

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۳، پیاپی ۱، بهار ۱۴۰۴

## بررسی اثرات آلاینده‌های جوی معیار و پارامترهای هواشناسی بر تغییر غلظت کربن سیاه در تهران و تبریز

پریسا کهراری<sup>۱</sup>، شهریار خالدی<sup>۲</sup>، قاسم کیخسروی<sup>۳\*</sup>، سید جلیل علوی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی

۲. استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی

۳. استادیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی (نویسنده مسئول)

۴. دانشیار جنگلداری، گروه جنگلداری، دانشگاه تربیت مدرس

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۰	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۵	
واژه‌های کلیدی:	
آلودگی هوا، ذرات معلق،	کربن سیاه (BC) یکی از اجزای مهم ذرات ریز معلق در هواست که تأثیر قابل توجهی بر آب و هوا و سلامت انسان دارد و فعالیت‌های انسانی همراه با شرایط آب‌وهوایی بر تغییرپذیری آن در طولانی مدت تأثیر می‌گذارد. از این‌رو، این مطالعه به بررسی روابط آماری بین پارامترهای هواشناسی (دما، بارش، سرعت باد، رطوبت نسبی، فشار هوا، ساعات آفتابی، تابش خورشیدی و ابرناکی)، آلاینده‌های معیار هوا (CO، NO <sub>2</sub> ، SO <sub>2</sub> ، O <sub>3</sub> ، PM <sub>10</sub> و PM <sub>2.5</sub> ) و آلاینده کربن سیاه و همچنین ارزیابی و مقایسه کارایی پنج الگوریتم یادگیری ماشین (رگرسیون خطی چندگانه (MLR)، مدل جمعی تعمیم‌یافته (GAM)، درخت طبقه‌بندی و رگرسیون (CART)، جنگل تصادفی (RF) و تقویت گرادیان (GBM)) در مدل‌سازی آلاینده‌ها و عوامل آب‌وهوایی مؤثر در تغییرات سطح غلظت آلاینده کربن سیاه در تبریز و تهران (۲۰۲۱-۲۰۰۴) با استفاده از نرم‌افزار R 4.3.2 پرداخته است. نتایج این مطالعه بیانگر تفاوت آشکار تأثیر پارامترهای هواشناسی و آلاینده‌های جوی معیار بر سطح غلظت آلاینده کربن سیاه در تبریز و تهران به دلیل موقعیت جغرافیایی، شرایط آب‌وهوایی و ساختار منطقه‌ای متفاوت این شهرها است. ذرات کربن سیاه روند صعودی معناداری را با سرعت نسبتاً برابر در طول دوره آماری مورد مطالعه در شهرهای تبریز و تهران تجربه کرده‌اند. بر اساس یافته‌های حاصل از تحلیل همبستگی اسپیرمن، ذرات کربن سیاه دارای همبستگی مثبت با آلاینده‌های PM <sub>2.5</sub> ، NO <sub>2</sub> ، CO و SO <sub>2</sub> و همبستگی منفی با O <sub>3</sub> است. آلاینده کربن سیاه دارای بیشترین همبستگی با پارامترهای سرعت باد (منفی) و رطوبت نسبی (مثبت) در تبریز و پارامترهای دما (منفی) و فشار هوا (مثبت) در تهران است. بر اساس ارزیابی عملکرد مدل‌های پیشگو و با توجه به اصل صرفه‌جویی، در تبریز مدل GAM و در تهران مدل مبنای MLR از عملکرد بهتری در پیش‌بینی مقادیر کربن سیاه نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار بودند.

استناد: کهراری، پریسا، خالدی، شهریار، کیخسروی، قاسم، علوی، سید جلیل. (۱۴۰۴). بررسی اثرات آلاینده‌های جوی معیار و پارامترهای هواشناسی

بر تغییر غلظت کربن سیاه در تهران و تبریز. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۴(۴۳)، ۲۶-۳۳. DOI: 10.22111/jneh.2024.47935.2028



© پریسا کهراری، شهریار خالدی، قاسم کیخسروی\*، سید جلیل علوی.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

## مقدمه

آلاینده کربن سیاه یکی از اجزای مهم ذرات ریز معلق در هواست که نقش بسیار مهمی در تغییر تعادل انرژی جو و گرمایش زمین ایفا می‌کند. در عین حال، ارتباط انتشار این ذرات با مرگ و میر زودرس، آن را به یک نگرانی عمده برای کیفیت هوای محلی تبدیل کرده است. بنابراین، شناخت ارتباط کربن سیاه با پارامترهای هواشناسی و سایر آلاینده‌های جوی ضروری است و پیامدهای مثبتی در حفاظت از محیط زیست و سلامت انسان به همراه خواهد داشت. مرور ادبیات پژوهش داخلی نشان می‌دهد تا کنون مطالعه جامعی در زمینه بررسی اثرات پارامترهای مختلف هواشناسی و آلاینده‌های جوی معیار بر غلظت آلاینده کربن سیاه صورت نگرفته است. از این رو، هدف پژوهش حاضر واکاوی ارتباط بین پارامترهای هواشناسی، آلاینده‌های جوی معیار و آلاینده کربن سیاه در مقیاس‌های زمانی ماهانه و فصلی و همچنین شناسایی آلاینده‌ها و عوامل هواشناسی مؤثر در تغییرات سطح غلظت آلاینده کربن سیاه در شهرهای تبریز و تهران طی سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۰۴ است.

## داده‌ها و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر شامل میانگین ماهانه پارامترهای هواشناسی (دما، بارش، سرعت باد، رطوبت نسبی، فشار هوا، ساعات آفتابی، تابش خورشیدی و ابرناکی) در ایستگاه‌های همدیدی، میانگین روزانه غلظت آلاینده‌های جوی معیار (کربن منوکسید، نیتروژن دی اکسید، گوگرد دی اکسید، ازن و ذرات معلق) در ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا و میانگین ساعتی غلظت آلاینده‌ی کربن سیاه استخراج شده از داده‌های بازتحلیل مدل مبنای MERRA-2 در سامانه گوگل ارث انجین است. در این پژوهش از نرم افزار R نسخه ۴.۳.۲ برای انجام کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری داده‌ها استفاده شده است. کیفیت داده‌ها از طریق شناسایی و مدیریت مقادیر مفقود و پرت مورد بررسی قرار گرفت و جهت سازگاری زمانی با داده‌های هواشناسی، مقادیر ماهانه غلظت‌های آلاینده‌ها استخراج گردید. آزمون ناپارامتری من-کندال برای تعیین وجود یا عدم وجود روند در سری زمانی ماهانه عناصر هواشناسی و آلاینده‌های هوا و آزمون شیب سن جهت برآورد شیب واقعی روند در سری زمانی داده‌ها بکار گرفته شد. ارتباط میان پارامترهای هواشناسی، آلاینده‌های جوی معیار و ذرات کربن سیاه در مقیاس‌های زمانی ماهانه و فصلی با انتخاب روش تحلیل همبستگی مناسب بر اساس توزیع داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به منظور شناسایی آلاینده‌ها و عوامل هواشناسی مؤثر در تغییرات سطح غلظت آلاینده کربن سیاه در شهرهای تبریز و تهران، الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی چندگانه، مدل جمعی تعمیم یافته، درخت طبقه‌بندی و رگرسیون، جنگل تصادفی و تقویت گرادیان در بسته tidymodels پیاده‌سازی شد. ارزیابی عملکرد مدل‌های پیشگو بر اساس ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطای اعتبارسنجی (آزمایش) صورت گرفت.

## نتایج و بحث

غلظت آلاینده کربن سیاه در شهرهای تبریز و تهران دارای بیشترین همبستگی مثبت با ذرات معلق ریز و بیشترین همبستگی منفی با آلاینده ازن است. همچنین، یافته‌های این مطالعه حاکی از کاهش سطح غلظت آلاینده کربن

سیاه با افزایش دما، سرعت باد، ساعات آفتابی و تابش خورشیدی و افزایش غلظت این آلاینده با افزایش میزان رطوبت نسبی، فشار هوا و ابرناکی در این شهرهاست. بطور کلی، آلاینده کربن سیاه در تبریز دارای بیشترین همبستگی منفی با سرعت باد و بیشترین همبستگی مثبت با رطوبت نسبی است. در تهران نیز دما و فشار هوا به ترتیب قوی‌ترین همبستگی منفی و مثبت را با میانگین غلظت آلاینده کربن سیاه دارند. با توجه به خروجی‌های الگوریتم‌های یادگیری ماشین، آلاینده‌های ازن، ذرات ریز و نیتروژن دی اکسید و عناصر سرعت باد، دما و تابش خورشیدی از اهمیت بیشتری در توضیح تغییرات آلاینده کربن سیاه در تبریز برخوردارند. در تهران نیز پارامترهای دما، فشار هوا و بارش و آلاینده‌های ذرات ریز معلق در هوا و ازن نقش مؤثرتری در بیان تغییرات سطح غلظت آلاینده کربن سیاه ایفا می‌کنند. بر اساس ارزیابی عملکرد مدل‌های پیشگو و با توجه به اصل صرفه‌جویی، در تبریز مدل جمعی تعمیم یافته و در تهران مدل رگرسیون خطی چند متغیره از عملکرد بهتری در پیش‌بینی مقادیر کربن سیاه نسبت به سایر مدل‌ها برخوردارند.

### نتیجه‌گیری

آلاینده کربن سیاه نقش پیچیده و در عین حال مهمی در اثر اقلیمی ذرات معلق در جو ایفا می‌کند. بنابراین، تحقیقات بر روی تعاملات کربن سیاه با پارامترهای هواشناسی و سایر آلاینده‌های جوی بسیار مهم است. در واقع، به دلیل طول عمر کوتاه کربن سیاه، کاهش انتشار این آلاینده نه تنها می‌تواند یک راهبرد ممکن برای کاهش گرمایش جهانی باشد، بلکه با بهبود کیفیت هوا به‌طور مستقیم به سلامت انسان کمک می‌کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که داده‌های باز تحلیل مدل MERRA-2 می‌تواند ابزار مناسبی برای تحلیل کیفی داده‌های کربن سیاه باشد. با این حال، با توجه به قدرت تفکیک مکانی پایین داده‌های این مدل، طراحی سیستم‌های بهتر نظارت بر آلودگی هوا برای ثبت رویدادهای آلودگی کربن سیاه و تأثیرات محیطی آن در کلان‌شهرها ضروری است. از سوی دیگر شناخت تعامل پیچیده کربن سیاه با آب و هوا و آلاینده‌های جوی معیار در مناطق شهری دارای اقلیم و منابع انتشار متفاوت بویژه در فصول مختلف سال نیازمند مطالعات بیشتر است.

### منابع

- رئیس پور، کوهزاد؛ خسروی، یونس. (۱۴۰۰). پایش بلندمدت غلظت آلاینده کربن سیاه (BC) در ایران با استفاده از داده‌های مدل مبنای NASA/MERRA-2. فصلنامه علوم محیطی، ۱۹(۳)، ۹۹-۱۲۲. <https://doi.org/10.52547/envs.2021.33941>
- سرور، هوشنگ؛ اسمعیل پور، مرضیه؛ خیری‌زاده، منصور؛ امرابی، مهتاب. (۱۳۹۹). تحلیل فضایی مؤلفه‌های تأثیرگذار بر آلودگی هوای شهر تبریز. مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۹(۲۴)، ۱۷۲-۱۵۱. <https://doi.org/10.22111/JNEH.2020.31469.1558>
- Bounakhla, Y., Benchrif, A., Costabile, F., Tahri, M., El Gourch, B., El Hassan, E.K., Zahry, F. & Bounakhla, M. (2023). Overview of PM10, PM2.5 and BC and Their Dependent Relationships with Meteorological Variables in an Urban Area in Northwestern Morocco. *Atmosphere*, 14(1), p 162. <https://doi.org/10.3390/atmos14010162>
- Chen, C., McCabe, D. C., Fleischman, L. E., & Cohan, D. S. (2022). Black carbon emissions and associated health impacts of gas flaring in the United States. *Atmosphere*, 13(3), p 385. <https://doi.org/10.3390/atmos13030385>
- Kuhn, M. & Wickham, H. (2020). Tidymodels: A Collection of Packages for Modeling and Machine Learning using Tidymodels Principles. <https://www.tidymodels.org>

- Kutzner, R. D., von Schneidmesser, E., Kuik, F., Quedenau, J., Weatherhead, E. C., & Schmale, J. (2018). Long-term monitoring of black carbon across Germany. *Atmospheric Environment*, 185, pp 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.039>
- Liakakou, E., Stavroulas, I., Kaskaoutis, D.G., Grivas, G., Paraskevopoulou, D., Dumka, U.C., Tsagkaraki, M., Bougiatioti, A., Oikonomou, K., Sciare, J. & Mihalopoulos, N. (2020). Long-term variability, source apportionment and spectral properties of black carbon at an urban background site in Athens, Greece. *Atmospheric Environment*, 222, p 117137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117137>
- Liu, X., Wei, Y., Liu, X., Zu, L., Wang, B., Wang, S., Zhang, R. & Zhu, R. (2022). Effects of Winter Heating on Urban Black Carbon: Characteristics, Sources and Its Correlation with Meteorological Factors. *Atmosphere*, 13(7), p 1071. <https://doi.org/10.3390/atmos13071071>
- Şahin, Ü.A., Onat, B., Akın, Ö., Ayvaz, C., Uzun, B., Mangır, N., Doğan, M. & Harrison, R.M. (2020). Temporal variations of atmospheric black carbon and its relation to other pollutants and meteorological factors at an urban traffic site in Istanbul. *Atmospheric Pollution Research*, 11(7), pp 1051-1062. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.03.009>
- Sand, M., Samset, B. H., Tsigaridis, K., Bauer, S. E., & Myhre, G. (2020). Black carbon and precipitation: An energetics perspective. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(13), e2019JD032239. <https://doi.org/10.1029/2019JD032239>
- Sankar, T. K., Ambade, B., Mahato, D. K., Kumar, A., & Jangde, R. (2023). Anthropogenic fine aerosol and black carbon distribution over the urban environment. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, pp 1-10. <https://doi.org/10.1007/s43994-023-00055-4>
- Yeganeh, B., Khuzestani, R. B., Taheri, A., & Schauer, J. J. (2021). Temporal trends in the spatial-scale contributions to black carbon in a Middle Eastern megacity. *Science of the Total Environment*, 792, p 148364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148364>
- Zhang, Y., Li, Y., Guo, J., Wang, Y., Chen, D., & Chen, H. (2019). The climatology and trend of black carbon in China from 12-year ground observations. *Climate Dynamics*, 53, pp 5881-5892. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04903-0>