

Analysis of the Impact of Agricultural Fires on Air Quality in Mazandaran Province Using Satellite Data

Alireza Yousefi Kebriya¹, Mehdi Nadi^{2*}, Hossein Yousefi Kebriya³

¹ Ph.D. of Agrometeorology, Faculty of Agricultural Sciences, University of Agricultural Sciences and Natural Resources Sari, Iran, Email: alireza3fkrbriya@gmail.com

² Associate Professor of Agricultural Meteorology, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran, Email: Mehdi.nadi@gmail.com

³ Bachelor's student in Computer Science, Computer Department, Faculty of Computer Science, Islamic Azad University of Babol, Babol, Iran, Email: hoseinyk933@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Burning of agricultural fields is considered one of the main contributors to air pollution in agricultural regions, resulting in serious environmental and health impacts. This study utilized satellite images from Landsat, MODIS, and Sentinel 5 to investigate pollution caused by this phenomenon in Mazandaran province. Initially, the NDVI index was used to identify vegetation cover, and agricultural areas were delineated by excluding forests. Subsequently, burned areas from 2022 to 2024 were identified using the MODIS fire index. The accuracy of the results was validated with actual MODIS images, and data on AOD, AAI, and carbon monoxide were extracted from MODIS and Sentinel 5 satellites. Additionally, a regression model was developed using data from the Tehran Fath station and satellite information to estimate pollution in the agricultural areas of Babol, Amol, and Fereydunkenar, with daily and monthly AQI charts for these cities plotted for the year 2022. The results indicated that the eastern regions of the province, including Babol, Amol, Qaemshahr, and Sari, experienced the highest levels of agricultural field burning, which was corroborated by satellite images. The pollution map revealed that coastal areas and main roads experienced the most pollution. Data analysis showed a significant relationship with a coefficient of determination of 0.75 between actual and satellite data. The AQI exceeded 120 during post-harvest of rice. Based on these findings, it is recommended instead of burning, use alternative methods of agricultural residue management, such as converting straw into biochar.
Article history: Received: 2024-12-8 Accepted: 2025-5-131	
Keywords: AOD index MODIS satellite Agriculture Fire air pollution	

Cite this article: Yousefi Kebriya, A.R., Nadi, M., Yousefi Kebriya, H. (2025). Analysis of the Impact of Agricultural Fires on Air Quality in Mazandaran Province Using Satellite Data. Journal of the Climate Change research, 6 (22), 25-44.



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال ششم / شماره مسلسل بیست و دوم / تابستان ۱۴۰۴ / صفحات: ۴۴-۲۵

تحلیل اثرات آتش‌سوزی مزارع بر کیفیت هوا در استان مازندران با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

علیرضا یوسفی کبریا^۱، مهدی نادى^۲، حسین یوسفی کبریا^۳

^۱ دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران. رایانامه: alirezau3fikrbriya@gmail.com

^۲ دانشیار گروه هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران. رایانامه: Mehdi.nadi@gmail.com

^۳ دانشجوی کارشناسی کامپیوتر، گروه کامپیوتر، دانشکده کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی بابل، بابل، ایران. رایانامه: hoseinyk933@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی	آتش‌سوزی مزارع یکی از عوامل اصلی آلودگی هوا در مناطق کشاورزی محسوب می‌شود که اثرات زیست‌محیطی و بهداشتی جدی به دنبال دارد. این پژوهش با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای لندست، مودیس و سنتینل ۵ به بررسی آلودگی ناشی از این پدیده در استان مازندران پرداخته است. ابتدا شاخص NDVI برای شناسایی پوشش گیاهی استفاده شد و با حذف جنگل‌ها، مناطق کشاورزی مشخص گردید. سپس، مناطق سوخته شده طی سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۴ با استفاده از شاخص آتش‌سوزی مودیس شناسایی شدند. صحت نتایج با تصاویر واقعی مودیس تأیید شد و داده‌های AOD، AAI و کربن مونوکسید از ماهواره‌های مودیس و سنتینل ۵ استخراج گردید. همچنین، با داده‌های ایستگاه فتح تهران و اطلاعات ماهواره‌ای، مدلی رگرسیونی برای برآورد آلودگی در مزارع شهرهای بابل، آمل و فریدون‌کنار طراحی و نمودارهای روزانه و ماهانه AQI این شهرها برای سال ۲۰۲۲ رسم گردید. نتایج نشان داد که نواحی شرقی استان، شامل بابل، آمل، قائمشهر و ساری، بیشترین میزان آتش‌سوزی مزارع را داشته است، که با تصاویر ماهواره‌ای تأیید شد. نقشه آلودگی نشان داد که مناطق ساحلی و جاده‌های اصلی بیشترین آلودگی را تجربه کردند. تحلیل داده‌ها رابطه‌ای معنادار با ضریب تعیین ۰/۷۵ بین داده‌های واقعی و ماهواره‌ای را نشان داد. شاخص AQI پس از برداشت برنج، به بیش از ۱۲۰ رسید. بر اساس این یافته‌ها، پیشنهاد می‌شود به‌جای سوزاندن، از روش‌های جایگزین مدیریت بقایای کشاورزی مانند تبدیل کاه و کلش به بیوجار استفاده شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۲	
واژه‌های کلیدی: شاخص AOD ماهواره مودیس کشاورزی آتش‌سوزی آلودگی هوا	

استناد: یوسفی کبریا، علیرضا؛ نادى، مهدى؛ یوسفی کبریا، حسین. (۱۴۰۴). تحلیل اثرات آتش‌سوزی مزارع بر کیفیت هوا در استان مازندران با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۶ (۲۲)، ۴۲-۲۳.

DOI: 10.30488/CCR.2025.492951.1260

ناشر: دانشگاه گلستان
© نویسندگان.



مقدمه

سوزاندن بقایای مزارع کشاورزی، به‌ویژه بقایای مزارع برنج، یکی از مهم‌ترین عوامل انتشار آلودگی هوا در مناطق کشاورزی محسوب می‌شود. این فعالیت، که به‌عنوان یک روش سنتی و کم‌هزینه برای پاکسازی زمین پس از برداشت محصول انجام می‌شود، به‌طور گسترده‌ای در استان‌های شمالی ایران از جمله مازندران رایج است. سوزاندن بقایای کشاورزی منجر به انتشار حجم قابل‌توجهی از ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$) و گازهای سمی نظیر مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن و گازهای گلخانه‌ای دیگر می‌شود. این فرآیند با تأثیرات گسترده‌ای بر کیفیت هوا، سلامت انسان‌ها و پایداری اکوسیستم‌ها، به یکی از چالش‌های زیست‌محیطی و بهداشتی حاد تبدیل شده است (Aggarwal et al., 2022). آتش سوزی مزارع پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی بسیاری به همراه دارد. انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن و متان نقش چشمگیری در افزایش دمای محلی و تسریع تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند. علاوه بر این، افزایش غلظت ذرات معلق در هوا می‌تواند بیماری‌های تنفسی و قلبی‌عروقی را، به‌ویژه در میان گروه‌های آسیب‌پذیر نظیر کودکان، سالمندان و بیماران مزمن، تشدید کند (Anees et al., 2024). آثار زیست‌محیطی این اقدامات فراتر از مناطق محلی گسترش یافته و بر مناطق دورتر نیز تأثیر می‌گذارد. کاهش باروری خاک، تغییر در ویژگی‌های فیزیکی آن، تخریب زیستگاه‌های طبیعی و کاهش تنوع زیستی از دیگر پیامدهای این فعالیت‌ها است. سوزاندن بقایای کشاورزی، به‌ویژه در استان مازندران، به دلیل نبود زیرساخت‌های پایش کیفیت هوا و فقدان ایستگاه‌های سنجش آلودگی، کمتر مورد تحلیل علمی دقیق قرار گرفته است. در این شرایط، استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند سنجش از دور می‌تواند ابزاری کارآمد برای نظارت و تحلیل دقیق انتشار آلاینده‌ها باشد. این فناوری با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای نظیر تصاویر لندست، مودیس و سنتینل، اطلاعاتی دقیق و به‌هنگام درباره تغییرات

زیست‌محیطی و کیفیت هوا فراهم می‌کند (Bahşi et al., 2022). سنجش از دور نه تنها امکان بررسی الگوهای مکانی و زمانی انتشار آلودگی‌ها را فراهم می‌آورد، بلکه ابزاری حیاتی برای مدل‌سازی و مدیریت آلودگی در مناطقی با داده‌های زمینی محدود یا غایب محسوب می‌شود. این فناوری، که در بسیاری از پژوهش‌های بین‌المللی به‌عنوان یک ابزار نوآورانه و چندکاره به کار گرفته شده است، در تحلیل منابع آلودگی، تأثیرگذاری بر پوشش گیاهی، و تخمین میزان آلودگی ناشی از سوزاندن مزارع کاربردهای گسترده‌ای دارد (Cordeiro et al., 2024).

پیشینه و پژوهش

مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که سوزاندن بقایای کشاورزی به‌طور مستقیم با افزایش شاخص‌های سنجش آلودگی، مانند عمق نوری هواپخش‌ها (AOD)، مرتبط است. به‌عنوان نمونه، در پژوهشی که در استان شاندونگ چین انجام شد، تغییرات مکانی و زمانی ذرات معلق جوی در ماه‌های سوزاندن بقایای محصولات کشاورزی بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که سوزاندن زیست‌توده عامل اصلی افزایش AOD بوده است، در حالی که غلظت گاز مونوکسیدکربن در مناطق زراعی نسبت به جنگل‌ها و سطوح غیرقابل نفوذ، کمتر و پایدارتر بوده است. همچنین، تأثیرات فعالیت‌های صنعتی و عوامل منطقه‌ای دیگر نیز در برخی مناطق مورد توجه قرار گرفته است (Cordeiro et al., Chen et al., 2017). در مطالعه‌ای آلودگی هوای در هیمالیاهای مرکزی شمال هند در طول فصل سوزاندن بقایای کشاورزی بررسی شد. نتایج حرکات فرامرزی ذرات معلق در هوا از سوزاندن بقایای کشاورز در شمال غربی هند باعث افزایش $PM_{2.5}$ می‌شود (Kalluri et al., 2020). در تحقیقی به بررسی روش‌های تلفیق اطلاعات چندحسگری، شامل تکنیک‌های سنتی و یادگیری عمیق، برای شناسایی سوزاندن کاه در مزارع واقعی با استفاده از داده‌های مادون قرمز و مرئی پهپادی پرداخته شد و روش جدیدی به نام انطباق

کنتراست چندمقیاسی (MCA) ارائه داده‌شد که عملکرد مدل YOLOv5 را بهبود داده و دقت تشخیص سوزاندن کاه را افزایش داد. نتایج نشان داد که تلفیق داده‌های چندحسگری با روش MCA به‌طور قابل توجهی بهتر از روش‌های تک‌حسگری عمل کرده و پتانسیل بالایی برای پایش مؤثر مزارع دارد (Keshavarz et al., 2023). در مطالعه‌ای به ارزیابی تصاویر سنتینل-۲ برای شناسایی مناطق سوخته ناشی از سوزاندن بقایای برنج در کورکشترا، هاریانا، هند پرداخته شد. داده‌ها از سپتامبر تا نوامبر ۲۰۱۸ جمع‌آوری شده و شاخص‌های NDVI و NBR برای تفکیک سطوح سوخته و غیرسوخته مقایسه شد. NBR با دقت ۹۱/۳۸٪ نسبت به NDVI (دقت ۷۵/۸۶٪) عملکرد بهتری داشت. افزونه‌ای در ArcGIS برای استخراج خودکار مناطق سوخته توسعه یافت و نتایج نشان داد ۲۴٫۵٪ از مناطق زیر کشت برنج تحت سوزاندن کاه قرار گرفته‌است، که منجر به انتشار ۱۳۸/۶۹ گیگاگرم آلاینده در سال ۲۰۱۸ شد (Khanal et al., 2022). پژوهشی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ و ۲ به تخمین بیوماس خشک برنج و انتشار گازهای آلاینده ناشی از سوزاندن کاه در منطقه هانوی پرداخته است. تصاویر سنتینل ۲ برای شناسایی مناطق کشت برنج و سوزاندن کاه و تصاویر راداری سنتینل ۱ برای محاسبه بیوماس خشک به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که از ۲۸۷۲۸٫۵ تن بیوماس خشک برنج، ۲۰۳۷٫۹۱ تن کاه سوزانده شده که منجر به انتشار ۲۳۹۸٫۶ تن CO₂، ۱۸۹٫۵ تن CO، ۱۸٫۸۶۷۳ تن PM₁₀ و ۱۷٫۲۰۸۷ تن PM_{2.5} شد (Nguyen et al., 2024). این یافته‌ها بر اهمیت پایش دقیق فعالیت‌های کشاورزی و انتشار آلاینده‌ها تأکید دارند. سنجش از دور نه تنها ابزاری برای تحلیل داده‌های گذشته، بلکه راهی برای پیش‌بینی و مدیریت اثرات زیست‌محیطی در آینده است.

سوزاندن بقایای کاه کشاورزی پس از برداشت محصول، به‌عنوان یکی از روش‌های رایج و سریع برای آماده‌سازی زمین جهت کشت مجدد، از دیرباز در

کشاورزی ایران به‌ویژه در استان مازندران مورد استفاده قرار گرفته است. این روش، که به دلیل هزینه پایین و سهولت اجرا همچنان مورد استقبال کشاورزان است، تأثیرات زیست‌محیطی و بهداشتی گسترده‌ای به همراه دارد. فرآیند سوزاندن نه تنها باعث انتشار حجم زیادی از آلاینده‌های جوی نظیر PM₁₀ و آلاینده‌های کربنی می‌شود، بلکه ترکیبات سمی ناشی از این عمل به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بر کیفیت هوا، خاک، و منابع آبی منطقه تأثیر می‌گذارد (Monteiro et al., 2024). استان مازندران، به‌عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی کشور، به دلیل شرایط اقلیمی و سطح بالای فعالیت‌های زراعی، به‌ویژه کشت برنج، با این چالش زیست‌محیطی به شکلی حادث‌تر مواجه است. سوزاندن بقایای مزارع در این استان به‌صورت گسترده‌ای اجرا می‌شود و در طول فصول پس از برداشت محصول، به‌ویژه در تابستان و اوایل پاییز، منجر به آلودگی هوای منطقه می‌شود. این آلودگی‌ها، علاوه بر تأثیرات زیان‌بار بر محیط‌زیست، سلامت عمومی را نیز به خطر انداخته و شیوع بیماری‌های مرتبط با دستگاه تنفسی و قلبی را افزایش می‌دهد. ضرورت پرداختن به این مسئله از دو جنبه قابل تأمل است. نخست، نبود ایستگاه‌های سنجش آلودگی در استان مازندران و در نتیجه نبود داده‌های محلی معتبر برای ارزیابی میزان آلودگی، تحلیل دقیق این پدیده را دشوار کرده است. دوم، کمبود رویکردهای جامع و دقیق در شناسایی و مدیریت آلودگی ناشی از این پدیده زیست‌محیطی باعث شده است تا اهمیت مطالعات میان‌رشته‌ای، به‌ویژه با بهره‌گیری از فناوری‌های سنجش از دور و مدل‌سازی، بیش از پیش نمایان شود. به‌طور کلی، پرداختن به این چالش جدی، نیازمند توسعه ابزارها و روش‌های نوین برای تحلیل و پایش این پدیده مخرب و ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر برای کاهش اثرات آن بر محیط‌زیست و سلامت عمومی است.

در این پژوهش، برای اولین بار، میزان آلودگی ناشی از سوزاندن مزارع استان مازندران با استفاده از داده‌های ایستگاه آلودگی استان تهران تخمین زده شد، چرا که استان مازندران فاقد ایستگاه‌های سنجش آلودگی

و گندم، پنبه، دانه‌های روغنی محصولات باغی چون مرکبات و سایر محصولات دیگر کشت می‌شود و در برخی از محصولات نیز از موقعیت ممتازی برخوردار است. به طوری که از مجموع سطح زیر کشت استان ۷۲/۲ درصد به محصولات زراعی سالانه و ۲۷/۵ درصد به کشت محصولات دائمی که عمدتاً مرکبات است، اختصاص دارد. محصول مهم و استراتژیک در بخش زراعت برنج می‌باشد. مازندران با تولید متوسط یک میلیون پنجاه هزار تن برنج ۴۲ درصد برنج مورد نیاز کشور را تأمین می‌کند و مقام اول تولید برنج در کشور ایران را دارا می‌باشد. در استان مازندران هر ساله بعد از برداشت برنج، شروع به سوزاندن مزارع و کاه و کلش می‌کنند، که به دلیل شروع کشت دوم، از بین بردن آفات، قارچ، بیماری و علف هرز برنج می‌باشد، که باعث آلودگی استان در تابستان به خصوص بعد از برداشت برنج می‌باشد که سوزاندن کاه و کلش را یکی از چالش‌های زیست محیطی در استان تبدیل شده است (Yosefi Kebriya & Norooz Valashedi, 2024).

داده‌های مورد استفاده

باتوجه به عدم وجود ایستگاه آلودگی سنج هوا در استان مازندران، از داده‌های شاخص PM10 ایستگاه آلودگی سنج هوای فتح استان تهران با طول جغرافیایی ۵۱/۳۴، عرض جغرافیایی ۳۵/۶۸ و ارتفاع ۱۱۴۶ استفاده شد. شاخص‌های مختلف گیاهی، آلودگی آلاینده‌ها شامل CO، AAI و AOD و شاخص آتش سوزی استان مازندران به ترتیب توسط ماهواره‌های لندست ۸، سنتینل ۵ و مودیس از سال ۲۰۲۲-۲۰۲۴ دریافت شد و مورد بررسی قرار گرفت. لندست ۸ با تفکیک مکانی ۳۰ متر و تفکیک زمانی ۱۶ روز، امکان نظارت دقیق بر پوشش گیاهی و تغییرات در عوارض زمین را فراهم می‌کند. این ماهواره به‌ویژه در شناسایی وضعیت سلامت گیاهان و تجزیه و تحلیل کیفیت خاک کاربرد دارد. سنتینل ۵، به‌عنوان یک ماهواره اختصاصی برای نظارت بر کیفیت هوا، با تفکیک مکانی ۷ کیلومتر و تفکیک زمانی ۱ روز،

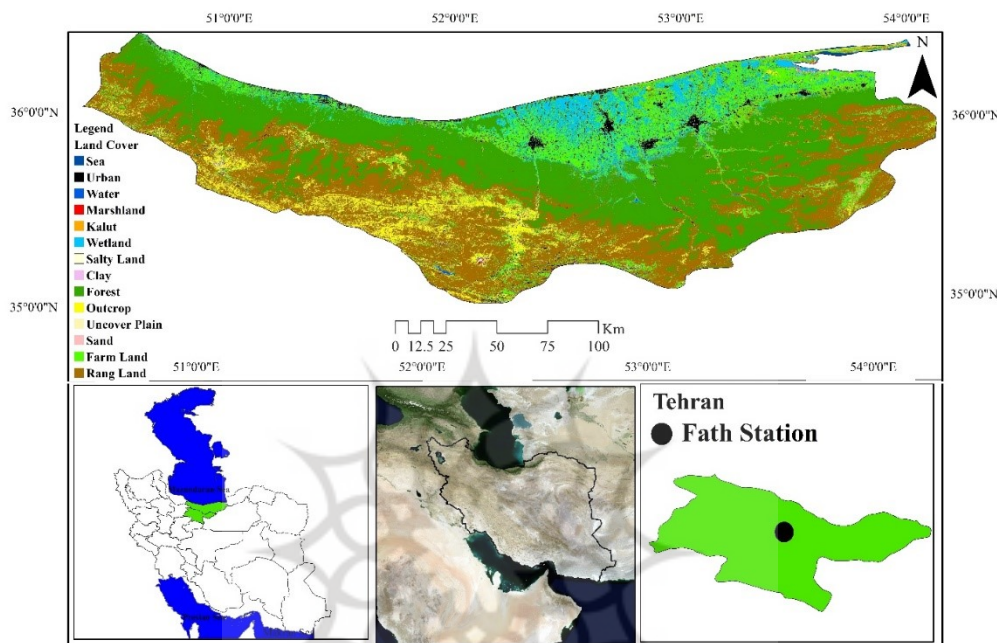
است. این اقدام با بهره‌گیری از داده‌های ایستگاه فتح تهران صورت گرفت و توانست تصویری جامع از آلودگی این منطقه ارائه دهد. علاوه بر این، از تصاویر ماهواره‌ای مختلف شامل لندست، سنتینل-۵ و مودیس استفاده شد تا آلاینده‌های هوا از جمله آلاینده‌های کربنی، AAI (شاخص جذب آئروسول) و AOD (عمق نوری آئروسول) به صورت سالانه مورد تحلیل قرار گیرد. همچنین، پوشش‌های گیاهی منطقه به تفکیک بررسی شدند، که این سطح از دقت و جزئیات برای اولین بار در این حوزه ارائه شده است. در ادامه، برای درک بهتر و بررسی دقیق‌تر آلودگی ناشی از مزارع، از تصاویر واقعی True Color ماهواره مودیس بهره گرفته شد. این تصاویر که جزئیات بیشتری از آتش سوزی و آلودگی را نمایان می‌کنند، به تحلیل جامع‌تر و مستندتری از انتشار آلاینده‌ها کمک کرده و صحت نتایج پژوهش را افزایش داده است. این پژوهش نه تنها با ارائه ابزارها و تکنیک‌های نوین، بلکه با پر کردن خلأهای موجود در شناسایی و تحلیل آلودگی مزارع استان مازندران، گامی نوآورانه در مطالعات زیست محیطی برداشته و ابزاری مؤثر برای مدیریت آلودگی در کشاورزی فراهم آورده است.

روش‌شناسی تحقیق

منطقه مورد مطالعه: استان مازندران از مناطق حاصلخیز و کشاورزی ایران که حدوداً دارای ۵۷۰/۳ هزار هکتار سطح زیر کشت اراضی می‌باشد. استان مازندران با داشتن ۲۳۷۵۶/۴ کیلومتر مربع مساحت از وسعتی معادل ۱/۴۶ درصد ایران برخوردار است. این استان، بین طول جغرافیایی ۳۴° و ۵۰° و ۵۴° و عرض جغرافیایی ۳۵°۴۷ و ۳۵°۳۵ در جنوب دریای مازندران و در شمال رشته کوه البرز قرار دارد که در شکل شماره ۱ آورده شده است. استان مازندران با توجه به موقعیت خاص اقلیمی، تنوع آب و هوایی و برخورداری از باران سالانه و پراکندگی مناسب در محصولات مختلف و دشت‌های وسیع در قسمت جلگه‌ای، از مناطق حاصلخیز و کشاورزی ایران می‌باشد. در مازندران انواع محصولات زراعی نظیر برنج

تغییرات آب و هوایی، آتش‌سوزی‌ها و پوشش گیاهی کمک می‌کند. در این پژوهش شاخص‌های مختلف ماهواره‌ای با استفاده از کد نویسی در گوگل ارث انجین استخراج شد. همچنین برای درک بهتر آلودگی حاصل از سوزاندن مزارع از تصویر واقعی مودیس استفاده شد (NOAA, 2020).

می‌تواند آلاینده‌های جوی مانند دی‌اکسید کربن، نیتروژن دی‌اکسید و اوزون را اندازه‌گیری کند و به تحلیل تأثیر آلودگی بر اکوسیستم‌ها و سلامتی عمومی بپردازد. مودیس، که بر روی ماهواره‌های Terra و Aqua نصب شده است، با تفکیک مکانی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر و تفکیک زمانی ۱ تا ۲ روز، به نظارت بر



شکل ۱: نقشه کابری اراضی استان مازندران و موقعیت جغرافیایی ایستگاه فتح استان تهران

از شاخص عمق نوری آئروسول (AOD) استفاده می‌شود که میزان جذب و پخش نور توسط ذرات معلق در جو را اندازه‌گیری می‌کند. همچنین، AQI شامل شاخص آئروسول جذب‌کننده (AAI) است که وجود لایه‌های بالایی از آئروسول‌ها را نشان می‌دهد و ارتباط بالاتر AAI با هوای آلوده‌تر و خطرات برای سلامت عمومی را تأیید می‌کند، که در جدول ۱ آورده شده است (NOAA, 2020).

شاخص آلودگی هوا: شاخص کیفیت هوا (AQI) ابزاری کلیدی برای ارزیابی و نظارت بر کیفیت هوای محیط است که به صورت روزانه یا ساعتی اندازه‌گیری می‌شود. این شاخص غلظت آلاینده‌های موجود در هوا را به یک مقدار عددی از ۰ تا ۵۰۰ تبدیل می‌کند، که مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده کیفیت بهتر هوا و خطر کمتر برای سلامت انسان‌هاست. برعکس، مقادیر بالاتر بیانگر کیفیت ضعیف‌تر و افزایش خطرات بهداشتی، به ویژه در شرایط آلودگی بالا، هستند. برای تعیین AQI،

جدول ۲: شاخص کیفیت هوا

شاخص AQI	شاخص AOD	شاخص AAI	سطح نگرانی
۵۰ - ۰	> ۰/۱	> ۰	خوب
۱۰۰ - ۵۱	۰/۴۹ - ۰/۱	۰/۵ - ۰	معمولی
۲۰۰ - ۱۰۱	۱ - ۰/۵	۲ - ۰/۵	ناسالم
۳۰۰ - ۲۰۱	۱ <	۵ - ۲	بسیار ناسالم
۳۰۰ <	-	۵ <	خطرناک

کیفیت محیط زیست منجر شود، که از رابطه‌ی ۱ بدست می‌آید (Anees et al., 2024).

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (۱)$$

مقادیر NDVI بین ۱- تا ۱+ متغیر است، مقادیر بالاتر از ۰/۲ تا ۱ نشان‌دهنده پوشش گیاهی سالم و متراکم است، مقادیر نزدیک به صفر به معنای سطوح کم یا بدون پوشش گیاهی (مانند خاک‌های خشک یا سطح آب) است. مقادیر منفی نشان‌دهنده سطوحی مانند آب یا سطوح بدون پوشش گیاهی هستند.

شاخص آتش سوزی: مجموعه‌ای از داده‌های MODIS که مربوط به نقاط آتش سوزی است، استفاده شد. این داده‌ها شامل اطلاعاتی درباره شدت و موقعیت آتش سوزی‌ها در بازه زمانی مشخص هست. با استفاده از تابع map، برای هر تصویر در مجموعه، ماسکی به نام FireMask اعمال می‌شود. این ماسک بر اساس باند FireMask ایجاد می‌شود که شدت آتش سوزی را نشان می‌دهد. فقط نقاطی که شدت آن‌ها بالاتر از ۵ است، انتخاب و ماسک می‌شود. این شاخص به مدیریت بحران و ارزیابی اثرات آتش سوزی بر محیط زیست کمک می‌کند.

در این پژوهش با استفاده از شاخص پوشش گیاهی ابتدا مزارع استان مازندران استخراج می‌شود، سپس با استفاده از شاخص آتش سوزی، مزارع سوخته شده مشخص می‌شود، سپس در بعضی از روزهای مربوط به سوزاندن مزارع استان، مناطق مرتبط مشخص می‌شود و برای صحت آتش سوزی مزارع استان از تصویر واقعی مودیس استفاده می‌شود، همچنین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۵ و مودیس تصاویر فصلی مربوط آلاینده‌های مختلف

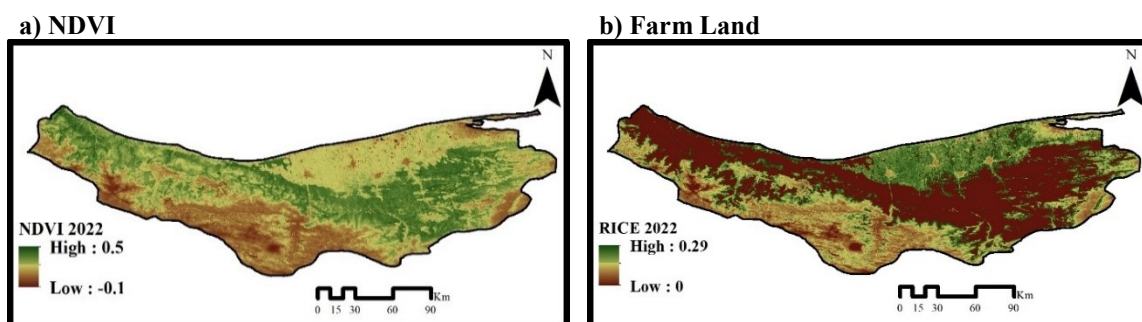
شاخص‌های گیاهی: شاخص NDVI^۱ یک ابزار مهم در سنجش از دور است که به کمک باندهای نزدیک به مادون قرمز (NIR) و قرمز (RED) از داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ محاسبه می‌شود. این شاخص به‌طور خاص برای ارزیابی سلامت پوشش گیاهی و تغییرات آن در طول زمان طراحی شده است. این شاخص به دلیل حساسیت بالایش به تغییرات در پوشش گیاهی، به‌عنوان معیاری معتبر برای شناسایی و تفکیک مناطق کشاورزی و جنگل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این مطالعه، NDVI به‌منظور شناسایی و تحلیل مناطق زراعی استان مازندران به کار گرفته شد. برای بهبود دقت نتایج و حذف مقادیر غیرضروری، NDVI با استفاده از یک ماسک خاص پردازش شد. این ماسک فقط مقادیر NDVI بین ۰/۲۱ و ۰/۲۹ را نگه می‌دارد. این دامنه به‌طور خاص انتخاب شده است تا مناطق با پوشش جنگلی که معمولاً NDVI بالاتری دارند، حذف شود. به این ترتیب، تمرکز تحلیل بر روی مزارع استان مازندران قرار می‌گیرد، که به‌واسطه این روش، امکان شناسایی دقیق‌تر و بهینه‌تر مزارع استان مازندران فراهم می‌شود که در شکل ۲ قابل مشاهده است. با استفاده از NDVI، می‌توان روندهای زمانی در سلامت پوشش گیاهی را بررسی کرده و به تحلیل تغییرات در کاربری زمین و تأثیرات محیطی ناشی از فعالیت‌های انسانی پرداخت. این اطلاعات می‌تواند به برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی کمک شایانی نماید و در نهایت به حفظ و بهبود

¹ Normalized Difference Vegetation Index

رگرسیون به تخمین آلودگی مزارع استان به صورت ماهانه و روزانه پرداخته می‌شود.

استخراج می‌شود، در نهایت با استفاده از داده‌های ایستگاه فتح تهران و داده‌های ماهواره‌ای مدل



شکل ۲: نقشه شاخص NDVI استان مازندران (a) و حذف پوشش جنگلی تبدیل به نقشه مزارع (b) استان مازندران در سال ۲۰۲۲

پوشش گیاهی)، پوشش گیاهی استان مازندران در فصل زراعی، یعنی از زمان کشت برنج تا برداشت (۰۵/۰۱ تا ۱۰/۳۱)، به استثنای سال ۲۰۲۴ که داده‌ها تا ۰۹/۰۱ در دسترس بودند)، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا پوشش گیاهی کل استان استخراج شد و سپس با اعمال فیلترهای مکانی و پوششی، مناطق جنگلی از تحلیل حذف و صرفاً مزارع شناسایی شدند. به منظور شناسایی مناطق سوزانده شده، از داده‌های ماهواره‌ای مودیس و شاخص آتش‌سوزی (FIRMS) استفاده گردید. نتایج این تحلیل در نقشه‌های ارائه شده در شکل ۳ به وضوح نشان داده شده است. بررسی نقشه‌های شکل ۳ نشان می‌دهد که در اطراف خلیج گرگان، به ویژه بخش جنوبی آن، آتش‌سوزی مزارع در تمامی سال‌های مورد بررسی (۲۰۲۲، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴) به طور مداوم رخ داده است. این الگوی مکانی حاکی از تکرار الگوهای مدیریتی و فعالیت‌های کشاورزی مشابه در این مناطق است. تحلیل نقشه‌های مربوط به سال ۲۰۲۲ نشان‌دهنده تمرکز بالای آتش‌سوزی در مزارع برنج واقع در مناطق مختلف از جمله آمل، بابل، کمربندی بابلسر، بخش‌هایی از قائمشهر و جویبار، و همچنین مناطق شرقی ساری و بخش‌های شمالی زاغمرز و بهشهر است. این گستردگی آتش‌سوزی‌ها بیانگر وابستگی شدید کشاورزان این مناطق به روش‌های

معادله تخمین آلودگی: تصاویر ماهواره‌ای مودیس در کنار داده‌های آلودگی هوا در معادله‌ی رگرسیونی به کار می‌رود، سپس هم‌مانند روش رگرسیونی، روند موجود در داده‌ها با استفاده از یک رابطه‌ی رگرسیون خطی چندگانه بین متغیر اصلی و متغیرهای کمکی محاسبه می‌شود. در نهایت نقش استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به عنوان متغیر کمکی در تخمین آلودگی مورد ارزیابی قرار گرفته و رابطه نهایی با استفاده از معادله ۲ بدست می‌آید (Yousefi Kebriya et al., 2024).

(۲)

$$\hat{f}_{(s_0)} = \hat{a} + \hat{\beta}_1 x + \hat{\beta}_2 y + \hat{\beta}_3 h + \hat{\beta}_4 n + \sum_{i=1}^n w_i z * (s_i)$$

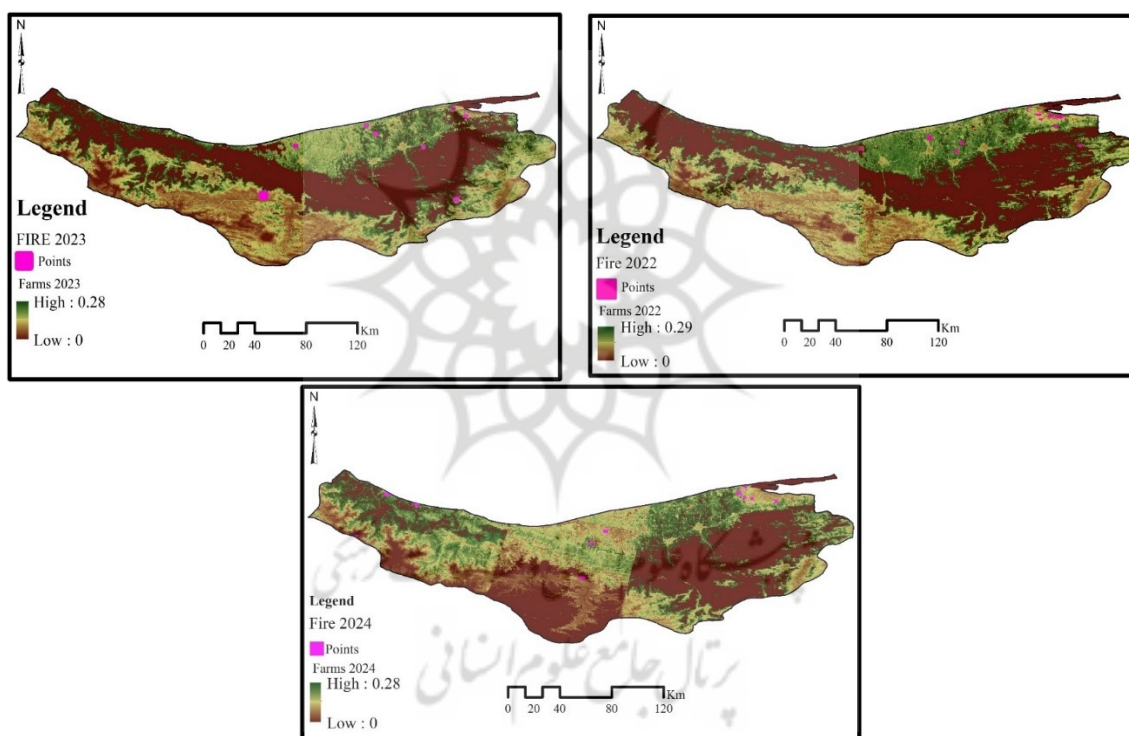
برای بررسی ارتباط بین داده‌های سنجش آلودگی ایستگاهی و داده‌های ماهواره‌ای، از ضریب همبستگی پیرسون (r)، استفاده شد. ضریب همبستگی پیرسون بین بازه ۱- و ۱ قرار می‌گیرد. مقدار r برابر با ۱ نشان‌دهنده یک رابطه خطی مستقیم کامل بین دو متغیر است، به این معنی که اگر یک متغیر افزایش (کاهش) یابد، دیگری نیز همزمان افزایش (کاهش) می‌یابد (Nadi and Yousefi Kebriya, 2024).

نتایج

تحلیل شاخص آتش‌سوزی: در این پژوهش، با استفاده از شاخص NDVI (شاخص نرمال شده تفاوت

نیز آتش‌سوزی‌های متعددی رخ داده است. این توزیع مکانی نشان‌دهنده تداوم الگوی مدیریتی غیرپایدار در استان مازندران است. نتایج حاصل از نقشه‌های ارائه‌شده در شکل ۳ به‌وضوح نشان می‌دهد که در سال‌های مختلف، پس از برداشت برنج، کشاورزان به‌طور سیستماتیک اقدام به سوزاندن بقایای مزارع برای آماده‌سازی زمین جهت کشت دوم می‌کنند. این روش که به‌دلیل هزینه پایین و سهولت اجرا مورد استفاده قرار می‌گیرد، تأثیرات گسترده‌ای بر کیفیت هوا و سلامت ساکنان مناطق شهری و روستایی استان مازندران داشته است.

سنتی آماده‌سازی زمین برای کشت مجدد است. در سال ۲۰۲۳، شدت و وسعت آتش‌سوزی‌ها در برخی مناطق افزایش یافته است. به‌ویژه مناطق آمل با گسترش قابل‌توجهی از آتش‌سوزی مواجه بوده است. افزون بر این، مزارع بهنمیر، جویبار، نکا، و همچنین بخش‌های مرتفع‌تر شرق استان، به‌طور گسترده‌ای درگیر این پدیده شده‌است. این تغییرات نشان‌دهنده روند رو به افزایش استفاده از روش‌های غیرپایدار مدیریت مزارع در این مناطق است. سال ۲۰۲۴، مناطق دابودشت آمل و مزارع اطراف شهر آمل به‌عنوان نقاط کانونی آتش‌سوزی مشخص شده‌است. همچنین در مناطق غربی استان و بخش‌های شرقی



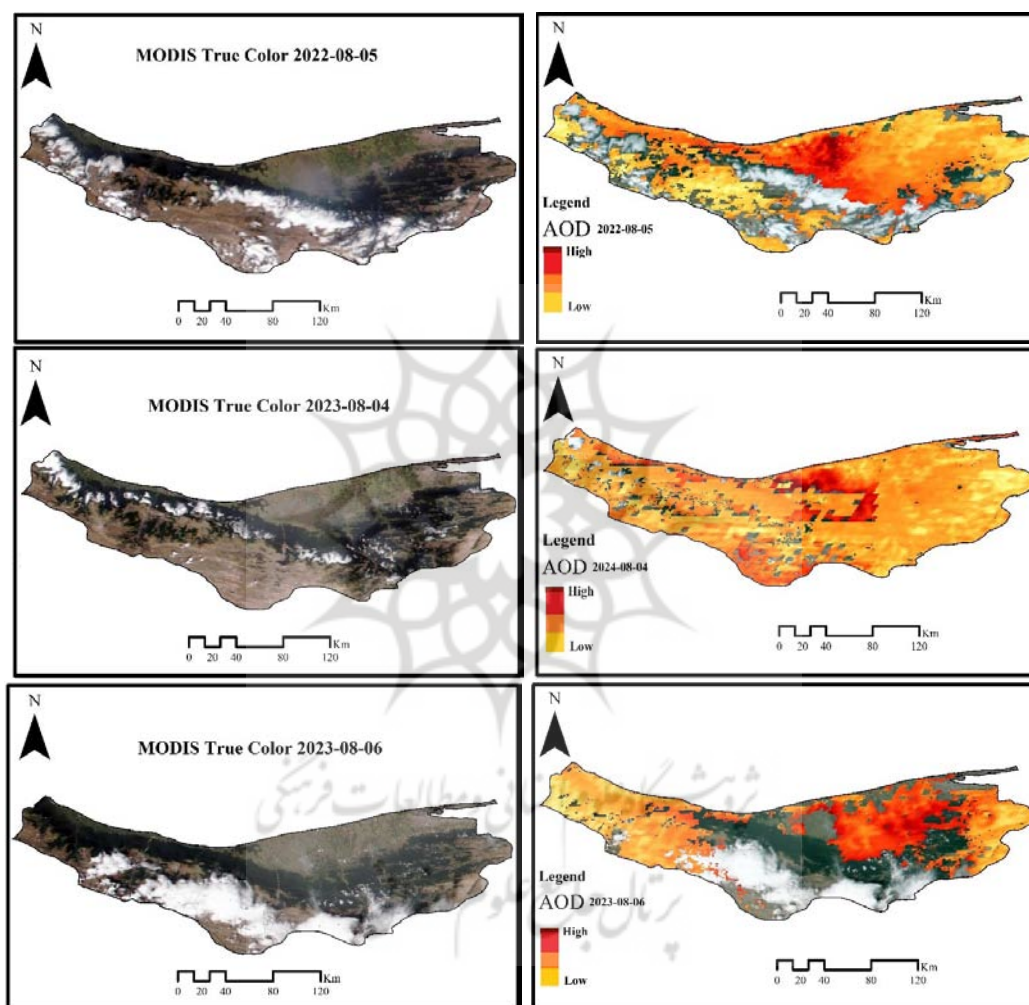
شکل ۳: موقعیت نقاط آتش‌سوزی مزارع استان مازندران در سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۲۴

با توجه به این‌که تصاویر مودیس به‌طور روزانه در دسترس هستند و تمامی عوارض مختلف سطح زمین در این تصاویر مشخص می‌شوند، بدون نیاز به فیلتر ابری قابل دریافت می‌باشند. به‌منظور افزایش دقت نتایج، از داده‌های روزهای خاصی از سال‌های ۲۰۲۲، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ که پوشش ابری کمتری داشتند و با

شاخص AOD و تصاویر واقعی مودیس: برای صحت‌سنجی نقشه‌های شاخص آتش‌سوزی که در شکل ۳ ارائه شده است، از داده‌های واقعی ماهواره‌ای مودیس استفاده شد و به‌طور مستقیم از شاخص AOD (ذرات معلق در جو) بهره‌برداری گردید. این اقدام به‌منظور تأیید صحت نتایج پژوهش انجام گرفت.

کمربندی بابل به آمل که بیشترین مزارع استان مازندران در این بخش وجود دارد، کاملاً مشهود است، همچنین بخش‌هایی از قائمشهر و ساری و مناطق اطراف خلیج گرگان نیز درگیر آتش سوزی مزارع می‌باشد، نقشه AOD این تاریخ نیز نشان می‌دهد که در بخش‌های گفته شده، بیشترین آلودگی را دارد.

فصل بعد از برداشت محصول و زمان وقوع آتش‌سوزی‌ها هم‌خوانی داشتند، استفاده شد. این انتخاب به‌منظور اطمینان از دقت و صحت تجزیه و تحلیل‌ها صورت گرفته است. باتوجه به شکل ۴ مشخص می‌شود که نقشه تاریخ ۲۰۲۲/۰۸/۰۵ گستردگی آتش سوزی بخاطر دود حاصل از سوزاندن مزارع مشخص است. مناطق آمل و بابل بخصوص در



شکل ۴: تصاویر واقعی ماهواره مودیس و نقشه شاخص AOD ماهواره مودیس

مرکزی استان به خصوص مناطقی که در مجاورت مزارع استان بودن را نسبت به سایر مناطق بالاتر نشان می‌دهد. نقشه تاریخ ۲۰۲۴/۰۸/۰۴ نشان می‌دهد که بخش‌های مرکزی و شرقی استان دچار آلودگی حاصل از آتش سوزی مزارع شده است، به طوریکه بخش‌های بابل، کمربندی بابلسر، کمربندی آمل، قائمشهر و

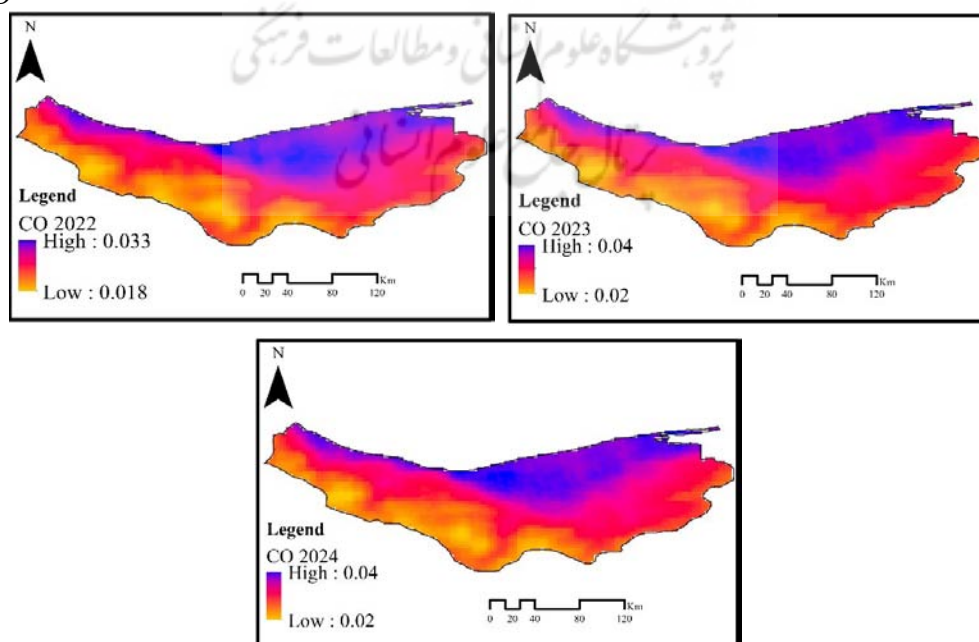
نقشه مربوط به تاریخ ۲۰۲۳/۰۸/۰۶ نشان می‌دهد که مزارع مربوط به شهر بابل و کمربندی آمل، بخش‌هایی از قائمشهر و ساری، همچنین مناطق شرقی استان دچار آلودگی حاصل از آتش سوزی مزارع شده است، که در نقشه AOD نشان داده شده است، نقشه شاخص AOD آلودگی مربوط به مناطق شرقی و

گرگان نیز بالا می‌باشد که می‌تواند به دلیل خشک شدن خلیج و افزایش گردوغبار آن باشد، مناطق مختلف استان به خصوص مناطق شهری و منطقه مربوط به نیروگاه نکا آلودگی بالاتری نسبت به سایر مناطق داشته است، همچنین مناطق زراعی آمل و بابل نیز آلودگی بالایی را در استان داشته است. نقشه شاخص AOD استان مازندران بیشترین شاخص آلودگی را مربوط به مسیرهای ورودی به استان نشان می‌دهد به خصوص جاده هراز، فیروزکوه، چالوس و راه‌های ورودی شرق استان، همچنین این شاخص در مناطق اطراف خلیج گرگان نیز بالا می‌باشد، آنچه که از نقشه دریافت می‌شود، پایین بودن شاخص AOD در مناطق جنگلی استان نسبت به مزارع و مناطق شهری استان می‌باشد، که در نقشه شکل ۵ قابل مشاهده است. باتوجه به نقشه‌ی شاخص‌های مختلف استان مازندران مشخص می‌شود که علاوه بر آلودگی مقطعی مزارع استان مازندران، منابع آلودگی‌های دیگری از جمله، نیروگاه نکا، جاده‌های اصلی استان، ورود مسافر به خصوص در نواحی ساحلی استان، خشک شدن خلیج گرگان و تالاب میانکاله می‌تواند عوامل ثابت و پایدار آلودگی هوا استان مازندران باشد (Yousefi Kebriyaei et al., 2023).

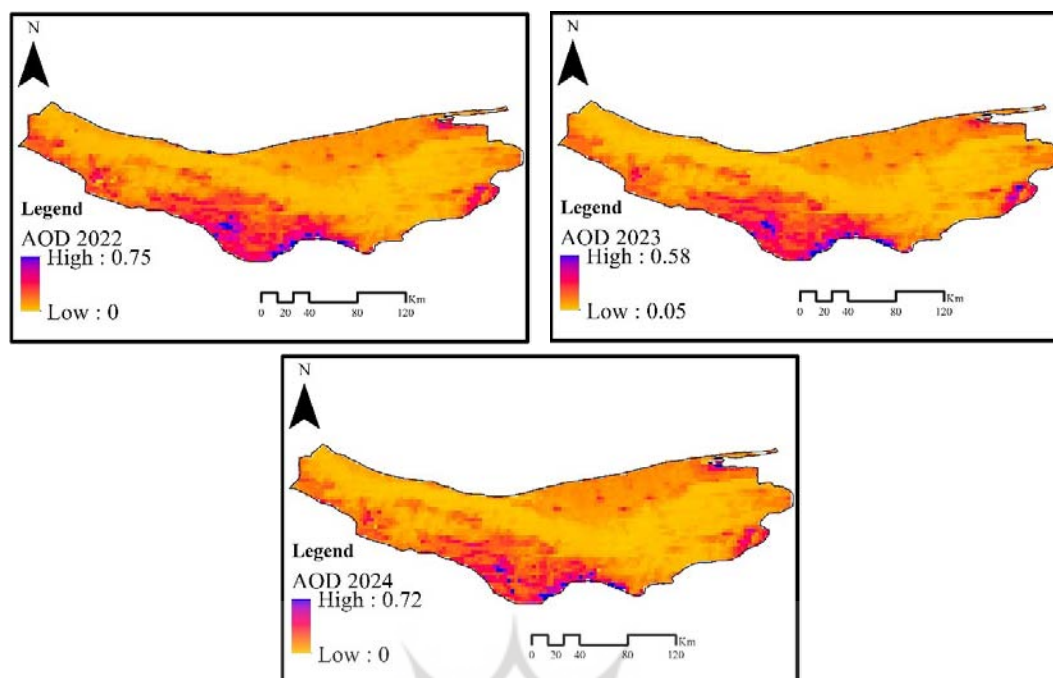
ساری و نواحی شرقی استان دچار آلودگی شده است، با توجه به شکل ۴، صحت نتایج به دست آمده از شاخص آتش سوزی که در شکل ۲ ارائه شده بود، کاملاً تأیید می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده نیاز به مدیریت بهتر و اقدامات پیشگیرانه برای کاهش آلودگی هوا ناشی از این پدیده مخرب است.

تحلیل شاخص‌های آلودگی هوا: نقشه آلاینده کربن مونواکسید و شاخص‌های AOD و AAI ماهواره سنتینل و مودیس برای استان مازندران در سال‌های ۲۰۲۲، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ (برای ماه‌های ژوئن تا سپتامبر می‌باشد) رسم شد که در شکل ۵ مشاهده می‌شود. باتوجه به نقشه آلاینده کربن مونواکسید مشاهده می‌شود که بیشتر آلودگی استات از نظر این آلاینده در بخش‌های شمالی، مناطق شهری، زراعی و نوار ساحلی بوده است، که علاوه بر اینکه سوختن مزارع باعث افزایش این آلاینده می‌شود، عبور و مرور وسایل نقلیه به خصوص در مناطق شهری و نوار ساحلی، ورود مسافر در بازه زمانی بهار و تابستان نیز تاثیر بسیار زیادی بر آلودگی این مناطق می‌گذارد. نقشه شاخص AAI استان مازندران مشخص می‌شود که مناطق غربی استان دارای آلودگی بیشتری نسبت به مناطق مرکزی استان می‌باشد، همچنین آلودگی اطراف خلیج

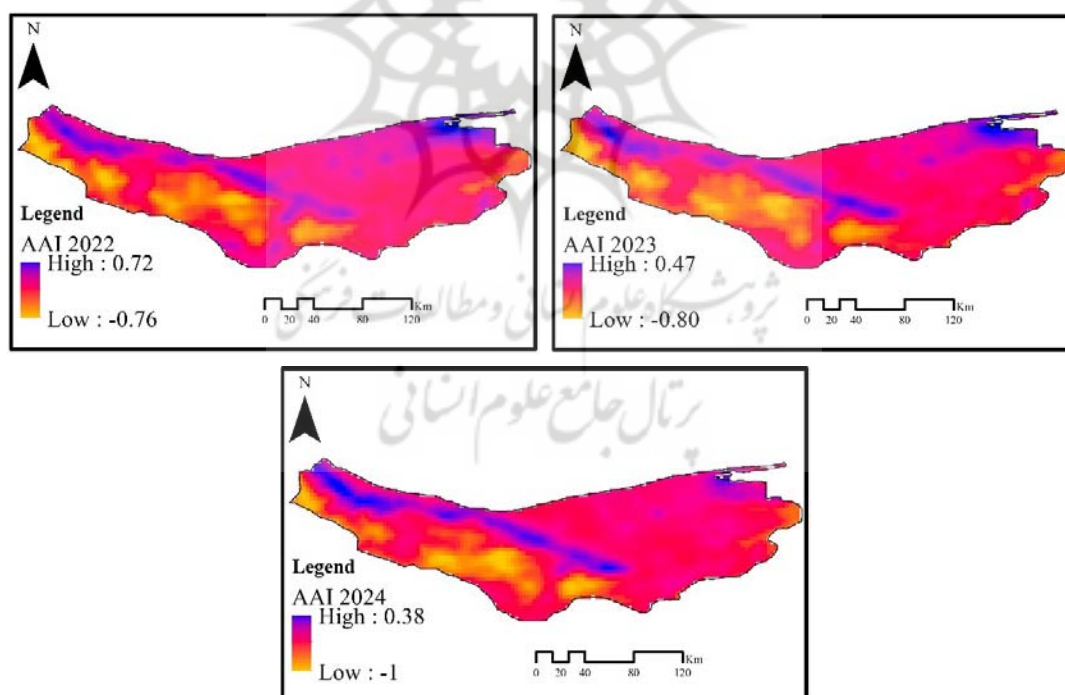
a) CO



b) AOD



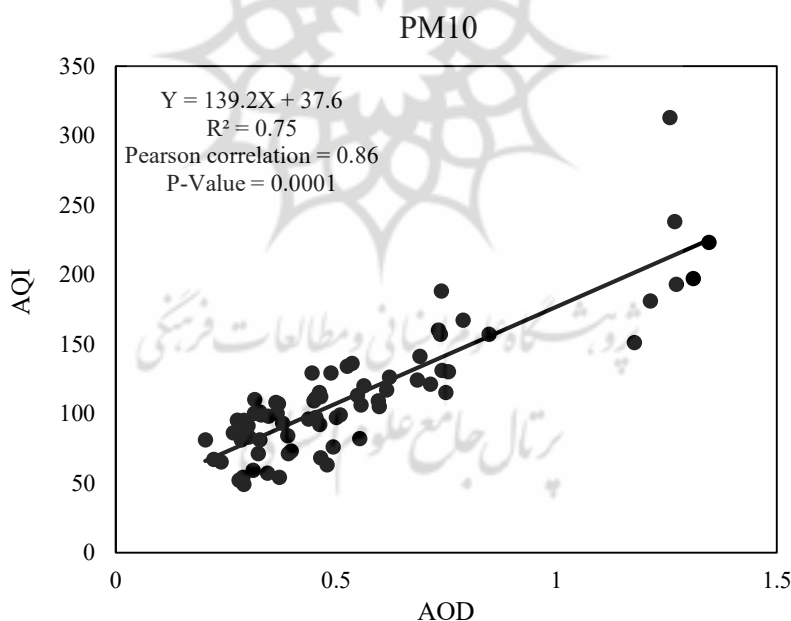
c) AAI



شکل ۵: نقشه شاخص‌های آلاینده‌های CO (a)، AOD (b) و AAI (c) در سه ماهه (ژوئیه، آگوست و سپتامبر) در سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۲۴ استان مازندران

پیرسون میان داده‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای برابر با $0/۸۶$ و ضریب تعیین (R^2) این مدل معادل $0/۷۵$ است، که نشان‌دهنده وجود رابطه‌ای قوی و معنادار میان این دو دسته داده می‌باشد. نتایج شکل ۶ به‌وضوح تأیید می‌کند که داده‌های ماهواره‌ای، علیرغم وجود برخی محدودیت‌ها، می‌توانند به عنوان یک منبع معتبر و قابل اعتماد برای تحلیل و پایش آلودگی هوا مورد استفاده قرار گیرند. این داده‌ها نه تنها دقت قابل قبولی در برآورد غلظت آلاینده PM_{10} دارند، بلکه پتانسیل بالایی برای استفاده در مطالعات علمی گسترده و کاربردهای مرتبط با مدیریت و نظارت بر کیفیت هوا را نیز فراهم می‌کنند. این یافته‌ها می‌تواند راهگشای مطالعات آینده در زمینه استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به عنوان مکمل یا جایگزین داده‌های زمینی در پایش آلودگی هوا باشند و به توسعه ابزارهای مدرن در حوزه مدیریت زیست‌محیطی کمک نمایند.

بررسی ارتباط داده‌های واقعی با داده‌های ماهواره‌ای: برای بررسی میزان آلودگی ناشی از آلاینده PM_{10} حاصل از سوزاندن مزارع برنج در استان مازندران، با توجه به محدودیت‌های موجود در دسترسی به داده‌های PM_{10} در تمامی ایستگاه‌ها و همچنین نواقص موجود در داده‌های ماهواره‌ای، از داده‌های ایستگاه آلودگی فتح واقع در استان تهران برای ۱۵۰ روز استفاده شد. به‌منظور ارزیابی میزان همبستگی داده‌های سنجنده‌های غلظت‌سنج زمینی با داده‌های ماهواره‌ای، تحلیل‌های آماری انجام شد و معادله خط رگرسیونی میان این دو مجموعه داده استخراج گردید. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها، مطابق شکل ۶، نشان می‌دهد که مقادیر به‌دست‌آمده از تحلیل داده‌ها در سطح P-Value برابر با $0,0001$ معنادار هستند. این امر بیانگر اعتبار بالای روابط آماری میان داده‌ها است. علاوه بر این، مقدار همبستگی



شکل ۶: نمودار رگرسیون خطی داده‌های غلظت سنجنده‌های زمینی و ماهواره‌ای PM_{10}

کشت برنج شامل بابل، آمل (دابودشت)، و فریدون‌کنار پرداخته است. سوزاندن بقایای گیاهی پس از برداشت

تخمین آلودگی حاصل از سوزاندن کاه و کلش مزارع: با توجه به بحران آلودگی هوا ناشی از سوزاندن بقایای گیاهی، به‌ویژه کاه و کلش برنج در مزارع استان مازندران، این مطالعه به بررسی سه منطقه اصلی

برنج، یکی از عوامل اصلی تولید آلودگی PM10 در این مناطق است. از آنجاکه در استان مازندران ایستگاه‌های کیفیت‌سنجی هوا وجود ندارد، داده‌های ایستگاه میدان فتح در استان تهران به‌عنوان مرجع برای تخمین غلظت PM10 مورد استفاده قرار گرفت.

برای تخمین آلودگی PM10، مدل رگرسیونی ارائه شده در شکل ۶ مورد استفاده قرار گرفت. معادله $Y=0.1392X+37.6$ به‌عنوان مدل پیش‌بینی آلودگی PM10 انتخاب شد، که ارتباط معناداری بین متغیر مستقل (AOD) و وابسته (PM10) نشان می‌دهد. این مدل با استفاده از داده‌های معتبر توسعه یافته و دقت قابل قبولی را در پیش‌بینی میزان PM10 ارائه داده است. داده‌های دوره زمانی اواخر تیرماه تا اواخر شهریورماه، که فصل برداشت برنج در مازندران است، نشان می‌دهند که در این بازه زمانی غلظت PM10 در اکثر مزارع به‌طور قابل توجهی بالاتر از سایر ماه‌های سال است. این افزایش غلظت، به‌ویژه در روزهای برداشت و سوزاندن کاه و کلش، به‌وضوح در نمودارهای روزانه و ماهانه مشاهده می‌شود. دلایل اصلی این افزایش، سوزاندن بقایای گیاهی و انتشار ذرات معلق ناشی از آن است.

در این پژوهش، با توجه به اهمیت و سهم قابل توجه ذرات معلق PM10 در آلودگی هوا و اثرات آن بر سلامت عمومی، تنها این آلاینده به‌عنوان محور اصلی بررسی انتخاب شده است. یکی از منابع اصلی انتشار PM10 در مناطق کشاورزی، سوزاندن بقایای گیاهی نظیر کاه و کلش است که به دلیل اندازه بزرگ‌تر ذرات تولید شده، به‌طور عمده آلاینده‌های PM10 ایجاد می‌کند. بر اساس شکل ۷ که نمودارهای روزانه و ماهانه شاخص کیفیت هوا (AQI) برای آلاینده PM10 در مزارع شهرستان بابل را نشان می‌دهد، دو دوره زمانی مشخص در سال ۲۰۲۲ شناسایی شده است که در آن‌ها شاخص آلودگی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. نخستین دوره در فصل بهار و به‌ویژه در ایام تعطیلات نوروزی بوده است. در این بازه زمانی، به دلیل افزایش حجم مسافران ورودی به استان مازندران و شهرستان بابل، شاخص آلودگی هوا به شکل

محسوسی افزایش یافته است و نشان‌دهنده تأثیر ترافیک مسافری و تراکم جمعیت در ایام تعطیل بر کیفیت هوا است (Yousefi Kebriya et al., 2023).

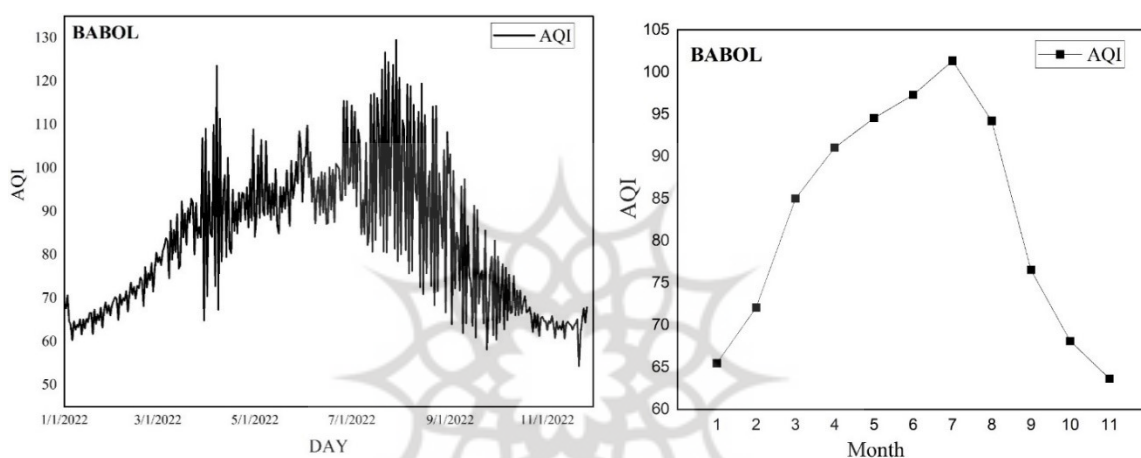
دومین دوره زمانی که در فصل تابستان رخ داده است، به زمان برداشت محصول برنج و سوزاندن کاه و کلش مربوط می‌شود. این دوره با افزایش طولانی‌مدت شاخص آلودگی هوا همراه بوده و نمودار ماهانه نیز این روند را به وضوح نشان می‌دهد. داده‌ها حاکی از آن است که سوزاندن بقایای برنج در این بازه زمانی، شاخص آلودگی هوا را به‌طور میانگین روزانه تا سطوح ناسالم برای گروه‌های حساس (بیش از ۱۲۰) رسانده است. این امر اهمیت مدیریت پایدار در برخورد با پس‌ماندهای کشاورزی را برجسته می‌کند.

شکل ۸ نیز روند مشابهی را برای مزارع شهرستان آمل نشان می‌دهد. در این منطقه، به دلیل گستردگی بیشتر مزارع برنج نسبت به شهرستان بابل، حجم آلودگی در بازه دوم (فصل برداشت محصول) به مراتب بالاتر بوده است. شاخص آلودگی هوا در این منطقه در برخی ماه‌ها به بیش از ۱۰۰ رسیده که نشان‌دهنده وضعیت ناسالم برای گروه‌های حساس است. پس از اتمام فصل برداشت و توقف سوزاندن بقایا، شاخص آلودگی به شرایط سالم بازمی‌گردد، که به‌وضوح تأثیر مستقیم این فعالیت کشاورزی بر کیفیت هوا را تأیید می‌کند.

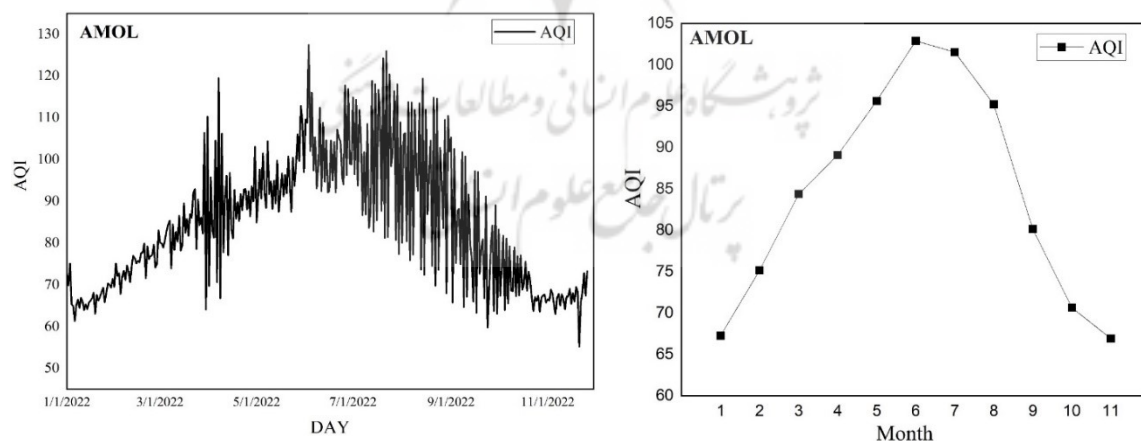
در شکل ۹، تحلیل شاخص آلودگی هوا در شهرستان فریدون‌کنار ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بازه تعطیلات نوروزی، به دلیل نزدیکی مزارع این منطقه به جاده‌ها، فاصله کم میان مناطق شهری و کشاورزی، و مجاورت با دریا، شاخص آلودگی در فریدون‌کنار نسبت به آمل و بابل بالاتر بوده است. علاوه بر این، به دلیل کمتر بودن وسعت مزارع زراعی و کاشت زود هنگام برنج در این منطقه (Yousefi Kebriya et al., 2024)، انتشار آلودگی ناشی از سوزاندن بقایای کشاورزی زودتر از سایر مناطق رخ داده است. در برخی روزها، شاخص آلودگی این منطقه به بیش از ۱۳۰ نیز رسیده که در نمودار ماهانه نیز این وضعیت قابل مشاهده است.

کشاورزی را برجسته می‌سازد. این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که نظارت مداوم بر غلظت PM_{10} و توسعه سیاست‌های مدیریتی مناسب در مناطق کشاورزی می‌تواند گامی مؤثر در کاهش آلودگی ناشی از سوزاندن بقایای گیاهی باشد. همچنین استفاده از داده‌های مشابه و مدل‌های رگرسیونی برای پایش و تحلیل کیفیت هوا در سایر مناطق کشاورزی ایران می‌تواند به سیاست‌گذاری‌های جامع در این حوزه کمک کند.

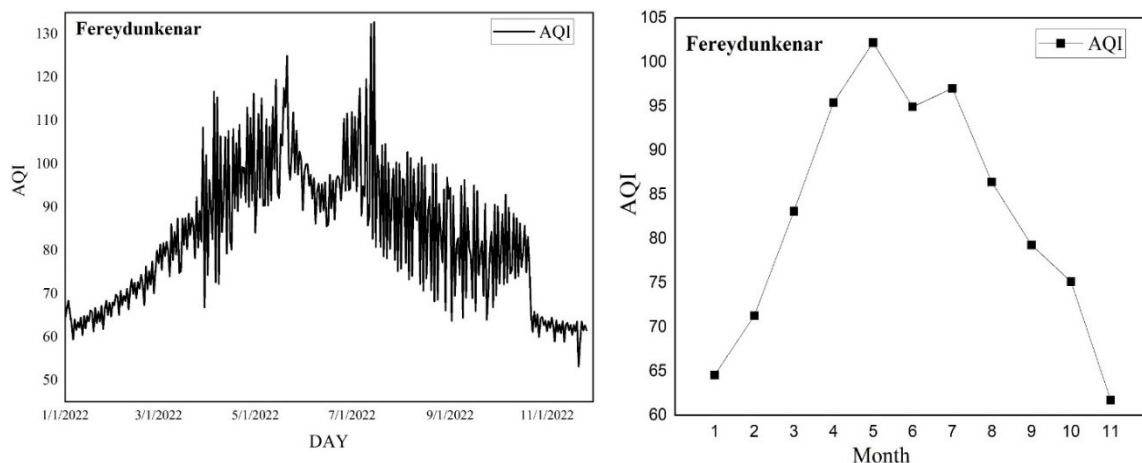
این پژوهش بر اهمیت مدیریت پایدار و مسئولانه پس‌مانده‌های کشاورزی تأکید دارد. جایگزینی روش‌های سنتی و مضر مانند سوزاندن بقایای کشاورزی با روش‌های مدرن و دوستدار محیط زیست نظیر کمپوست‌سازی، می‌تواند به شکل مؤثری انتشار ذرات PM_{10} را کاهش داده و اثرات مخرب آن بر کیفیت هوا و سلامت عمومی را به حداقل برساند. این نتایج، ضرورت توجه سیاست‌گذاران و مسئولان محلی به راهکارهای نوین و اقدامات پیشگیرانه برای بهبود کیفیت هوا و کاهش اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های



شکل ۷: نمودار روزانه و ماهانه آلودگی AQI آلاینده‌ی PM_{10} مزارع بابل



شکل ۸: نمودار روزانه و ماهانه آلودگی AQI آلاینده‌ی PM_{10} مزارع آمل



شکل ۹: نمودار روزانه و ماهانه آلودگی AQI آلاینده‌ی PM10 مزارع فریدون کنار

بحث

(2023). در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر سوزاندن باقی‌مانده‌های محصول بر غلظت‌های PM2.5 محلی در استان هیلونگ‌جیانگ چین پرداخته شد. نتایج نشان داد که تعداد نقاط سوزاندن باقی‌مانده‌های محصول با تغییرات غلظت PM2.5 در مقیاس استانی (منطقه‌ای) همبستگی نداشت، اما در مقیاس محلی تأثیر قابل توجهی بر تغییرات غلظت PM2.5 داشت. با استفاده از داده‌های MOD14A1 و داده‌های پوشش زمین ملی، مناطق سوزاندن باقی‌مانده‌ها استخراج شد. تحقیق نشان داد که شعاع اثر سوزاندن باقی‌مانده‌ها بین ۵۰ تا ۸۰ کیلومتر بوده و غلظت متوسط PM2.5 در ایستگاه‌های نزدیک به نقاط سوزاندن بیش از ۶۰ میکروگرم بر مترمکعب بیشتر از ایستگاه‌های دور از این نقاط بود (Chen et al., 2017). در پژوهشی به بررسی اثرات سوزاندن بقایای کشاورزی بر کیفیت هوا در فصل برداشت پاییزه پرداخته و از داده‌های سنجش از دور برای شناسایی آتش‌سوزی‌ها و اندازه‌گیری آلودگی هوا استفاده کرده است. نتایج نشان می‌دهند که سوزاندن بقایا باعث افزایش غلظت‌های PM2.5 و PM10 به ترتیب به میزان ۲۷ و ۲۲ میکروگرم در مترمکعب می‌شود. همچنین، آلودگی هوای ناشی از سوزاندن بقایای کشاورزی در مناطق تولید غلات ۴۰ درصد بیشتر از میانگین است (Zhao et al., 2024). اکثر پژوهش‌های صورت گرفته خارجی بوده و پژوهش داخلی به این صورت انجام نشده است، این پژوهش

سوزاندن بقایای محصولات زراعی بر محیط زیست و سلامت انسان چه در جنبه آلودگی هوا، تغییرات آب و هوایی منطقه‌ای، جهانی، و آلودگی هوای فرامرزی تأثیر منفی می‌گذارد. امکانات ضعیف ذخیره سازی کاه، عدم تقاضای بازار برای استفاده بیشتر، دستمزد بالای کارگر و نگرانی کشاورزان برای جمع‌آوری و عرضه زود هنگام محصول زراعی، دفع را بسیار دشوار می‌کند و بقایای محصول با رطوبت بالا باقی می‌ماند و بیشتر در معرض سوزاندن باز قرار می‌گیرد، که سبب آلودگی هوا مناطق اطراف مزارع و مناطق مسکونی می‌شود. در همین راستا پژوهش‌هایی نیز صورت گرفته است، در پژوهشی میزان سوزاندن بقایای کشاورزی در منطقه جنوب شرقی آناتولی ترکیه را بررسی کرده است. تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 برای شناسایی توزیع مکانی انواع محصولات زراعی و تعیین مزارع سوخته در سال ۲۰۱۹ با استفاده از پلتفرم Google Earth Engine استفاده شده است. برای محاسبه انتشار گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق، استانداردهای IPCC به کار گرفته شد و نقشه‌های دی‌اکسید نیتروژن با استفاده از تصاویر Sentinel-5P تولید و با داده‌های انتشار مقایسه شد. نتایج نشان داد که در سال ۲۰۱۹، حدود ۱۴۴۴۴/۳۰۷ گیگاگرم گازهای گلخانه‌ای و ۱۱۷/۸۰۹ گیگاگرم ذرات معلق ناشی از سوزاندن بقایا منتشر شده است (Bahsi et al., 2023).

علاوه بر استفاده از داده‌های سنتینل ۵ و سنتینل ۲ از ماهواره مودیس نیز استفاده شد، همچنین برای اثبات آتش سوزی و ارزیابی از تصاویر واقعی استفاده شد و به پایش آلاینده‌های CO و PM پرداخته شد، در نهایت با استفاده از داده‌های واقعی و مدل رگرسیونی نمودار ماهانه و روزانه آلودگی در مزارع مهم استان مازندران رسم شد، که از اولین پژوهش‌های صورت گرفته در استان مازندران می‌باشد. به منظور جلوگیری از آتش زدن مزارع برنج، پیشنهاد می‌شود که تسهیلاتی برای ذخیره‌سازی بقایای محصولات زراعی ایجاد شود تا نیاز به سوزاندن آن‌ها کاهش یابد. همچنین، ارتقاء بازار برای محصولات تولید شده از بقایای کشاورزی، مانند استفاده از آن‌ها به عنوان سوخت یا در تولید کود، می‌تواند مؤثر باشد. تحقیق و توسعه در زمینه فناوری‌های نوین برای استفاده از بقایای کشاورزی به جای سوزاندن نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. برگزاری کارگاه‌ها و دوره‌های آموزشی برای کشاورزان درباره روش‌های بهینه مدیریت بقایای کشاورزی و تأثیرات سوزاندن آن‌ها نیز ضروری است. علاوه بر این، ایجاد همکاری‌های میان دولت، کشاورزان و سازمان‌های غیر دولتی برای مدیریت پایدار بقایای کشاورزی و کاهش آلودگی هوا می‌تواند به بهبود وضعیت فعلی کمک کند. اجرای این پیشنهادات می‌تواند به کاهش آلودگی هوا و حفظ محیط زیست کمک شایانی نماید.

نتیجه‌گیری

این تحقیق با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست، مودیس و سنتینل ۵ به منظور بررسی آلودگی حاصل از سوزاندن مزارع صورت گرفته است، به همین منظور از شاخص NDVI برای شناسایی مناطق پوشش گیاهی استان استفاده شد، سپس با فیلتر کردن پوشش جنگلی مزارع استان از جنگل‌ها تفکیک گردید و با استفاده از شاخص آتش سوزی ماهواره مودیس، مزارع سوخته شده در سال‌های ۲۰۲۲، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ شناسایی شد. همچنین برای صحت روش مود نظر از تصاویر واقعی ماهواره مودیس

استفاده شد، علاوه بر این با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مودیس و سنتینل ۵ شاخص آلودگی کربن مونواکسید، AAI و AOD رسم شد، در نهایت با استفاده از داده‌های واقعی ایستگاه فتح استان تهران و داده‌های ماهواره‌ای، یک مدل رگرسیونی برای تخمین میزان آلودگی مزارع استان مازندران شکل گرفت و نمودار روزانه و ماهانه سال ۲۰۲۲ شاخص AQI مزارع شهرهای بابل، آمل و فریدون کنار رسم شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مناطق بابل، آمل، قائمشهر، ساری و نواحی شرقی استان مازندران بیشترین میزان آتش سوزی در مزارع را تجربه کرده‌اند، که به‌طور مستقیم باعث افزایش آلودگی هوا در این مناطق در مقطع زمانی مورد نظر شده است. تحلیل صحت نتایج با استفاده از تصاویر واقعی ماهواره‌ای MODIS نیز تأیید کرد که آتش سوزی‌ها عمدتاً در مزارع بخش‌های بابل، آمل، کمربندی بابلسر و نواحی شرقی استان رخ داده‌اند. نقشه‌های تولید شده از شاخص آلودگی هوا نیز نشان داد که نواحی نوار ساحلی و جاده‌های اصلی استان بیشترین میزان آلودگی را دارا می‌باشند، که این نشان‌دهنده تجمع بالای آلاینده‌ها در این نواحی پر تردد و حساس است. در این راستا، مشخص شد که در مقاطع زمانی خاص، به‌ویژه در فصل‌های پس از برداشت برنج و سوزاندن مزارع، میزان آلودگی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، مقایسه داده‌های واقعی ایستگاه‌های هواشناسی با داده‌های ماهواره‌ای نشان داد که این داده‌ها در سطح یک درصد معنی‌دار بوده و ضریب تعیین ۰/۷۵ به‌طور مؤثری ارتباط قوی و معناداری را میان این دو مجموعه داده برقرار می‌کند. این یافته‌ها مبنای محکمی برای استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به عنوان ابزاری مؤثر برای پایش و پیش‌بینی آلودگی‌های ناشی از آتش سوزی مزارع فراهم می‌آورد. در ادامه، با استفاده از مدل رگرسیونی، تخمین‌های دقیقی از میزان آلودگی شاخص PM10 در مزارع برنج استان در شهرستان‌های بابل، آمل و فریدون کنار به‌دست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که پس از فصل برداشت برنج و در نتیجه سوزاندن مزارع برنج برخی روزها

شاخص AQI به بیش از ۱۲۰ می‌رسد. بررسی میانگین ماهانه شاخص AQI در این تحقیق نیز نشان داد که در ماه‌های برداشت برنج و سوزاندن کاه و کlesh، شاخص آلودگی از سایر ماه‌ها بالاتر بوده و این روند به‌ویژه در مناطق کشاورزی و اطراف مزارع به وضوح مشاهده می‌شود. داده‌های به‌دست‌آمده از این پژوهش، اهمیت مدیریت پسماندهای کشاورزی و نیاز به جایگزینی روش‌های پایدارتر با سوزاندن بقایای مزارع را به‌وضوح نشان می‌دهد. برای کاهش این پدیده، می‌توان از فناوری‌های جدید نظیر تجهیزات مکانیزه خرد کردن بقایای کشاورزی و توزیع آنها در مزارع استفاده کرد. همچنین، سیاست‌های آموزشی و

ترویجی برای آگاه‌سازی کشاورزان از اثرات زیان‌بار سوزاندن مزارع و معرفی روش‌های پایدار، نقش مهمی در تغییر رفتارهای مدیریتی خواهد داشت. پایش مستمر مناطق کشاورزی با استفاده از فناوری‌های سنجش از دور و تحلیل‌های مکانی دقیق، به‌عنوان ابزارهایی قدرتمند برای نظارت بر آتش‌سوزی‌ها و ارائه راهکارهای مؤثر، ضروری به نظر می‌رسد. این تحلیل، علاوه بر تشریح جزئیات مکانی و زمانی آتش‌سوزی‌ها، اهمیت توسعه سیاست‌های جامع مدیریتی برای کاهش اثرات مخرب این فعالیت‌ها بر محیط‌زیست و سلامت عمومی را برجسته می‌سازد.

منابع

1. Aggarwal, S., Srinivas, R., Puppala, H., & Magner, J. (2022). Integrated decision support for promoting crop rotation based sustainable agricultural management using geoinformatics and stochastic optimization. *Computers and Electronics in Agriculture*, 200, 107213. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107213>
2. Anees, S. A., Mehmood, K., Akhtar, R., Rehman, N. U., Sultan, M., Shahzad, F., Hussain, K., Luo, M., Alarfaj, A. A., Alharbi, S. A., & Khan, W. R. (2024). Unveiling fractional vegetation cover dynamics: A spatiotemporal analysis using MODIS NDVI and machine learning. *Environmental and Sustainability Indicators*, 24, 100485. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100485>
3. Bahşi, K., Ustaoglu, B., Aksoy, S., & Sertel, E. (2022). Estimation of emissions from crop residue burning in Türkiye using remotely sensed data and the Google Earth Engine platform. *Geocarto International*, 38(1). <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2157052>
4. Chen, Z., Chen, D., Zhuang, Y., Cai, J., Zhao, N., He, B., Gao, B., & Xu, B. (2017). Examining the influence of crop residue burning on local PM2.5 concentrations in Heilongjiang province using ground observation and remote sensing data. *Remote Sensing*, 9(10), 971. <https://doi.org/10.3390/rs9100971>
5. Cordeiro, E. U., Hamilton, D. S., Rossiter, D. G., Mahowald, N., Hess, P., Malik, R., Singh, A., Samaddar, A., & McDonald, A. J. (2024). Rice residue burning trajectories in Eastern India: Current realities, scenarios of change, and implications for air quality. *Environmental Research Letters*, 19(1), 014006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0a1b>
6. Kalluri, R. O. R., Zhang, X., Bi, L., Zhao, J., Yu, L., & Kotalo, R. G. (2020). Carbonaceous aerosol emission reduction over Shandong province and the impact of air pollution control as observed from synthetic satellite data. *Atmospheric Environment*, 222, 117150.
7. Keshavarz, N., Ansari, V., & Salami, H. (2023). Investigation of economies of size in rice paddies of Guilan province. *Agricultural Economics*, 16(4), 115-146. <https://doi.org/10.22034/iaes.2023.560148.1937>
8. Khanal, S., Pokhrel, R. P., Pokharel, B., Becker, S., Giri, B., Adhikari, L., & LaPlante, M. D. (2022). An episode of transboundary air pollution in the central Himalayas during agricultural residue burning season in North India. *Atmospheric Pollution Research*, 13(1), 101270.
9. Monteiro, A. T., Arenas-Castro, S., Punalekar, S. M., Cunha, M., Mendes, I., Giamberini, M., Marques da Costa, E., Fava, F., & Lucas, R. (2024). Remote sensing of vegetation and

- soil moisture content in Atlantic humid mountains with Sentinel-1 and 2 satellite sensor data. *Ecological Indicators*, 163, 112123. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112123>
10. Nguyen, C. G., Nguyen, Q. C., & Dang, V. K. (2024). Estimation of greenhouse gas emission due to open burning of rice straw using Sentinel data. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 46(3), 381-398. <https://doi.org/10.15625/2615-9783/20716>
 11. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), (2020). NOAA ESRL global monitoring laboratory: SURFRAD aerosol optical depth. <https://gml.noaa.gov/grad/surfrad/aod/>, accessed in 2020.
 12. Pazhanivelan, S., Sudarmanian, N. S., Geethalakshmi, V., Deiveegan, M., Ragunath, K., Sivamurugan, A. P., & Shanmugapriya, P. (2024). Assessing methane emissions from rice fields in large irrigation projects using satellite-derived land surface temperature and agronomic flooding: A spatial analysis. *Agriculture*, 14(3), 496. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030496>
 13. Singh, D., Kundu, N., & Ghosh, S. (2021). Mapping rice residues burning and generated pollutants using Sentinel-2 data over northern part of India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100486. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100486>
 14. Wen, H., Hu, X., & Zhong, P. (2024). Detecting rice straw burning based on infrared and visible information fusion with UAV remote sensing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 222, 109078. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109078>
 15. Yosefi Kebriya, A., & Norooz Valashedi, R. (2024). Presenting the suitable planting calendar of Tarem Hashemi rice variety in Mazandaran Province using remote sensing technique. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 2(3), 1-17. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8087.1076>
 16. Yousefi Kebria, A., Nadi, M., Ghanbari Parmehr, E., & Sun, Z. 2024. Correlation between the changing Shadegan wetland extent and dust emission using remote sensing techniques. *Journal of Watershed Management Research*, 15(1): 1-15.
 17. Yousefi Kebriya, A., Nadi, M., & Ghanbari Parmehr, E. (2023). Estimation of ozone and nitrogen dioxide pollutants in Mazandaran Province using sentinel 5 satellite images. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 16(1), 56-65. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.01.07>
 18. Zhao K, Tian X, Lai W, Xu S (2024) Agricultural production and air pollution: An investigation on crop straw fires. *PLoS ONE* 19(5): e0303830. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303830>



پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی