

ارائه روشی مبتنی بر ترکیب و رأی گیری با هدف تحلیل مشاهدات ماهانه ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مطالعه موردی: شهرستان اراک

محمدامین قنادی^۱

متین شهری^۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۴

چکیده

یکی از مهم‌ترین چالش‌های امروز در دنیا و ایران افزایش آلودگی هوا ناشی از افزایش جمعیت، توسعه صنعتی و تغییرات اقلیمی است. از این‌رو پایش کیفیت هوای شهرها به‌صورت مستمر امری ضروری به‌نظر می‌رسد. از اصلی‌ترین تجهیزات پایش آلودگی هوا، ایستگاه‌های زمینی پایش کیفیت هوا می‌باشند. مشاهدات پایش کیفیت هوا با استفاده از ایستگاه‌های زمینی به علت تراکم پایین، توزیع مکانی غیریکنواخت، لزوم نگهداری و کالیبراسیون منظم و دوره‌ای و نیاز مبرم به مکانیابی بهینه برای نصب، گاهی اوقات دچار اختلال می‌شود و اینگونه به‌نظر می‌رسد که صحت برخی مشاهدات مبهم می‌باشند. در کنار ایستگاه‌های زمینی، تصاویر ماهواره‌ای نیز به‌منظور پایش کیفیت هوا قابل استفاده می‌باشند. این تصاویر هیچکدام از نقاط ضعف ایستگاه‌های زمینی پایش را ندارند و نتایج صحیحی ارائه می‌دهند، اگرچه قدرت تفکیک زمانی و دقت اندازه‌گیری پایین‌تری دارند. در این مطالعه هدف مقایسه مشاهدات صورت گرفته توسط ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا با مشاهدات ماهواره ستینل-۵ و آنالیز آن‌ها می‌باشد. از این‌رو روشی مبتنی بر ترکیب و رأی‌گیری از مشاهدات ارائه می‌شود. روش پیشنهادی بر روی چهار آلاینده دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، مونوکسید کربن و ازن پایش شده از چهار ایستگاه مخابرات، محیط زیست، شریعتی و استانداری شهرستان اراک در بازه زمانی ۱۹ ماهه از مهر ماه ۱۳۹۸ الی فروردین ۱۴۰۰ (بجز ماه‌هایی که ایستگاه‌های زمینی مشاهداتی ثبت نکرده‌اند) پیاده‌سازی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در صحت برخی از مشاهدات زمینی تردید وجود دارد که می‌تواند ناشی از عدم سلامت و یا کالیبراسیون منظم این دستگاه‌ها و یا عدم مکانیابی ایده‌آل آن‌ها باشد. با حذف مشاهدات ناصحیح از مجموعه مشاهدات زمینی، خطای جذر میانگین مربعات از ۲٪ تا ۴۷٪ بهبود حاصل می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، ایستگاه‌های زمینی پایش کیفیت هوا، تصاویر ماهواره ستینل-۵

۱- دکتری فتوگرامتری و سنجش از دور، عضو هیات علمی گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک (نویسنده مسئول)
m.ghannadi@arak.ut.ac.ir

۲- دکتری حمل و نقل و ترافیک، عضو هیات علمی گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک shahri@arak.ut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه آلودگی هوا یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین مشکلات کره زمین به‌شمار می‌رود و نقش عمده‌ای در تغییرات سراسری اقلیم در دنیا دارد. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی، آلودگی هوا منجر به وقوع سالانه حدود ۳ میلیون مرگ در سراسر جهان می‌شود (Lelieveld et al., 2015). بیش از نیمی از این آمار مربوط به کشورهای در حال توسعه (بیش از نیم میلیون فقط در کشور هند) می‌باشد (Chowdhury & Dey, 2016; Ghude et al., 2016). آلودگی هوا در برخی از کشورهای پیشرفته صنعتی (به‌عنوان مثال ایالات متحده) نیز باعث مرگ زودهنگام می‌شود (Caiazzo et al., 2013). عواملی همچون رشد جمعیت و پیرو آن افزایش خودرو و همچنین افزایش روند صنعتی‌شدن و تقاضای انرژی مربوط به آن در بسیاری از کشورها منجر به افزایش روند آلودگی به‌خصوص در کلان‌شهرهای کشورهای صنعتی شده است. نقش صنعت و حمل و نقل در میزان آلوده نمودن هوا به شکلی است که در سال ۲۰۲۰ میلادی به‌علت شیوع اپیدمی کرونا، در بسیاری از کشورهای دنیا غلظت آلاینده‌ها در قیاس با سال‌های قبل از آن روندی نزولی به خود گرفت (Bray et al., 2021; Fan et al., 2020; Ghahremanloo et al., 2021; Islam et al., 2021). لذا اندازه‌گیری دقیق آلاینده‌های هوا با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا در سطح محلی، منطقه‌ای و جهانی برای تعیین چگونگی توزیع و اثرگذاری آن‌ها و همچنین، ارائه راهکارهایی برای مدیران در سطح محلی، ملی و بین‌المللی امری ضروری محسوب می‌شود (Saxena & Naik, 2018).

پس از تعیین اهداف پایش تنها با بهره‌گیری از تکنولوژی‌های مناسب برای نمونه‌برداری، آنالیز و اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها، می‌توان ارزیابی مطلوب و منطقی از وضعیت کیفیت هوا داشت. برخی تجهیزات از روش‌های اندازه‌گیری مستقیم آلاینده‌ها استفاده می‌کنند. این تجهیزات نیازی به ارسال نمونه به آزمایشگاه شیمی و انجام عملیات بعدی ندارند و اگر خوب کالیبره شده

باشند بسیار کاربردی می‌باشند و برای سنجش آلاینده‌ها با دقت کافی استفاده می‌شوند. ازجمله مزایای استفاده از تجهیزات سنجش آلودگی هوا با قرائت مستقیم می‌توان به برآورد فوری غلظت آلودگی و امکان محاسبه میانگین‌های کوتاه‌مدت به‌صورت آنی، استفاده برای مدیریت بحران و اعلام هشدار، عدم نیاز به آزمایش‌های دستی و امکان ذخیره و پردازش به‌صورت آنی، اشاره نمود. همچنین از جمله محدودیت‌های این تجهیزات، قیمت بالا، نیاز به کالیبراسیون به‌صورت پیوسته و دوره‌ای، کمیاب بودن مواد مورد نیاز و غیرقابل حمل بودن این تجهیزات می‌باشد. ایستگاه‌های زمینی پایش کیفیت هوای محیط با استفاده از تحلیل‌گرهای پایش پیوسته آلاینده‌های هوا، به‌عنوان یکی از کارآمدترین سیستم‌های پایش لحظه‌ای با قرائت مستقیم و در دسته تجهیزات ابزار دقیق قرار می‌گیرند و لذا می‌بایست به‌طور مناسب و سیستماتیک از آن‌ها محافظت و نگهداری شود و کالیبراسیون دوره‌ای آن‌ها صورت بپذیرد (سپهرنیا، ۱۳۹۴). تصویری از یک ایستگاه پایش آلودگی هوا در نگاره (۱) نشان داده شده است.

تعیین مقدار آلاینده هوا، مستلزم تعیین دقیق غلظت آلاینده‌ها می‌باشد. غلظت آلاینده‌ها معمولاً بر حسب جرم آلاینده موجود در واحد حجم گاز بیان می‌شود. شبکه‌های پایش کیفیت هوا برای اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌های هوا در دوره‌های زمانی کمتر یا مساوی ۲۴ ساعت و همچنین برای توسعه دراز مدت (مساوی یا بیش از ۲۴ ساعت) تشکیل شده است (سپهرنیا، ۱۳۹۴).

متأسفانه در ایران ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا به لحاظ تعداد، تراکم و یکنواختی مکانی شرایط مناسبی ندارند. در بسیاری از شهرهای ایران حتی یک ایستگاه پایش هوا وجود ندارد و در بسیاری از شهرها نیز تنها یک ایستگاه وجود دارد. نکته قابل تأمل این است که حتی در شهری مثل اراک به‌عنوان مرکز استان مرکزی و شهری صنعتی، تنها چهار ایستگاه پایش وجود دارد و این در حالی است که در بسیاری از زمان‌ها همه آن‌ها در وضعیت فعال قرار ندارند.



نگاره ۱: نمای بیرونی و درون یک ایستگاه زمینی پایش کیفیت هوا (سپهرنیا، ۱۳۹۴)

دارد و از نتایج مشاهدات صورت گرفته، حذف نشده اند. معمولاً اینگونه است که عدم رسیدگی منظم و کالیبراسیون دوره ای ایستگاه های پایش کیفی هوا در شهرهای کوچک تر بیشتر باشد.

در این مطالعه، هدف مقایسه مشاهدات ایستگاه های زمینی پایش کیفیت هوا با مشاهدات ماهواره ای سنتینل-۵ می باشد. این مقایسه در مطالعات گذشته نیز صورت گرفته است (Talongo et al., 2020). مشاهدات ماهواره ای در قیاس با ایستگاه های زمینی پایش دارای مزایا و معایبی می باشد که در ادامه به آن اشاره خواهد شد. مهم ترین مزیت داده های ماهواره ای این است که در لحظه کیفیت هوا در منطقه وسیعی مشاهده می شود و می توان غلظت آلاینده ها را به صورت آنی برای منطقه وسیعی پایش نمود. اما ایستگاه های زمینی به صورت نقطه ای با تراکم پایین و احتمالاً یکنواخت و توزیع نامناسب مشاهدات را انجام می دهند. از دیگر مزایای مشاهدات ماهواره ای عدم نیاز به فرآیندهای نگهداری کوتاه مدت (مانند کالیبراسیون) و عدم وجود بی نظمی های محلی ناشی از مکانیابی نامناسب می باشد. از طرفی مشاهدات ماهواره ای برخلاف مشاهدات ایستگاه های زمینی قدرت تفکیک زمانی پایین تری دارند و در روز دو الی سه مشاهده بیشتر انجام نمی دهند. همچنین

در نگاره (۲) پراکندگی این ایستگاه ها نمایش داده شده است که نشان می دهد توزیع مکانی مناسبی در استقرار آنها وجود ندارد.

بررسی و صحت سنجی داده های کیفیت هوا توسط کارشناسان پس از تولید، روال مرسوم است که در همه جای دنیا انجام می شود. ممکن است ایستگاهی به دلایل مختلف داده های غیر قابل قبول تولید کند و کارشناسان پس از بازبینی داده ها، مقادیر غیر واقعی که بیانگر شاخص قابل قبولی از کیفیت هوا در محدوده ایستگاه نباشد را تأیید نکنند و این داده های نادرست از طریق بازبینی کارشناسان، شناسایی و حذف شوند. اثرات ساختمان ها، عوارض زمین، منابع گرمایی و عوامل هواشناسی می تواند بی نظمی های محلی در غلظت های زیاد آلاینده تولید نماید. این موارد باید در شناسایی محل جغرافیایی مکان پایش در نظر گرفته شود (سپهرنیا، ۱۳۹۴). عدم کالیبراسیون به موقع این ایستگاه ها نیز موجب مختل شدت نتایج پایش کیفیت هوا می شود. در این مواقع این داده ها از نتایج حذف می شوند و یا ایستگاه توسط مسئولین ذیربط در وضعیت غیر فعال قرار می گیرد (به عنوان نمونه به مدت یک هفته یا یک ماه). گاهی اوقات نیز به لحاظ شهرداری این گونه به نظر می رسد که داده های ناصحیح در میان مشاهدات این ایستگاه ها وجود

صورت گرفته است که نشان می‌دهد روند کلی تغییرات غلظت ماهانه دی‌اکسید نیتروژن مشاهده شده با هر دو ابزار رفتاری مشابه و بایاس اندکی دارد. این در حالی است که در مطالعات دیگری نیز صحت مشاهدات سنجنده TROPOMI و اعتمادپذیری آن مورد بررسی قرار گرفته است (Borsdorff, 2018, Cooper, 2020). مقایسه نتایج مطالعات فوق در کره جنوبی و فنلاند با مشاهدات ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهرستان اراک که در نمودار نگاره (۳) نشان داده شده است، بیانگر ضرورت انجام این گونه از پژوهش‌ها می‌باشد.

به‌طور کلی، انواع مختلفی از آلاینده‌ها در اتمسفر وجود دارد که اثرات جدی آن‌ها بر کیفیت هوا، محیط زیست، سلامتی انسان و اقلیم به یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های قرن ۲۱ تبدیل شده است. مهم‌ترین آلاینده‌های هوا، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، دی‌اکسید کربن (CO_2)، مونوکسید کربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، ازن (O_3)، متان (CH_4)، کربن‌های آلی ناپایدار، کلروفلوئورکربن‌ها (CFC) و ذرات معلق^۲ یا همان آئروسول‌ها^۳ می‌باشند (Saxena and Naik, 2018). آلاینده‌های مورد مطالعه در این پژوهش، SO_2 ، NO_2 ، CO و O_3 می‌باشند. در ادامه مختصری درباره هرکدام از این آلاینده‌ها توضیح داده خواهد شد.

در بین آلاینده‌های مختلف موجود در اتمسفر، اکسیدهای نیتروژن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آلاینده‌ها و گازهای سمی مطرح هستند (Park et al., 2020, Dickerson et al., 2019). سالانه میلیون‌ها تن دی‌اکسید نیتروژن و اکسید نیتروژن در اثر فعالیت‌های انسانی به‌ویژه مصرف سوخت‌های فسیلی در دماهای بالا تولید می‌شود (Ghannadi et al., 2021). دی‌اکسید نیتروژن در ترکیب با هوای مرطوب، تولید اسیدنیتريك می‌کند که موجب پوسیدگی شدید فلزات می‌شود. همچنین در غلظت‌های بالا باعث ایجاد مه‌دود شده و میدان دید را به شدت کاهش می‌دهد (Park et al., 2020). اکسیدهای نیتروژن به‌عنوان گازهای گلخانه‌ای غیرمستقیم

دقت اندازه‌گیری آلاینده‌ها در ایستگاه‌های پایش زمینی بالاتر از مشاهدات ماهواره‌ای می‌باشد. در مجموع می‌توان اینگونه ادعا نمود که مشاهدات ماهواره‌ای دارای صحت بالا ولی دقت پایین‌تری نسبت به ایستگاه‌های پایش می‌باشند. می‌توان با مقایسه مشاهدات ماهواره‌ای که صحت بالاتری نسبت به ایستگاه‌های زمینی دارند (به دلایلی از جمله امکان عدم کالیبره‌بودن ایستگاه زمینی و وجود بی‌نظمی‌های محیطی و به تبع آن نتایج ناصحیح و در این مورد مطالعه خاص) مقادیر احتمالی اشتباه پایش شده توسط ایستگاه‌های زمینی را تعیین نمود.

نویسندگان در این پژوهش نگاهی جدید و چالش برانگیز به مسئله دارند و سعی می‌کنند ضرورت بهبود ایستگاه‌های زمینی پایش آلاینده‌های هوا چه به لحاظ جانمایی صحیح (استفاده از روش‌های معتبر مبتنی بر سیستم اطلاعات مکانی^۱) چه به لحاظ افزایش تعداد و پراکندگی مطلوب در سطح شهرهای کشور و انجام کالیبراسیون‌های منظم و نگهداری مطلوب از این ایستگاه‌ها را با نشان دادن مشاهدات ناسازگار ایستگاه‌های زمینی پایش کیفیت هوا، هشدار دهند.

برای اثبات ادعای مطرح شده در ارتباط با وجود ناسازگاری میان برخی مشاهدات مربوط به پایش آلاینده‌ها به‌وسیله ایستگاه‌های زمینی و مشاهدات ماهواره‌ای در منطقه مورد مطالعه این مقاله، چند نمونه از مطالعات دو سال اخیر بررسی می‌شوند. در مطالعه‌ای که توسط ژئونگ و هونگ از دانشگاه مریلند آمریکا صورت گرفته است، سازگاری میانگین غلظت ماهانه دی‌اکسید نیتروژن مشاهده شده توسط شبکه زمینی پایش وزارت محیط زیست کره جنوبی با مشاهدات ماهواره‌ای در سال ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفته است که نشان می‌دهد که بایاس ناچیزی میان مشاهدات صورت گرفته وجود دارد (Jeong & Hong, 2021). در مطالعه‌ای مشابه نیز این مقایسه میان مشاهدات شبکه پایش زمینی پاندورا و مشاهدات سنتینل-۵ در هلندینکی فنلاند

2- Particulate matter

3- Aerosols

1- GIS

کربن در جو می تواند بر طول عمر متان و تولید دی اکسید کربن و ازن تروپوسفری مؤثر واقع شود و از این رو تأثیر مهمی بر تغییرات جهانی اقلیم دارد.

ازن طبیعی بیشتر در استراتوسفر در ارتفاع ۱۵ تا ۵۰ کیلومتری از سطح زمین وجود دارد. تشکیل آن با فوتون های اشعه فرابنفش با طول موج کمتر از ۲۴۲ نانومتر بر مولکول های اکسیژن صورت می پذیرد. این لایه ازن که بعضی اوقات به آن ازن خوب گفته می شود، در حقیقت ۹۰ درصد ازن جو کره زمین را تشکیل می دهد. در تروپوسفر هم ازن طبیعی وجود دارد. قسمتی از این ازن از استراتوسفر به طبقات پایین تر نفوذ کرده است. این تبادل ازن بین ۳۰ الی ۴۰ درصد ازن تروپوسفر را شامل می شود. در واکنش شیمیایی فوتولیز، ملکول های دی اکسید نیتروژن به مونوکسید نیتروژن تبدیل می شوند. اتم O آزاد شده از این واکنش می تواند با یک ملکول اکسیژن (O_2) واکنش نشان دهد و به ازن (O_3) تبدیل شود. بنابراین بخشی از ازن سطح زمین، اینگونه با دی اکسید نیتروژن در ارتباط است (Saxena & Naik, 2018).

هدف از این پژوهش، ارائه روشی بر پایه ترکیب و رأی گیری به منظور صحت سنجی مشاهدات ایستگاه های پایش کیفیت هوا با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنتینل-۵ می باشد. منطقه مورد مطالعه شهرستان اراک به عنوان یکی از آلوده ترین شهرهای کشور است.

مروری بر مطالعات گذشته نیز نشان می دهد که تصاویر سنتینل-۵ به منظور پایش دی اکسید گوگرد (Hedelt et al., 2019; Theys et al., 2019; Safarianzengir et al., 2020)، فرمالدهید (Vigouroux et al., 2020)، ازن (Quesada-Ruiz et al., 2020)، مونوکسید نیتروژن (Lorente et al., 2019) و همچنین دی اکسید نیتروژن (Ialongo et al., 2020; Omrani et al., 2020; Virghileanu et al., 2020; Shikwambana et al., 2020) در مطالعات محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفته است.

در ادامه و در بخش ۲، داده ها و روش تحقیق توضیح داده می شود. بخش ۳ نتایج حاصل از پیاده سازی روش

نیز شناخته می شوند، زیرا از طریق صاعقه، به تروپوسفر بالایی وارد می شود (Grewe et al., 2012, Finney et al., 2016) و با تولید ازن نقش مهمی در گرم شدن کره زمین ایفا می کنند (Finney et al., 2016, Grewe et al., 2012). این عوامل اثرات نامطلوبی بر سیستم تنفسی انسان گذاشته و همچنین در رشد گیاهان تأثیرات منفی زیادی خواهند گذاشت (Kim et al., 2006, Kampa and Castanas, 2008).

کلیه سوخت های فسیلی دارای گوگرد هستند که در جریان احتراق به صورت دی اکسید گوگرد وارد هوا می شوند. تقریباً همه دی اکسید گوگرد انسان ساخت، ناشی از مصرف سوخت های فسیلی است. مقدار گوگرد در سوخت های مختلف، تفاوت دارد و فرآورده های نفتی هم از نظر مقدار گوگرد با هم متفاوتند. نفت کوره یا مازوت ایران بین ۲/۵ الی ۳/۵ درصد و گازوئیل بین ۰/۵ تا ۱ درصد گوگرد دارد ولی گوگرد بنزین ناچیز است. زغال سنگ بین ۰/۱ تا ۴ درصد گوگرد به صورت پیریت آهن (FeS_2) دارد. گوگرد گاز طبیعی در سر چاه های مختلف فرق می کند و ممکن است به صورت گاز H_2S ، دی سولفید کربن (CS_2)، مرکاپتان (CH_3SSCH_3) و دی متیل دی سولفید (DMDS) باشد. اکثر حالات احیایی ترکیبات گوگرد بعداً در هوا به SO_2 اکسیده می شود. طی سال های اخیر، غلظت دی اکسید گوگرد در کشورهای صنعتی به علت آنکه در نیروگاه ها به جای زغال سنگ بیشتر از گاز طبیعی استفاده می کنند، کاهش یافته است.

مونوکسید کربن یکی از رایج ترین گازهای آلوده کننده هوا و البته از سمی ترین آن ها است. مونوکسید کربن یک گاز بسیار خطرناک است و عمدتاً از سوختن ناقص کربن تولید می شود و تقریباً دو سوم انتشار مونوکسید کربن ناشی از فعالیت های انسانی است. از جمله این موارد می توان به سوزاندن بقایای محصولات زراعی، احتراق سوخت فسیلی و اکسیداسیون متان اشاره نمود (Saxena & Naik, 2018). به دلیل طول عمر نسبتاً کوتاه، مونوکسید کربن به خوبی در تروپوسفر مخلوط نمی شود. با این وجود، انتشار مونوکسید

پیشنهادی نمایش داده می‌شود و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت این کار تحقیقاتی در بخش ۴ نتیجه‌گیری می‌شود.

۲- داده‌ها و روش‌ها

در این بخش ابتدا منطقه مورد مطالعه معرفی می‌شود، سپس داده‌های زمینی و ماهواره‌ای معرفی می‌شوند و در آخر روش پیشنهادی توضیح داده خواهد شد.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش شهرستان اراک می‌باشد. اراک یکی از کلان‌شهرهای ایران، از بزرگ‌ترین شهرهای مرکز ایران و مرکز استان مرکزی است. جمعیت اراک در سال ۱۳۹۵ خورشیدی حدوداً ۵۲۱ هزار نفر بوده که از این نظر قطب جمعیتی استان مرکزی و هجدهمین شهر پرجمعیت ایران به حساب می‌آید.

شهر اراک دارای زمستان‌های سرد و مرطوب و تابستان‌های گرم و خشک است. کوه‌های پیرامون، تالاب میقان و دشت فراهان در آب و هوای این منطقه مؤثر می‌باشند. از مهم‌ترین صنایع اراک می‌توان به نیروگاه حرارتی شازند، پتروشیمی و پالایشگاه شازند، آلومینیوم‌سازی و ماشین‌سازی اشاره نمود. اراک از لحاظ گوناگونی محصولات صنعتی، نخستین رتبه و از لحاظ وجود صنایع مادر، دومین رتبه را در کشور داشته و به‌طور کلی یکی از چهار قطب صنعتی کشور محسوب می‌شود. این شهر به واسطه وجود صنایع مادر، با تولید ۸۰٪ تجهیزات انرژی کشور، وجود بزرگ‌ترین کارخانه تولیدکننده آلومینیوم کشور، بزرگ‌ترین ماشین‌سازی کشور، بزرگ‌ترین واگن‌سازی و لوکوموتیو‌سازی خاورمیانه، بزرگ‌ترین کمباین‌سازی خاورمیانه، بزرگ‌ترین تولیدکننده ماشین‌آلات سنگین در خاورمیانه، بزرگ‌ترین تولیدکننده جرثقیل در خاورمیانه و بزرگ‌ترین شرکت املاح معدنی کشور، به‌عنوان پایتخت صنعتی ایران شناخته شده است و به همین دلیل یکی از آلوده‌ترین شهرهای ایران است.

علاوه بر صنعتی بودن، تراکم نسبتاً بالای جمعیتی (و به تبع آن شرایط ترافیکی بالا) و شرایط اقلیمی نیز بر کیفیت هوای اراک مؤثر است. یکی از مهم‌ترین آلاینده‌ها در اراک دی‌اکسید گوگرد است که شاید مهم‌ترین دلیل آن مازوت سوزی در نیروگاه و پالایشگاه شازند باشد.

۲-۲- داده‌های زمینی

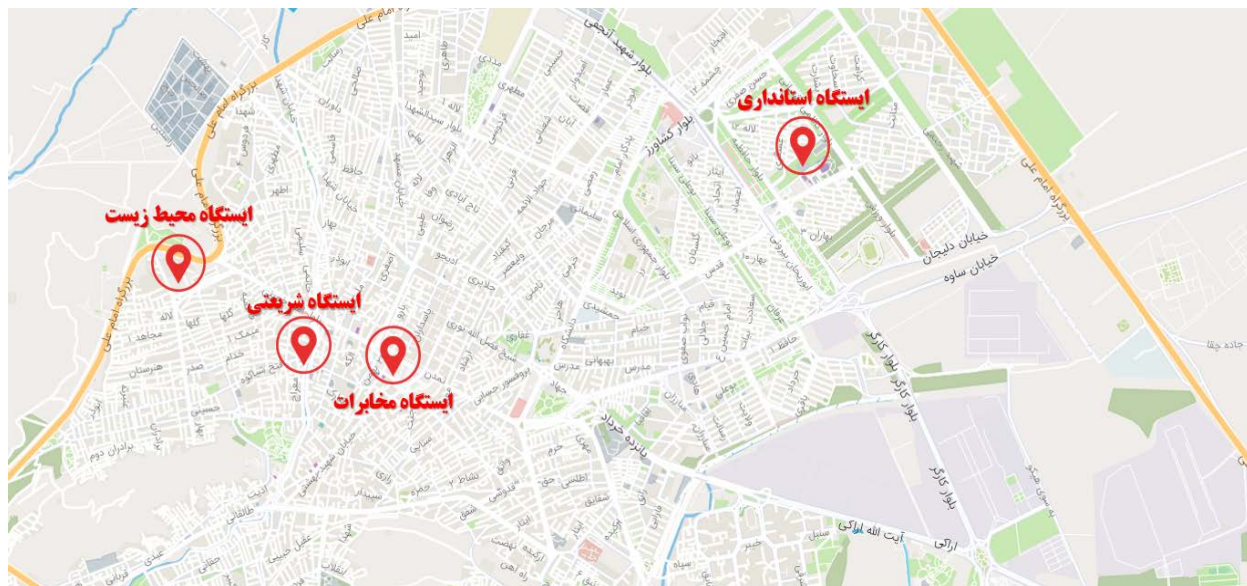
در اراک چهار ایستگاه پایش کیفیت هوا نصب شده است. موقعیت این چهار ایستگاه در نگاره (۲) نشان داده شده است. غلظت آلاینده‌های O_3 ، NO_2 ، SO_2 ، CO از ابتدای مهر ۱۳۹۸ تا انتهای فروردین ۱۴۰۰ به مدت ۱۹ ماه به‌صورت روزانه از ایستگاه‌های محیط زیست، شریعتی، مخابرات و استانداری جمع‌آوری شده است. ضروری است که بیان شود همه آلاینده‌ها در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌صورت کامل مشاهده نشده‌اند. در برخی ماه‌های سال یا ایستگاه مشخصی در حالت غیرفعال یا خاموش قرار دارد و یا تعداد بسیار کمی از روزهای یک ماه در حالت فعال است که در این صورت مشاهدات این ماه‌ها از مجموعه داده‌های مورد مطالعه کنار گذاشته شده‌اند.

۲-۳- داده‌های ماهواره‌ای

به منظور پایش غلظت آلاینده‌ها در این مقاله از تصاویر سطح سه (L3) سنجنده TROPOMI ماهواره سنتینل-۵ استفاده شده است (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog>) و نتایج آن در نمودارهای نگاره (۳) نشان داده شده است.

اصلی‌ترین مأموریت پروژه ماهواره‌ای سنتینل، تصویربرداری راداری (*Aljammaz et al., 2021; Ghannadi et al., 2020*) و سوپر طیفی از خشکی (*Phiri et al., 2020*) و اقیانوس‌ها (*Toming et al., 2017*) و پایش جو (*Magro et al., 2021*) می‌باشد.

ماهواره سنتینل-۵ به‌عنوان اولین ماهواره مأموریت کوپرنیکوس و یکی از ابزارهای قدرتمند در زمینه پایش اتمسفر می‌باشد. این ماهواره دارای یک طیف‌سنج به نام



نگاره ۲: موقعیت مکانی ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا در شهرستان اراک

هستند (Shikwambana et al., 2020). در این پژوهش، از تعداد بالایی تصویر سطح سه که از طریق موتور گوگل ارث^۲ از مهر ۱۳۹۸ تا فروردین ۱۴۰۰ فراخوانی شده‌اند، استفاده شده است. باندهای تصویری مورد استفاده در این مطالعه برای استخراج آلایندهای مختلف در جدول (۱) معرفی شده‌اند.

جدول ۱: باندهای مورد استفاده از تصاویر سنجنده (TROPOMI) ماهواره سنتینل-۵ در پایش آلایندها

آلایند	توضیحات باند مورد استفاده
ازن	غلظت ستون عمودی با واحد mol/m ²
دی‌اکسید نیتروژن	غلظت ستون عمودی تروپوسفری با واحد mol/m ²
دی‌اکسید گوگرد	غلظت ستون عمودی با واحد mol/m ²
مونوکسید کربن	غلظت ستون عمودی با واحد mol/m ²

(<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/>)

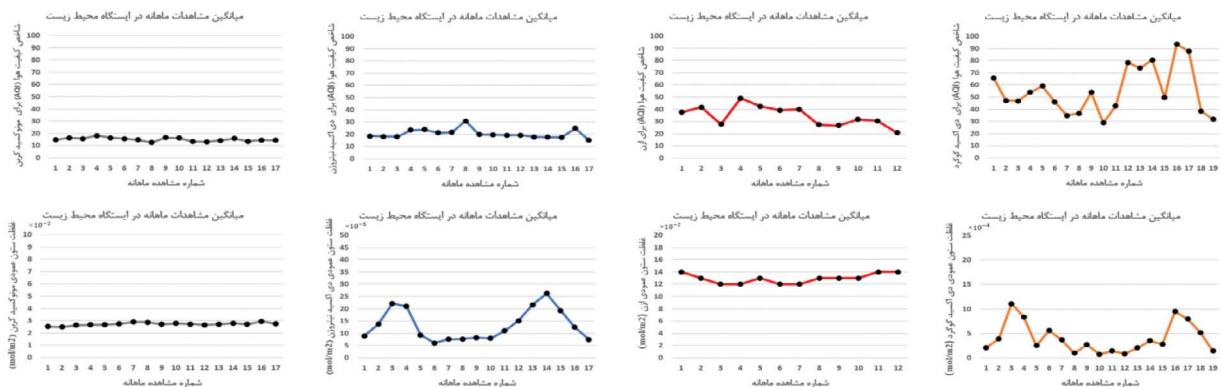
در نگاره (۳) مشاهدات صورت گرفته از آلایندهای هوا توسط ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهرستان اراک و ماهواره سنتینل-۵ نشان داده شده است.

TROPOMI بوده که تابش اشعه ماوراء بنفش زمین را در طیفی بالا اندازه‌گیری می‌کند. از جمله اهداف سنتینل-۵، اطمینان از تداوم و پیوستگی داده‌های بین مشاهدات مأموریت‌های قبلی OMI، GOME-2، SCIAMACHY و Envisat و مشاهدات آینده توسط سنتینل-۵ می‌باشد (de Vries et al., 2016).

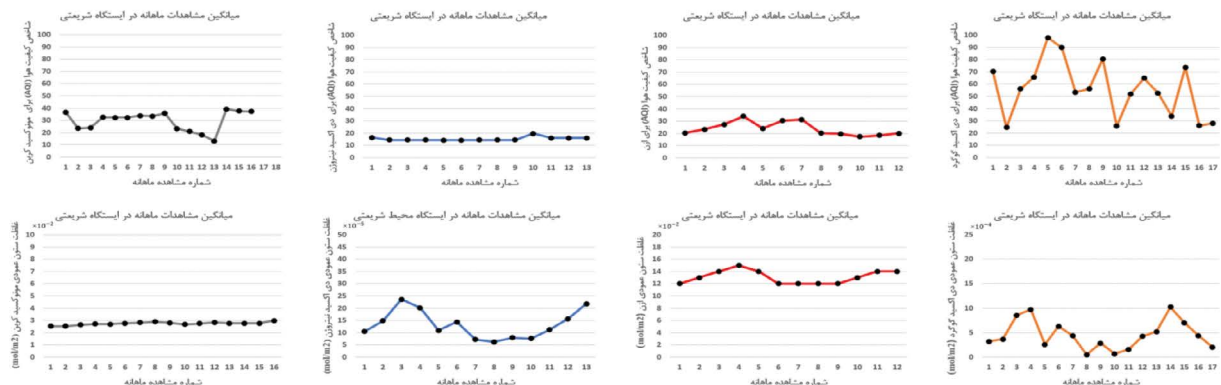
TROPOMI به صورت روزانه، با قدرت تفکیک مکانی ۷ کیلومتر × ۳/۵ کیلومتر از اتمسفر زمین تصویربرداری می‌کند که ۱۳ برابر بهتر از OMI است (Shikwambana et al., 2020). تصاویر به دست آمده از TROPOMI دارای ۸ باند است که چندین محدوده طیفی فرابنفش (UV)، نزدیک به مادون قرمز (NIR) و مادون قرمز با طول موج کوتاه (SWIR) را پوشش می‌دهد (Lorente et al., 2019). سنجنده TROPOMI قابلیت بالایی در تصویربرداری و پایش تعداد زیادی از آلایندها دارد. تصاویر این آلایندها را می‌توان با سه حالت مختلف در حالت زمان تقریباً آنی^۱، حالت آفلاین و حالت پردازش مجدد دریافت نمود. داده‌های حالت تقریباً آنی، در مدت ۳ ساعت پس از اخذ اطلاعات و داده‌های آفلاین و پردازش مجدد چند روز پس از تصویربرداری در دسترس



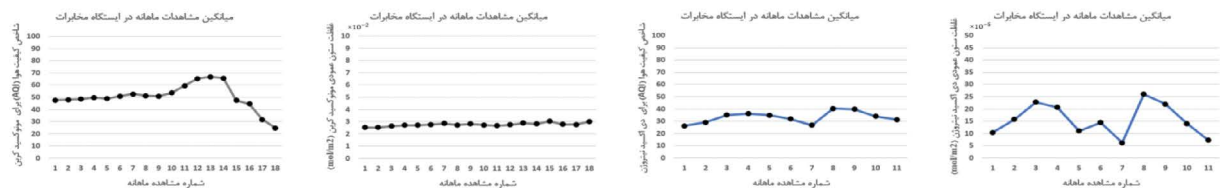
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

نگاره ۳: پایش غلظت آلاینده‌ها در موقعیت ایستگاه‌های استاندارد (الف)، محیط زیست (ب)، شریعتی (ج) و مخابرات (د) توسط ایستگاه‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای

۲-۴- روش پیشنهادی

مفاهیم جایگشت، ترکیب و رأی گیری در بسیاری از کاربردهای سنجش از دور استفاده شده است (Frantz, 2016; Shen, 2018). در اینجا از این مفاهیم برای ارائه روشی به منظور تشخیص مشاهدات با صحت پایین ایستگاه های پایش کیفیت هوا با کمک تصاویر ماهواره سنتینل-۵ استفاده شده است.

با توجه به اینکه رزولوشن زمانی مشاهدات زمینی بالاتر از مشاهدات ماهواره ای (رزولوشن زمانی مشاهدات توسط ماهواره سنتینل-۵ تا سه مشاهده در روز) می باشد، برای افزایش اطمینان پذیری مشاهدات، از غلظت روزانه آلاینده ها میانگین گیری شده است و نتایج به صورت ماهانه ارائه می شوند. به عبارتی غلظت آلاینده ها به صورت ماهانه با یکدیگر مقایسه می شوند. در روش پیشنهادی فرض بر آن است که آن دسته از مجموعه مشاهدات زمینی صحت بالاتری دارند که ضریب همبستگی خطی آن ها با مشاهدات ماهواره ای مقدار بالاتری باشد.

اگر مجموعه مشاهدات ایستگاه های زمینی با $L_G = \{l_{g1}, l_{g2}, l_{g3}, \dots, l_{gn}\}$ و مشاهدات ماهواره ای متناظر با $L_S = \{l_{s1}, l_{s2}, l_{s3}, \dots, l_{sn}\}$ نشان داده شود، آنگاه مشاهدات صحیح زمینی عبارت است از:

$$L_T = \{ \subseteq L_G | \rho_{L_G, L_S} \rightarrow \text{Max} \} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱)، ρ ضریب همبستگی خطی میان مشاهدات ایستگاه های زمینی پایش و مشاهدات ماهواره ای می باشد. حال برای انتخاب مجموعه مناسب باید مشخص شود که از میان مشاهدات صورت گرفته از غلظت آلاینده ها چه تعداد از آن ها صحت مطلوب دارند. برای این کار از یک روش مبتنی بر ترکیب و رأی گیری استفاده شده است. همانگونه که پیشتر اشاره شد، هر مشاهده مربوط به میانگین غلظت آلاینده در یک ماه در بازه زمانی مورد مطالعه می باشد. اگر فرض شود تعداد کل مشاهدات ایستگاه زمینی k باشد و تعداد زیرمجموعه ای از آن n باشد آنگاه:

$$nC_k = \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}, \quad n = 4 : k \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در واقع nC_k تعداد حالت های انتخاب مجموعه به اندازه n از مجموعه کل مشاهدات می باشد.

شروع فرآیند نیز حداقل با چهار مشاهده ماهانه شروع می شود. بنابراین برای یک ایستگاه و آلاینده مشخص رابطه (۳) محاسبه می شود:

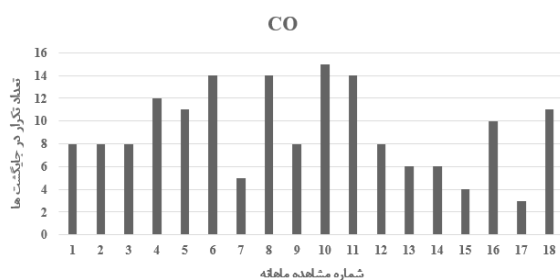
$$L_T = \{ L_{G1}, L_{G2}, \dots, L_{GnC_k} | \rho_{L_{GnC_k}, L_S} \rightarrow \text{Max} \}, \quad n = 4 : k \quad \text{رابطه (۳)}$$

در نتیجه اگر فرض شود تمام ۱۹ مشاهده ماهانه بازه مورد مطالعه موجود باشد، براساس رابطه (۳) ۱۶ زیرمجموعه صحیح یا همان L_T به دست می آید (با تعداد مشاهدات ۴ تا ۱۹) که ضریب همبستگی خطی به ازای آن مجموعه از مشاهدات زمینی و متناظر ماهواره ای آن ها ماکزیمم هست و نشان از صحت مشاهدات دارد.

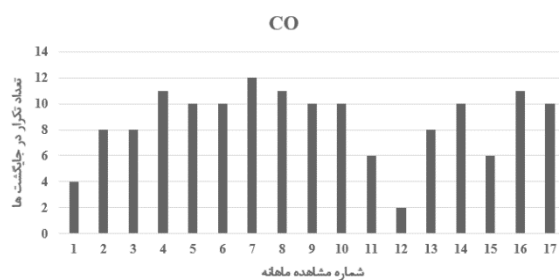
مرحله دوم روش پیشنهادی رأی گیری می باشد. در این مرحله مشخص می شود که مشاهدات زمینی هر ماه (به عنوان مثال مشاهدات مهر ماه ۱۳۹۸) چند بار در این مجموعه از L_T ها تکرار شده است. تکرار زیاد یک مشاهده ماهانه نشان از صحت آن دارد و مشخص می کند در جایگشت های مختلف، حضور این مشاهده خاص موجب افزایش ضریب همبستگی خطی مشاهدات شده است. بنابراین اگر به عنوان مثال مشاهده مهر ماه ۱۳۹۸ ایستگاه زمینی ۱۵ یا ۱۶ بار تکرار شده باشد نشان دهنده صحت بالای این مشاهده است. در بخش بعدی نتایج حاصل از پیاده سازی روش پیشنهادی نمایش داده شد و مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

۳- نتایج و بحث

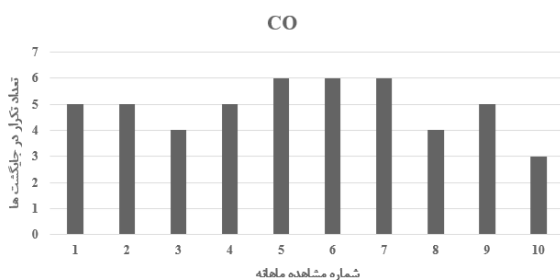
در این بخش، نتایج تعداد تکرار مشاهدات ماهانه در نگاره های (۴) الی (۷) نشان داده شده است.



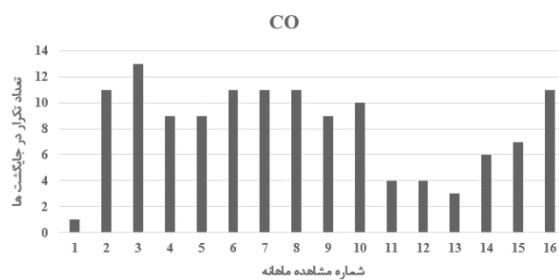
(ب)



(الف)

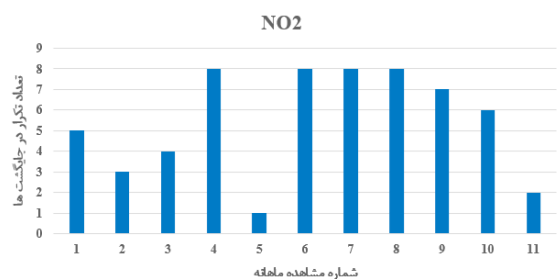


(د)



(ج)

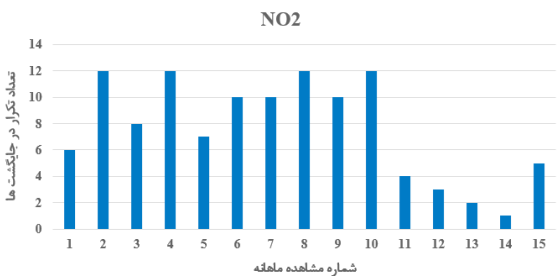
نگاره ۴: تعداد تکرار مشاهدات آلاینده CO در جایگشت‌های مختلف مجموعه مشاهدات با بهترین صحت در ایستگاه‌های (الف) محیط زیست، (ب) مخابرات، (ج) شریعتی و (د) استانداری



(ب)



(الف)



(د)

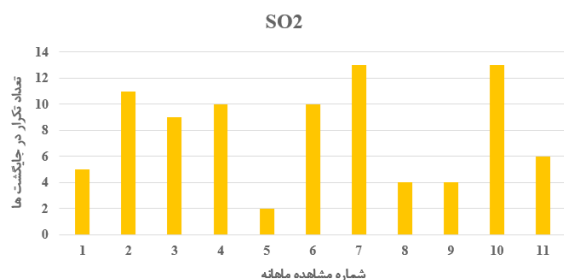


(ج)

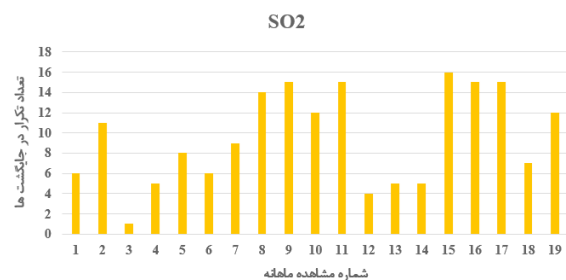
نگاره ۵: تعداد تکرار مشاهدات آلاینده NO2 در جایگشت‌های مختلف مجموعه مشاهدات با بهترین صحت در ایستگاه‌های (الف) محیط زیست، (ب) مخابرات، (ج) شریعتی و (د) استانداری

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)

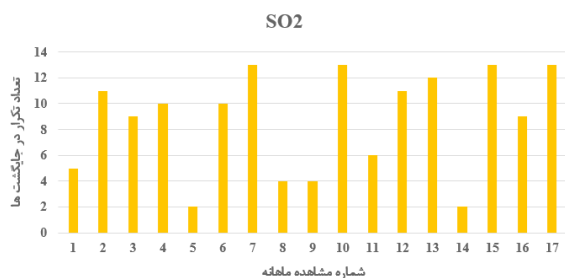
ارائه روشی مبتنی بر ترکیب و رأی گیری با هدف تحلیل مشاهدات ماهانه ایستگاه های پایش ... / ۳۳



(ب)

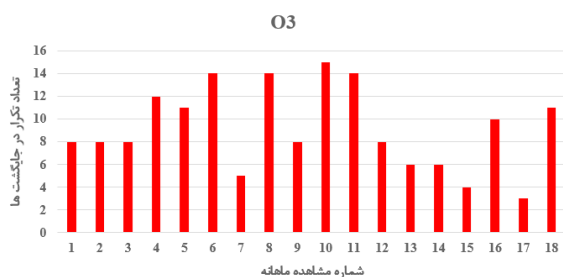


(الف)

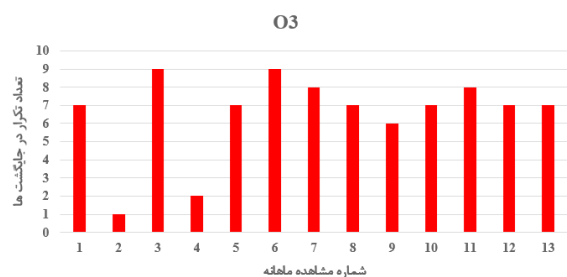


(ج)

نگاره ۶: تعداد تکرار مشاهدات آلاینده SO₂ در جایگشت های مختلف مجموعه مشاهدات با بهترین صحت در ایستگاه های (الف) محیط زیست، (ب) استانداری و (ج) شریعتی



(ب)

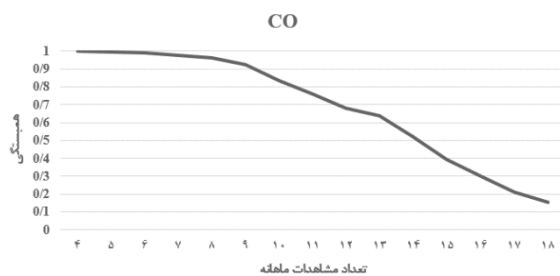


(الف)

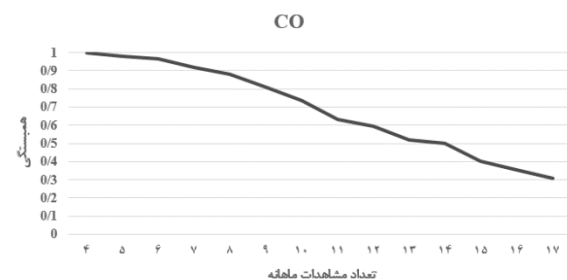
نگاره ۷: تعداد تکرار مشاهدات آلاینده O₃ در جایگشت های مختلف مجموعه مشاهدات با بهترین صحت در ایستگاه های (الف) محیط زیست و (ب) شریعتی

مشاهدات زمینی و ماهواره ای با افزایش تعداد مشاهدات ماهانه در نگاره های (۸) الی (۱۱) نشان داده شده است. در نگاره های (۸) الی (۱۱) مشاهده می شود که با افزایش تعداد مشاهدات ماهانه، ضریب همبستگی کاهش می یابد. طبق روش پیشنهادی به ترتیب بهترین مشاهدات در حال اضافه شدن می باشند (در رأی گیری در وضعیت مطلوب تری می باشند).

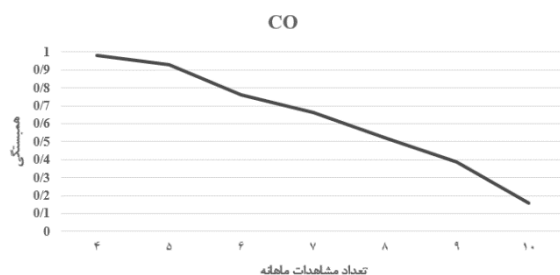
همانگونه که مشاهده می شود در برخی ایستگاه ها به ازای آلاینده ها تعداد مشاهدات ماهانه کمتر از ۱۹ می باشد، علت این امر پیشتر نیز بیان شده است. علت این مسئله عدم پایش آلاینده توسط ایستگاه زمینی پایش کیفیت هوا به ازای کل ماه و یا اکثر روزهای ماه می باشد که نتایج آن ماه را نامعتبر می کند و در مجموعه مشاهدات وجود ندارد. در ادامه این بخش، روند تغییرات ضریب همبستگی خطی میان



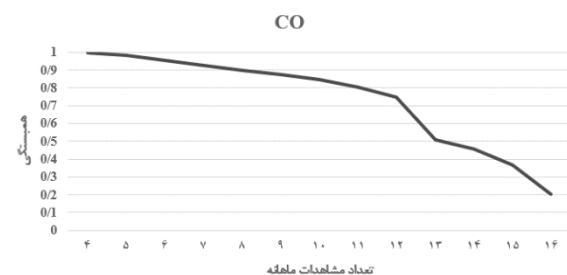
(ب)



(الف)

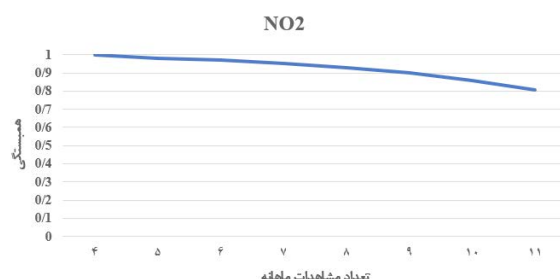


(د)

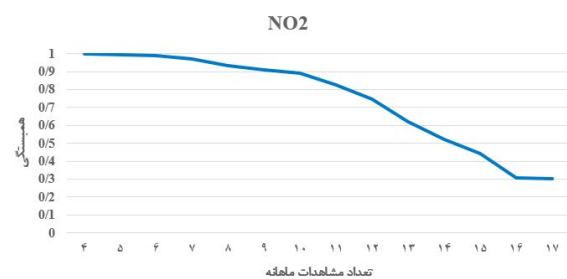


(ج)

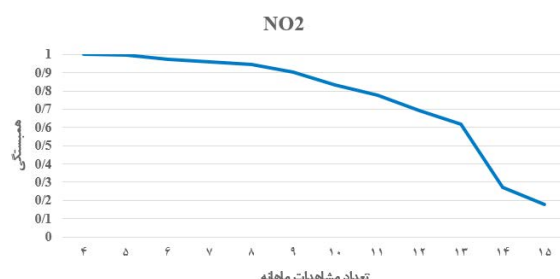
نگاره ۸: تغییرات ضریب همبستگی خطی میان مشاهدات ایستگاه‌های زمینی پایش و تصاویر ماهواره‌ای با افزایش تعداد مشاهدات ماهانه آلاینده CO با بهترین صحت در ایستگاه‌های الف) محیط زیست، ب) مخابرات، ج) شریعتی و د) استانداری



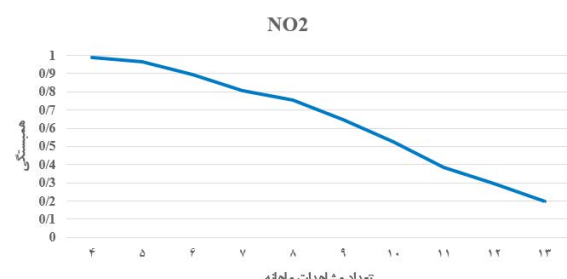
(ب)



(الف)



(د)

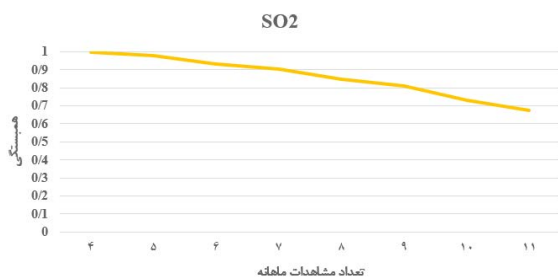


(ج)

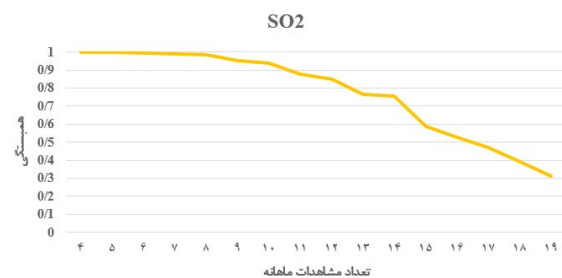
نگاره ۹: تغییرات ضریب همبستگی خطی میان مشاهدات ایستگاه‌های زمینی پایش و تصاویر ماهواره‌ای با افزایش تعداد مشاهدات ماهانه آلاینده NO₂ با بهترین صحت در ایستگاه‌های: الف) محیط زیست، ب) مخابرات، ج) شریعتی و د) استانداری

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (مهر)

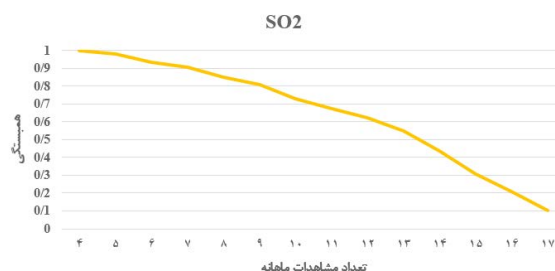
ارائه روشی مبتنی بر ترکیب و رأی گیری با هدف تحلیل مشاهدات ماهانه ایستگاه های پایش ... / ۳۵



(ب)

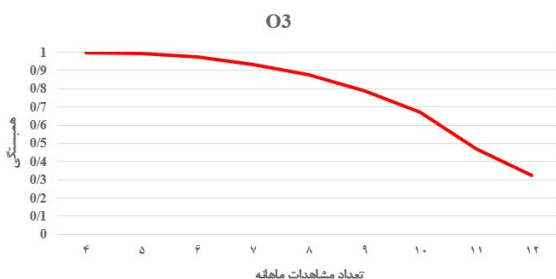


(الف)

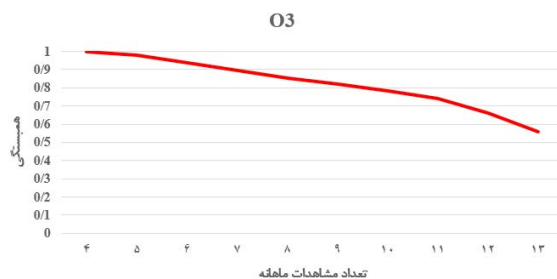


(ج)

نگاره ۱۰: تغییرات ضریب همبستگی خطی میان مشاهدات ایستگاه های زمینی پایش و تصاویر ماهواره ای با افزایش تعداد مشاهدات ماهانه آلاینده SO₂ با بهترین صحت در ایستگاه های الف) محیط زیست، ب) استاندارد و ج) شریعتی



(ب)



(الف)

نگاره ۱۱: تغییرات ضریب همبستگی خطی میان مشاهدات ایستگاه های زمینی پایش و تصاویر ماهواره ای با افزایش تعداد مشاهدات ماهانه آلاینده O₃ با بهترین صحت در ایستگاه های الف) محیط زیست و ب) شریعتی

$$\begin{bmatrix} L_{G1} \\ L_{G2} \\ L_{G3} \\ L_{G4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_{S1} & L_{S1}^2 & L_{S1}^3 \\ 1 & L_{S2} & L_{S2}^2 & L_{S2}^3 \\ 1 & L_{S3} & L_{S3}^2 & L_{S3}^3 \\ 1 & L_{S4} & L_{S4}^2 & L_{S4}^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix}$$

رابطه (۴)

در رابطه (۴)، L_{S1} الی L_{S4} مشاهدات ماهواره ای مربوط به ۴ (این مقدار توسط اپراتور تعیین می شود) مشاهده

به منظور مقایسه داده های ایستگاه های زمینی پایش کیفیت هوا و داده های ماهواره ای سنتینل-۵ نیاز است که هر دو دسته از مشاهدات ابتدا در یک فضا قرار بگیرند. برای انجام این کار، از یک معادله درجه سه به منظور تبدیل مشاهدات ماهواره ای به فضای مشاهدات زمینی استفاده شده است. ضرایب این معادله با استفاده از رابطه (۴) تعیین می شود.

با مقادیر ماهواره‌ای (مقادیر اولیه اصلی) خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE$) را محاسبه نمود. $RMSE$ یکی از معیارهای ارزیابی دقت می‌باشد. در بسیاری از کاربردها از جمله سنجش از دوری از این معیار برای ارزیابی دقت استفاده می‌شود (Moradi & Ghannadi, 2020).

در اینجا نیز برای ارزیابی روش پیشنهادی، $RMSE$ در دو حالت محاسبه شده است، یکی محاسبه $RMSE$ در حالت اولیه و بدون حذف داده‌های با صحت پایین (یا همان اشتباهات) و دیگری محاسبه آن پس از حذف داده‌های با صحت پایین. به منظور محاسبه $RMSE$ از رابطه (۷) استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (L_G - L'_G)^2}{N}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در این رابطه L_G مشاهدات ایستگاه‌های زمینی و L'_G مشاهدات متناظر تبدیل شده زمینی می‌باشند. جدول (۲) مقادیر $RMSE$ در صورت حضور اشتباهات و بدون حضور آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرده است.

ملاک اشتباه بودن در نتایج نمایش داده شده در جدول (۱)، آن دسته از مشاهداتی می‌باشند بعد از اضافه شدن آن‌ها

ماهانه با بهترین ضریب همبستگی خطی می‌باشند. همچنین L_{G1} الی L_{G4} نیز مقادیر متناظر در فضای مشاهدات زمینی هستند. می‌توان با استفاده از روش کمترین مربعات ضرایب ماتریس C را با استفاده از ماتریس مشاهدات ماهواره‌ای رابطه ۴ یعنی L_S و ماتریس مشاهدات ایستگاه‌های زمینی یعنی L_G طبق رابطه (۵) محاسبه نمود.

$$C = (L_S^T \cdot L_S)^{-1} \cdot L_S^T \cdot L_G \quad \text{رابطه (۵)}$$

پس از تعیین ضرایب چهارگانه C_0 الی C_3 می‌توان با استفاده از رابطه (۶) تمام مشاهدات ماهواره‌ای را به فضای زمینی تبدیل نمود.

$$\begin{bmatrix} L'_{G1} \\ L'_{G2} \\ \vdots \\ L'_{Gn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_{S1} & L_{S1}^2 & L_{S1}^3 \\ 1 & L_{S2} & L_{S2}^2 & L_{S2}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & L_{Sn} & L_{Sn}^2 & L_{Sn}^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه (۶)، L'_G مقادیر تبدیل شده زمینی (از مشاهدات ماهواره‌ای) می‌باشد. در ادامه می‌توان با تبدیل مشاهدات ماهواره‌ای به مشاهدات زمینی و مقایسه آن

جدول (۲): ارزیابی دقت مشاهدات ایستگاه‌های زمینی پایش قبل و بعد از حذف مشاهدات اشتباه

نام ایستگاه	نام آلاینده	تعداد مشاهدات با صحت پایین	RMSE قبل از حذف اشتباهات	RMSE بعد از حذف اشتباهات	بهبود در RMSE
مخابرات	NO2	۰	۲/۶۳	۲/۶۳	۰ %
	CO	۴	۱۰/۱	۹/۳۰	۸/۲ %
	NO2	۳	۱/۴۵	۱/۳۱	۹/۶ %
شریعتی	SO2	۴	۲۰/۹۷	۱۴/۰۹	۳۲/۸ %
	CO	۳	۷/۳۴	۶/۱۴	۱۶/۲ %
	O3	۲	۳/۷۸	۲	٪۴۷
	NO2	۳	۳/۴۲	۳/۳۶	۱/۹ %
محیط زیست	SO2	۳	۱۷/۷۰	۱۵/۹۴	۱۰ %
	CO	۴	۱/۴۹	۱/۳۷	۸/۲ %
	O3	۰	۵/۵۳	۵/۵۳	۰ %
	NO2	۲	۶/۳۵	۵/۸۴	۸ %
استانداری	SO2	۰	۱۲/۱۷	۱۲/۱۷	۰ %
	CO	۲	۸/۷۸	۶/۶۸	۲۳/۹ %

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (زمین)

ارائه روشی مبتنی بر ترکیب و رأی گیری با هدف تحلیل مشاهدات ماهانه ایستگاه های پایش ... / ۳۷

به مجموعه مشاهدات، ضریب همبستگی خطی به زیر ۵۰٪ (این حد آستانه توسط اپراتور تعیین می شود) برسد. همانگونه که ملاحظه می شود در مشاهدات صورت گرفته، برخی از قرائت ها در ایستگاه های زمینی پایش کیفیت هوا سنخیتی با سایر مشاهدات زمینی و مشاهدات ماهواره ای ندارند و حذف آن ها از مجموعه مشاهدات باعث افزایش همبستگی میان مشاهدات زمینی و ماهواره ای می شود. به عنوان نمونه، براساس روش پیشنهادی، سه مشاهده آلاینده SO_2 در ماه های آذر ۹۸، شهریور و آبان ۹۹ مربوط به ایستگاه محیط زیست از صحت پایین تری برخوردار هستند، به شکلی که همانگونه که در نگاره (۶) نشان داده شده است تعداد تکرار آن ها در جایگشت ها پایین تر از سایر مشاهدات ماهانه است و حضور آن ها در مجموعه مشاهدات باعث کاهش ضریب همبستگی خطی به زیر ۵۰٪ می شود. با توجه به فرکانس

بالای تغییرات سطح آلاینده ها در مشاهدات روزانه در قیاس با مشاهدات ماهانه به دلیل تأثیر آنی پارامترهای هواشناسی به ویژه باران و باد بر آلاینده ها، از مهر ماه ۱۳۹۸ الی اسفند ۱۳۹۹، ۱۶ روز آلوده از نظر آلاینده دی اکسید گوگرد انتخاب شده و مقایسه ای میان برخی از مشاهدات روزانه صورت گرفته توسط سنجنده TROPOMI و سیستم پایش زمینی در موقعیت دو ایستگاه شریعتی و محیط زیست انجام گرفته است. نتایج این پایش در جدول (۳) نشان داده شده است. همچنین در نگاره (۱۲) نمودار برخی مشاهدات روزانه صورت گرفته توسط سنجنده TROPOMI (الف) و سامانه پایش زمینی (ب) در موقعیت ایستگاه های شریعتی و محیط زیست با یکدیگر مقایسه شده است.

در نگاره (۱۲-ب) نشان داده شده است، علیرغم فاصله نه چندان زیاد دو ایستگاه شهرداری و محیط زیست، تفاوت

جدول ۳: مقایسه ای میان برخی از مشاهدات روزانه صورت گرفته توسط سنجنده TROPOMI و سیستم پایش زمینی

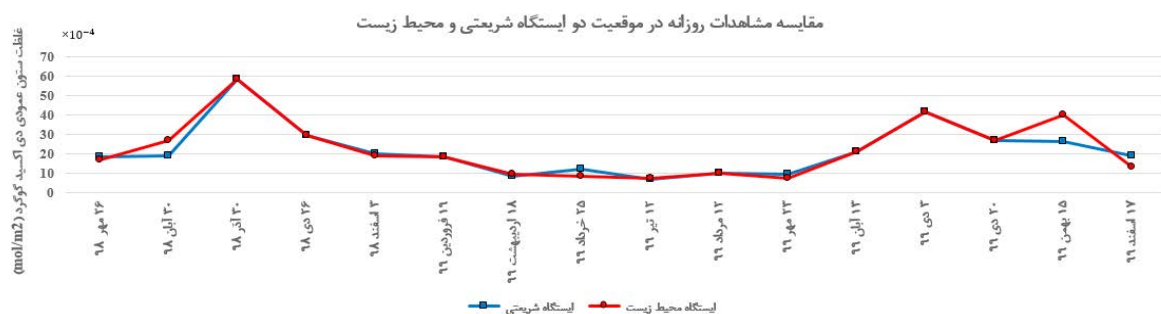
در موقعیت دو ایستگاه شریعتی و محیط زیست

موقعیت ایستگاه محیط زیست		موقعیت ایستگاه شریعتی		تاریخ
ایستگاه زمینی (شاخص آلودگی)	TROPOMI (mol/m ²) × 10 ⁻⁴	ایستگاه زمینی (شاخص آلودگی)	TROPOMI (mol/m ²) × 10 ⁻⁴	
۵۰	۱۶/۸	۵۹	۱۸/۳	۱۳۹۸/۰۷/۲۶
-	۲۷	-	۱۹	۱۳۹۸/۰۸/۳۰
۸۶	۵۸/۳	۱۴۸	۵۸/۳	۱۳۹۸/۰۹/۳۰
-	۲۹/۶	۵۷	۲۹/۶	۱۳۹۸/۱۰/۲۶
-	۱۸/۸	-	۲۰	۱۳۹۸/۱۲/۰۳
۵۳	۱۸/۲	۹۷	۱۸/۲	۱۳۹۹/۰۱/۱۹
۱۷	۹/۵	۳۹	۸/۵	۱۳۹۹/۰۲/۱۸
۸۶	۸/۲	-	۱۲	۱۳۹۹/۰۳/۲۵
-	۷/۳	-	۶/۹	۱۳۹۹/۰۴/۱۲
-	۱۰	-	۹/۹	۱۳۹۹/۰۵/۱۲
۴۹	۳/۴	-	۶/۸	۱۳۹۹/۰۷/۱۶
۱۳۱	۷/۵	۴۰	۹/۴	۱۳۹۹/۰۷/۲۳
۳۲	۲۰/۸	۱۹	۲۰/۸	۱۳۹۹/۰۸/۲۸
۱۰۳	۴۱/۴	۹	۴۱/۴	۱۳۹۹/۱۰/۰۳
۱۳۱	۲۷	۳۵	۲۷	۱۳۹۹/۱۰/۲۰
۱۱۰	۴۰	۱۱۰	۲۶/۲	۱۳۹۹/۱۱/۱۵
۷۹	۱۳/۲	۱۶	۱۹/۱	۱۳۹۹/۱۲/۱۷

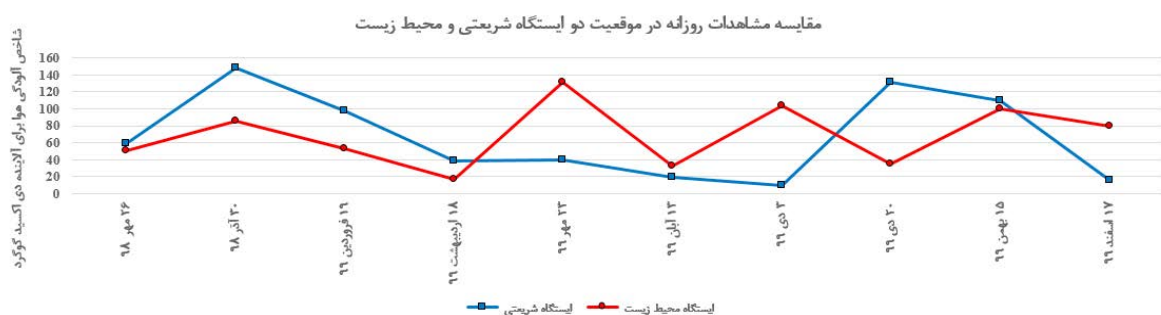
۴- نتیجه گیری

امروزه آلودگی هوا یکی از مهم ترین چالش ها در ایران به شمار می رود و همچنین نقش عمده ای در تغییرات اقلیم کشور ایفا می کند. عواملی همچون رشد جمعیت و پیرو آن افزایش خودرو و همچنین وجود صنایع متنوع (و غالباً قدیمی) و تقاضای انرژی مربوط به آن در ایران منجر به افزایش روند آلودگی در بسیاری از کلان شهرهای کشور شده است. شهرستان اراک یکی از چهار قطب صنعتی کشور محسوب می شود و از این رو هوای آن یکی از آلوده ترین ها در ایران است. علاوه بر صنعتی بودن، تراکم نسبتاً بالای جمعیتی (و به تبع آن شرایط ترافیکی بالا) و شرایط اقلیمی نیز بر کیفیت هوای اراک مؤثر است. اندازه گیری دقیق آلاینده های هوا با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا برای تعیین چگونگی توزیع و اثرگذاری آن ها و همچنین، ارائه راهکارهایی برای مدیران در سطح استانی و ملی امری ضروری محسوب می شود. متأسفانه در ایران ایستگاه های

معنی داری میان پایش صورت گرفته میان دو ایستگاه از غلظت دی اکسید گوگرد در برخی از روزها مشاهده می شود. به عنوان نمونه یکی از آلوده ترین روزها به لحاظ کیفیت هوا در شهر اراک مربوط به تاریخ سوم دی ۱۳۹۹ می باشد. همانگونه که نشان داده شده، سنجنده TROPOMI غلظت این آلاینده را مقدار $41/4 \times 10^{-4}$ مول بر مترمربع به ازای ایستگاه های شریعتی و محیط زیست مشاهده کرده است. این در حالی است که شاخص آلودگی هوا در این تاریخ در ایستگاه محیط زیست عدد ۱۰۳ را نشان می دهد، اما این مقدار برای ایستگاه شریعتی مقدار ۹ می باشد که مطمئناً صحیح نیست و یا اینکه به دلایل مختلف نتوانسته واقعیت هوای این روز شهرستان اراک را به درستی اندازه گیری نماید. بنابراین ضروری به نظر می رسد که علاوه بر مشاهدات ماهانه ایستگاه های پایش کیفیت هوا، مشاهدات روزانه نیز می بایست به صورت جدی مورد مطالعه و صحت سنجی قرار بگیرد.



(الف)



(ب)

نگاره ۱۲: مقایسه برخی از مشاهدات روزانه صورت گرفته توسط سنجنده TROPOMI (الف) و سامانه پایش زمینی (ب) دو ایستگاه شریعتی و محیط زیست

شده است. مشاهده شد که برخی از قرائت ها در ایستگاه های زمینی پایش کیفیت هوا سنخیتی با سایر مشاهدات زمینی و مشاهدات ماهواره ای ندارند و حذف آن ها از مجموعه مشاهدات باعث افزایش همبستگی میان مشاهدات زمینی و ماهواره ای می شود. با حذف مشاهدات اشتباه از مجموعه مشاهدات، $RMSE$ از ۲٪ تا ۴۷٪ بهبود می یابد.

در کار تحقیقاتی حاضر، این نتیجه حاصل شد که برخی از مشاهدات ایستگاه های زمینی پایش صحیح نمی باشند و یا لاقبل می توان اینگونه بیان نمود که به علت بی نظمی های محلی ناشی از علل مختلف از جمله مکانیابی نامناسب نصب و یا عدم کالیبراسیون مناسب، نتوانسته اند واقعیتی از روند کلی آلودگی محیط اطراف را به شکل صحیح ارائه دهند. بنابراین با توجه به نتایج رضایت بخش داده های ماهواره ای سنتینل-۵ می توان در مناطقی که داده ای برای ایستگاه های پایش کیفیت هوا وجود ندارد و یا در صحت مشاهدات آن ها تردید وجود دارد از مشاهدات ماهواره ای برای پایش هرچه بهتر آلاینده های هوا بهره برد.

۵- تشکر و قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۹۹۰۳۰۴۱۴ انجام شده است.

منابع و مآخذ

۱- سپهرنیا، شهرام، (۱۳۹۴)، دوره آموزشی راهبری ایستگاه های پایش کیفی هوای محیط، سازمان حفاظت محیط زیست

2- Aljammaz, A., Sultan, M., Izadi, M., Abotalib, A. Z., Elhebiry, M. S., Emil, M. K., Abdelmohsen, K., Saleh, M., & Becker, R. (2021). Land Subsidence Induced by Rapid Urbanization in Arid Environments: A Remote Sensing-Based Investigation. *Remote Sensing*, 1109, (6) 13.
3- Borsdorff, T., Aan de Brugh, J., Hu, H., Aben, I., Hasekamp, O., & Landgraf, J. (2018). Measuring carbon monoxide with TROPOMI: First results and a comparison

پایش کیفیت هوا تعداد و توزیع مناسبی ندارند. در بسیاری از شهرهای ایران حتی یک ایستگاه پایش هوا وجود ندارد و در بسیاری از شهرها نیز تنها یک ایستگاه وجود دارد. در اراک به عنوان مرکز استان مرکزی و شهری صنعتی، تنها چهار ایستگاه پایش وجود دارد و این در حالی است که در بسیاری از زمان ها همه آن ها در وضعیت فعال قرار ندارند. عدم مکانیابی مناسب به منظور نصب ایستگاه های زمینی پایش، باعث بی نظمی های محلی در مشاهده غلظت آلاینده ها می شود. عدم کالیبراسیون به موقع این ایستگاه ها نیز موجب اختلال در مشاهدات کیفیت هوا می شود. در این مواقع این داده ها از نتایج حذف می شوند و یا ایستگاه توسط مسئولین ذیربط در وضعیت غیرفعال قرار می گیرد (به عنوان نمونه به مدت یک هفته یا یک ماه). به نظر می رسد که در میان مشاهدات این ایستگاه ها داده های ناصحیح وجود دارد.

در این پژوهش، روشی بر پایه ترکیب و رأی گیری برای صحت سنجی مشاهدات ایستگاه های پایش کیفیت هوا با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنتینل-۵ ارائه شد. شهرستان اراک به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. به منظور پایش غلظت آلاینده ها در این مقاله از تصاویر سطح سه (L3) سنجنده TROPOMI ماهواره سنتینل-۵ که از سامانه گوگل ارث انجین دریافت شده است، استفاده شد. ماهواره سنتینل-۵ یک ابزار قدرتمند در زمینه پایش اتمسفر می باشد. این ماهواره دارای یک طیف سنج به نام TROPOMI بوده که تابش اشعه ماوراء بنفش زمین را در طیفی بالا اندازه گیری می کند. سنجنده TROPOMI قابلیت بالایی در تصویربرداری و پایش تعداد زیادی از آلاینده ها دارد.

در این مطالعه پایش انجام شده ی چهار آلاینده NO_2 ، SO_2 ، CO و ازن توسط ایستگاه های زمینی شهرستان اراک و تصاویر سنتینل-۵ به مدت ۱۹ ماه با یکدیگر مقایسه شدند. به وسیله روش پیشنهادی برخی از مشاهدات به عنوان مشاهدات ناصحیح یا همان اشتباه تشخیص داده شده اند. برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی از معیار $RMSE$ استفاده

- A. (2020). A method for Sentinel-1 DEM outlier removal using 2-D Kalman filter. *Geocarto International*, 1-15.
- 14- Ghude, S. D., Chate, D., Jena, C., Beig, G., Kumar, R., Barth, M., Pfister, G., Fadnavis, S., & Pithani, P. (2016). Premature mortality in India due to PM_{2.5} and ozone exposure. *Geophysical Research Letters*, 43(9), 4650-4658.
- 15- Hedelt, P., Efremenko, D. S., Loyola, D. G., Spurr, R., & Clarisse, L. (2019). Sulfur dioxide layer height retrieval from Sentinel-5 Precursor/TROPOMI using FP-ILM. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(10).
- 16- Ialongo, I., Virta, H., Eskes, H., Hovila, J., & Douros, J. (2020). Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO₂ observations with ground-based measurements in Helsinki. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(1).
- 17- Islam, M. S., Tusher, T. R., Roy, S., & Rahman, M. (2021). Impacts of nationwide lockdown due to COVID-19 outbreak on air quality in Bangladesh: a spatiotemporal analysis. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14(3), 351-363.
- 18- Jeong, U., & Hong, H. (2021). Assessment of Tropospheric Concentrations of NO₂ from the TROPOMI/Sentinel-5 Precursor for the Estimation of Long-Term Exposure to Surface NO₂ over South Korea. *Remote Sensing*, 13(10), 1877.
- 19- Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367-371.
- 20- Lorente, A., Boersma, K., Eskes, H., Veefkind, J., Van Geffen, J., de Zeeuw, M., van der Gon, H. D., Beirle, S., & Krol, M. (2019). Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over Paris with TROPOMI. *Scientific reports*, 9(1), 1-10.
- 21- Magro, C., Nunes, L., Gonçalves, O. C., Neng, N. R., Nogueira, J. M., Rego, F. C., & Vieira, P. (2021). Atmospheric Trends of CO and CH₄ from Extreme Wildfires in Portugal Using Sentinel-5P TROPOMI Level-2 Data. *Fire*, 4(2), 25.
- 22- Moradi, A. R., & Ghannadi, M. A. (2020). Presenting a method for the improvement of Sentinel-1 generated DEM, using SRTM and 2D wavelet transform. *Scientific with ECMWFIFS analysis data. Geophysical Research Letters*, 45(6), 2826-2832.
- 4- Bray, C. D., Nahas, A., Battye, W. H., & Aneja, V. P. (2021). Impact of lockdown during the COVID-19 outbreak on multi-scale air quality. *Atmospheric Environment*, 254, 118386.
- 5- Caiazzo, F., Ashok, A., Waitz, I. A., Yim, S. H., & Barrett, S. R. (2013). Air pollution and early deaths in the United States. Part I: Quantifying the impact of major sectors in 2005. *Atmospheric Environment*, 79, 198-208.
- 6- Chowdhury, S., & Dey, S. (2016). Cause-specific premature death from ambient PM_{2.5} exposure in India: Estimate adjusted for baseline mortality. *Environment international*, 91, 283-290.
- 7- Cooper, M. J., Martin, R. V., McLinden, C. A., & Brook, J. R. (2020). Inferring ground-level nitrogen dioxide concentrations at fine spatial resolution applied to the TROPOMI satellite instrument. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104013.
- 8- de Vries, J., Voors, R., Ording, B., Dingjan, J., Veefkind, P., Ludewig, A., Kleipool, Q., Hoogeveen, R., & Aben, I. (2016). TROPOMI on ESA's Sentinel 5p ready for launch and use. *Fourth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2016)*,
- 9- Fan, C., Li, Y., Guang, J., Li, Z., Elnashar, A., Allam, M., & de Leeuw, G. (2020). The impact of the control measures during the COVID-19 outbreak on air pollution in China. *Remote Sensing*, 12(10), 1613.
- 10- Frantz, D., Röder, A., Udelhoven, T., & Schmidt, M. (2016). Forest disturbance mapping using dense synthetic landsat/MODIS time-series and permutation-based disturbance index detection. *Remote Sensing*, 8(4), 277.
- 11- Ghahremanloo, M., Lops, Y., Choi, Y., & Mousavinezhad, S. (2021). Impact of the COVID-19 outbreak on air pollution levels in East Asia. *Science of The Total Environment*, 754, 142226.
- 12- Ghannadi, M., Shahri, M., & Moradi, A. (2021). Modeling The Effect of Nitrogen Dioxide Produced In Shazand Power Plant Upon Air Pollution In Arak, Iran Using Sentinel-5 Satellite Data.
- 13- Ghannadi, M. A., Alebooye, S., Izadi, M., & Moradi,

- Vahter, K., & Paavel, B. (2017). Mapping water quality parameters with sentinel-3 ocean and land colour instrument imagery in the Baltic Sea. *Remote Sensing*, 9(10), 1070.
- 32- Vigouroux, C., Langerock, B., Bauer Aquino, C. A., Blumenstock, T., Cheng, Z., De Mazière, M., De Smedt, I., Grutter, M., Hannigan, J. W., & Jones, N. (2020). TROPOMI-Sentinel-5 Precursor formaldehyde validation using an extensive network of ground-based Fourier-transform infrared stations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(7), 3751-3767.
- 33- Virghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B.-A., Nistor, C., & Dobre, R. (2020). Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak. *Remote Sensing*, 12(21), 3575.
- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 29(115), 35-48.
- 23- 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.
- 24- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 data for land cover/use mapping: a review. *Remote Sensing*, 12(14), 2291.
- 25- Quesada-Ruiz, S., Attié, J.-L., Lahoz, W. A., Abida, R., Ricaud, P., Amraoui, L. E., Zbinden, R., Piacentini, A., Joly, M., & Eskes, H. (2020). Benefit of ozone observations from Sentinel-5P and future Sentinel-4 missions on tropospheric composition. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(1), 131-152.
- 26- 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 AND HEALTH*.
- 27- Saxena, P., & Naik, V. (2018). *Air pollution: sources, impacts and controls*. CABI.
- 28- Shen, H., Lin, Y., Tian, Q., Xu, K., & Jiao, J. (2018). A comparison of multiple classifier combinations using different voting-weights for remote sensing image classification. *International journal of remote sensing*, 39(11), 3705-3722.
- 29- Shikwambana, L., Mhangara, P., & Mbatha, N. (2020). Trend analysis and first-time observations of sulphur dioxide and nitrogen dioxide in South Africa using TROPOMI/Sentinel-5 P data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91, 102130.
- 30- Theys, N., Hedelt, P., De Smedt, I., Lerot, C., Yu, H., Vlietinck, J., Pedernana, M., Arellano, S., Galle, B., & Fernandez, D. (2019). Global monitoring of volcanic SO₂ degassing with unprecedented resolution from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Scientific reports*, 9(1), 1-10.
- 31- Toming, K., Kutser, T., Uiboupin, R., Arikas, A.,

