی‌ترین معضلات زیست‌محیطی عصر حاضر، اثرات نامطلوبی بر سلامت انسان، اکوسیستم‌ها و اقلیم دارد. یکی از منابع اصلی تولید آلاینده‌های جوی، نیروگاه‌های حرارتی هستند که بسته به نوع سوخت مصرفی، نقش بسزایی در انتشار گازها و ذرات معلق دارند. در این پژوهش، با هدف بررسی تأثیر نوع سوخت مصرفی نیروگاه نکا بر میزان انتشار آلاینده‌های جوی، داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۵ و مودیس در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ تحلیل شد. تغییرات مکانی و زمانی آلاینده‌های SO_2 ، NO_2 ، CO ، O_3 و AOD در سه سناریوی عملکردی سوخت شامل گاز طبیعی، مازوت و ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد که مصرف گاز طبیعی، علی‌رغم افزایش نسبی CO و O_3 ناشی از احتراق ناقص و واکنش‌های فتوشیمیایی، منجر به کاهش قابل توجه در انتشار SO_2 و AOD نسبت به مصرف مازوت شده است. در مقابل، مصرف مازوت با افزایش چشمگیر غلظت SO_2 و گسترش آلودگی تا شعاع ۶۵ کیلومتری در شرق و ۱۵ کیلومتری در جنوب همراه بوده است. الگوهای فصلی نیز حاکی از اوج‌گیری غلظت O_3 در زمستان، CO در ماه‌های اسفند و مرداد، و AOD در ماه‌های گرم سال است. تکرار این الگوها طی پنج سال اخیر، نشان‌دهنده تأثیر توأمان نوع سوخت، شرایط اقلیمی و الگوهای مصرف انرژی بر میزان آلودگی است. نتایج این مطالعه بر ضرورت تدوین سیاست‌های کنترلی مبتنی بر استفاده از سوخت‌های پاک‌تر، به‌کارگیری فناوری‌های نوین احتراقی و بهره‌گیری از سامانه‌های پایش ماهواره‌ای در مدیریت بهینه آلودگی هوا تأکید دارد.

کلمات کلیدی: سنتینل ۵، مودیس، مازوت سوزی، آلاینده‌های جوی، الگوهای فصلی، تحلیل مکانی زمانی

استناد: یوسفی کبریا، علیرضا، نادی، مهدی و ملکی، محمد علی. (۱۴۰۴). بررسی نقش نیروگاه نکا در انتشار آلاینده‌های جوی با استفاده از داده‌های سنجش از دور.

(e234023)، [doi: 10.30467/nivar.2025.234023](https://doi.org/10.30467/nivar.2025.234023)، (e234023)

رایانامه: (۱) s.roozitalab@ut.ac.ir (۳) ehsani@ut.ac.ir

ناشر: سازمان هواشناسی کشور.

DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.234023>



۱- مقدمه

امروزه محیط زیست یکی از مهم‌ترین ارکان توسعه پایدار تلقی می‌گردد و توسعه سایر بخش‌های اقتصادی و اجتماعی در گرو پایداری و عملکرد صحیح آن معنا پیدا می‌کند. نرخ بالای رشد جمعیت و شهرنشینی از یک سو و صنعتی شدن جوامع و افزایش تولید و رشد اقتصادی (برای پاسخگویی به نیازهای بیشتری از افراد جامعه به منظور ارتقاء کیفیت زندگی افراد) از سوی دیگر، از مواردی هستند که منجر به بهره برداری بیشتر از سوخت‌های فسیلی و افزایش مصرف انرژی شده‌اند [۱]. امروزه بحران ناشی از مصارف بی‌رویه مواد و انرژی و افزایش آلودگی‌های وارد شده به محیط زیست به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی بشر مطرح است. توجه به توسعه پایدار به گونه‌ای که کمترین آسیب به محیط زیست و سلامت افراد جامعه را به همراه داشته باشد، شاید به عنوان راهکاری اجتناب ناپذیر فراروی بشر است. رشد اقتصادی با ایجاد زمینه افزایش تقاضای انرژی افراد، بستر ارتقاء شاخص‌های سلامتی را فراهم می‌آورد [۲]؛ اما در صورت عدم اتخاذ سیاست‌های مناسب، آلودگی‌های ناشی از رشد اقتصادی می‌تواند تأثیر منفی جدی بر سلامت جامعه داشته باشد. بنابراین به دلیل افزایش اثرات زیست محیطی ناشی از فعالیت‌های بشری و تقاضای روزافزون افراد جامعه برای زندگی بهتر و به دنبال آن استفاده جنون آمیز از منابع، به سیستم‌های کنترل و مدیریت آلودگی هوای موثرتری نیاز است [۳]. برای دستیابی به یک سیستم مدیریتی جامع در زمینه آلودگی هوا نیاز است تا همه جوانب و ابزارهای آن بخوبی شناخته شوند و نقش این ابزارها در کل سیستم مدیریتی تعیین گردد. از دهه ۷۰ قرن بیست با تقلیل منابع و بروز محدودیت‌ها، دنیا در چالش با مسئله پیچیده و بغرنج برخاسته از تهدیدات مصرف منابع انرژی قرار گرفته است [۴]. در این میان مساله سوخت‌های فسیلی و گسترده‌گی استفاده از آنها ریشه اصلی بروز تهدیدات زندگی شهری بوده است. آن چه امروزه در نتیجه استفاده گسترده از منابع تجدیدناپذیر انرژی و به طور کلی مصرف بالای انرژی به عنوان معضلی جدی مطرح شده، پدیده تغییرات اقلیمی است. نرخ رشد شهرنشینی بالا در طی

دهه‌های اخیر اثرات زیادی در محیط زیست شهری داشته که از جمله آنها می‌توان به افزایش حرارت شهرها و تغییرات اقلیم آنها اشاره نمود. گسترش شهرنشینی و توسعه شهرها به همراه افزایش شتابان جمعیت و توسعه فعالیت‌های صنعتی با مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی به شدت آلودگی‌ها را افزایش داده و میزان آن را بیش از ظرفیت قابل تحمل محیط نموده است [۵]. بحث مربوط به توسعه شهرنشینی و آلودگی هوای شهری و متعاقب آن آب و هوای شهری می‌باشد. ناپایداری توسعه شهری و صنعتی کشور در سنوات گذشته یکی از میراث‌های ناخوشایندی است که در ابعاد و گستره

وسعی محیط زیست شهری کشور بویژه شهرهای بزرگ و پرجمعیت را متاثر نموده است [۶]. آلاینده‌ها از لحاظ حالت فیزیکی (جامد، مایع و گاز)، منبع انتشار (سیار، ثابت، طبیعی، انسان ساخت) طبقه‌بندی می‌شوند [۷]. و از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا می‌توان مونوکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن، ازن تروپوسفری، آئروسول، ذرات معلق با قطرهای ۲/۵ و ۱۰ میکرومتر را نام برد که هر کدام دارای اثرات متعددی بر سلامت انسان و محیط‌زیست هستند. مونوکسید کربن گازی است که بر اثر سوختن ناقص کربن بوجود می‌آید. منابع مونوکسید کربن طبیعی و انسانی هستند. در اثر اکسیداسیون گاز متان حاصل از مرگ گیاهان سالانه ۳/۵ میلیون تن کربن دی‌اکسید وارد طبیعت می‌شود. منبع دیگر این ماده متابولیسم انسانی است. بازدم شخصی که در حال استراحت است به طور تقریبی حاوی کربن دی‌اکسید ۱ پی پی ام است. در اثر آتش سوزی جنگل مقدار اندکی نیتروژن اکسید تولید می‌شود [۸]. تجزیه باکتریایی مواد آلی نیز سبب آزاد شدن نیتروژن اکسید در اتمسفر می‌گردد. در واقع منابع تولیدکننده، نیتروژن اکسید به طور طبیعی تقریباً ۱۰ برابر منابع انسانی که در نواحی شهری دارای تراکم و غلظت هستند، می‌باشد. بخش عمده نیتروژن اکسید تولید شده از منابع انسانی مربوط به احتراق سوخت در منابع ساکن و حرکت وسائط نقلیه می‌شود. گاز ازن از ترکیب سه اتم اکسیژن ایجاد می‌شود و یک اکسید کننده قوی می‌باشد. ازن موجود در سطح زمین برای سلامتی انسان،

میکروگرم بر متر مکعب، عملکرد قابل قبولی از خود نشان داد. همچنین نتایج مدل کاهش چشمگیر غلظت نیتروژن دی اکسید طی همه گیری را در مقایسه با سال ۲۰۱۹ تأیید کرد. با توجه به اینکه نیروگاه نکا یکی از منابع مهم آلودگی هوا در استان مازندران محسوب می شود و پژوهش های انجام شده نیز بر نقش آن در انتشار آلاینده های مختلف تأکید دارند، بررسی دقیق و مستمر وضعیت آلاینده ها در اطراف این نیروگاه از اهمیت بالایی برخوردار است.

۲- مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

نیروگاه شهید سلیمی نکا، یکی از مهمترین سرمایه های ملی و از بزرگترین نیروگاه های کشور است. این نیروگاه متشکل از دو بخش مستقل بخاری و سیکل ترکیبی بوده که در ساحل دریای خزر و در ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان نکا قرار دارد. قدرت نامی این نیروگاه ۲۲۱۴ مگاوات می باشد که از چهار واحد بخاری هریک با قدرت نامی ۴۴۰ مگاوات، یک بلوک سیکل ترکیبی شامل دو واحد گازی هریک با قدرت نامی ۶/۱۳۷ مگاوات و یک واحد بخاری با قدرت نامی ۱۶۰ مگاوات و همچنین دو واحد توربین انبساطی با قدرت نامی هر کدام ۴/۹ مگاوات تشکیل شده است. این نیروگاه که فعالیت خود را از دهه ۵۰ شمسی آغاز کرده و سالیانه پنج درصد از برق کشور را تولید می کند و بیش از یک میلیارد تن سوخت مازوت در هر سال می سوزاند. دود ناشی از این سوخت های فسیلی با حجم بسیار زیادی از لوله های تخلیه خارج می شوند و گرده های سیاه رنگی را در کل منطقه پراکنده می کنند [۱۱].

داده های مورد استفاده

به دلیل تعداد اندک ایستگاه کیفیت سنج هوا (۲ ایستگاه) در استان مازندران و عدم وجود داده های مناسب و پیوسته در ایستگاه کیفیت سنج هوا در این استان، از داده های ماهواره ای استفاده گردید.

جانوران و گیاهان مضر بوده و از آن به عنوان ازن بد و آلاینده یاد می شود. در مطالعه آلودگی هوا دی اکسید سولفور و تری اکسید سولفور حائز اهمیت خاص هستند. دی اکسید سولفور گازی است بیرنگ، غیر قابل انفجار که بویی خفه کننده دارد [۹]. ذرات دارای قطر کمتر از ۲/۵ و ۱۰ میکرون دارای قطری برابر تقریباً یک سی ام قطر موی انسان است و به ذرات ریز نیز شناخته می شوند، استفاده از سنجش از دور در بررسی آلاینده های جوی به دلیل آسیب های فراوان این گازها به سلامت انسان و محیط زیست بسیار حائز اهمیت می باشد، مطالعاتی نیز در این زمینه صورت گرفته است از جمله، کرمپور و همکاران [۲]، در پژوهشی به تحلیل الگوهای فشاری انتشار و انتقال منواکسید کربن از منابع داخلی و خارجی کشور پرداخته شد. برای این کار از تصاویر ماهواره ای GEOS-5 و GMAO، NASA بهره گرفتند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار آلودگی از نظر فصلی مربوط به فصول سرد و صبح زود است و کمترین آن مربوط به اوایل بعد از ظهر و فصل گرم سال است. پیشداد و همکاران [۸]، با تحلیل داده های بلندمدت کیفیت هوای تهران (۱۳۸۱ تا ۱۳۹۶) و بهره گیری از روش هایی مانند تخمین روند خطی، توزیع فراوانی و درصد تغییرات، نشان دادند که غلظت بیشتر آلاینده ها (به جز کربن دی اکسید) بین دو تا چهار برابر بالاتر از حدود مجاز ملی و بین المللی بوده است. شجاع الدینی و همکاران [۹]، با بررسی سطوح دی اکسید نیتروژن در پنج زیست بوم اصلی کشاورزی ایران طی سال های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹، دریافتند که بیشینه غلظت این آلاینده در فصل رشد مربوط به استان های فارس، خوزستان و مازندران بوده و به ترتیب برابر با ۷۱، ۸۰ و ۱۶۰ میکرومول بر متر مربع گزارش شده است. لی و همکاران [۱۰]، با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی و ترکیب داده های ستونی نیتروژن دی اکسید تروپوسفری از ابزار ماهواره ای TROPOMI با اطلاعات هواشناسی، مدلی روزانه برای تخمین غلظت نیتروژن دی اکسید نزدیک به سطح در چین ارائه دادند. این مدل با داده های میدانی دوره شیوع کوید-۱۹ (۱ تا ۵ فوریه ۲۰۲۰) اعتبارسنجی شد و با ضریب تعیین ۰.۷۸ و میانگین مربعات خطا برابر با ۷/۰۴

داده‌های ماهواره‌ای آلودگی هوا

در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ی سنتینل ۵ و مودیس استفاده شد و این محصولات از طریق کد نویسی در سامانه گوگل ارث انجین دانلود شده است. از طریق این ماهواره، پایش آلاینده‌هایی مانند کربن، دی‌اکسید نیتروژن و ازن است و سایر آلاینده‌ها از جمله دی‌اکسید سولفور و فرمالدئید صورت می‌گیرد. در واقع در این پژوهش فرآیند پایش آلودگی هوا با استفاده از دیتاست گوگل ارث انجین با نوشتن اسکریپت بر روی مجموعه تصاویر و استخراج اطلاعات مورد نظر هم بصورت منطقه‌ای و هم به صورت نقطه‌ای استخراج شدند. که در شکل ۱ پلتفرم گوگل ارث انجین قابل مشاهده است. همچنین اطلاعات مربوط به هر آلاینده در جدول ۱ مشاهده می‌شود [۱۲].

جدول ۱: اطلاعات مربوط به داده‌های آلاینده دریافت شده از سنتینل ۵

Product/Band	Physical Quantity (units)	Sentinel Hub Units	Source Format	Typical Range
CO	Carbon monoxide total column (mol/m ²)	MOL/M2	FLOAT32	0 - 0.1
SO2	Sulfur dioxide total column (mol/m ²)	MOL/M2	FLOAT32	0 - 0.01
NO2	Nitrogen dioxide tropospheric column (mol/m ²)	MOL/M2	FLOAT32	0 - 0.0003

آماده سازی تصاویر ماهواره‌ای

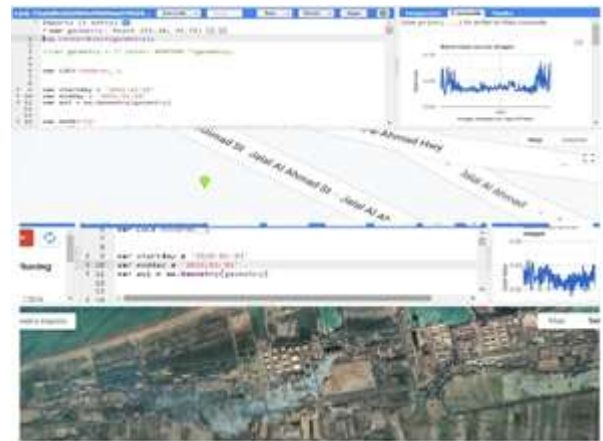
با استفاده از کد نوشته شده در گوگل ارث انجین تصاویر بر اساس زمان مورد نظر در محدوده‌ی انتخاب از پایگاه داده‌های سنتینل ۵ و مودیس فراخوانی شده و با داده‌های سنتینل ۵/۵*۷ کیلومتر و مودیس ۱*۱ کیلومتر درون‌یابی گردید و در گوگل درایو با فرمت GeoTIFF ذخیره گردید. اندازه یکسان پیکسل‌ها باعث سهولت پردازش و عدم بروز اختلاف به دلیل پیکسل‌های مختلف می‌شود، که در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲: کد نویسی و فراخوانی تصاویر از گوگل ارث انجین

ماهواره

سنجنده مودیس و ماهواره سنتینل ۵ برای پایش و مطالعات مختلف محیط زیستی و اقلیمی استفاده می‌شوند. ماهواره مودیس توسط سازمان ملی اقیانوسی و اتمسفری ایالات متحده آمریکا و ناسا به منظور پایش زمین، اقلیم و محیط زیست طراحی شده است. این ماهواره تصاویر با وضوح متوسطی را در طول موج‌های مختلف به دست می‌آورد. مودیس اطلاعاتی درباره مساحت سطحی، دما، برف و یخ، گیاهان، گردوغبار، اقیانوس‌ها و غیره را فراهم می‌کند. ماهواره سنتینل ۵ نیز یک سامانه ماهواره‌ای اروپایی است که برای پایش محیط زیست و بررسی آلاینده‌های موجود در جو استفاده می‌شود [۱۳].



شکل ۱: پلتفرم گوگل ارث انجین و نیروگاه نکا در این پلتفرم

شاخص کیفیت هوا

شاخص کیفیت هوا^۱ به صورت روزانه و حتی ساعتی اندازه گیری می شود و غلظت هر آلاینده هوا را ارزیابی می کند. غلظت هر آلاینده اندازه گیری شده و با استفاده از مقیاس یا شاخص استاندارد، به یک عدد از صفر تا ۵۰۰ تبدیل می شود. شاخص کیفیت هوا یک اندازه گیری نسبی است، به این معنی که مقادیر پایین تر نشان دهنده کیفیت هوای بهتر و نگرانی کمتر برای سلامتی است، در حالی که مقادیر بالاتر نشان دهنده کیفیت هوای ضعیف تر و افزایش خطرات شاخص کیفیت هوا با استفاده از شاخص عمق اپتیکی آئروسول^۲ تعیین می شود که جذب و پراکندگی نور توسط ذرات معلق (آئروسول)^۳ در جو را اندازه گیری می کند. عمق اپتیکی آئروسول یک شاخص کمی است که بر حسب تعداد مولکول ذرات معلق هوا در هر کیلومتر مکعب از جو اندازه گیری می شود [۱۴]. در این پژوهش از تعداد روزهای آلوده در هر ماه استفاده شد که با توجه به جدول ۲ مشخص می شود که هر شاخص بالاتر از ۱۰۰ آلوده می باشد و ناسالم است.

جدول ۲: شاخص های مختلف کیفیت هوا

Levels of Concern	Values of Index AAI	Values of Index AOD	Values of Index AQI
Good	<0	<0.1	0-50
Moderate	0-0.5	0.1-0.3	51-100
Unhealthy	0.5-2	0.3-0.5	101-200
Very Unhealthy	2-5	0.5-1	201-300
Hazardous	5<	1<	300<

درونیابی

پیکسل های ماهواره مانند صفحه ای موزائیکی در مجاور هم قرار دارند و هر پیکسل یک مقدار معین را به عنوان غلظت ارائه می دهد پس برای اینکه داده ها به مقدار واقعی نزدیک تر باشد باید از درونیابی استفاده کرد. در این تحقیق از روش های درونیابی استفاده شد که در ذیل آورده شده است [۱۵].

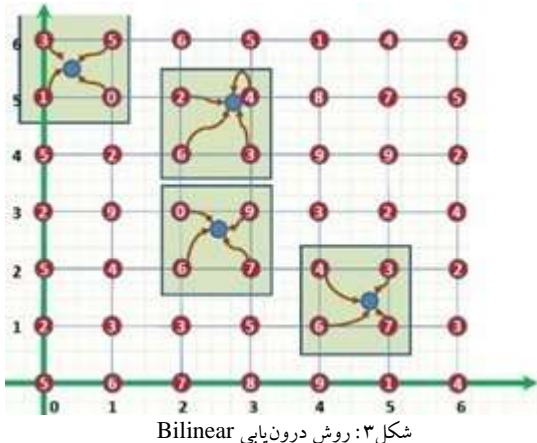
روش Nearest

در درونیابی نزدیک ترین همسایگی، اگر مقدار تابع f در نقاط شبکه منظم داده شده باشد و مقدار f در نقطه (p,q) به دست می آید، آنگاه در ابتدا باید مشخص شود که این نقطه در بین کدام چهار نقطه شبکه قرار می گیرد سپس مشخص شود که به کدام یک از این چهار نقطه نزدیک تر است در نهایت مقدار تابع در نزدیک ترین نقطه را به عنوان مقدار تقریبی تابع در (p,q) معرفی شود [۱۶].

روش Bilinear

در درونیابی دوخطی، اگر مقدار تابع f در نقاط شبکه منظم داده شده باشد و برای بدست آوردن مقدار f را در نقطه (p,q) ، ابتدا باید مشخص شود که این نقطه در بین کدام چهار نقطه شبکه قرار می گیرد و سپس با توجه به مقدار تابع در این چهار نقطه مقدار تابع در نقطه (p,q) را تخمین زده می شود، که در شکل ۳ مشاهده می شود می شود (۱)، در این درونیابی، تابع درونیاب به صورت دوخطی نظر گرفته می شود [۱۷].

$$F(x; y) = ax + by + cx + d \quad (1)$$



در این پژوهش با توجه به عدم وجود داده های واقعی از تصاویر ماهواره ای سنتینل ۵ و مودیس برای بررسی آلودگی حاصل از نیروگاه نکا استفاده شد.

³. AAI

¹. AQI
². AOD

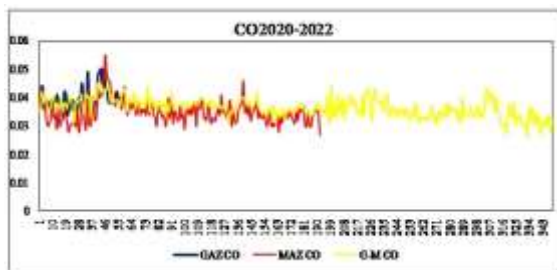
۳- نتایج

ماهواره‌ها برای همه آلاینده‌ها در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف داده ندارند و یا دارای نواقص هستند، در نیروگاه برق نکا که یکی از منابع عظیم آلودگی استان مازندران می‌باشد، تخمین برای این آلاینده‌های یعنی NO_2 ، O_3 ، AOD ، SO_2 و CO انجام گرفت. از بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۲۲ استفاده گردید و برای دوره‌های گاز سوزی، مازوت سوزی و ترکیب سوخت‌ها نمودار مورد نظر رسم شد. برای سه سال مورد نظر تعداد ۸۸۵ روز داده وجود داشته که ۹۰ روز مربوط به گازسوزی نیروگاه، ۲۷۹ روز مازوت سوزی و ۵۱۶ روز سوخت ترکیبی در نیروگاه نکا سوزانده شده است. با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل برای نیروگاه نکا در سه بازه مازوت سوزی، گاز سوزی و سوخت ترکیبی نمودار غلظت آلاینده‌های فوق رسم شد. همچنین با تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۵ برای دو بازه مازوت سوزی و گاز سوزی نقشه آلاینده‌ها رسم شد و پهنه تاثیر نیروگاه تعیین گردید. برای تایید نتایج نقشه آلودگی فصلی سه سال ۲۰۲۰، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ رسم گردید و نتایج آن آورده شد.

بررسی غلظت آلاینده‌ها

در این مطالعه، با استفاده از داده‌های سنجش از دور و محصولات ماهواره‌ای، به تحلیل و مقایسه‌ی تغییرات غلظت آلاینده‌های جوی در سه وضعیت عملکردی مختلف نیروگاه نکا شامل گازسوزی، مازوت سوزی و مصرف سوخت ترکیبی پرداخته شد. این مقایسه با هدف بررسی اثر نوع سوخت مصرفی بر سطح آلاینده‌های کلیدی نظیر مونو کسید کربن، دی اکسید گوگرد، ذرات معلق بر پایه شاخص نوری آبروسل، و ازن انجام گرفت. نتایج حاصل در قالب نمودار شکل‌های ۴ تا ۷ ارائه شده است که تفاوت‌های معناداری را در رفتار آلاینده‌ها در مواجهه با نوع سوخت مصرفی نشان می‌دهد. تحلیل داده‌ها نشان داد که در بازه‌ی زمانی گازسوزی، غلظت آلاینده‌ی کربن منو اکسید به‌طور معناداری بالاتر از دوره‌ی مازوت سوزی بوده است. این افزایش احتمالاً ناشی از احتراق ناقص گاز طبیعی در شرایط خاص عملکردی نیروگاه و ساختار سامانه‌های احتراق و

فیلتراسیون موجود در این وضعیت می‌باشد. از سوی دیگر، در دوره‌های مازوت سوزی و همچنین مصرف سوخت ترکیبی، غلظت آلاینده‌های SO_2 و PM به شکل قابل توجهی افزایش یافته است. این روند به خوبی بیانگر ماهیت آلاینده‌تر مازوت به عنوان یک سوخت سنگین با محتوای گوگرد و ذرات معلق بالاست که در فرایند احتراق منجر به تولید مقادیر بیشتری از دی اکسید گوگرد و ذرات معلق در جو می‌شود. علاوه بر این، بررسی تغییرات آلاینده‌ی ازن نشان داد که در وضعیت گازسوزی و نیز در حالت ترکیبی، غلظت این آلاینده نسبت به دوره‌ی مازوت سوزی در سطح بالاتری قرار دارد. این پدیده می‌تواند ناشی از افزایش واکنش‌های فتوشیمیایی در حضور پیش سازهای ازن نظیر NO_x و VOC در دوره‌ی گازسوزی باشد که در نتیجه‌ی افزایش تابش خورشیدی و شرایط جوی خاص تشدید می‌شوند. جمع‌بندی نتایج نمودار شکل ۱۰ به روشنی حاکی از آن است که مصرف گاز طبیعی، اگرچه از نظر تولید SO_2 و PM عملکرد بهتری دارد، اما منجر به افزایش غلظت CO و O_3 می‌شود. در مقابل، مازوت سوزی باعث اوج‌گیری چشمگیر در غلظت آلاینده‌های SO_2 و PM می‌شود و استفاده از ترکیب گاز و مازوت (سوخت ترکیبی) منجر به افزایش هم‌زمان آلاینده‌های مربوط به هر دو نوع سوخت می‌گردد. بنابراین، نتایج بیانگر آن است که نوع سوخت مصرفی تأثیر مستقیمی بر کیفیت هوای منطقه دارد و انتخاب نوع سوخت باید با در نظر گرفتن تأثیرات ترکیبی آن بر آلاینده‌های مختلف صورت گیرد.



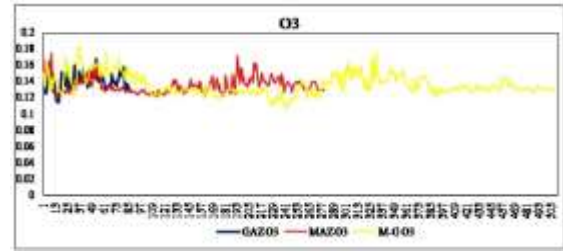
شکل ۴: نمودار غلظت آلاینده CO مورد بررسی در بازه زمانی گاز سوزی، مازوت سوزی و سوخت ترکیبی نیروگاه نکا

با توجه به نتایج به دست آمده از نمودار شکل ۸ بیشترین میزان حضور ذرات معلق در سال ۲۰۲۰ در استان مازندران مربوط به شهرهای نکا، بهشهر، ساری، قائم‌شهر و بابل می‌باشد، که شاخص آئروسول آن‌ها در نمودار زیر مشخص است. بنابراین نتایج نشان دهنده تاثیر گذاری نیروگاه نکا به شهرهای اطراف می‌باشد که مقدار غلظت آئروسول‌ها در شهرهای نزدیک نیروگاه بیشتر از سایر شهرها می‌باشد. همچنین با استفاده از ماهواره سنتینل ۵ تصاویر آلاینده‌های NO_2 و CO ، SO_2 در بازه زمانی گازسوزی و مازوت سوزی نیروگاه تهیه گردید، که نتایج شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داد:

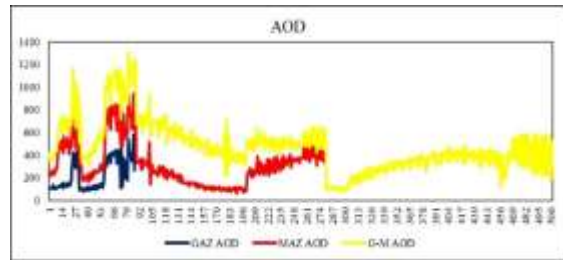
۱- در زمان گاز سوزی نیروگاه، آلاینده SO_2 تاثیری بر شهر نکا و شهرهای اطراف ندارد، اما در زمان مازوت سوزی SO_2 محدوده‌ی اطراف نکا و بهشهر و سواحل شهر ساری به طوری که تا ۱۱ کیلومتر منطقه غربی خود و ۱۶ کیلومتر شرقی را تحت تاثیر آلودگی SO_2 قرار می‌دهد و که در شکل شماره‌ی ۲۴ قابل مشاهده است.

۲- با توجه به شکل ۲۴ و نقشه غلظت کربن مشخص می‌شود که غلظت CO در سراسر استان و به خصوص مناطق ساحلی نسبت به آلاینده‌های دیگر بالا می‌باشد، اما این آلاینده در بازه زمانی گاز سوزی نیروگاه نکا افزایش می‌یابد به طوری که شاخص غلظت CO در محدوده شهرستان‌های اطراف نیروگاه بیشتر می‌باشد و شهرستان‌های نکا، بهشهر تا محدوده‌ی ۱۵ کیلومتری شرق و تا محدوده‌ی ۵۰ کیلومتری غرب یعنی شهرتان‌های ساری، جویبار و محدوده‌ای از بابلسر تحت تاثیر گاز CO قرار می‌دهد.

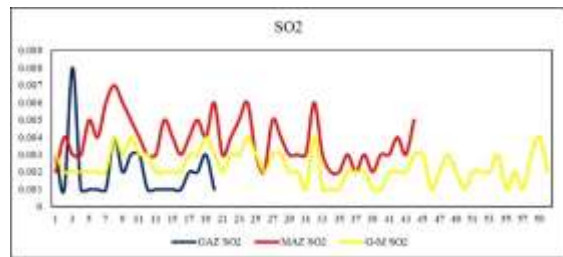
۳- غلظت آلاینده NO_2 در دو بازه زمانی مازوت سوزی و گاز سوزی نیروگاه نشان داد که در زمان گاز سوزی نیروگاه تاثیر قابل توجهی بر شهرها نداشته اما در زمان مازوت سوزی سوزی میزان غلظت آلاینده NO_2 افزایش یافته و شهرستان‌های نکا، بهشهر و محدوده‌ای از شهرتان گلوگاه را در بر گرفته است و مناطق شهری نکا و بهشهر را درگیر آلودگی کرده است، که محدوده‌ی شرقی نیروگاه تا ۶۵ کیلومتر و محدوده‌ی جنوبی نیروگاه تا ۱۵ کیلومتر تحت تاثیر آلودگی قرار می‌گیرد.



شکل ۵: نمودار غلظت آلاینده O_3 مورد بررسی در بازه زمانی گاز سوزی، مازوت سوزی و سوخت ترکیبی نیروگاه نکا



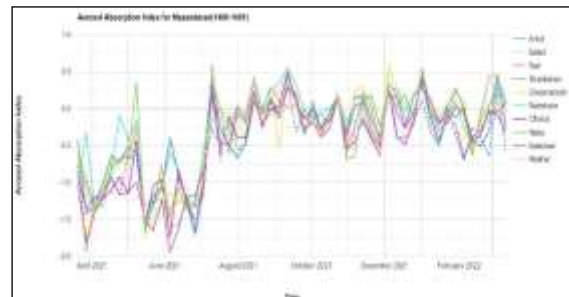
شکل ۶: نمودار غلظت آلاینده AOD مورد بررسی در بازه زمانی گاز سوزی، مازوت سوزی و سوخت ترکیبی نیروگاه نکا



شکل ۷: نمودار غلظت آلاینده SO_2 مورد بررسی در بازه زمانی گاز سوزی، مازوت سوزی و سوخت ترکیبی نیروگاه نکا

بررسی اثر آلودگی نیروگاه به شهرهای استان (پهنه‌بندی آلودگی)

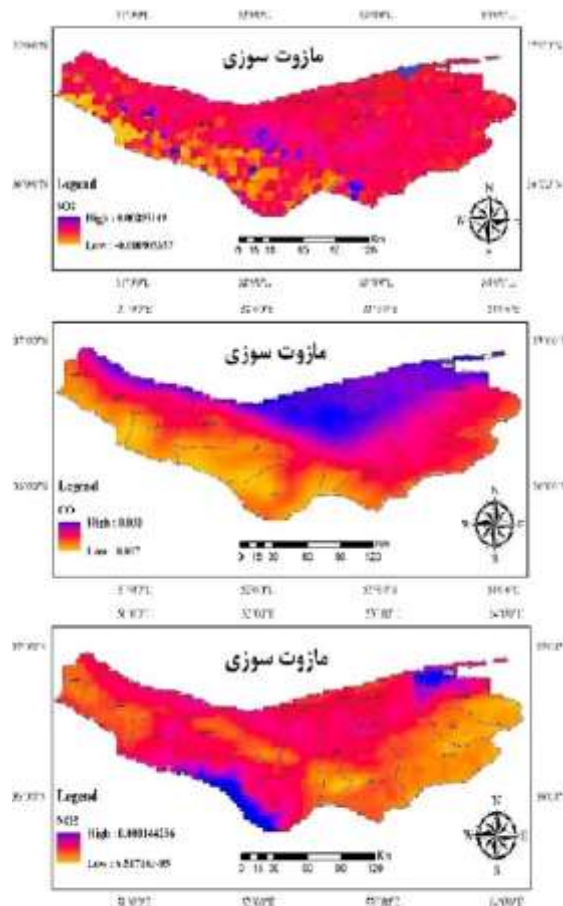
با استفاده از تصاویر ماهانه ماهواره سنتینل ۵ میزان تغییرات ذرات معلق را در ده شهر پرجمعیت استان مازندران مورد بررسی قرار گرفته‌اند، که به صورت نمودار شکل ۸ نمایش داده شده‌اند.



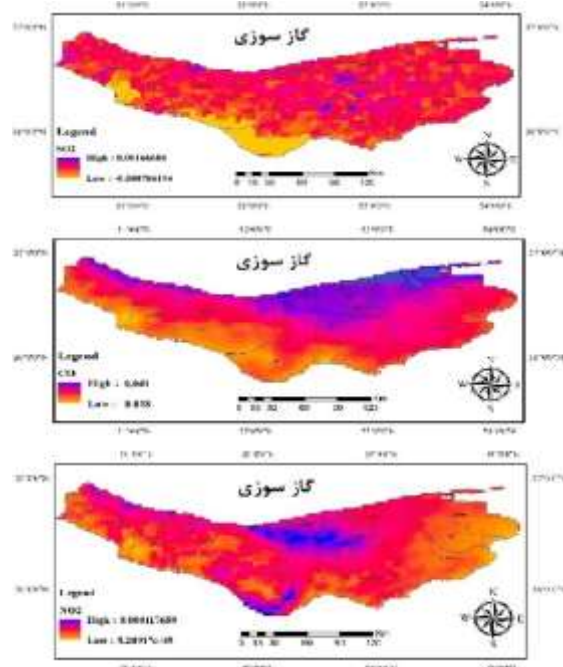
شکل ۸: بررسی تغییرات ذرات معلق در ده شهر پرجمعیت استان مازندران در

بررسی نوسانات ۵ ساله نیروگاه شهید سلیمی نکا

طی بررسی داده‌های ماهواره‌ای مربوط به نیروگاه نکا در بازه زمانی پنج‌ساله‌ی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳، روند تغییرات سه آلاینده‌ی اصلی شامل ازن، منو اکسید کربن و ذرات معلق مورد ارزیابی قرار گرفت که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ مشاهده می‌شود. به دلیل وجود نواقص و نویز در داده‌ها، تحلیل تنها بر این سه آلاینده متمرکز شد. نتایج حاصل از نمودارهای ترسیم‌ی این بازه زمانی نشان می‌دهد که هر یک از این آلاینده‌ها در ماه‌های خاصی از سال دارای بیشترین غلظت بوده‌اند، به طوری که این الگوها در طول پنج سال به صورت تکرار شونده ثبت شده‌اند و حاکی از وجود چرخه‌های فصلی مشخص در انتشار آلاینده‌ها در اطراف نیروگاه می‌باشد. بر این اساس، غلظت ازن عمدتاً در فصل زمستان، به ویژه در ماه‌های دی و بهمن، افزایش قابل توجهی داشته که می‌توان آن را به پایداری جوی، کاهش تهویه اتمسفری و وقوع پدیده وارونگی دما نسبت داد. از سوی دیگر، بیشترین میزان منو اکسید کربن در ماه‌های اسفند و مرداد مشاهده شده که احتمالاً تحت تأثیر افزایش بار عملیاتی نیروگاه، مصرف بیشتر سوخت در فصول سرد و گرم، و کارایی پایین تر سیستم‌های احتراق در دماهای حداکثری یا حداقلی بوده است. همچنین، میزان ذرات معلق در هوا در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد به اوج خود رسیده که این افزایش می‌تواند به واسطه ترکیب عوامل طبیعی مانند وزش بادهای گردوغباری منطقه، افزایش تابش خورشید و تشدید واکنش‌های شیمیایی در جو، و نیز احتمال استفاده از سوخت‌های سنگین تر یا ترکیبی در دوره‌های اوج مصرف برق باشد. تکرار این پیک‌های غلظت در بازه‌های زمانی مشخص طی سال‌های مختلف نشان می‌دهد که آلودگی ناشی از نیروگاه نکا نه تنها تابع نوع سوخت مصرفی، بلکه تحت تأثیر مستقیم شرایط اقلیمی، الگوهای فصلی و میزان تقاضای انرژی قرار دارد. علی‌رغم محدودیت در داده‌های درازمدت، نتایج پنج سال اخیر توانسته‌اند تصویری قابل اتکا از رفتار زمانی آلاینده‌ها ارائه دهند و بر ضرورت تدوین سیاست‌های کنترلی در بازه‌های حساس زمانی و استفاده هدفمند از سوخت‌های پاک‌تر در ماه‌هایی با اوج آلودگی تأکید نمایند.



شکل ۹: پهنه بندی آلودگی آلاینده‌های SO₂، CO، NO₂ ناشی از نیروگاه نکا در زمان مازوت سوزی

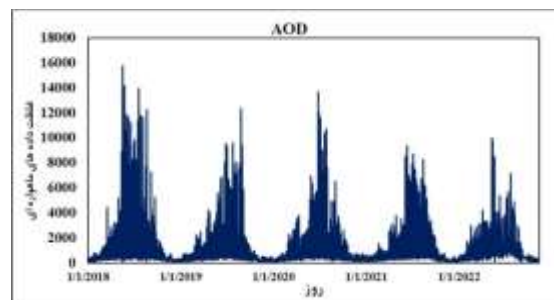


شکل ۱۰: پهنه بندی آلودگی آلاینده‌های SO₂، CO، NO₂ ناشی از نیروگاه نکا در زمان گازسوزی

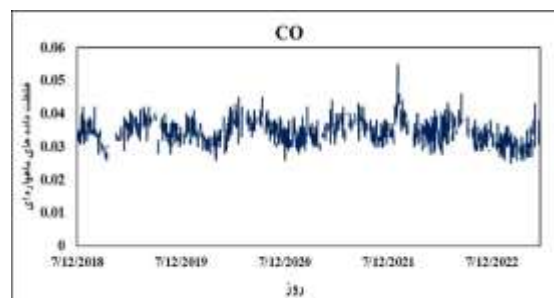
دارای الگوی فصلی مشخصی است: افزایش ازن در زمستان به دلیل پایداری جوی و وارونگی دما، اوج‌گیری CO در اسفند و مرداد در پی افزایش مصرف سوخت و کاهش کارایی احتراق، و بیشترین میزان AOD در فصل گرم ناشی از گردوغبار، تابش خورشیدی و احتمال استفاده از سوخت‌های سنگین‌تر. تکرار این الگوها طی سال‌های متوالی حاکی از پیوند مستقیم آلودگی با شرایط اقلیمی، نوع سوخت و تقاضای فصلی انرژی است. این نتایج بر لزوم مدیریت راهبردی سوخت در واحدهای تولید انرژی تأکید دارد، به‌گونه‌ای که انتخاب نوع سوخت نه تنها بر کیفیت هوای منطقه تأثیرگذار است، بلکه پیامدهای مستقیمی برای سلامت عمومی دارد. بر این اساس، تدوین سیاست‌های زیست‌محیطی مبتنی بر استفاده از فناوری‌های احتراقی پاک‌تر و برنامه‌ریزی برای گذار به سوخت‌های کم‌آلاینده ضروری به نظر می‌رسد. همچنین، بهره‌گیری از پایش‌های ماهواره‌ای به‌عنوان ابزاری کارآمد در نظارت، مدیریت و سیاست‌گذاری بلندمدت در حوزه آلودگی هوا باید مورد توجه ویژه قرار گیرد.

منابع

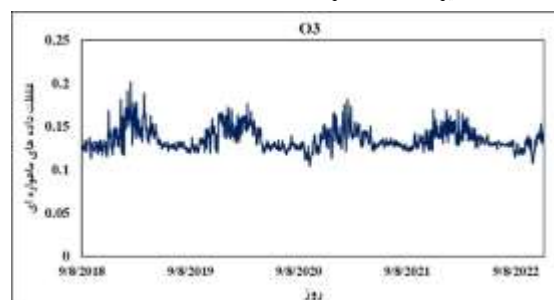
1. Yousefi-Kebriya, A., Nadi, M., Afaridegan, E., & Sun, Z. (2025). Wetland shrinking and dust pollution in Khuzestan Iran: insights from sentinel-5 and MODIS satellites. *Scientific reports*, 15(1), 13626. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96935-2>
2. karampoor M, khamoshian Y, heidari H, amraei F. The role of environmental and climatic factors on the transmission and emission of carbon monoxide in Iran in 2018. *jsaeh*. 2021; 8 (2):179-190. URL: <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3154-fa.html>. (In Persian with English abstract).
3. Katabi, D., Esmaili, R., Alidadi, H., Peirovi, R., and Joulaai, F. 2016. Evaluation of MashhadCity Air Quality based on Air Quality Index (AQI). *Iranian Journal of Research in Environmental Health*, 2., 228-236. (In Persian with English abstract).
4. Pishdad, A., Alijani, b. Ali Akbari Bidokhti, A. and Akbari, M. 2019. Long Term Status Analysis of Major Air Pollutants and Determination of Air Pollution Periods in Tehran Metropolis. *Journal of Earth and Space Physics*. 46., 355-376. (In Persian with English abstract).
5. EPA, U. (n d-c). Particulate Matter (PM) Pollution. Retrieved from <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>



شکل ۱۱: نمودار غلظت اندازه‌گیری شده ابروسل‌ها، با تصاویر ماهواره‌ای نیروگاه نکا در سری زمانه ۵ سال (۲۰۲۳-۲۰۱۸)



شکل ۱۲: نمودار غلظت اندازه‌گیری شده منو اکسید کربن با تصاویر ماهواره‌ای نیروگاه نکا در سری زمانه ۵ سال (۲۰۲۳-۲۰۱۸)



شکل ۱۳: نمودار غلظت اندازه‌گیری شده ازن با تصاویر ماهواره‌ای نیروگاه نکا در سری زمانه ۵ سال (۲۰۲۳-۲۰۱۸)

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

اما در مقایسه با مازوت، میزان انتشار SO_2 و ذرات معلق (PM) به‌مراتب کمتر است. در مقابل، استفاده از مازوت با افزایش چشمگیر غلظت SO_2 و AOD همراه بوده و بیانگر پتانسیل آلودگی بالای این نوع سوخت است. نقشه‌برداری مکانی آلودگی‌ها نیز نشان داد که در دوره‌های مصرف مازوت، پراکنش آلاینده‌هایی مانند SO_2 و NO_2 تا مناطق شهری از جمله نکا، بهشهر و بخش‌هایی از ساری گسترش یافته و شعاعی تا حدود ۶۵ کیلومتر به سمت شرق و ۱۵ کیلومتر به سمت جنوب نیروگاه را دربر می‌گیرد. همچنین، غلظت CO در دوره‌های مصرف گاز طبیعی به‌ویژه در مناطق ساحلی و پرجمعیت، به‌طور محسوسی افزایش یافته است. طی تحلیل داده‌های ماهواره‌ای پنج‌ساله (۲۰۲۳-۲۰۱۸) پیرامون نیروگاه نکا، روند تغییرات سه آلاینده‌ی اصلی شامل ازن (O_3)، منوکسید کربن (CO) و ذرات معلق (AOD) بررسی شد. یافته‌ها نشان داد که هر آلاینده

6. EPA, U. (n.d-b). Ground-level Ozone Pollution. Retrieved from <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution>
7. Prevention, C. f. D. C. a. (2019). Nitrogen dioxide. Retrieved from <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0454.html>
8. Pishdad, A., Alijani, b. Ali Akbari Bidokhti, A. and Akbari, M. 2019. Long Term Status Analysis of Major Air Pollutants and Determination of Air Pollution Periods in Tehran Metropolis. *Journal of Earth and Space Physics*. 46., 355-376. (In Persian with English abstract).
9. Shojaaddini, M. and Moosaviyan, A. 2021. Application of Satellite Remote Sensing Data in Monitoring Iran's Agricultural and Horticultural Environmental Pollutions (A Case Study of Nitrogen Dioxide), *Scientific & Research Journals Managment System*. 49., 253-261.
10. Li, M., Wu, Y., Bao, Y., Liu, B., & Petropoulos, G. P. (2022). Near-surface NO₂ concentration estimation by random forest modeling and Sentinel-5P and ancillary data. *Remote Sensing*, 14(15), 3612. <https://doi.org/10.3390/rs14153612>
11. Yousefi Kebriya, A., Nadi, M., & Ghanbari Parmehr, E. (2023). Estimation of ozone and nitrogen dioxide pollutants in Mazandaran Province using Sentinel-5 satellite images. *Iranian Journal of Energy and Environment*, 15(5), 70–81. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.01.07>
12. NASA (National Aeronautics and Space Administration). (2015). *GMS: NASA images show human fingerprint on global air quality – Release materials*. Retrieved from <https://svs.gsfc.nasa.gov>
13. Lorente, A., Borsdorff, T., Butz, A., & Hasekamp, O. (2021). Methane retrieved from TROPOMI: Improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 665–684. <https://doi.org/10.5194/amt-14-665-2021>
14. Yousefi Kebriya, A., & Nadi, M. (2024). Examining air pollution continuity in Tehran Province using Markov chain model. *Iranian Journal of Energy and Environment*, 15(2), 201–210. <https://doi.org/10.5829/IJEE.2024.15.02.10>
15. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2020). NOAA ESRL global monitoring laboratory: SURFRAD aerosol optical depth. Retrieved from <https://gml.noaa.gov/grad/surfrad/aod/>
16. Yousefi Kabria, A., Nadi, M., & Jamei, M. (2021). Combining interpolation methods and precipitation products of TRMM satellite to increase the accuracy of rainfall maps in Mazandaran province. *Water and Soil Conservation*, 28, 49–70. (In Persian with English abstract).
17. Stigler, S. M. (1989). Francis Galton's account of the invention of correlation. *Statistical Science*, 4(2), 73–79.