



پایش و تحلیل فصلی آلودگی هوای ایران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل در گوگل ارث انجین

سعید بهزادی^{*}، پارسا افزالی کردمحلله

۱- دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

ایمیل: behzadi.saeed@gmail.com

۲- دانشجوی ارشد گروه نقشه برداری، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

ایمیل: parsa_afzalikord@yahoo.com

چکیده

امروزه آلودگی هوا به مشکلی جدی در جوامع بشری تبدیل شده است. در ایران نیز سال به سال میزان آلودگی در حال افزایش است. یکی از روش‌های مناسب برای مدیریت بهتر در مقابله با این پدیده مخرب زیست محیطی، پایش و بررسی روند میزان آلودگی با استفاده از تکنولوژی‌های روز دنیا از جمله تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. هدف این مطالعه تولید نقشه فصلی و بررسی روند آلودگی‌های منواکسید کربن (CO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO₂)، متان (CH₄) و دی‌اکسید گوگرد (SO₂) می‌باشد. نقطه عطف این پژوهش بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل با وضوح بالا و مدل‌سازی در گوگل ارث انجین برای تحلیل دقیق فصلی و سالانه آلودگی‌ها است. منطقه مورد مطالعه جهت تولید نقشه آلودگی، کشور ایران در جنوب غرب آسیا است. با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین، تصاویر مربوط به هر آلودگی در سال ۱۴۰۲ شمسی استخراج شده است. با ایجاد مدل و بهره‌گیری از باندهای مخصوص، نقشه آلودگی فصلی ایران براساس آلاینده‌ها تولید گردید. در ادامه نیز برای تحلیل روند آلودگی، نقطه‌ای در شهر تهران در نظر گرفته شد. با ایجاد تابع در گوگل ارث انجین نمودار سال ۱۴۰۲ مربوط به آلاینده‌های CO، NO₂، CH₄ و SO₂ ترسیم می‌شود. نتایج این دو قسمت نشان می‌دهد که میزان آلودگی در زمستان نسبت به فصول دیگر بیشتر است. برخی از مناطق به‌ویژه در سواحل خلیج فارس و دریای خزر در هر ۴ فصل از سال در از لحاظ وجود CO پرخطر هستند. آلودگی NO₂ در کلانشهرها در طول سال خطرناک است. نقشه‌های CH₄ تقریباً خنثی هستند. از طرفی آلودگی SO₂ همانند NO₂ در مناطق صنعتی و پرجمعیت بیشتر دیده می‌شود. نمودارها هم نشان می‌دهند که روند آلودگی CO، NO₂ و SO₂ در نیمه دوم سال بشدت افزایش می‌یابد. درنهایت سنجش از دور می‌تواند آلودگی‌ها را در سطح وسیع مورد بررسی قرار داده و اطلاعات مفیدی را برای برنامه‌ریزی در اختیار سازمان‌ها قرار دهد.

کلمات کلیدی: آلودگی، سنجش از دور، گوگل ارث انجین، تصاویر ماهواره‌ای



۱- مقدمه

سلامت افراد جامعه یکی از اهداف اصلی کشورها بوده و برخورداری از سلامت فیزیکی، روانی و اجتماعی حق تمامی مردم است. آلودگی به عنوان پدیده‌ای که سلامت انسان و محیط زیست را تهدید می‌کند، شامل آلودگی هوا، آب و خاک است. این پدیده می‌تواند به آسیب‌های جدی و اختلال در شرایط زندگی منجر شود. بنابراین پایش و مدیریت آلودگی برای حفظ سلامت جامعه ضروری است. سنجش از دور با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل باندهای مختلف امکان تحلیل ساده‌تر و دقیق‌تر آلودگی را فراهم می‌کند. آلودگی هوا در ایران، به‌ویژه در فصول سرد، به چالشی جدی تبدیل شده و تعطیلی سازمان‌ها و آسیب به اقتصاد و سلامت عمومی را به همراه دارد.

از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا می‌توان به مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO₂)، متان (CH₄) و دی‌اکسید گوگرد (SO₂) اشاره کرد. مقادیر بالاتر از استاندارد CO، زندگی افراد پرخطر را به مخاطره می‌اندازد و در مقادیر هشدار نیز سبب مرگ سریع افراد می‌شود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین NO₂ یکی از آلاینده‌های معیار هوا محسوب می‌شود که علاوه بر اثرات سوء بهداشتی، پیش‌نیاز تشکیل ترکیبات خطرناک جوی نیز است (اسماعیلی و همکاران، ۱۴۰۰). پژوهش‌های متعددی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نظیر سنتینل ۵، لندست ۸ و OMI انجام شده‌اند که به تحلیل مکانی و زمانی آلودگی و ارزیابی آلاینده‌ها در مناطق مختلف ایران و جهان پرداخته‌اند.

پیشرفت‌های اخیر در سنجش از دور امکان نظارت بر کیفیت هوا در سطوح محلی و منطقه‌ای را فراهم کرده و افق جدیدی برای اطلاعات زیست‌محیطی گشوده است. اندازه‌گیری آلودگی با استفاده از داده‌های شبکه آب و ذرات معلق در جو مورد توجه قرار گرفته است (محمدی و شبان، ۱۴۰۲). مطالعات بسیاری از داده‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های پیشرفته برای تحلیل آلودگی هوا استفاده کرده‌اند. به‌عنوان مثال، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در بازه ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ با الگوریتم Sarawat برای برآورد PM₁₀ در تهران به کار رفته و نتایج نشان‌دهنده افزایش PM₁₀ در مناطق صنعتی غرب تهران بوده است (خامسی میبیدی، ۱۴۰۲). در دوران همه‌گیری کرونا، بررسی آلودگی هوا در تهران، اصفهان و قم نشان داد که میزان آلودگی در مقایسه با قبل از کرونا کاهش چشمگیری داشته و مناطق آلوده‌تر با دمای بالاتر همراه بوده‌اند (شایگان و مکرّم، ۱۴۰۲).

تحقیقات مختلفی به بررسی کاربری زمین و تأثیر آن بر آلودگی پرداخته‌اند. به‌عنوان نمونه، تغییر پوشش گیاهی به اراضی مسکونی در تهران سبب افزایش استفاده از خودروهای شخصی و تشدید آلودگی هوا شده است (قهرمانلو و



همکاران، ۱۴۰۱). همچنین ارزیابی مدل‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی نشان داده که مدل Levenberg-Marquardt برای پیش‌بینی PM_{2.5} عملکرد بهتری دارد (جعفریان و بهزادی، ۱۳۹۸).

برخی مطالعات تمرکز ویژه‌ای بر آلاینده‌ی CO داشته‌اند. در کلان شهر تهران با استفاده از روش درون یابی Kriging در محیط GIS، نقشه‌های پهنه بندی آلودگی هوا بر اساس داده‌های آلودگی دی ماه سال ۱۳۹۶ و برای آلاینده CO تهیه شده است (جعفریان و بهزادی، ۱۳۹۸). پژوهشگران ضربی را به نام آلفا با دقت بالا جهت محاسبه غلظت CO در هر مکانی با کمترین هزینه تولید کردند. داده‌های ماهواره سنتینل ۵ و ایستگاه‌های سنجش شهر مشهد مورد استفاده قرار گرفت. با ضرب آلفا در مقدار عددی اندازه گیری ماهواره از گاز CO، اندازه واقعی غلظت گاز CO در هر نقطه و مکانی روی زمین محاسبه خواهد شد (اولیایی و همکاران، ۱۴۰۳). پایش و تحلیل مکانی و زمانی آلودگی CO با استفاده از داده‌های ماهواره‌های سنتینل ۵، terra و modis در ایران مورد مطالعه قرار گرفت. بیشترین میزان آلودگی فضایی برای استان‌های تهران و گیلان بود (صفریان و همکاران، ۲۰۲۰).

برخی مطالعات به بررسی NO₂ پرداخته‌اند. نتایج بررسی نقشه‌های فصلی NO₂ در مشهد نشان داد که غلظت این آلاینده در شرق و شمال شرق شهر بیشتر است (اسماعیلی و پذیرا، ۱۴۰۰). همچنین، تحلیل داده‌های NO₂ از سنجنده OMI نشان داد که این آلاینده در فصول سرد سال بیشترین مقدار را دارد (شاهمحمدی و همکاران، ۱۳۹۹). در پژوهشی توزیع جهانی غلظت‌های NO₂ در سطح زمین برآورد شد. همبستگی سطح NO₂ با جمعیت برای سه کشور و یک قاره بررسی شد: ایالات متحده ($r = 0.71$)، اروپا ($r = 0.67$)، چین ($r = 0.69$) و هند ($r = 0.59$). نتایج نشان می‌دهد غلظت NO₂ متناسب با جمعیت افزایش یافته به یک توان افزایش می‌یابد (لامسال، ۲۰۱۳). تجزیه و تحلیل چند مقیاسی، چند گونه‌ای و چند پلتفرمی آلاینده‌های هوا و داده‌های هواشناسی با هم‌افزایی مشاهدات سطحی و ماهواره‌ای در دوره قرنطینه کرونا هند انجام شد. نتایج حاکی از کاهش قابل توجهی در اندازه‌گیری‌های سطحی دی اکسید نیتروژن (NO₂) و ذرات ریز ۲/۵ pm را در طول دوره قرنطینه می‌باشد (ساته، ۲۰۲۱).

مطالعاتی نیز بر روی گاز متان صورت پذیرفته است. هضم بی‌هوازی یک فناوری برای تصفیه ضایعات و فاضلاب است. سیستم‌های هضم بی‌هوازی که در حال حاضر در اروپا کار می‌کنند دارای ظرفیت کل ۱۵۰۰ مگاوات هستند، در حالی که استقرار بالقوه در سال ۲۰۱۰ بین ۵۳۰۰-۶۳۰۰ مگاوات برآورد شده است (دی مس، ۲۰۰۳). پژوهشی دیگر بر روش‌های سنتی جذب متان مورد استفاده در هند، چین و سایر کشورهای در حال توسعه جهت تأمین انرژی برای



روستاها تمرکز کرد. تخمین زده شده است که کود دامی حدود ۲۴۰ میلیون تن دی‌اکسید کربن معادل متان به اتمسفر وارد می‌کند (تاوسف، ۲۰۱۳).

دیگر مطالعات به طور کلی آلاینده‌های هوا را بررسی کرده‌اند. مطالعه‌ای بررسی شاخص کیفیت هوا و ارتباط آن با تغییرات فضای سبز کلانشهر تبریز را هدف قرار داد. داده‌های آلودگی هوا سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۶ و از پنج آلاینده اصلی آلودگی هوا NO_2 , NO , O_3 , CO استفاده شده است. با استفاده از نرم افزارهای اکسل و GIS و روش درونیابی (IDW) نقشه وضعیت کیفیت هوای روزهای ناسالم بدست آمد. نتایج نشان دهنده این است که وضعیت شاخص سلامت کیفیت هوای کلانشهر تبریز با تغییرات فضای سبز رابطه مستقیم دارد و آلودگی هوا بیشتر در فصول سرد است (محمودزاده و همکاران، ۱۴۰۲). تحقیقی تحلیلی فضایی آلودگی فلزات سنگین گردوغبار سطح شامل، سرب، کروم، منگنز، روی، مس و آهن در محدوده شمالغرب شهر تبریز را بررسی کرد. نرم افزارهای مورد استفاده ArcGis10.8 و Spss22 بودند. یافته‌ها نشان داد که توزیع فضایی آلودگی‌های فلزات سنگین از الگوی خوشه‌ای تبعیت می‌کند (تیموری و همکاران، ۱۴۰۳). مقادیر دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، مونوکسید کربن و ذرات معلق، با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۵ ارزیابی شد. نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد که مقادیر پایش با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۵ حداقل ۷۸٪ با مقادیر پایش شده توسط ایستگاه‌های زمینی همبستگی دارد (قنادی و همکاران، ۱۴۰۱). طی اندازه‌گیری‌های مداوم در آلمان ارتفاع لایه‌های اختلاط (MLH) توسط سیستم‌های سنجش از دور مختلف عمدتاً از ساختار حرارتی و آشفتگی هوا (SODAR) تعیین شد. نتایج نشان داد که همبستگی‌ها در ایستگاه‌های پس‌زمینه شهری در زمستان بیشتر از تابستان است و برای ایستگاه‌های شهری بزرگ‌تر از ایستگاه‌های روستایی است. همچنین همبستگی غلظت NO_x با MLH بزرگتر از همبستگی غلظت ذرات است (شفر، ۲۰۰۳). مدلی جهت پیش‌بینی آلودگی هوا ایجاد گردید. علاوه بر داده‌های ماهواره‌ای از مدل‌های یادگیری عمیق پیشرفته برای یادگیری الگوهای ذرات معلق $pm_{2.5}$ بر روی همبستگی‌های مکانی و زمانی استفاده شد. این مدل نسبت به مدل‌های قبل عملکرد بهتری را ثبت کرد (موتو کومار، ۲۰۲۲). وضعیت آلودگی هوای اوکراین توسط سنتینل ۵ در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. مناطقی در شرق اوکراین به دلیل فعالیت نیروگاه‌های حرارتی با سوخت زغال سنگ بر کیفیت هوا در منطقه تأثیر منفی می‌گذارد (میخایلو، ۲۰۲۱).

فرآیند حمل و نقل و تأثیر بالقوه ذرات گردوغبار چین در اکتبر ۲۰۲۰ بر اساس مشاهدات ماهواره‌ای و زمینی یکپارچه ارائه شد که نشان دهنده فعالیت منابع غبار در پاییز است (تاو، ۲۰۲۱). مجموعه داده مکانی-زمانی جدید با کمک Sentinel5 ارائه شد. بسته کد تکمیلی پایتون که برای جمع‌آوری و پردازش داده‌ها استفاده می‌شود در دسترس عموم



قرار گرفته است (عمرانی و همکاران، ۲۰۲۰). مروری بر داده های ماهواره ای برای کیفیت هوا و برنامه های کاربردی سلامت ارائه گردید. مزیت اصلی داده ماهواره ای پوشش فضایی آنهاست (هالوی، ۲۰۲۱). پژوهشی به تجزیه و تحلیل توزیع های مکانی-زمانی آلاینده اولیه هوا از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲ در منطقه گوانژونگ، چین با استفاده از داده های ماهواره های مودیس، لندست ۸، سنتینل ۲ و مدل های یادگیری ماشین پرداخت. میانگین سالانه غلظت O₃ کمی افزایش یافت (لی، ۲۰۲۴). در تحقیقی ارزیابی خطر سلامت تنفسی برای جوامع نزدیک کارخانه فرآوری نیکل در ناحیه پومالا با تجزیه و تحلیل توسط آزمون کولموگروف اسمیرنوف و EHRA انجام شد. نتایج EHRA نشان می دهد که سطوح SO₂ از استانداردهای کیفیت ملی فراتر رفته است. با این حال اکثر پاسخ دهندگان در این مطالعه دارای خطرات سلامتی بودند که در محدوده ایمن بود (آزیس، ۲۰۲۴). ارتباط بین غلظت آلاینده ها و مقادیر باندهای مختلف تصاویر ماهواره ای لندست از طریق ۱۹ مدل رگرسیون بررسی شد که در میان آنها، Ensembles Bagged Trees دارای کمترین RMSE برابر با ۲۱/۸۸ بود (جعفریان و همکاران، ۲۰۲۰)

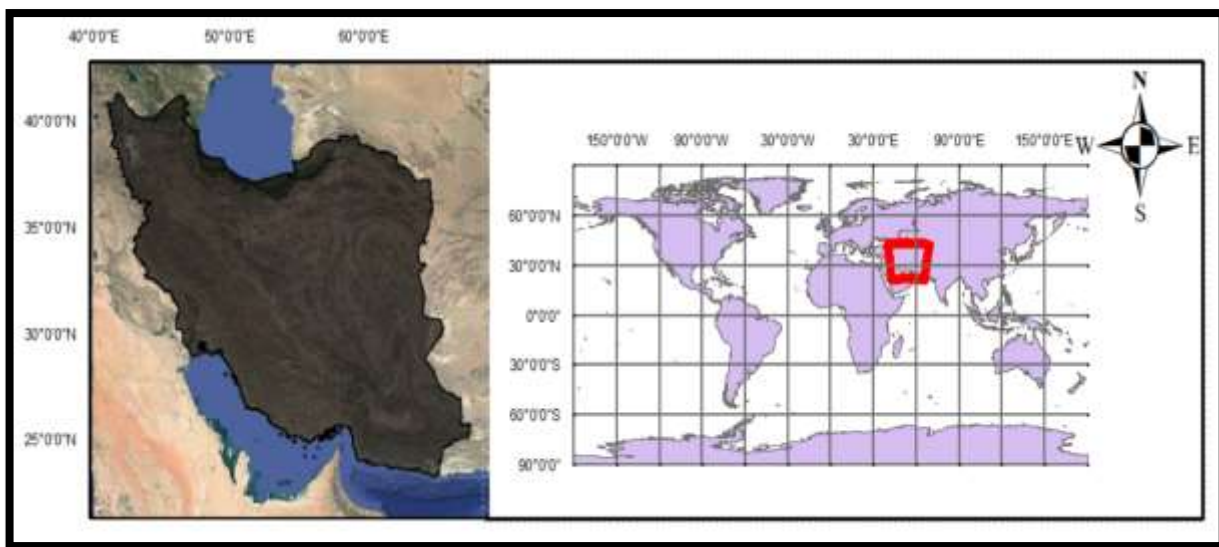
در این تحقیق تحلیل چندبعدی و همزمان آلاینده ها انجام شده است درحالیکه در تحقیقات پیشین معمولاً به بررسی تک بعدی و منطقه ای آلاینده های محیطی پرداخته شده است. هدف اصلی این پژوهش، پایش و تحلیل تغییرات زمانی-مکانی آلودگی های CO، NO₂، CH₄ و SO₂ در کشور ایران با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنتینل ۵ و سامانه گوگل ارث انجین است. این مطالعه با تمرکز بر تولید نقشه های فصلی و تحلیل روند آلودگی در سال ۱۴۰۲، به ارائه نتایج دقیق تر و جامع تر در مقایسه با پژوهش های مشابه پرداخته است. نوآوری این پژوهش در بهره گیری از تصاویر ماهواره ای با وضوح بالا و مدل سازی در گوگل ارث انجین برای تحلیل دقیق فصلی و سالانه آلودگی ها است. این پژوهش به طور همزمان چهار آلاینده اصلی در سامانه ارث انجین را مورد بررسی قرار می دهد و تمرکز اصلی این تحقیق بر تفاوت های مکانی-زمانی این تغییرات می باشد که دیدگاهی جامع تر را به سازمان های مربوطه ارائه می دهد. همچنین، مقایسه نقشه های آلودگی و تحلیل نقاط بحرانی در مناطق مختلف ایران، به ویژه کلان شهرها و مناطق صنعتی، به تصمیم گیری بهتر در مدیریت محیط زیست و کاهش اثرات آلودگی کمک می کند. استفاده از الگوریتم های پیشرفته گوگل ارث انجین برای تولید نقشه ها و نمودارهای زمانی اصلی ترین تفاوت این پژوهش با سایر مطالعات مشابه است که امکان پایش گسترده، سریع و دقیق را فراهم کرده و اطلاعات کاربردی برای برنامه ریزی شهری و صنعتی ارائه می دهد. فرضیه استفاده شده در مطالعه این است که مناطق صنعتی و کلان شهرها بیشترین سهم را در آلودگی ناشی از NO₂ و SO₂ دارند. همچنین میزان آلودگی CH₄ و CO در مناطق مختلف ایران به عوامل طبیعی وابسته است و تأثیر چندانی از فعالیت های انسانی ندارد.



۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، کشور ایران می‌باشد که در شکل ۱ بر روی نقشه نمایش داده شده است. ایران با مساحتی در حدود ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع در جنوب غرب قاره آسیا واقع است که در مختصات جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی قرار دارد. آذربایجان، ارمنستان، ترکمنستان، پاکستان، افغانستان، عراق و ترکیه همسایگان خاکی ایران می‌باشند. پایتخت این کشور تهران می‌باشد که جمعیتی بیش از ۱۰ میلیون نفر را در خود جا داده است. پرجمعیت‌ترین استان‌های کشور به ترتیب مربوط به تهران، خراسان رضوی، اصفهان و فارس می‌باشد. همچنین از استان‌های صنعتی می‌توان به مرکزی، البرز، آذربایجان شرقی و اصفهان اشاره کرد.



شکل (۱): منطقه مورد مطالعه

Fig. (1): Study Area

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

برای پایش آلودگی و کیفیت هوا از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۵ استفاده می‌گردد. ماموریت سنتینل ۵ بخشی از برنامه رصد زمین اروپا "کوپرنیک" است که توسط کمیسیون اروپا (EC) هماهنگ و مدیریت می‌شود. ابزار TROPOMI یک حسگر چند طیفی است که بازتاب طول موج‌های مهم برای اندازه‌گیری غلظت‌های اتمسفر ازن، متان، فرمالدئید،



آژوسل، مونوکسید کربن، دی اکسید نیتروژن و دی اکسید گوگرد و همچنین ویژگی‌های ابر را با وضوح فضایی ۰/۰۱ درجه ثبت می‌کند. در این تحقیق از تصاویر Sentinel-5P Nitrogen, Sentinel-5P Carbon Monoxide, Sentinel-5P Sulphur Dioxide, و Sentinel-5P Methane به ترتیب برای تعیین نقشه و میزان منواکسید کربن، دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد و متان به صورت آفلاین بهره برده شده است. سامانه استفاده شده در تحقیق نیز گوگل ارث انجین می‌باشد. این سامانه تمام تصاویر ذکر شده را در منطقه معین گردآوری کرده و با ایجاد مدل و تابع‌های گوناگون نتایج را بصورت نقشه و نمودار براساس آنچه که کاربر می‌خواهد، نمایش می‌دهد.

۲-۳- روش اجرای پژوهش

جهت تولید نقشه هر یک از آلودگی‌های CO, NO₂, CH₄ و SO₂ در گوگل ارث انجین، نیاز است تا در قسمت کدنویسی سامانه، مدلی تولید شود تا ابتدا تصاویر مربوط به منطقه مورد مطالعه را در بازه زمانی خواسته شده گردآوری کرده و سپس فیلترهای دیگر اعمال گردد. برای ارزیابی و تحلیل زمانی مکانی هدفمند، بازه زمانی سه ماهه سال ۱۴۰۲ شمسی در نظر گرفته شده است. در نتیجه برای هر فصل از سال نقشه آلودگی ایجاد می‌شود.

برای تهیه نقشه آلودگی منواکسید کربن از داده ماهواره‌ای Sentinel-5P OFFL CO استفاده می‌شود. این مجموعه داده تصاویر آفلاین با وضوح بالا از غلظت CO را ارائه می‌دهد که قدرت تفکیک مکانی آن ۱۱۱۳/۲ متر می‌باشد. فراوانی جهانی CO با بهره‌برداری از اندازه‌گیری‌های تشعشع زمین در آسمان صاف و آسمان ابری در محدوده طیفی ۲,۳ میکرومتر بخش مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) از طیف خورشیدی تعیین می‌شود. یکی از باندهای این تصویر CO_column_number_density نام دارد که میزان چگال کربن دی اکسید را با واحد mol/m^2 ارزیابی می‌کند. با فراخوانی این باند از تصاویر، تعیین منطقه و بازه زمانی سه ماهه، نقشه آلودگی کربن منواکسید برای چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان نمایان خواهد شد.

جهت ایجاد نقشه آلودگی دی اکسید نیتروژن از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P OFFL NO₂ بهره برده شده است. این مجموعه داده تصاویر آفلاین با وضوح بالا از غلظت NO₂ را ارائه می‌دهد. NO₂ برای نشان دادن غلظت اکسیدهای نیتروژن جمعی استفاده می‌شود، زیرا در طول روز، یعنی در حضور نور خورشید، یک چرخه فتوشیمیایی شامل ازن (O₃)، NO را به NO₂ و بالعکس در مقیاس زمانی چند دقیقه تبدیل می‌کند. مهمترین باند برای تولید نقشه فصلی آلودگی دی اکسید نیتروژن، NO₂_column_number_density با واحد mol/m^2 است که با فراخوانی آن و اعمال فیلترهای مکانی و زمانی نقشه نهایی بوجود می‌آید.

داده ماهواره‌ای Sentinel-5P OFFL CH₄ برای تهیه نقشه آلودگی متان استفاده شده است. این سنجنده از اطلاعات جذب از باند Oxygen-A (۷۶۰ نانومتر) و محدوده طیفی SWIR برای نظارت بر فراوانی CH₄ در جو زمین استفاده می‌کند. نحوه تولید نقشه فصلی متان در ارث انجین با تصاویر ماهواره‌ای، استفاده از باند



همانطور که در شکل ۲ در خصوص آلودگی CO مشاهده می‌شود، برخی از مناطق به‌ویژه در سواحل خلیج فارس و دریای خزر در هر ۴ فصل از سال در از لحاظ وجود CO پرخطر هستند. از طرفی این وضعیت در تهران نیز به‌گونه‌ای می‌باشد که فصل بهار کمترین CO را دارد و هرچه به سمت زمستان می‌رود آلودگی افزایش می‌یابد تا حدی که در فصل پاییز و زمستان به وضعیت خطرناک می‌رسد. مناطقی مثل بیرجند، استان کرمان، شهرکرد، یاسوج، اردبیل و شمال استان تهران در بیشتر مواقع سال در شرایط کم‌خطر قرار می‌گیرند. شهرهای صنعتی و پرجمعیت بیشتر درگیر این نوع گاز هستند. در کل میتوان نتیجه گرفت توزیع آلودگی در زمستان و پاییز بیشتر است. منابع طبیعی و انسان‌ساخت هر دو در تشکیل مونوکسیدکربن اتمسفر سهیم هستند ولیاز آنجا که توزیع به صورت لکه ای نمی‌باشد، بنابراین می‌توان گفت که آلودگی مناطق شهری و صنعتی نقش کمی در این گاز دارد و به طور کلی منابع طبیعی در تولید مونوکسیدکربن نسبت به منابع انسانی سهم بیشتری دارند. از طرفی در این نقشه‌ها مشاهده شده است که وجود گاز CO در مناطق کوهستانی بیشتر می‌باشد. لذا دمای پایین و ارتفاع بالا تاثیری بیشتری بر مقدار این گاز می‌تواند داشته باشد. در این نقشه علیرغم اینکه شهرهای صنعتی نقش کمی در آلودگی داشته اند ولی شهر تهران به صورت یک منطقه بحرانی مشاهده می‌شود. این نشان‌دهنده تاثیر بیش از حد این منطقه بر مقدار آلودگی دارد. مهمترین دلیل آن نیز مساله حمل و نقل و تعداد بسیار زیاد خودرو در این شهر می‌باشد.

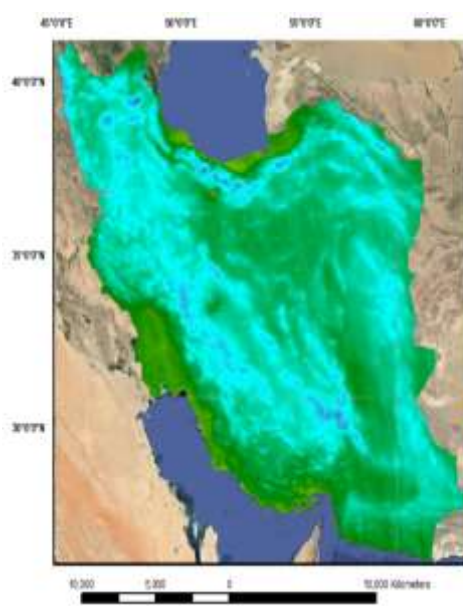
۳- نتایج

در انتها نیز بوسیله باند SO2_column_number_density با واحد mol/m^2 موجود در مجموعه داده Sentinel-5P OFFL SO2 و ایجاد تابع، نقشه آلودگی فصلی دی اکسیدگوگرد ایجاد می‌شود. چگالی SO2 در سطح زمین، با استفاده از تکنیک DOAS محاسبه شده است.

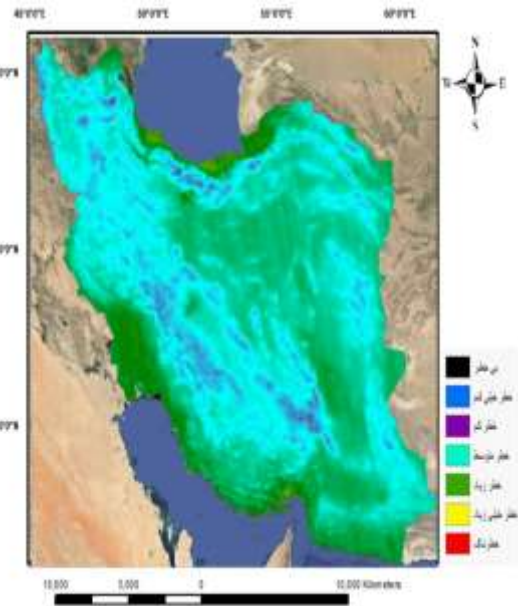
همانطور که در شکل ۳ نشان می‌دهد که آلودگی NO2 در بسیاری از مناطق کشور در طول سال خطرناک است. در بهار این نسبت کم بوده و هرچه به زمستان می‌رسد، آلودگی بیشتر می‌شود. مشهد، بندرعباس، عسلویه، اصفهان، شیراز، تهران، کرج و رشت در تمام فصل‌ها در قسمت پرخطر هستند. شهرهایی مثل یاسوج، بیرجند و ایلام همواره در قسمت کم‌خطر هستند. در نقشه آلودگی NO2 برخلاف نقشه آلودگی CO لکه‌های آلودگی مشاهده می‌شود. از طرفی تمام شهرهایی که میزان NO2 در آنها زیاد است، صنعتی و پرجمعیتند. لذا می‌توان بیان کرد مهم‌ترین منابع انسانی انتشار NO2 فرآیندهای احتراق نظیر وسایل نقلیه، سیستم‌های گرمایش، نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها می‌باشد. پالایشگاه‌ها در مناطق جنوبی به وضوح میزان NO2 را در منطقه افزایش داده‌اند. برخلاف CO که بیشتر عوامل طبیعی بر روی آن تاثیرگذار



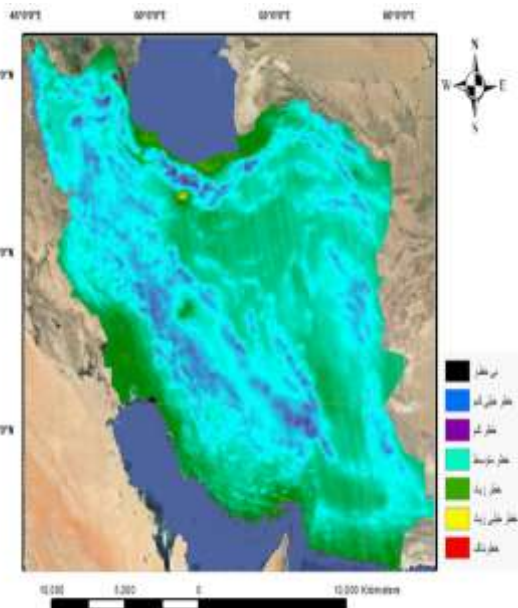
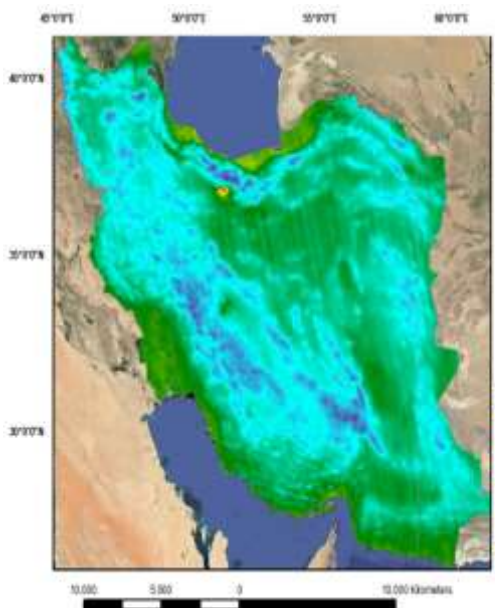
بود، در اینجا اکثریت قریب به اتفاق NO_2 در جو ناشی از فعالیت های انسانی است. دامنه کوه ها و مناطق کوهستانی فاقد آلودگی می باشد که نشان میدهد بر خلاف آلاینده قبلی تابع ارتفاع و سرما نمی باشد. شباهت آلودگی NO_2 و CO در این است که در فصول سرد مقدار بیشتری نسبت به دیگر فصول دارند.



(ب)



(الف)



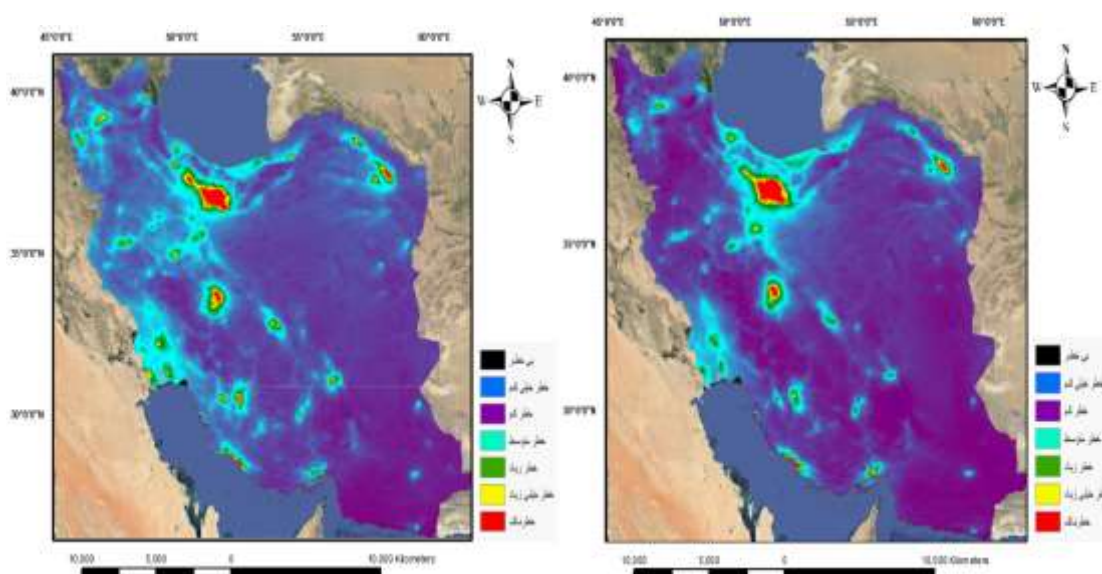


(د)

(ج)

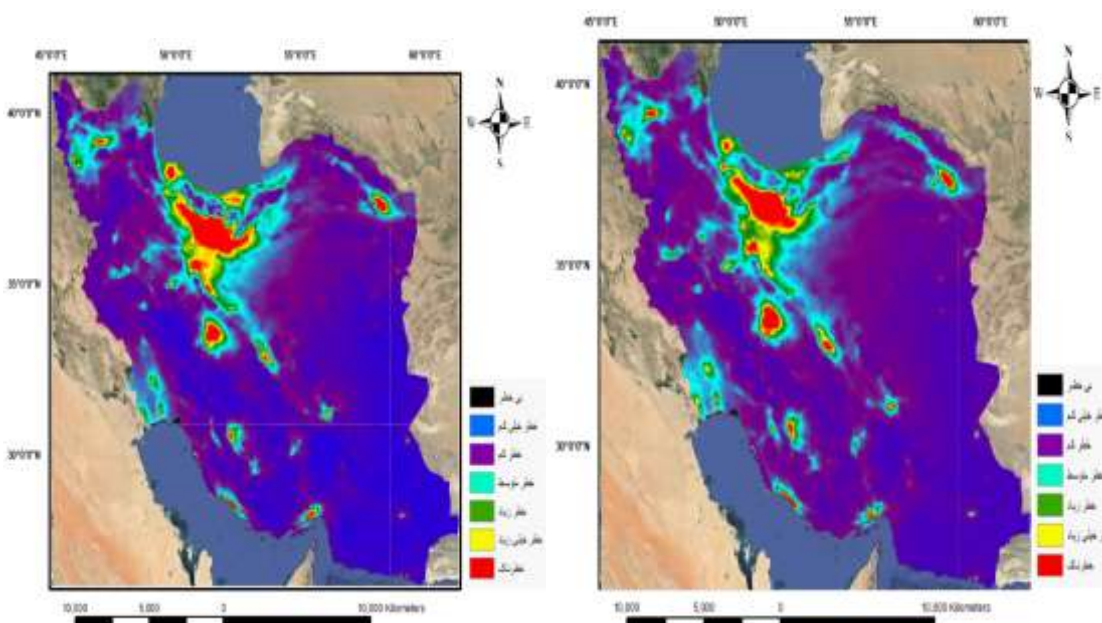
شکل (۲): نقشه آلودگی CO در الف) بهار، ب) تابستان، ج) پاییز و د) زمستان

Fig. (2): CO pollution map in the a) spring, b) summer, c) fall and d) winter



(ب)

(الف)





(ج)

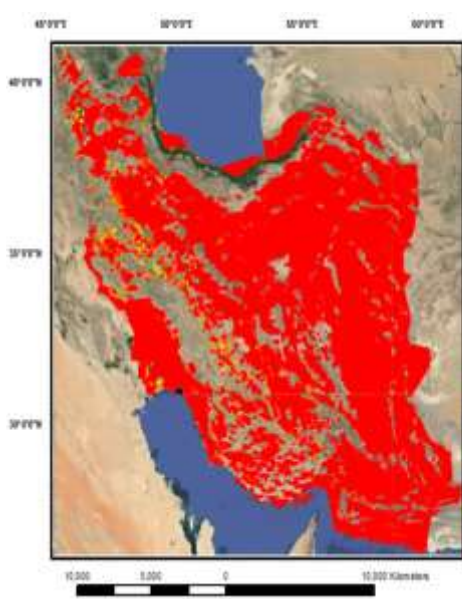
(د)

شکل (۳): نقشه آلودگی NO₂ در الف) بهار، ب) تابستان، ج) پاییز و د) زمستان

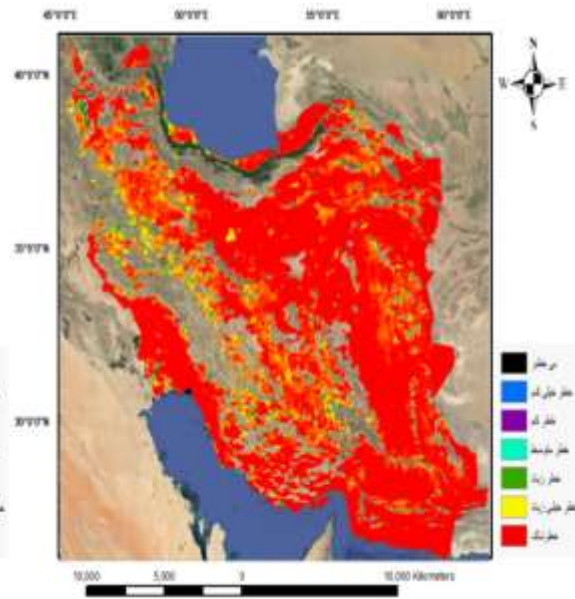
Fig. (3): NO₂ pollution map in the a) spring, b) summer, c) fall and d) winter

از طرفی باتوجه به شکل ۴ می‌توان متوجه شد که نقشه‌های CH₄ تقریباً خنثی هستند. همچنین نشان می‌دهند که اغلب مناطق کشور ایران در سال ۱۴۰۲ از حیث آلودگی CH₄ خطرناک بوده‌اند و وجود CH₄ در تمام مدت به وضوح قابل مشاهده است. از طرفی نقشه آلودگی CH₄ تقریباً ارتباطی به مناطق صنعتی و حتی فصول سال ندارد. با این حال در فصل‌های زمستان و بهار مناطق پرخطر به خطر کم تغییر وضعیت یافته‌اند. در فصل تابستان و پاییز بیشترین آلودگی وجود دارد. این بدان معناست که احتمالاً منبع متان بنزین و گاز نیست. متان در محیط به طور غیرمستقیم توسط فرآیندهای مختلف مانند فاضلاب‌ها، زباله‌ها و گاوها تولید می‌شود. متان بیشترین تأثیر را در افزایش اثر گلخانه‌ای دارد و توانایی بسیار بالایی در جذب انرژی خورشیدی دارد. این گاز از دلایل مهم تغییر دمای کره زمین می‌باشد که با افزایش میزان آن در جو، دمای منطقه نیز بالا می‌رود.

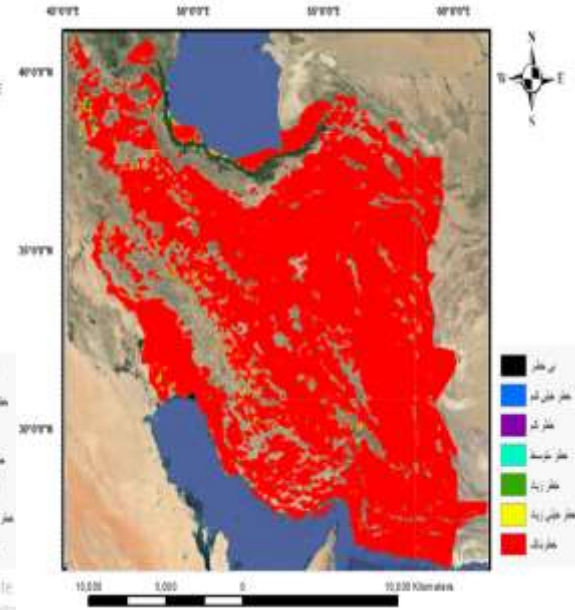
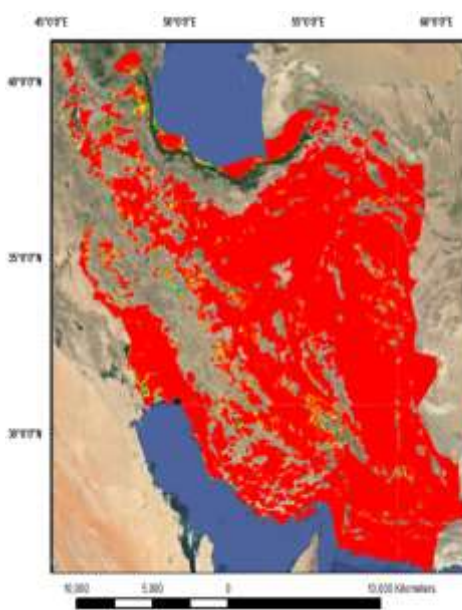
در شکل ۵ آلودگی SO₂ در عسلویه، بندرعباس، کرمان و اهواز طی تمام سال قابل مشاهده است. هرچه به آخر سال می‌رسد وضعیت آلودگی بدتر می‌شود. به‌طوریکه قسمت‌های شمالی و غربی ایران درگیر این نوع آلودگی شده‌اند. از مناطق پرخطر در فصل پاییز و زمستان می‌توان به مشهد، تهران، ساری، رشت اشاره کرد. قسمت شرق ایران علی-الخصوص جنوب شرق و استان سیستان و بلوچستان در طول سال در قسمت کم خطر قرار گرفته است. دی‌اکسید گوگرد نیز همانند دی‌اکسید نیتروژن در مناطق صنعتی و پرجمعیت بیشتر دیده می‌شود. لذا آلودگی گازی و نفتی تأثیر بسزایی بر افزایش SO₂ دارد. عسلویه به دلیل پالایشگاه و کرمان نیز به دلیل وجود معدن، باعث افزایش میزان SO₂ در منطقه خود شده‌اند. این گاز نیز بیشتر توسط منابع انسانی ایجاد می‌شود. می‌توان بیان کرد که فرایندهای تولید برق، احتراق سوخت (گازوئیل و مازوت) در کارخانه‌ها و ترافیک شهری، معادن و پالایشگاه‌ها مهمترین عوامل تولید گاز دی‌اکسید گوگرد می‌باشد.



(ب)



(ف)



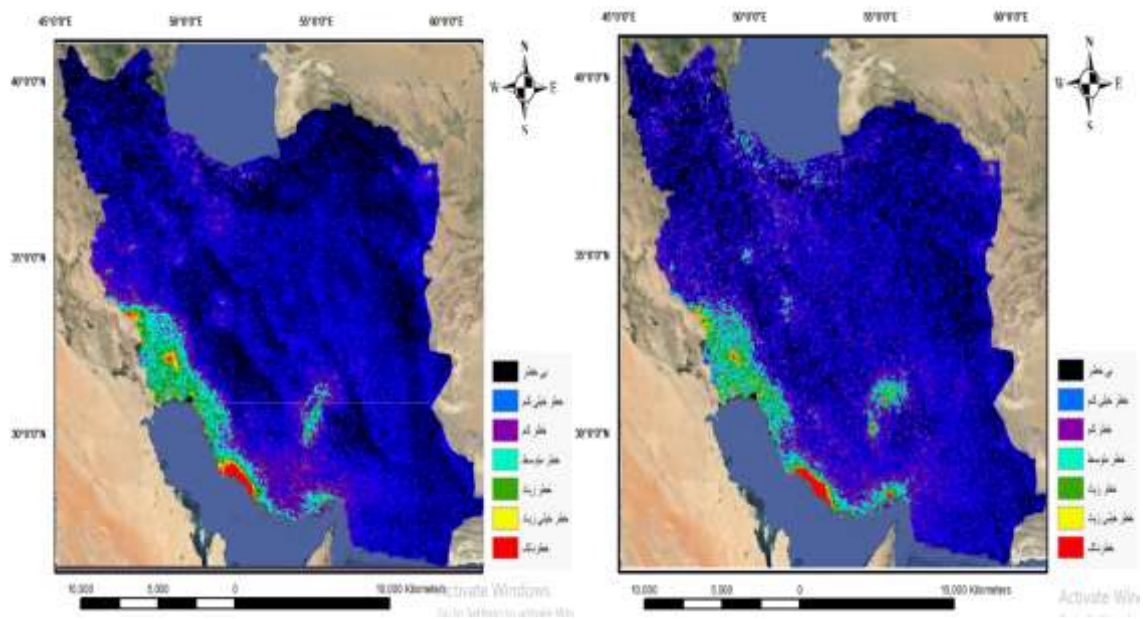


(د)

(ج)

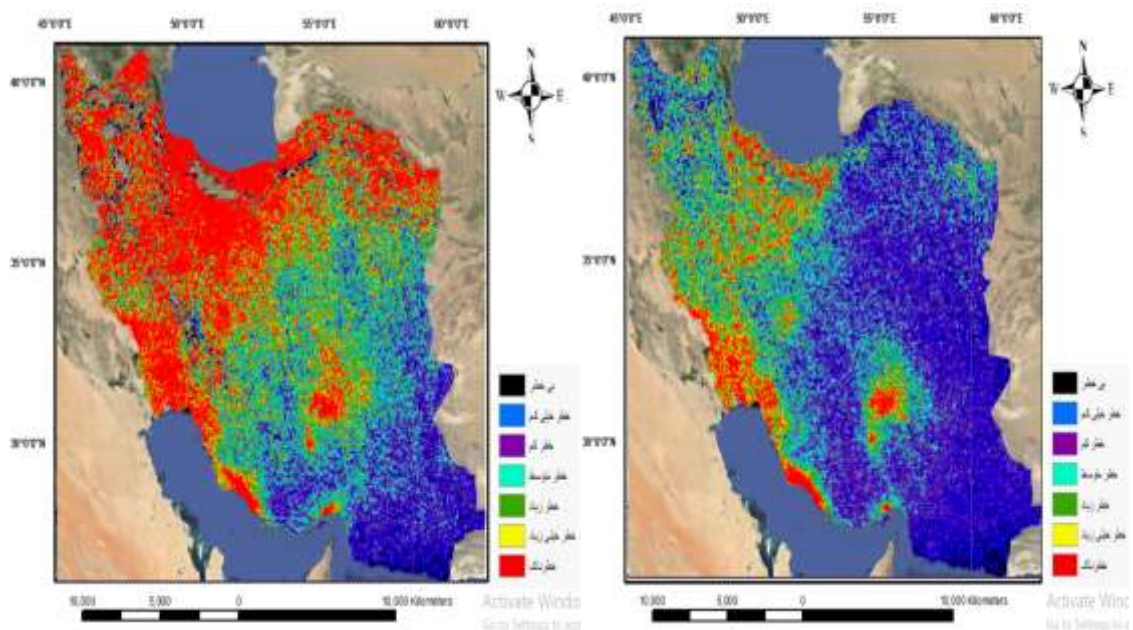
شکل (۴): نقشه آلودگی CH₄ در (الف) بهار، (ب) تابستان، (ج) پاییز و (د) زمستان

Fig. (4): CH₄ pollution map in the a) spring, b) summer, c) fall and d) winter



(ب)

(الف)





(د)

(ج)

شکل (۵): نقشه آلودگی SO₂ در الف) بهار، ب) تابستان، ج) پاییز و د) زمستان

Fig. (5): SO₂ pollution map in the a) spring, b) summer, c) fall and d) winter

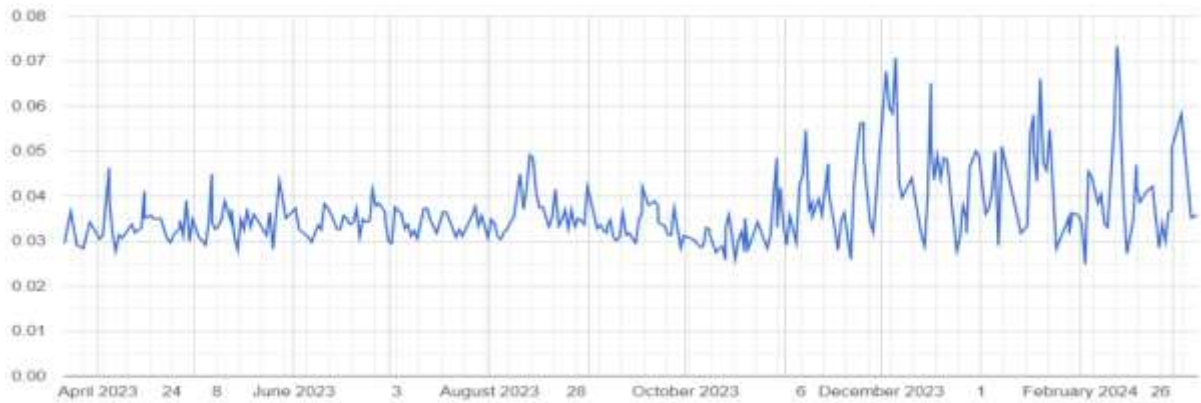
باتوجه به نقشه‌های آلودگی کشور ایران، مشخص شده است که تهران همیشه جزو مناطق آلوده نسبت به هر ۴ نوع آلودگی بررسی شده می‌باشد. لذا برای بررسی بیشتر، نقطه‌ای از شهر تهران انتخاب شده و نمودار سالانه تغییرات برای هر کدام از آلودگی‌های ذکر شده رسم می‌شود. بدین منظور همانطور که در شکل ۶ نمایان است، نقطه‌ای در میدان انقلاب شهر تهران انتخاب گردید و تمام تحلیل‌ها روی آن انجام شد.



شکل (۶): نقطه مورد مطالعه در مرکز شهر تهران

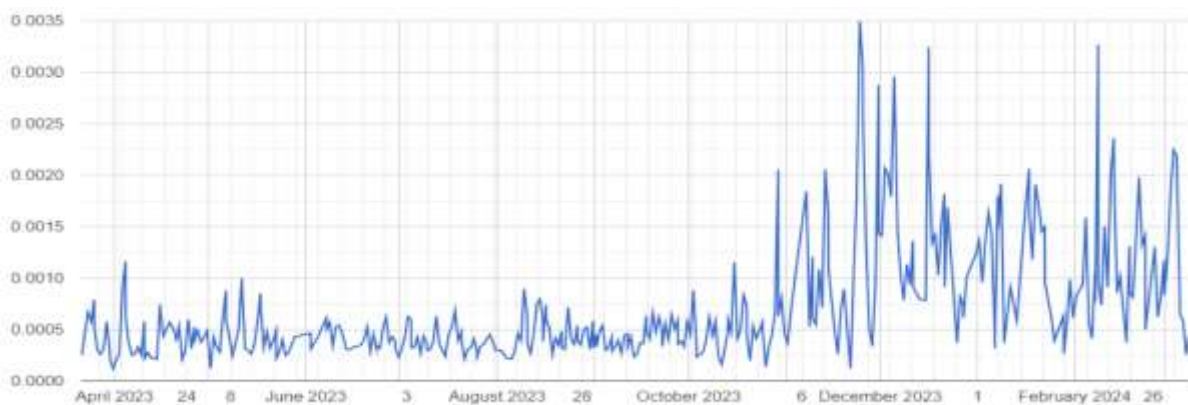
Fig. (6): The studied point in the center of Tehran

باتوجه به نمودار سالانه منوکسید کربن در شکل ۷، غالباً میزان کربن در شش ماهه اول سال در محدوده ۰/۰۳ - ۰/۰۴ می‌باشد. با این حال در ۲۲ مرداد این میزان به ۰/۰۴۹ رسیده است. مشخصاً هرچه به سمت انتهای سال رفته می‌شود، مقدار CO بیشتر می‌شود. در دوره شش ماهه دوم، بیشترین مقدار ۰/۰۷۳ و کمترین مقدار ۰/۰۲۵ به ترتیب در تاریخ‌های ۲۳ بهمن و ۳۰ آبان است.



شکل (۷): نمودار سالانه تغییرات CO در تهران
Fig. (7): Annual graph of CO changes in Tehran

با توجه به شکل ۸، میزان NO_2 از ابتدای سال تا ۳ آبان در محدوده ۰-۰/۰۰۱ نوسان دارد و پس از این زمان به طور قابل توجهی افزایش پیدا می کند. به طوری که در ۳ آذر بیشترین میزان در سال را با ۰/۰۰۳۵ را به خود اختصاص داده است. صعود و نزول های با شیب زیادی در فصل زمستان قابل مشاهده می باشد. دو نقطه بیشینه دیگر نیز در تاریخ های ۲۵ آذر و ۱۹ بهمن ثبت شده است.



شکل (۸): نمودار سالانه تغییرات NO_2 در تهران
Fig. (8): Annual graph of NO_2 changes in Tehran



نمودار سالانه تغییرات متان تهران در شکل ۹، با دو نمودار قبل تفاوت‌هایی دارد. از مهمترین نتایج می‌توان به کاهش بسیار زیاد CH_4 از ۲۷ آذر تا انتهای سال و حتی بهار سال بعد اشاره کرد. بیشینه میزان CH_4 در ۱۲ آذر و کمینه مقدار در تاریخ ۲۷ خرداد نمایش داده شده است. با توجه به مشاهدات متان برخلاف دیگر آلاینده‌ها در زمستان روند نزولی دارد. روند صعودی آن در بازه خرداد تا مرداد و آبان تا دی می‌باشد.



شکل (۹): نمودار سالانه تغییرات CH_4 در تهران
Fig. (9): Annual graph of CH_4 changes in Tehran

نمودار سالانه دی اکسید گوگرد در شکل ۱۰، همانند دی اکسید نیتروژن و منوکسید کربن در دو فصل پایانی سال مقدار بیشتری دارد. از ابتدای سال تا ۲۳ مهر روند تقریباً ثابت بوده و در محدوده ۰/۰۰۱ - ۰/۰۰۱ در حال نوسان است. با این حال در تاریخ ۷ خرداد مقدار از ۰/۰۰۱ بیشتر شده و به ۰/۰۰۱۵ رسیده است. از ماه آبان تا انتهای سال روند صعودی افزایش داشته تا حدی که در ۱۹ بهمن این میزان به بیشتر از ۰/۰۰۴ رسیده است.



شکل (۱۰): نمودار سالانه تغییرات SO_2 در تهران
Fig. (10): Annual graph of SO_2 changes in Tehran



۴- بحث و نتیجه گیری

نتایج این تحقیق در خصوص تغییرات زمانی و مکانی آلاینده‌ها در ایران، اطلاعات ارزشمندی درباره الگوهای فصلی و جغرافیایی آلودگی‌های CO، NO₂، CH₄ و SO₂ ارائه می‌دهد. تحلیل‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان داد که آلودگی CO در زمستان و پاییز به اوج خود می‌رسد و مناطق ساحلی خلیج فارس و دریای خزر در تمامی فصول دارای مقادیر بالایی از این آلاینده هستند. مشابه این یافته‌ها، تحقیقات انجام‌شده توسط شفر و همکاران نشان داده که آلودگی CO در مناطق شهری و صنعتی در فصل‌های سرد به دلیل کاهش ارتفاع لایه اختلاط اتمسفری و افزایش فعالیت‌های گرمایشی تشدید می‌شود. در ایران، مطالعات مشابهی نظیر کار صفریان و همکاران نیز بر نقش ترکیبی منابع طبیعی و انسانی در آلودگی CO تأکید دارند. تطبیق این نتایج نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری برای مدیریت آلودگی CO باید به نقش عوامل طبیعی مانند توپوگرافی و سرمای هوا نیز توجه داشته باشد.

پژوهش انجام شده نشان داد که آلودگی NO₂ به‌ویژه در مناطق صنعتی و شهرهای پرجمعیت مانند تهران، مشهد و اصفهان در تمام سال بالا بوده و در زمستان شدت بیشتری دارد. این نتایج با یافته‌های لامسال و همکاران که غلظت NO₂ در مناطق صنعتی و پرجمعیت را مرتبط با فعالیت‌های انسانی مانند ترافیک و صنایع سنگین دانسته‌اند، هم‌خوانی دارد. بررسی نقشه‌های منتشر شده توسط European Space Agency (ESA) نیز نشان می‌دهد که در مناطق شهری ایران، غلظت این آلاینده به‌ویژه در فصول سرد با استفاده بیشتر از سوخت‌های فسیلی افزایش می‌یابد. تفاوت اساسی در این مطالعه تأکید بیشتر بر نقش پالایشگاه‌ها و صنایع جنوبی کشور در آلودگی NO₂ بوده که می‌تواند برای سیاست‌گذاران ملی اهمیت ویژه‌ای داشته باشد.

بر اساس این مطالعه، آلاینده CH₄ به‌طور گسترده در سراسر کشور پراکنده است و تغییرات فصلی مشخصی ندارد. مشابه این نتایج، مطالعات تاوسف همکاران نیز تأکید کرده‌اند که متان بیشتر به منابع زیست‌محیطی مانند دامداری، زباله‌ها، و فاضلاب مرتبط است و تأثیر کمتری از فعالیت‌های صنعتی و فصلی دارد. پژوهش‌های داخلی نیز نشان داده‌اند که بیشترین غلظت CH₄ در ایران در نزدیکی مناطق کشاورزی و دامپروری مشاهده می‌شود که این پژوهش نیز با تأیید این نتایج، پیشنهاد مدیریت پایدار منابع طبیعی را مطرح می‌کند.

نتایج نشان داد که SO₂ به‌ویژه در مناطق صنعتی و شهرهای بزرگ مانند تهران و عسویه به‌شدت بالا است. یافته‌های این پژوهش با نتایج آریس و همکاران درباره توزیع SO₂ در مناطق صنعتی و معدنی جهان و همچنین گزارش‌های ملی از سازمان محیط‌زیست ایران مطابقت دارد. در عسویه، نقش پالایشگاه‌های گاز در افزایش غلظت SO₂ تأیید شده و این مسئله نیاز به اقدامات فوری برای کاهش انتشار این آلاینده را برجسته می‌کند.

این پژوهش به تحلیل همزمان چهار آلاینده اصلی پرداخته است. این رویکرد چندبعدی نه تنها به شناسایی تعاملات میان آلاینده‌ها کمک می‌کند، بلکه امکان شناسایی الگوهای پیچیده‌تر محیطی را نیز فراهم می‌سازد. همچنین در این



تحقیق تحلیل تفاوت‌های مکانی و زمانی تغییرات آلاینده‌ها در یک بازه زمانی مشخص است. ضمناً تمام مراحل در سامانه Google Earth Engine (GEE) انجام شده است. این محیط به دلیل قابلیت‌های پیشرفته در پردازش داده‌های عظیم مکانی و زمانی، ابزار بسیار قدرتمندی برای تحلیل‌های جامع در مقیاس‌های بزرگ است. با این حال، استفاده از GEE در داخل کشور کمتر رایج بوده و این پژوهش نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از این ابزار برای تحلیل‌های کلان و راهبردی استفاده کرد. مطالعه حاضر به بررسی تغییرات زمانی و مکانی آلودگی‌های CO ، NO_2 ، SO_2 و CH_4 در ایران پرداخته و به تحلیل روند آنها با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۵ و سامانه گوگل ارث انجین پرداخته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که آلودگی هوا در ایران به‌ویژه در فصل زمستان افزایش قابل‌توجهی دارد. این افزایش آلودگی در مناطق پرجمعیت و صنعتی بیشتر به چشم می‌خورد، به‌ویژه در شهرهای بزرگ مانند تهران که میزان آلاینده‌هایی نظیر NO_2 و SO_2 به‌طور مداوم در سطح خطرناک باقی می‌ماند. بررسی نقشه‌های فصلی نشان داد که برخی مناطق کشور، به‌ویژه در سواحل خلیج فارس و دریای خزر، در تمامی فصول سال در معرض سطوح بالایی از آلودگی CO قرار دارند. همچنین، آلودگی NO_2 در مناطق صنعتی و کلانشهرها به دلیل فعالیت‌های صنعتی و ترافیک سنگین، همواره در سطوح نگران‌کننده‌ای باقی می‌ماند. در مقابل، نقشه‌های CH_4 نشان‌دهنده پراکندگی یکنواخت‌تر این آلاینده هستند و تغییرات آن در طول سال کمتر محسوس است. از طرفی، نمودارهای ترسیم‌شده برای آلودگی‌های مختلف در شهر تهران نیز روند افزایشی آلودگی را به‌ویژه در نیمه دوم سال تأیید می‌کنند. این افزایش می‌تواند ناشی از پدیده‌هایی مانند وارونگی دما و کاهش جریان هوا باشد که به انباشت آلاینده‌ها در سطح زمین کمک می‌کند. به‌طور کلی، این پژوهش تأکید می‌کند که پایش دقیق و مداوم آلودگی هوا با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند ابزار مهمی برای مدیریت بهتر این معضل زیست‌محیطی باشد. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند به عنوان اطلاعات پایه برای سیاست‌گذاران و مدیران شهری در جهت اتخاذ تصمیمات مناسب برای کاهش آلودگی هوا و بهبود کیفیت زندگی شهروندان مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به افزایش سریع جمعیت و توسعه صنعتی در ایران، ضرورت دارد که پایش آلودگی هوا به‌صورت سیستماتیک و مستمر ادامه یابد تا بتوان با تحلیل روندها، اقدامات پیشگیرانه و کنترلی مؤثرتری را اعمال کرد. این نتایج می‌تواند به‌طور مستقیم در تصمیم‌گیری‌های اجرایی و برنامه‌ریزی‌های آینده برای کاهش آلودگی‌ها مورد استفاده قرار گیرد.



۵-منابع

- 1) Heydari, Rahim., & Valizadeh, Naseh. (2024). Investigating health indicators of air quality and its relationship with changes in the green spaces land use (the case study of Tabriz metropolitan). *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 3(9), 37-1. (In Persian)
- 2) Olyaei, Masoud., Pardakhti, Alireza., & Zahed, Mohammadali. (2024). Investigating the correlation coefficient of carbon monoxide pollutant concentration from air pollution measurement stations and Sentinel 5 satellite (Mashhad city case study). *Quarterly Journal of Urban Management and Environmental Engineering*, 2(1), 55-66. (In Persian)
- 3) Qolipour, Milad, & Behzadi, Saeed. (2016). Modeling the concentration of carbon monoxide pollutant in the air of Tehran city. *The sixth national conference on air and noise pollution management*. Tehran, Iran (In Persian)
- 4) Shaygan, M., & Mokarram, M. (2023). Investigating Air Pollution during the Corona Era and before that in the Metropolises of Tehran, Isfahan and Qom. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 15(2), 101-116. (In Persian)
- 5) Mahmoudzadeh, Hassan., & esmailzadeh laleh, Ali. (2023). Spatial assessment of environmental pollution of heavy metals in surface dust according to the type of urban land use; a case study of the northwestern region of Tabriz metropolis. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 3(7), 119-98 (In Persian)
- 6) Ghannadi, Mohammad Amin., Shahri, Matin., & Moradi, Amirreza. (2022). Air pollution monitoring using Sentinel-5 (Case study: big industrial cities of Iran). *Environmental Sciences*, 20(2), 81-98. (In Persian)
- 7) Ghahremanlou, Amir. , Saffarzadeh, Mahmoud. , Naderan, Ali. , & Javanshir, Hassan. (2022). Mechanism of the Effect of Urban Form and Land Use on Transportation and Air Pollution in Tehran. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, 19(109), 35-46 (In Persian)
- 8) Jafarian, Hosein., & Behzadi, Saeed (2018). Air pollution zoning in Tehran using artificial neural network algorithms. *The second national conference of environmental science and engineering and sustainable development*. Tehran, Iran. (In Persian)
- 9) Jafarian, Hosein., & Behzadi, Saeed. (2018). Zoning of air pollution in Tehran using different models of kriging interpolation method. *The first national conference on geographic information science foundations and interdisciplinary applications*. Mashhad, Iran. (In Persian)
- 10) Khamesi Meibodi, Mohammad Hassan. (2023). Investigating changes in air pollution in Tehran using Landsat images. *The fifth international conference and the sixth national conference on civil engineering, architecture, art and urban design*. Tabriz, Iran. (In Persian)
- 11) Mohammadi, Hosein., & Shaban, Majid. (2023). Application of remote sensing in air pollution. *The 12th international conference on modern researches in civil engineering, architecture, urban management and environment*. Tehran, Iran. (In Persian)
- 12) Mohammadi, Parviz., Cheraghian Fard, Shahin., Mohammadi, Tahmineh., & Mortezaei, Zahra. (2014). An overview of the amounts and effects of carbon monoxide gas on humans and the environment. *The first national conference on and management*. Ardabil, Iran. (In Persian)
- 13) Zakeri KIA, Samira, Aghamohammadi, Hossein., Behzadi, Saeed, & Azizi, Zahra. (2020). Modeling and Spatio-Temporal Analysis of the Distribution of Particulate Matter in Tehran City Based on Spatial Analysis in GIS Environment. *Journal of environmental science and technology*, 21(11 (90)), 241-252.(In Persian)



- 14) Omrani, H., Omrani, B., Parmentier, B., & Helbich, M. (2020). Spatio-temporal data on the air pollutant nitrogen dioxide derived from Sentinel satellite for France. *Data in brief*, 28, 105089.
- 15) Safarianzengir, V., Sobhani, B., Yazdani, M. H., & Kianian, M. (2020). Monitoring, analysis and spatial and temporal zoning of air pollution (carbon monoxide) using Sentinel-5 satellite data for health management in Iran, located in the Middle East. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 13, 709-719.
- 16) Jafarian, H., & Behzadi, S. (2020). Evaluation of PM_{2.5} emissions in Tehran by means of remote sensing and regression models. *Pollution*, 6(3), 521-529.
- 17) Li, Y., Zhang, M., Ma, G., Ren, H., & Yu, E. (2024). Analysis of Primary Air Pollutants' Spatiotemporal Distributions Based on Satellite Imagery and Machine-Learning Techniques. *Atmosphere*, 15(3), 287.
- 18) Holloway, T., Miller, D., Anenberg, S., Diao, M., Duncan, B., Fiore, A. M., ... & Zondlo, M. A. (2021). Satellite monitoring for air quality and health. *Annual review of biomedical data science*, 4(1), 417-447.
- 19) Azis, S. D., Azizah, R., & Jalaludin, J. (2024). Risk Analysis of Sulfur Dioxide (SO₂) Exposure to Public Health Around Kolaka District Nickel Processing Plant, *Journal of Environmental Health*, 16(4).
- 20) Muthukumar, P., Cocom, E., Nagrecha, K., Comer, D., Burga, I., Taub, J., ... & Pourhomayoun, M. (2021). Predicting PM_{2.5} atmospheric air pollution using deep learning with meteorological data and ground-based observations and remote-sensing satellite big data. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1-14.
- 21) De Mes, T. Z. D., Stams, A. J. M., Reith, J. H., & Zeeman, G. (2003). Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. *Bio-methane & Bio-hydrogen*, 2003, 58-102.
- 22) Savenets, M. (2021). Air pollution in Ukraine: a view from the Sentinel-5P satellite. *Időjárás - Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service (OMSZ)*, 125(2), 271-290.
- 23) Lamsal, L. N., Martin, R. V., Parrish, D. D., & Krotkov, N. A. (2013). Scaling relationship for NO₂ pollution and urban population size: a satellite perspective. *Environmental science & technology*, 47(14), 7855-7861.
- 24) Tao, M., Gui, L., Li, R., Wang, L., Liang, S., Li, Q., ... & Chen, L. (2021). Tracking prevailing dust aerosol over the air pollution in central China with integrated satellite and ground observations. *Atmospheric Environment*, 253, 118369.
- 25) Schäfer, K., Emeis, S., Hoffmann, H., & Jahn, C. (2006). Influence of mixing layer height upon air pollution in urban and sub-urban areas, *Meteorol. Z.*, 15, 647-658.
- 26) Tauseef, S. M., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2013). Methane capture from livestock manure. *Journal of environmental management*, 117, 187-207.
- 27) Sathe, Y., Gupta, P., Bawase, M., Lamsal, L., Patadia, F., & Thipse, S. (2021). Surface and satellite observations of air pollution in India during COVID-19 lockdown: Implication to air quality. *Sustainable cities and society*, 66, 102688.



Seasonal monitoring and analysis of air pollution in Iran using Sentinel satellite images in Google Earth Engine

Abstract

Today, air pollution has become a serious problem in human societies. In Iran, the amount of annual pollution is increasing. One of the appropriate methods for better management in dealing with this destructive environmental phenomenon is to monitor and investigate the pollution trend using modern technologies, including satellite images. The purpose of this study is to produce a seasonal map and investigate the trends of pollution carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), methane (CH₄) and sulfur dioxide (SO₂). The research innovation is the use of high-resolution satellite images and modeling in Google Earth Engine for accurate seasonal and annual pollution analysis. The study area for producing a pollution map is Iran in Southwest Asia. Using the Google Earth Engine system, the images related to each pollution in the year 2023 have been extracted. By creating a model and using special bands, the seasonal pollution map of Iran is produced. In the following, a point in the city of Tehran was considered to analyze the pollution trend. By creating a function in Google Earth Engine, the graph of 2023 related to CO, NO₂, CH₄, and SO₂ pollutants is drawn. The results of these two parts show that the amount of pollution in winter is higher than in other seasons. Some areas, especially on the coasts of the Persian Gulf and the Caspian Sea, are dangerous in terms of the presence of CO in all 4 seasons of the year. NO₂ reporting is hazardous in metropolitan areas throughout the year. CH₄ maps are almost neutral. On the other hand, partial SO₂ and NO₂ are seen more in industrial and densely populated areas. The graphs also show that the trend of CO, NO₂, and SO₂ pollution increases drastically in the second half of the year. Finally, remote sensing can examine pollution on a wide scale and provide organizations with useful information for planning.

Keywords: Pollution, remote sensing, Google Earth Engine, satellite images