

Satellite-Based Analysis of Black Carbon Pollutant in Tehran, Iran: Ground Validation and Future Outlook

Poorya Shahverdi¹, Faezeh Borhani^{2*}

1. Master student, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

Black Carbon (BC) is a critical air pollutant with significant impacts on public health and climate. This study provides a comprehensive analysis of two-decade BC concentration trends over Tehran, Iran, by integrating satellite observations with ground-based measurements. We utilized monthly mean BC surface mass concentration data from the MERRA-2 reanalysis product from 2002 to 2021 and compared it against daily measurements from a ground-based Aethalometer station (2014–2017). The results reveal a significant discrepancy between the two datasets, with MERRA-2 underestimating ground-level BC concentrations by approximately a factor of four. A Wilcoxon signed-rank test confirmed that the datasets are statistically distinct ($p < 0.001$). Despite the difference in magnitude, MERRA-2 successfully captures the strong seasonal cycle of BC, with pronounced peaks in winter and minimums in summer, driven by meteorological conditions. A Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA) model was developed based on the 20-year historical MERRA-2 data to forecast future trends. The model demonstrated strong predictive performance and projects a continuation of the current elevated concentrations and seasonal patterns. This study highlights the utility of satellite data for long-term trend analysis while underscoring the necessity of ground-based data for accurate local air quality assessment and public health applications. The forecast provides a quantitative baseline for future environmental planning in Tehran.

Review History

Received: Jul 31, 2025

Revised: Sep 10, 2025

Accepted: Oct 11, 2025

Keywords

Black Carbon

Remote Sensing

Trend Analysis

Timeseries Forecasting

Tehran

* Corresponding Author Email: f.borhani@modares.ac.ir



Copyright © 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

تحلیل ماهواره‌ای آلاینده کربن سیاه در تهران، ایران: اعتبارسنجی زمینی و چشم‌انداز آینده

پوریا شاهوردی^۱، فائزه برهانی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

کربن سیاه (BC) یک آلاینده هوای مهم با اثرات قابل توجه بر بهداشت عمومی و اقلیم است. این مطالعه با تلفیق مشاهدات ماهواره‌ای و اندازه‌گیری‌های زمینی، یک تحلیل جامع از روندهای دو دهه غلظت BC بر فراز تهران، ایران، ارائه می‌دهد. ما از داده‌های میانگین ماهانه غلظت جرمی BC در سطح زمین از MERRA-2 برای دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ استفاده کردیم و آن را با اندازه‌گیری‌های روزانه از یک ایستگاه اتالومتر زمینی (۲۰۱۴-۲۰۱۷) مقایسه نمودیم.

کلمات کلیدی

کربن سیاه
سنجش‌ازدور
تحلیل روند
پیش‌بینی سری زمانی
تهران

نتایج نشان‌دهنده یک مغایرت قابل توجه بین دو مجموعه داده است، به‌طوری‌که MERRA-2 غلظت BC در سطح زمین را چهار برابر کمتر برآورد می‌کند. آزمون Wilcoxon signed-rank تأیید کرد که این مجموعه داده‌ها از نظر آماری متمایز هستند ($p < 0.001$). علی‌رغم تفاوت در بزرگی، MERRA-2 با موفقیت چرخه فصلی قوی BC را، با قله‌های برجسته در زمستان و کمینه‌ها در تابستان که ناشی از شرایط هواشناسی است، ثبت می‌کند. یک مدل SARIMA بر اساس داده‌های تاریخی ۲۰ ساله MERRA-2 برای پیش‌بینی روندهای آینده توسعه داده شد. این مدل عملکرد پیش‌بینی قوی از خود نشان داد و ادامه غلظت‌های بالای فعلی و الگوهای فصلی را پیش‌بینی می‌کند. این مطالعه اهمیت داده‌های ماهواره‌ای را برای تحلیل روندهای بلندمدت برجسته می‌کند و هم‌زمان بر ضرورت داده‌های زمینی برای ارزیابی دقیق کیفیت هوای محلی و کاربردهای بهداشت عمومی تأکید می‌نماید. پیش‌بینی حاصل، یک مبنای کمی برای برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی آینده در تهران فراهم می‌کند.

۱- مقدمه

فعالیت‌های صنعتی و شرایط خاص هواشناسی که اغلب باعث به دام افتادن آلاینده‌ها می‌شوند، از کانون‌های اصلی آلودگی BC هستند. مدیریت مؤثر کیفیت هوا در چنین مناطقی به داده‌های دقیق و جامع از نظر مکانی و زمانی بستگی دارد. با این حال، شبکه‌های پایش زمینی سنتی، اگرچه «استاندارد طلایی» دقت محسوب می‌شوند، اغلب با محدودیت‌های قابل توجهی از جمله هزینه‌های عملیاتی بالا و پوشش مکانی پراکنده روبرو هستند. در نتیجه، داده‌های حاصل از تعداد محدودی از ایستگاه‌های زمینی ممکن

کربن سیاه (BC)، یکی از اجزای اصلی ذرات معلق ریز ($PM_{2.5}$)، یک آلاینده هوای مهم است که از احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی و سوخت‌های زیستی تولید می‌شود (Borhani et al, 2024). بنابراین، مدیریت و کاهش انتشار BC از اولویت‌های حیاتی برای بهداشت عمومی و علوم اقلیمی، به‌ویژه در مناطق شهری پرجمعیت است. کلان‌شهرهایی مانند تهران، به دلیل تراکم بالای ترافیک،

* رایانامه نویسنده مسئول: f.borhani@modares.ac.ir

غلظت‌های آینده BC.

۲- مواد و روش‌ها

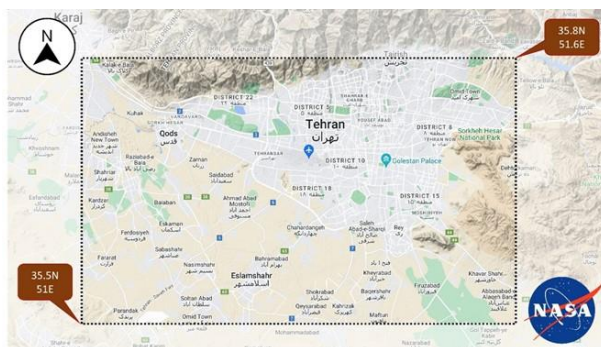
۲-۱- محدوده مورد بررسی

این تحقیق بر روی تهران، پایتخت و پرجمعیت‌ترین شهر ایران، متمرکز است. تهران به عنوان یکی از بزرگترین کلان‌شهرهای خاورمیانه با چالش‌های مداوم و شدید آلودگی هوا روبرو است که آن را به یک منطقه حیاتی برای مطالعات زیست‌محیطی تبدیل می‌کند.

قلمرو جغرافیایی مشخص برای این مطالعه، منطقه بزرگ کلان‌شهری تهران را در بر می‌گیرد که با مختصات عرض جغرافیایی 35.5 درجه تا 35.8 درجه شمالی و طول جغرافیایی 51.0 درجه تا 51.6 درجه شرقی تعریف می‌شود. توپوگرافی منحصربه‌فرد این شهر یک عامل کلیدی در تأثیرگذاری بر کیفیت هوای آن است. این شهر در دامنه رشته‌کوه البرز در شمال واقع شده است که به عنوان یک مانع طبیعی عمل کرده و به طور مکرر، به‌ویژه در ماه‌های زمستان تحت شرایط وارونگی دمایی، آلاینده‌ها را در داخل حوضه شهری به دام می‌اندازد. این محصور شدن توپوگرافیک، در ترکیب با ترافیک سنگین وسایل نقلیه و انتشارات صنعتی، تهران را به عنوان یک کانون مهم برای کربن سیاه و سایر آلاینده‌های هوا معرفی می‌کند (Zargari et al, 2025; Borhani et al, 2023; Mousavi et al., 2024). شکل ۱ نقشه‌ای از منطقه مورد مطالعه و مرزهای جغرافیایی آن را ارائه می‌دهد.

۲-۲- داده‌ها

تحلیل در این مطالعه بر اساس دو نوع داده مجزا است: مشاهدات ماهواره‌ای بلندمدت و اندازه‌گیری‌های در محل زمینی.



شکل ۱- منطقه مطالعاتی تحقیقاتی (برگرفته از سایت Giovanni)

است به اندازه کافی نمایانگر میزان مواجهه کل جمعیت شهری با آلودگی هوا نباشد و شکاف‌های حیاتی در درک ما از شرایط آلودگی باقی بگذارد (Borhani et al., 2017; Cheraghi et al., 2016 a, b; Weatherhead et al, 2017).

برای غلبه بر این محدودیت‌ها، سنجش از دور ماهواره‌ای به عنوان ابزاری قدرتمند ظهور کرده است که مشاهدات منسجم و در مقیاس بزرگ از ترکیبات جوی را ارائه می‌دهد. محصولات بازتحلیلی جوی جهانی، مانند MERRA-2، مجموعه داده‌های بلندمدت و پیوسته مکانی را برای آلاینده‌هایی مانند کربن سیاه فراهم می‌کنند. این داده‌ها پتانسیل عظیمی برای ردیابی روندهای آلودگی، شناسایی منابع و اطلاع‌رسانی به سیاست‌گذاری‌های منطقه‌ای کیفیت هوا، به‌ویژه در مناطقی که داده زیادی از آن‌ها در دسترس نیست، دارند.

با این حال، داده‌های ماهواره‌ای، اندازه‌گیری‌های مستقیم از غلظت‌های سطح زمین نیستند. آن‌ها تخمین‌های مبتنی بر مدل با وضوح مکانی درشت هستند و صحت آن‌ها باید قبل از استفاده با اطمینان، به طور دقیق در برابر اندازه‌گیری‌های محلی و «واقعیت زمینی» ارزیابی شود. یک شکاف تحقیقاتی حیاتی در مقایسه سیستماتیک داده‌های بلندمدت ماهواره‌ای BC با مشاهدات زمینی در تهران وجود دارد تا سوگیری‌ها (biases)، همبستگی‌ها و قابلیت اطمینان کلی داده‌های ماهواره‌ای برای این محیط شهری خاص درک شود. علاوه بر این، یک مجموعه داده بلندمدت اعتبارسنجی‌شده، پایه‌ای ارزشمند برای پیش‌بینی روندهای آینده آلودگی فراهم می‌کند که گامی ضروری برای برنامه‌ریزی پیشگیرانه است.

این مطالعه با هدف پرداختن به این مسائل، یک تحلیل جامع از روندهای غلظت کربن سیاه در تهران طی دو دهه گذشته ارائه می‌دهد. اهداف اصلی عبارتند از:

- تحلیل روندهای زمانی بلندمدت و فصلی بودن غلظت BC بر فراز تهران با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای MERRA-2.
- انجام یک ارزیابی مقایسه‌ای از داده‌های ماهواره‌ای با اندازه‌گیری‌های زمینی موجود از یک ایستگاه پایش محلی.
- کمی‌سازی رابطه آماری و مغایرت‌ها بین دو مجموعه داده برای ارزیابی سودمندی MERRA-2 برای مطالعات محلی کیفیت هوا.
- استفاده از روند تاریخی برای ارائه یک پیش‌بینی اولیه از

جدول ۱- مشخصات کلیدی داده‌های MERRA-2

Parameter	Unit	Source			Spatial Coverage	Temporal Coverage	Spatial Resolution	Temporal Resolution
		Project	Model	Version				
BC	$\mu\text{gr}/\text{m}^3$	MERRA-2	M-GEOS	V5.12.4	-180.0, -90.0, 180.0, 90.0	1980-01-01 to 2022-01-01	$0.5^\circ \times 0.625^\circ$	Monthly

(۲۰۱۴-۲۰۱۷) را نشان می‌دهند. این عدم تطابق زمانی و منبع‌یابی تک‌نقطه‌ای، ملاحظات کلیدی هنگام مقایسه با مجموعه داده‌های ماهواره‌ای تجمیع‌شده مکانی طی دو دهه است. در حالی که این رکورد زمینی یک مرجع ارزشمند و باکیفیت بالا برای مکان و زمان خاص خود فراهم می‌کند، در نظر گرفته نشده است که نماینده کل حوضه تهران طی دوره مطالعاتی ۲۰ ساله کامل باشد.

۲-۳- همسان‌سازی داده‌ها و تحلیل مقایسه‌ای

مقایسه مستقیم بین مجموعه داده‌های خام ماهواره‌ای و زمینی به دلیل وضوح زمانی متفاوت آن‌ها (ماهانه در مقابل روزانه) امکان‌پذیر نبود. بنابراین، ابتدا یک مرحله همسان‌سازی داده‌ها انجام شد. اندازه‌گیری‌های روزانه BC زمینی به صورت میانگین‌های ماهانه تجمیع شدند تا با وضوح زمانی ماهانه مجموعه داده MERRA-2 هماهنگ شوند. این کار با تبدیل سری زمانی روزانه به ماهانه و محاسبه میانگین برای هر ماه انجام پذیرفت. این مرحله تضمین می‌کند که هرگونه مقایسه بین نقاط داده‌ای انجام می‌شود که دوره زمانی یکسانی را طی می‌کنند.

پس از همسان‌سازی، از یک رویکرد دو وجهی برای تحلیل مقایسه‌ای استفاده شد:

۱- مقایسه توزیع به صورت بصری: نمودارهای تابع چگالی احتمال (PDF) هم برای داده‌های ماهانه ماهواره‌ای و هم برای داده‌های ماهانه زمینی تولید شدند. این نمودارها ابزاری بصری برای مقایسه شکل، قله و پراکندگی توزیع‌های غلظت BC از دو منبع فراهم می‌کنند.

۲- آزمون فرض آماری: برای آزمودن آماری این‌که آیا دو مجموعه داده از یک توزیع یکسان آمده‌اند، از آزمون رتبه علامت‌دار ویلکاکسون (Wilcoxon signed-rank test) استفاده شد. این یک آزمون غیر پارامتریک است، به این معنی که فرض نمی‌کند داده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. این آزمون به این دلیل انتخاب شد که داده‌ها مانند غلظت آلاینده‌ها اغلب دارای چولگی هستند و مفروضات نرمال بودن لازم برای

۲-۲-۱- مشاهدات ماهواره‌ای

داده‌های ماهواره‌ای کربن سیاه از MERRA-2 که توسط دفتر مدل‌سازی و همسان‌سازی جهانی ناسا (GMAO) توسعه و نگهداری می‌شود، به دست آمده است. این داده‌ها یک بازتحلیل جوی جهانی است که مشاهدات ماهواره‌ای را با مدل‌های هواشناسی ادغام می‌کند تا یک مجموعه جامع و منسجم از نظر مکانی و زمانی از پارامترهای مختلف جوی تولید کند.

در این مطالعه، از داده میانگین ماهانه «غلظت جرمی کربن سیاه در سطح زمین» (BCSMAS) استفاده شد. این مجموعه داده دارای وضوح مکانی 0.5 درجه عرض جغرافیایی $\times 0.625$ درجه طول جغرافیایی است که کل منطقه کلان‌شهری تهران را در یک سلول شبکه پوشش می‌دهد. داده‌های مربوط به دو دهه کامل گذشته، از ژانویه ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۲۱، با استفاده از سامانه آنلاین داده جیووانی ناسا برای تحلیل استخراج شد. مشخصات کلیدی داده‌های MERRA-2 مورد استفاده در جدول ۱ خلاصه شده است.

۲-۲-۲- اندازه‌گیری زمینی

برای اعتبارسنجی و مقایسه مشاهدات ماهواره‌ای، داده‌های غلظت BC زمینی از شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (AQCC) تهیه شد. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از یک اتالومتر زمینی انجام شد؛ ابزاری که غلظت BC را با اندازه‌گیری میزان یک باریکه نور عبوری از یک نوار فیلتر، همزمان با ته‌نشین شدن ذرات آئروسول بر روی آن، تعیین می‌کند.

مجموعه داده زمینی شامل ۱۲۲۰ میانگین روزانه غلظت BC است که دوره زمانی از ۲۱ آوریل ۲۰۱۴ (۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۳) تا ۲۲ اوت ۲۰۱۷ (۳۱ مرداد ۱۳۹۶) را پوشش می‌دهد. روش‌های جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها که توسط شرکت کنترل کیفیت هوا دنبال می‌شود، از استانداردهای بین‌المللی کیفیت، شامل کالیبراسیون منظم و پروتکل‌های تضمین کیفیت (QA/QC).

مهم است که در نظر داشته باشیم که این داده‌ها از یک ایستگاه نظارتی واحد سرچشمه می‌گیرند و یک دوره نسبتاً کوتاه‌مدت

مطالعه، ما از تابع `auto_arima` از کتابخانه `pmdarima` در پایتون استفاده کردیم. این تابع فرآیند انتخاب مدل را با برآزش تکراری ترکیب‌های مختلف پارامترهای `SARIMA` بر روی داده‌های تاریخی `MERRA-2` و انتخاب مدلی که کمترین `AIC` را به دست می‌دهد، خودکار می‌کند. مقدار `AIC` پایین‌تر، نشان‌دهنده تعادل بهتر بین برآزش مدل و سادگی مدل است و در نتیجه خطر بیش‌برآزش (`overfitting`) را کاهش می‌دهد. سپس بهترین مدل `SARIMA` از نظر عملکرد برای تولید پیش‌بینی غلظت‌های ماهانه `BC` برای سال‌های بعد مورد استفاده قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقایسه داده‌های ثبت شده از مشاهدات ماهواره ای و

اندازه گیری های زمینی

مقایسه اولیه بین داده‌های ماهواره‌ای `MERRA-2` و اندازه‌گیری‌های زمینی، تفاوت‌های قابل توجهی را هم در بزرگی و هم در توزیع غلظت کربن سیاه در تهران آشکار می‌کند. همانطور که در آمار توصیفی جدول ۲ نشان داده شده است، میانگین غلظت ماهانه `BC` از ایستگاه زمینی ($3.963 \mu\text{g}/\text{m}^3$) تقریباً چهار برابر بیشتر از میانگین غلظت به‌دست آمده از داده‌های ماهواره‌ای `MERRA-2` ($0.995 \mu\text{g}/\text{m}^3$) است. این اختلاف قابل توجه توسط داده‌های ماهواره‌ای، یک یافته حیاتی است که بر اختلاف فاحش بین داده‌های بازتحلیل در مقیاس بزرگ و آلودگی محلی در سطح زمین تأکید می‌کند.

جدول ۲- آمار توصیفی داده های زمینی و ماهواره ای

Statistical analysis of variables	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	S	G
Count	240	41
Mean	0.995	3.963
Standard deviation (SD)	0.254	0.783
Minimum	0.549	2.613
Q ₁ (25%)	0.789	3.456
Q ₂ (50%)	0.938	3.963
Q ₃ (75%)	1.165	4.497
Maximum	1.744	5.788
Skewness	0.662	NAN

آزمون‌های پارامتریک مانند آزمون تی زوجی (`paired t-test`) را برآورده نمی‌کنند. این آزمون فرضیه صفر را ارزیابی می‌کند که میانه تفاضل بین نمونه‌های زوجی صفر است. مقدار `p-value` پایین (معمولاً $0.05 >$) نشان می‌دهد که دو مجموعه داده از نظر آماری متفاوت هستند.

۲-۴- تحلیل روند و پیش‌بینی آینده

۲-۴-۱- تحلیل سری زمانی

برای تحلیل روند بلندمدت غلظت کربن سیاه طی دو دهه گذشته، یک مدل رگرسیون خطی بر روی داده‌های سری زمانی ماهانه ماهواره‌ای `MERRA-2` اعمال شد. این روش یک خط مستقیم را به نقاط داده برآزش می‌دهد و امکان کمی‌سازی جهت کلی (افزایشی یا کاهش) و نرخ تغییر غلظت `BC` را در دوره مورد مطالعه فراهم می‌کند. خط روند حاصل، یک نمایش بصری ساده اما مؤثر از مسیر تاریخی آلودگی `BC` در تهران ارائه می‌دهد. یک مدل خطی مشابه نیز بر روی داده‌های زمینی موجود برآزش داده شد تا روند کوتاه‌مدت آن با روند دو دهه ای ماهواره‌ای مقایسه شود.

۲-۴-۲- پیش‌بینی سری زمانی با مدل SARIMA

برای پیش‌بینی غلظت‌های آینده `BC`، از یک مدل «میانگین متحرک یکپارچه خودهمبسته فصلی» (`SARIMA`) استفاده شد. مدل `SARIMA` یک روش آماری قدرتمند و پرکاربرد برای تحلیل و پیش‌بینی داده‌های سری زمانی است که هم روند غیرفصلی و هم الگوی فصلی را نشان می‌دهند. این ویژگی آن را به‌ویژه برای داده‌های زیست‌محیطی مانند غلظت `BC` که اغلب به دلیل تغییرات فصلی در انتشار آلاینده‌ها و هواشناسی، چرخه‌های سالانه مشخصی دارند، بسیار مناسب می‌سازد.

مدل `SARIMA` با نمادگذاری `SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)m`

مشخص می‌شود، که در آن:

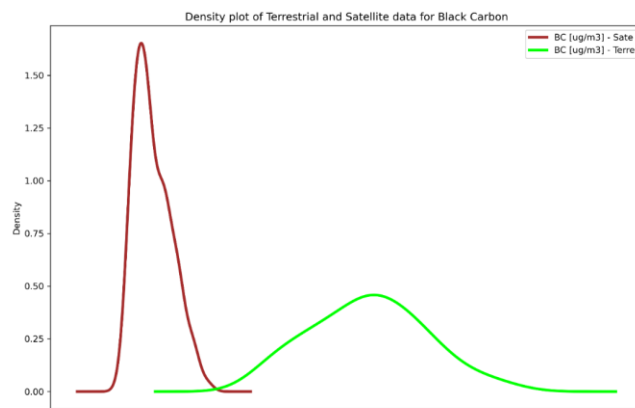
- (q,d,p) پارامترهای غیرفصلی برای مولفه‌های خودهمبسته (`AR`)، یکپارچه (`I`) و میانگین متحرک (`MA`) هستند.
 - (Q,D,P) پارامترهای فصلی متناظر هستند.
 - 'm' تعداد گام‌های زمانی برای یک دوره فصلی واحد است (برای داده‌های ماهانه با چرخه سالانه، $m=12$ است).
- انتخاب پارامترهای بهینه مدل یک مرحله حیاتی است. در این

غلظت‌های بالاتر جابجا شده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه MERRA-2 ممکن است سطح منطقه‌ای BC را ثبت کند، اما در نمایش غلظت‌های بالا و مقادیر حدی که اغلب در محیط شهری تجربه می‌شود، ناتوان است؛ امری که احتمالاً به دلیل منابع انتشار محلی مانند ترافیک است (Badarinath et al, 2007). برای تأیید این‌که تفاوت مشاهده‌شده از نظر آماری معنادار است، آزمون رتبه علامت‌دار ویلکاکسون انجام شد. نتیجه، که در جدول ۳ ارائه شده است، مقدار (p-value) بسیار پایینی به دست می‌آید ($p \approx 4.0 \times 10^{-41}$) که منجر به رد قاطع فرضیه صفر و تأیید این موضوع با اطمینان بالا می‌شود که دو مجموعه داده از نظر آماری متفاوت هستند.

این اختلاف توسط MERRA-2 یک موضوع تکرار شونده در مطالعات اعتبارسنجی است، اگرچه عملکرد آن به شدت به مکان و آلاینده خاص بستگی دارد. به عنوان مثال، Song و همکارانش نیز دریافتند که MERRA-2 به طور سیستماتیک غلظت $PM_{2.5}$ سطحی را در شمال چین کم‌برآورد کرده است که بزرگترین سوگیری در ماه‌های زمستانی با آلودگی بالا رخ داده است. به طور مشابه، Aldabash و همکاران اختلاف «عمق نوری آئروسول» (AOD) را توسط MERRA-2 در مقایسه با ایستگاه‌های AERONET در ترکیه گزارش کردند. با این حال، عملکرد آن در همه جا یکسان نیست. در مطالعه‌ای روی BC در پکن، Qin و همکاران دریافتند که MERRA-2 در واقع غلظت BC زمینی را بیش‌برآورد کرده است. این تضاد نشان می‌دهد که دقت BC در بازتحلیل MERRA-2 به شدت به «سیاه انتشار» (mission inventoriesE) منطقه‌ای و توانایی مدل در شبیه‌سازی هواشناسی محلی حساس است که می‌تواند بین کلان‌شهرها مانند پکن و تهران تفاوت قابل توجهی داشته باشد (Song et al, 2018; Aldash et al, 2020; Qin et al, 2018).

۲-۳- تحلیل روندهای بیست ساله و کوتاه‌مدت کربن سیاه

روندهای زمانی غلظت BC از هر دو منبع ماهواره‌ای و زمینی در شکل ۳ ترسیم شده‌اند. داده‌های MERRA-2، که دو دهه کامل را در بر می‌گیرند، یک الگوی فصلی واضح و منسجم را نشان می‌دهند، به طوری که غلظت‌ها در ماه‌های زمستان (دسامبر-فوریه) به اوج خود رسیده و در تابستان به حداقل می‌رسند. این فصلی



شکل ۲- توابع چگالی احتمال

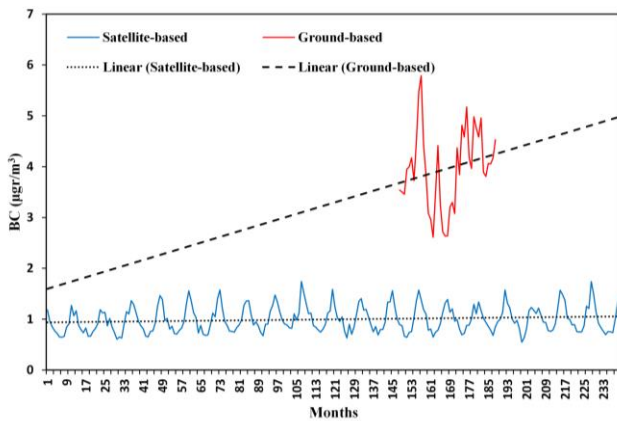
جدول ۳- نتیجه آزمون Wilcoxon

Main SLCPs	Variables	Related samples Wilcoxon signed-rank test	
		Statistic	P-value
	BC	0.0	4.015256434384509e-41

این مغایرت را می‌توان عمدتاً به تفاوت‌های اساسی در آنچه هر مجموعه داده نشان می‌دهد، نسبت داد. ایستگاه واحد اتالومتر یک اندازه‌گیری باکیفیت بالا از یک محیط خرد شهری خاص ارائه می‌دهد که احتمالاً تحت تأثیر منابع انتشار محلی فوری مانند ترافیک وسایل نقلیه است؛ عواملی که با وضوح درشت محصول ماهواره‌ای قابل ثبت نیستند. در مقابل، داده‌های MERRA-2 یک غلظت متوسط مکانی را بر روی یک سلول شبکه‌ای بزرگ نشان می‌دهد که به طور ذاتی نقاط کانونی محلی را هموار کرده و یک سطح پس‌زمینه منطقه‌ای را فراهم می‌کند.

علاوه بر این، این مقایسه بین یک اقلیم‌شناسی ماهواره‌ای بلندمدت (۲۰۰۲-۲۰۲۱) و یک نمونه‌برداری زمینی کوتاه‌مدت (۲۰۱۴-۲۰۱۷) است. شرایط جوی و الگوهای انتشار خاص در طول این دوره سه‌ساله ممکن است کاملاً نماینده کل روند دو دهه‌ای نباشد و به طور بالقوه مقایسه مستقیم بزرگی‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.

این واگرایی در نمودارهای تابع چگالی احتمال (PDF) در شکل ۲ بیشتر نمایان است. این دو مجموعه داده توزیع‌های کاملاً متفاوتی را نشان می‌دهند. داده‌های ماهواره‌ای یک توزیع باریک با قله‌ای در غلظت پایین (حدود $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) را نشان می‌دهند، در حالی که داده‌های زمینی توزیع بسیار گسترده‌تری داشته و به سمت



شکل ۳- روندهای زمانی غلظت کربن سیاه

بنابراین، روندی که در داده‌های ما دیده می‌شود، احتمالاً تعادلی پیچیده بین تلاش‌های مداوم کاهش آلودگی و واقعیت پایدار و پراشتار بخش حمل و نقل تهران را منعکس می‌کند.

در مقابل، اندازه‌گیری‌های زمینی، اگرچه برای دوره کوتاه‌تری (۲۰۱۴-۲۰۱۷) در دسترس هستند، غلظت‌های بسیار بالاتر و نوسانات ماه به ماه بیشتری را نشان می‌دهند. در حالی که داده‌های زمینی نیز شواهدی از فصلی بودن را نشان می‌دهند، خط روند آن شیب بیشتری نسبت به داده‌های ماهواره‌ای دارد. توجه به اختلاف در بزرگی مهم است: کمترین مقادیر اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه زمینی اغلب بالاتر از بالاترین قله‌ها در سوابق ماهواره‌ای است.

این قله مشخص زمستانی یک پدیده کاملاً مستند در شهرهای جنوب آسیا است و ارتباط تنگاتنگی با شرایط هواشناسی دارد. Joshi و همکاران در مطالعه BC در «دشت سند و گنگ»، یک رابطه معکوس واضح بین غلظت BC و ارتفاع لایه مرزی جو نشان دادند. در طول زمستان، لایه مرزی کم‌عمق‌تر و وارونگی‌های دمایی مکرر، آلاینده‌ها را در نزدیکی سطح به دام می‌اندازند که منجر به غلظت‌های بالاتر می‌شود، حتی اگر انتشار آلاینده‌ها ثابت بماند. Badarinath و همکاران الگوی فصلی مشابهی را در حیدرآباد هند مشاهده کردند و مقادیر بالای BC در زمستان را به کاهش ارتفاع لایه مرزی و انتشار ناشی از ترافیک وسایل نقلیه نسبت دادند. این اجماع منطقه‌ای این ایده را تأیید می‌کند که فصلی بودن مشاهده‌شده در داده‌های MERRA-2 تهران از نظر فیزیکی معتبر بوده و عمدتاً توسط دینامیک جوی هدایت می‌شود. Islam و همکاران نیز روندهای افزایشی معناداری از BC را در بنگلادش ذکر کرده و آن را هم به فعالیت‌های انسان‌زاد محلی و هم به «انتقال دوربرد» (long-

بودن قابل انتظار است و عمدتاً ناشی از عوامل هواشناسی مانند ارتفاع کمتر لایه مرزی و وارونگی‌های دمایی در زمستان است که آلاینده‌ها را در نزدیکی سطح به دام می‌اندازد، و همچنین افزایش فعالیت فتوشیمیایی و تهویه جوی در تابستان. روند خطی کلی برای داده‌های ماهواره‌ای یک افزایش جزئی، هرچند نه شدید، را در طول دو دهه نشان می‌دهد، که حاکی از آن است که سطح منطقه‌ای BC به طور قابل توجهی کاهش نیافته است.

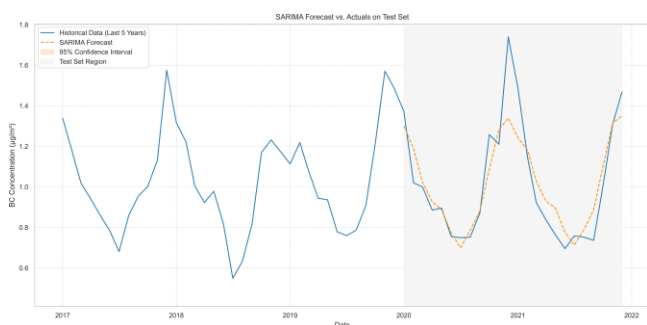
این روند با وجود مداخلات سیاستی متعدد، می‌تواند با بررسی عوامل پایدار انتشار در داخل منطقه کلان‌شهری تهران درک شود.

مطالعات اوایل این دوره، انتشارات وسایل نقلیه، به ویژه از موتورهای دیزلی، را به عنوان منبع غالب آلاینده‌های ناشی از احتراق مانند هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) که به طور همزمان با کربن سیاه منتشر می‌شوند، شناسایی کردند. جغرافیای نامناسب تهران، که آلاینده‌ها را به دام می‌اندازد، این مشکل را تشدید می‌کند (Halek et al, 2010).

در پاسخ به این امر، مقامات مجموعه‌ای از اقدامات با هدف کنترل این آلودگی را اجرا کرده‌اند، از جمله ارتقاء استانداردهای کیفیت سوخت از یورو ۲ به یورو ۴، حذف وسایل نقلیه فرسوده، اجرای بازرسی‌های وسایل نقلیه، و تأسیس مناطق کم‌انتشار (LEZs) که از سال ۲۰۱۶ آغاز شد (Taksibi et al, 2019; Taghizadeh et al, 2023).

با این حال، به نظر می‌رسد که اثربخشی این سیاست‌ها توسط چندین عامل خنثی شده است. یک مسئله حیاتی، چالش اجرای مداوم و اعمال این مقررات است (Taghizadeh et al, 2023).

مهم‌تر از آن، حجم عظیم ترافیک که تخمین زده می‌شود بیش از ۱۷ میلیون سفر روزانه باشد و غالب بودن فناوری‌های قدیمی وسایل نقلیه باری از انتشار ایجاد می‌کند که می‌تواند دستاوردهای سیاستی را تحت الشعاع قرار دهد (Taleshi et al, 2020). به طور خاص برای کربن سیاه، بخش قابل توجهی از ناوگان وسایل نقلیه سنگین تهران، که منبع اصلی انتشارات دیزلی است، فاقد سیستم‌های تصفیه پسین مدرن مانند فیلترهای ذرات دیزل (DPFs) هستند که منجر به ادامه سطوح بالای انتشار BC می‌شود. مطالعات سهم‌بندی منابع تأیید می‌کنند که حتی در سال‌های اخیر، آگروز بنزین و دیزل همچنان دو عامل اصلی مشارکت‌کننده در آئروسل‌های مرتبط با احتراق هستند (Taleshi et al, 2020).



شکل ۵- عملکرد مدل SARIMA روی مجموعه تست

دقت مدل به صورت کمی ارزیابی شد که به میانگین خطای مطلق (MAE) برابر با $0.0915 \mu\text{g}/\text{m}^3$ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با $0.1268 \mu\text{g}/\text{m}^3$ بر روی مجموعه آزمون منجر شد. این مقادیر خطای پایین، نسبت به دامنه داده‌ها، قابلیت پیش‌بینی قوی مدل را تأیید می‌کند. علاوه بر این، نمودار عیب‌یابی مدل SARIMA نشان می‌دهد که باقی‌مانده‌های مدل تقریباً توزیع نرمال دارند و خود همبستگی معناداری نشان نمی‌دهند، که مفروضات کلیدی مدل را برآورده می‌سازد. اعتبار مدل برازش‌یافته SARIMA از طریق آزمون‌های تشخیصی که در شکل ۶ ارائه شده‌اند، تأیید گردید.

باقیمانده‌های استاندارد شده هیچ الگوی آشکاری نشان نمی‌دهند و مشابه نویز سفید به نظر می‌رسند. کوریلوگرام این موضوع را تأیید می‌کند، به طوری که آزمون لانگ-باکس (Ljung-Box) یک مقدار p برابر با 0.77 به دست می‌دهد که نشان می‌دهد هیچ همبستگی خودکار معنی‌داری باقی نمانده است.

در حالی که آزمون جارک-برا (Jarque-Bera) ($0.001 > p$) نشان می‌دهد که باقیمانده‌ها به طور کامل دارای توزیع نرمال نیستند، که یک ویژگی رایج داده‌های محیطی دنیای واقعی است، برآورده شدن فرض حیاتی خطاهای ناهمبسته توسط مدل، آن را برای اهداف پیش‌بینی مستحکم می‌سازد.

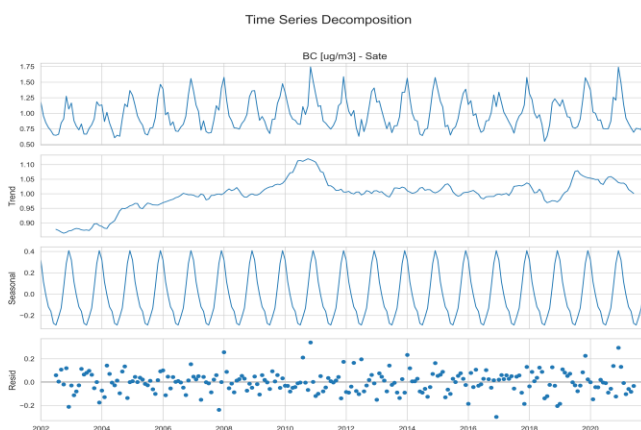
پس از تأیید عملکرد مدل، این مدل بر روی کل مجموعه داده ۲۰ ساله اجرا شد و برای تولید یک پیش‌بینی ۵ ساله (۲۰۲۶-۲۰۲۲) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج در شکل ۷ ارائه شده است. این پیش‌بینی نشان می‌دهد که الگوی فصلی تثبیت شده کربن سیاه در تهران انتظار می‌رود ادامه یابد، با اوج‌های برجسته در زمستان و کاهش‌ها در تابستان.

range transport) مرتبط دانستند، که این موضوع بیشتر تأکید می‌کند که BC یک مشکل منطقه‌ای پایدار است (Joshi et al, 2015; Badarinath et al, 2007; Islam et al, 2019).

۳-۳- پیش‌بینی آینده غلظت BC

برای ارائه یک چشم‌انداز آینده‌نگر، یک مدل سری زمانی SARIMA با استفاده از مجموعه داده ۲۰ ساله ماهواره‌ای MERRA-2 توسعه داده شد. استفاده از SARIMA برای پیش‌بینی سری‌های زمانی آلاینده‌های هوا یک رویکرد کاملاً تثبیت شده و مؤثر است، همانطور که در مطالعات متعدد به دلیل توانایی آن در ثبت روند و فصلی بودن نشان داده شده است (Das et al, 2021; Zhang et al, 2018). ابتدا، سری زمانی برای تأیید ساختار آن تجزیه شد، همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است. این نمودار به وضوح مولفه‌های زیربنایی داده‌ها را به تصویر می‌کشد: یک روند بلندمدت، یک الگوی فصلی قوی و منظم با دوره ۱۲ ماهه، و یک مولفه باقی‌مانده. این فصلی بودن ذاتی، مدل SARIMA را به انتخابی مناسب برای پیش‌بینی تبدیل می‌کند.

کل مجموعه داده به یک مجموعه آموزشی (۲۰۱۹-۲۰۲۰) و یک مجموعه آزمون (۲۰۲۰-۲۰۲۱) برای ارزیابی عملکرد پیش‌بینی مدل تقسیم شد. با استفاده از فرآیند auto_arima ، بهترین مدل برازش شده به عنوان $\text{SARIMA}(1,0,0)(2,0,1)_{12}$ شناسایی شد. عملکرد این مدل بر روی داده‌های آزمون مشاهده نشده در نمودار پیش‌بینی SARIMA در مقابل مقادیر واقعی به تصویر کشیده شده است. شکل ۵ نشان می‌دهد که مدل با موفقیت هم فاز و هم دامنه چرخه‌های فصلی را ثبت می‌کند و مشاهدات واقعی به خوبی در بازه اطمینان ۹۵٪ پیش‌بینی قرار می‌گیرند.



شکل ۴- نمودار تجزیه سری زمانی توسط مدل SARIMA

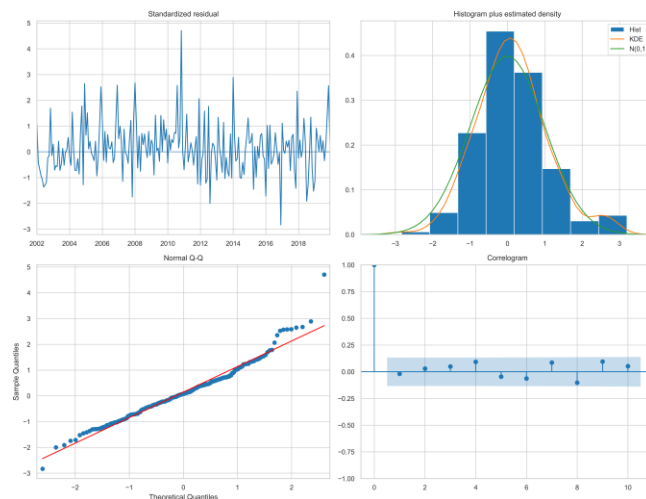
برای روندهای آینده ارائه داد.

یافته‌های کلیدی چهارگانه هستند. اول، محصول ماهواره‌ای MERRA-2 با موفقیت چرخه فصلی متمایز BC در تهران را، با قله‌های برجسته در زمستان و کمینه‌ها در تابستان، ثبت می‌کند؛ الگویی که توسط دینامیک هواشناسی منطقه‌ای هدایت می‌شود. دوم، یک مغایرت قابل توجه در بزرگی غلظت‌ها وجود دارد، به طوری که MERRA-2 غلظت BC سطح زمین را در مقایسه با داده‌های اتالومتر زمینی با ضریبی حدود چهار، کم‌تر برآورد می‌کند. مشخص شد که این دو مجموعه داده از نظر آماری متمایز هستند ($p > 0.001$)، که بر محدودیت‌های استفاده از مدل‌های جهانی با وضوح درشت برای ارزیابی‌های مواجهه و انطباق محلی بدون اعتبارسنجی دقیق محلی تأکید می‌کند. سوم، روند بیست ساله حاصل از داده‌های ماهواره‌ای افزایش جزئی را نشان داد، که حاکی از آن است که آلودگی منطقه‌ای BC در دهه گذشته به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش نیافته است. در نهایت، مدل پیش‌بینی SARIMA که با عملکرد قوی ($MAE=0.0915 \mu\text{g}/\text{m}^3$) اعتبارسنجی شد، ادامه این روند پایدار اما بالا و فصلی بودن را در آینده نزدیک پیش‌بینی می‌کند، که نشان می‌دهد شرایط و سیاست‌های محیط زیستی فعلی ممکن است برای ایجاد کاهش قابل توجه در سطح BC کافی نباشد.

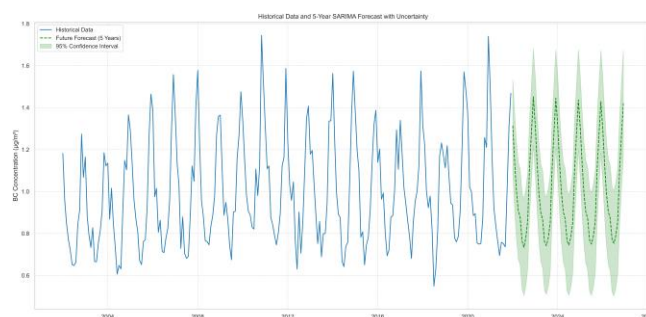
پیامد اصلی این کار آن است که اگرچه داده‌های ماهواره‌ای مانند MERRA-2 ابزاری ارزشمند برای درک روندهای منطقه‌ای بلندمدت و فصلی بودن در مناطق کم‌داده هستند، اما نمی‌توانند به عنوان جایگزین مستقیم برای پایش زمینی جهت ارزیابی خطرات بهداشت عمومی در یک محیط شهری پیچیده مانند تهران استفاده شوند. پیش‌بینی به عنوان یک مبنای حیاتی برای سیاست‌گذاران عمل می‌کند و نیاز به استراتژی‌های قوی‌تر کنترل انتشار برای کاهش آلودگی آینده BC را برجسته می‌سازد.

این مطالعه تابع محدودیت‌های خاصی است که زمینه‌هایی را برای تحقیقات آتی باز می‌کند. محدودیت اصلی تکیه بر یک ایستگاه زمینی واحد با رکورد زمانی محدود برای اعتبارسنجی است. در حالی که این مقایسه برای ارزیابی اختلاف بزرگی و انسجام فصلی ارزشمند بود، اما تغییرپذیری مکانی غلظت‌های کربن سیاه در سراسر چشم‌انداز شهری متنوع تهران را ثبت نمی‌کند.

SARIMA Model Diagnostics



شکل ۶- نمودارهای عیب یابی مدل SARIMA



شکل ۷- پیش‌بینی ۵ ساله توسط مدل SARIMA

نکته حیاتی این است که این مدل روند نزولی قابل توجهی را در غلظت‌های کربن سیاه پیش‌بینی نمی‌کند. برای مثال، پیش‌بینی برای اوج نهایی زمستانی در دسامبر ۲۰۲۶، غلظت میانگین $1.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ است، با بازه اطمینان ۹۵٪ که یک محدوده احتمالی بین $1.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ و $1.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ را فراهم می‌کند.

عرض این بازه اطمینان به طور مناسب افزایش عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها در آینده دورتر را منعکس می‌کند. این پیش‌بینی کمی، از جمله محدوده‌های عدم قطعیت آن، به عنوان یک خط پایه حیاتی عمل می‌کند و نشان می‌دهد که بدون مداخلات سیاستی جدید و گسترده، آلودگی منطقه‌ای کربن سیاه احتمالاً در سطوح بالای کنونی خود پایدار خواهد ماند.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه یک تحلیل جامع از روندهای غلظت کربن سیاه در شهر تهران، ایران، با مقایسه دو دهه از داده‌های ماهواره‌ای MERRA-2 با اندازه‌گیری‌های زمینی محلی و توسعه یک پیش‌بینی

بودن، برای امکان‌پذیر ساختن مقایسه‌ای قوی‌تر و در مقیاس دهه‌ها از روندها.

- توسعه مدل‌های کالیبراسیون برای تنظیم رکورد ماهواره‌ای بلندمدت MERRA-2 با استفاده از داده‌های زمینی، و در نتیجه ایجاد یک سری زمانی تاریخی تصحیح شده و دقیق‌تر برای تحلیل سلامت و سیاست‌گذاری.

بنابراین، کارهای آتی بهتر است شامل موارد زیر برای جبران محدودیت‌های این مطالعه باشند:

- گنجاندن داده‌ها از چندین سایت زمینی برای انجام یک اعتبارسنجی مکانی جامع‌تر و درک بهتر گرادیان‌های آلودگی درون‌شهری.
- استفاده از رکوردهای زمینی بلندمدت‌تر، در صورت موجود

References

- Aldabash, M., Balcik, F. B., and Glantz, P. (2020). Validation of MODIS C6.1 and MERRA-2 AOD using AERONET observations: A comparative study over Turkey. *Atmosphere*, 11(9), 905.
- Ali-Taleshi, M. S., Moeinaddini, M., Riyahi Bakhtiari, A., Feiznia, S., Squizzato, S., and Bourliva, A. (2020). A one-year monitoring of spatiotemporal variations of PM_{2.5}-bound PAHs in Tehran, Iran: Source apportionment, local and regional sources origins and source-specific cancer risk assessment. *Environmental Pollution*, 267, 115883.
- Badarinath, K. V. S., Kharol, S. K., Latha, K. M., Chand, T. R. K., Prasad, V. K., Jyothsna, A. N., and Samatha, K. (2007). Multiyear ground-based and satellite observations of aerosol properties over a tropical urban area in India. *Atmospheric Science Letters*, 8(1), 7–13.
- Borhani, F., Mirmohammadi, M., & Aslemand, A. (2017). Experimental study of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) concentrations in the air pollution of Tehran, Iran. *Journal of Research in Environmental Health*, 3(2), 105-115.
- Borhani, F., Ehsani, A. H., Shafiepour Motlagh, M., and Rashidi, Y. (2024). Estimate ground-based PM_{2.5} concentrations with Merra-2 aerosol components in Tehran, Iran: Merra-2 PM_{2.5} concentrations verification and meteorological dependence. *Environment, Development and Sustainability*, 26(3), 5775-5816.
- Borhani, F., Shafiepour Motlagh, M., Ehsani, A. H., Rashidi, Y., Ghahremanloo, M., Amani, M., and Moghimi, A. (2023). Current status and future forecast of short-lived climate-forced ozone in Tehran, Iran, derived from ground-based and satellite observations. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(2), 134.
- Castagna, J., Calvello, M., Esposito, F., and Pavese, G. (2019). Analysis of equivalent black carbon multi-year data at an oil pre-treatment plant: Integration with satellite data to identify black carbon transboundary sources. *Remote Sensing of Environment*, 235, 111429.
- Cheraghi, A., & Borhani, F. (2016a). Evaluation of environmental and sustainable development of four pavements in Iran by four method of multi-criteria analysis. *Journal of Environmental Science Studies*, 1(2), 51-62.
- Cheraghi, A., & Borhani, F. (2016b). Assessing the effects of air pollution on four methods of pavement by using four methods of multi-criteria decision in Iran. *Journal of Environmental Science Studies*, 1(1), 59-71.
- Das, R., Middy, A. I., and Roy, S. (2021). High granular and short term time series forecasting of PM_{2.5} air pollutant - a comparative review. *Artificial Intelligence Review*, 54, 1-52.
- Halek, F., Kianpour-rad, M., and Kavousi, A. (2010). Characterization and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air (Tehran, Iran). *Environmental Chemistry Letters*, 8(1), 39–44.
- Islam, M. N., Ali, M. A., and Islam, M. M. (2019). Spatiotemporal investigations of aerosol optical properties over Bangladesh for the period 2002–2016. *Earth Systems and Environment*, 3, 533–548.
- Joshi, H., Naja, M., Singh, K. P., Kumar, R., Bhardwaj, P., Babu, S. S., Satheesh, S. K., Moorthy, K. K., and Chandola, H. C. (2015). Investigations of aerosol black carbon from a semi-urban site in the Indo-Gangetic Plain region. *Atmospheric Environment*, 100, 1–14.
- Li, W., Ali, E., El-Magd, I. A., Mourad, M. M., and El-Askary, H. (2019). Studying the impact on urban health over the Greater Delta region in Egypt due to aerosol variability using optical characteristics from satellite observations and ground-based AERONET measurements. *Remote Sensing*, 11(17), 1998.
- Ma, J., Xu, J., and Qu, Y. (2020). Evaluation on the surface PM_{2.5} concentration over China mainland from NASA's MERRA-2. *Atmospheric Environment*, 223, 117666.
- Miyama, T., Matsui, H., Azuma, K., Minejima, C., Itano, Y., Takenaka, N., and Ohya, M. (2020). Time series analysis of climate and air pollution factors associated with atmospheric nitrogen dioxide concentration in Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(24), 9507.

- Mousavi, S. M., Dinan, N. M., Ansarifard, S., Borhani, F., Darvishi, A., Mustafa, F., & Naghibi, A. (2024). Unveiling the drivers of atmospheric methane variability in Iran: A 20-year exploration using spatiotemporal modeling and machine learning. *Environmental Challenges*, 15, 100946.
- Qin, W., Zhang, Y., Chen, J., Yu, Q., Cheng, S., Li, W., Liu, X., and Tian, H. (2018). Variation, sources and historical trend of black carbon in Beijing, China based on ground observation and MERRA-2 reanalysis data. *Environmental Pollution*, 244, 821-831.
- Ryu, Y.-H., and Min, S.-K. (2021). Long-term evaluation of atmospheric composition reanalyses from CAMS, TCR-2, and MERRA-2 over South Korea: Insights into applications, implications, and limitations. *Atmospheric Environment*, 246, 118062.
- Sakerin, S. M., Kabanov, D. M., Kopeikin, V. M., Kruglinsky, I. A., Novigatsky, A. N., Pol'kin, V. V., and Turchinovich, Y. S. (2021). Spatial distribution of black carbon concentrations in the atmosphere of the North Atlantic and the European sector of the Arctic Ocean. *Atmosphere*, 12(8), 949.
- Song, X., Hu, Y., Ma, Y., Jiang, L., Wang, X., Shi, A., Zhao, J., Liu, Y., Liu, Y., Tang, J., Li, X., Zhang, X., Guo, Y., and Wang, S. (2022). Is short-term and long-term exposure to black carbon associated with cardiovascular and respiratory diseases? A systematic review and meta-analysis based on evidence reliability. *BMJ open*, 12(5), e049516.
- Song, Z., Fu, D., Zhang, X., Wu, Y., Xia, X., He, J., Han, X., Zhang, R., and Che, H. (2018). Diurnal and seasonal variability of PM_{2.5} and AOD in North China plain: Comparison of MERRA-2 products and ground measurements. *Atmospheric Environment*, 191, 70-78.
- Taghizadeh, F., Mokhtarani, B., and Rahmanian, N. (2023). Air pollution in Iran: The current status and potential solutions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(5), 737.
- Taksibi, F., Khajepour, H., and Saboohi, Y. (2020). On the environmental effectiveness analysis of energy policies: A case study of air pollution in the megacity of Tehran. *Science of The Total Environment*, 699, 135824.
- Tiwari, P., Cohen, J. B., Lu, L., Wang, S., Li, X., Guan, L., Liu, Z., Li, Z., and Qin, K. (2025). Multi-platform observations and constraints reveal overlooked urban sources of black carbon in Xuzhou and Dhaka. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 38.
- Weatherhead, E. C., Bodeker, G. E., Fassò, A., Chang, K.-L., Lazo, J. K., Clack, C. T., Hurst, D. F., Hassler, B., English, J. M., and Yorgun, S. (2017). Spatial coverage of monitoring networks: A climate observing system simulation experiment. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(12), 3211-3228.
- Zaini, N., Ean, L. W., Ahmed, A. N., Malek, M. A., and Chow, M. F. (2022). PM_{2.5} forecasting for an urban area based on deep learning and decomposition method. *Scientific Reports*, 12(1), 17565.
- Zargari, M., Abbas Mofidi, Alireza Entezari, and Baaghideh, M. (2025). Climatology of Tehran Surface Heat Island: a satellite-based Spatial Analysis. *Scientific Reports*, 15(1).
- Zhang, L., Lin, J., Qiu, R., Hu, X., Zhang, H., Chen, Q., Tan, H., Lin, D., and Wang, J. (2018). Trend analysis and forecast of PM_{2.5} in Fuzhou, China using the ARIMA model. *Ecological Indicators*, 95, 702-710.
- Zhao, N., Liu, Y., Vanos, J. K., and Cao, G. (2018). Day-of-week and seasonal patterns of PM_{2.5} concentrations over the United States: Time-series analyses using the Prophet procedure. *Atmospheric Environment*, 192, 116-127.