



Synoptic-Remote Sensing Analysis of the Persistence of Air Pollution in the Southern Slopes of Alborz (Tehran, Alborz and Qazvin Metropolitan)

Ghasem Azizi¹ | Mohammad Naji² | Mostafa Karimi³

1. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.
E-mail: ghazizi@ut.ac.ir
2. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 29 Apr 2024

Received in revised form:
16 Jun 2024

Accepted: 18 Jun 2024

Available online: 21 Jun
2024

Keywords:

Air quality index,
Severe pollution,
Boundary layer,
Temperature inversion,
Blocking patterns.

ABSTRACT

Regional recognition and analysis of air pollution is one of the important components in the action plan for environmental sustainability. The present study was conducted to analyze the spatial distribution, the reasons for the persistence of air pollution, and the factors that cause it in the dense population-industrial area of the three metropolitan cities of Tehran, Karaj, and Qazvin. In this regard, the combination of station-satellite and atmospheric data between 2018 and 2023 was used. By using the air quality index (AQI), the days that had an average daily pollution index above 150 and were in an unhealthy condition and continued for at least 6 days or more in the five-year statistical period were extracted. Then, two periods from January 17 to 29, 2023, and December 19 to 28, 2022, when air pollution was the most persistent, were selected for analysis. The results of the synoptic analysis showed that during the duration of the pollution, the blocking pattern has caused the movement of the system to stop or slow down, and with the establishment of a strong ridge, the atmosphere of Iran and the region has been kept in a stable state. With its permanent establishment, the mentioned ridge has caused the stillness of the air. As a result of these conditions, pollution has yet to be discharged daily and accumulated. The average distribution and focus of pollutants with the help of satellite images shows that the highest amount of CO and NO₂ is concentrated in the city of Tehran. In contrast, the highest amount of SO₂ is concentrated in Qazvin province. It seems that the Shahid Rajaei power plant is responsible for a large share of SO₂ pollution. The study of the atmospheric patterns of these 7 periods, when air pollution has been high, indicates the dominance of blocking patterns.

Cite this article: Azizi, Gh., Naji, M., & Karimi, M. (2024). Synoptic-Remote Sensing Analysis of the Persistence of Air Pollution in the Southern Slopes of Alborz (Tehran, Alborz and Qazvin Metropolitan). *Geography and Environmental Sustainability*, 14 (2), 65-82. <https://doi.org/10.22126/GES.2024.10555.2752>



© The Author (s).

DOI: <https://doi.org/10.22126/GES.2024.10555.2752>

Publisher: Razi University

تحلیل همدیدی - دورسنجی تداوم آلودگی هوا در دامنه‌های جنوبی البرز (تهران، البرز و قزوین)

قاسم عزیزی^۱ | محمد ناجی^۲ | مصطفی کریمی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ghazizi@ut.ac.ir
 ۲. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
 ۳. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخچه مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۷</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹</p> <p>دسترسی آنلاین: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱</p> <p>کلیدواژه‌ها:</p> <p>شاخص کیفیت هوا، آلودگی‌های شدید، لایه‌مرزی، وارونگی دما، الگوی بندالی.</p>	<p>شناخت و تحلیل پهنه‌های آلودگی هوا یکی از مؤلفه‌های مهم در برنامه اقدام برای پایداری محیط است. پژوهش حاضر باهدف تحلیل توزیع فضایی و چرایی تداوم آلودگی هوا و همین‌طور عوامل ایجادکننده آن در منطقه متراکم جمعیتی - صنعتی محدوده سه کلان‌شهر تهران، کرج و قزوین انجام شده است. در این راستا از تلفیق داده‌های ایستگاهی - ماهواره‌ای و جوی بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. با استفاده از شاخص کیفیت هوا (AQI) روزهایی که در پنج سال دوره آماری میانگین شاخص روزانه آلودگی آنها بالای ۱۵۰ و در وضعیت ناسالم قرار داشته و حداقل ۶ روز یا بیشتر تداوم داشتند، استخراج گردید. سپس دو دوره ۱۷ تا ۲۹ ژانویه ۲۰۲۳ و ۱۹ الی ۲۸ دسامبر ۲۰۲۲ که آلودگی هوا بیشترین تداوم را داشته است، جهت تجزیه و تحلیل انتخاب شدند. نتایج تحلیل سینوپتیک نشان داد که در طی مدت تداوم آلودگی، الگوی بلاکینگ سبب مانا یا کندشدن حرکت سامانه شده است و با استقرار پشته‌ای قوی جو ایران و منطقه را در حالت پایدار نگه داشته است. پشته مذکور با استقرار ماندگار خود، سبب سکون هوا شده است. نتیجه این شرایط سبب عدم تخلیه روزانه آلودگی و انباشته‌شدن آن گردیده است. میانگین پراکنش و کانون آلاینده‌ها به کمک تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که بیشترین مقدار منو اکسید کربن و نیتروژن دی‌اکسید در شهر تهران تمرکز دارد. درحالی‌که بالاترین مقدار گوگرد دی‌اکسید در استان قزوین تمرکز دارد. به نظر می‌رسد نیروگاه شهید رجایی سهم بالایی از مقدار آلاینده گوگرد دی‌اکسید را عهده‌دار است. مطالعه الگوهای جوی این ۷ دوره که آلودگی هوا تداوم بالایی داشته، حاکی از تسلط الگوهای بندالی می‌باشد.</p>

استناد: عزیزی، قاسم؛ ناجی، محمد؛ کریمی، مصطفی (۱۴۰۳). تحلیل همدیدی - دورسنجی تداوم آلودگی هوا در دامنه‌های جنوبی البرز (تهران، البرز و قزوین). *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۴ (۲)، ۶۵-۸۲. <https://doi.org/10.22126/GES.2024.10555.2752>

مقدمه

پایداری محیطی، یکی از مهم‌ترین بسترها در توسعه پایدار است و آلودگی هوا یکی از مؤلفه‌های اصلی برهم‌زننده پایداری محیط به حساب می‌آید. آلودگی هوا می‌تواند به روش‌های گوناگون به گیاهان و درختان آسیب برساند. آلودگی در لایه سطحی هوا می‌تواند منجر به کاهش عملکرد محصولات کشاورزی و جنگل‌ها و مراتع، کاهش رشد و بقای نهال درختان، و افزایش حساسیت گیاه به بیماری، آفات و سایر تنش‌های محیطی شود. آسیب‌پذیرترین افراد و جوامع (کودکان، زنان و سالمندان) معمولاً کسانی هستند که بیشترین آسیب را از آلودگی هوا می‌بینند، بنابراین سیاست‌ها و اقدامات برای بهبود کیفیت هوا می‌تواند به کاهش نابرابری‌ها کمک کند (United Nations, 2023).

آلودگی هوا در زندگی انسان زمانی نمایان شد که سکونت انسان به صورت اجتماعات متمرکز و ثابت شکل گرفت (قنبری و عزیزی، ۱۳۸۸). با گسترش شتابان شهرها، آلودگی هوا با پیامدهای منفی بی‌شمار، به یکی از بنیادی‌ترین تنگناهای زیست محیطی شهرهای بزرگ جهان تبدیل شده است (براتی و شکیب، ۱۴۰۳). به طوری که در سطح جهانی، آلودگی هوا مهم‌ترین خطر بهداشت محیطی به‌شمار می‌رود. یکی از مهم‌ترین عوامل ناپایداری زیست محیطی در شهرها، آلودگی هوای ناشی از مصرف سوخت فسیلی و افزایش آلاینده‌هاست (صیدایی و همکاران، ۱۳۹۷). این آلودگی مضر در مناطق شهری بیشتر از مناطق روستایی به دلیل تمرکز منابع اصلی انتشار است (Krzyzanowski et al., 2014). دلایل اصلی مشکلات کیفیت هوا در کلان شهرها، رشد جمعیت شهری، همراه با تغییر کاربری زمین به دلیل افزایش مناطق شهری است (Mayer et al., 1999). داده‌های پایش بلندمدت کیفیت هوا نشان داده است که آلودگی هوا به یک مشکل فاجعه بار برای جامعه تبدیل شده است (Yang et al., 2018).

بخش بزرگی از جمعیت ایران در دامنه جنوبی البرز مرکزی یعنی سه کلان‌شهر تهران، کرج و قزوین متمرکز شده‌اند. طبق آخرین سرشماری نفوس و مسکن این سه شهر دارای ۱۵.۹۱۷.۱۱۶ جمعیت ساکن در نقاط شهری می‌باشد (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). این جمعیت سطوح بالای آلودگی جوی را تجربه می‌کنند و نگرانی‌های زیادی در تمام بخش‌های جامعه ایجاد می‌کند و زندگی، سلامت و کار مردم در منطقه را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار داده است. در دامنه جنوبی البرز مرکزی، عوامل اقلیمی ثابتی نظیر طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، جهت و پوشش سطح زمین وجود دارد و به عبارتی در این منطقه، پهنه فیزیکی ثابت است اما این سوال مطرح می‌شود که چرا برخی روزها هوا به‌شدت آلوده می‌شود و این آلودگی هوا تداوم پیدا می‌کند.

در نگارش این مقاله به تحلیل توزیع فضایی و چرایی تداوم آلودگی هوا و عوامل ایجادکننده آن در منطقه متراکم جمعیتی - صنعتی محدوده سه کلان‌شهر تهران، کرج و قزوین پرداخته شده است. در این راستا، روند تداوم آلودگی روزانه هوا و انباشت آلاینده‌ها با توجه به نوع آلاینده و در ارتباط با گردش جو و الگوهای همدیدی (سینوپتیک^۱) منجر به شرایط جوی مسلط بر منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است.

بررسی آلودگی هوا و ارتباط آن با عوامل آب‌وهوای همدیدی با توجه به شرایط جو، همواره مورد توجه بسیاری از محققان بوده است. دی برناردینو و همکاران در تحقیقی به بررسی تأثیر شرایط همدیدی بر غلظت و ترکیب ذرات جو در منطقه شهری رم (ایتالیا) پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در زمانی که بادهای شمالی با سرعت بیش از ۴ متر در ثانیه و حداقل ۲۴ ساعت تداوم داشته باشد غلظت ذرات PM₁₀ به زیر ۱۵ میکروگرم بر متر مکعب می‌رسد. هنگامی که وارونگی دمای پایدار رخ می‌دهد، غلظت‌های بالایی توسط ایستگاه‌های شهری ثبت می‌شود (Di Bernardino et al., 2021). لای و همکاران در پژوهشی به بررسی تأثیر الگوهای همدید بر غلظت‌های شدید PM₁₀ در سکوندای افریقای جنوبی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که رویدادهای شدید PM₁₀ با شرایط واچرخندی^۲ بر روی معدن و نیروگاه‌های زغال سنگ مرتبط است (Lai et al., 2023). روسو و همکاران به بررسی غلظت‌های شهری (NO₂^۳)،

1. Synoptic
2. Anticyclone
3. Nitrogen dioxide

(PM10)^۱ و (O3)^۲ و ارتباط آن با انواع گردشی جو در پرتغال با استفاده از ویژگی‌های همدید و فراوانی نوع الگوهای گردشی مرتبط با وقوع دوره های آلودگی هوا بین سال های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که غلظت بالاتر هر سه آلاینده و دو رویداد شدید مورد تجزیه و تحلیل عمدتاً با گردش همدیدی که با یک جز فرارفت توده‌های هوای خشک مشخص می‌شود، رخ می‌دهد (Russo et al., 2014).

هسو و چنگ، در پژوهشی به بررسی الگوهای همدید و آلودگی هوا در تایوان، در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸ پرداختند. آن‌ها در طبقه بندی الگوهای همدید ۶ خوشه را استخراج کردند. خوشه‌های ۱، ۲ و ۳، که انواع آب‌وهوای زمستانی معمولی هستند و با غلظت بالای آلاینده هوا مرتبط هستند. خوشه ۴، که بیشتر در طول ماه‌های انتقال فصلی رخ می‌دهد و با بالاترین غلظت O3 همراه است و ۵ و ۶ که انواع آب‌وهوای تابستانی با غلظت آلاینده کم هستند (Hsu & Cheng, 2019). هاجسون و فیلیپس تغییرات فصلی آلودگی هوا با روش همدید در بیرمنگام، انگلستان طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ بررسی کردند که شش طبقه‌بندی فشار هوا را در هر دو فصل زمستان و تابستان ارائه کردند و به این نتیجه رسیدند که غلظت‌های بالای آلاینده با انواع واچرخندها مرتبط بوده است (Hodgson & Phillips, 2021). ماکرا و همکاران در پژوهشی به بررسی رابطه میان الگوهای جوی بزرگ مقیاس و آلودگی هوا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت آلاینده‌های هوای پیکزلی در مجارستان در دو فصل تابستان و زمستان در شرایط استقرار سامانه واچرخندی و پراترفاع در سطوح میانی جو رخ می‌دهد و کاهش این آلاینده‌ها نه تنها در هنگام استقرار چرخنده‌های دینامیکی، بلکه به هنگام استقرار پراترفاع ها، هم می‌تواند رخ دهد (Makra et al., 2007). فیناردی و پلگرینی به بررسی شرایط همدیدی حاکم بر یک آلودگی هوای شدید شهری در دره پو واقع در ایتالیا در ژانویه ۲۰۰۲ پرداختند و آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فرارفت هوای گرم بر روی لایه سرد نزدیک به سطح زمین سبب ایجاد ساختار دمایی پایدار و ایجاد واچرخند در تراز ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال می‌گردد و بررسی نقشه‌های همدیدی نشان می‌دهد که در تمام موارد سامانه‌های پرفشار در سطح زمین حاکم بوده است (Finardi & Pellegrini, 2002).

در ایران نیز لشکری و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی الگوهای همدیدی آلودگی‌های شدید هوا، در لایه وردسپهر زیرین کلان‌شهر تهران پرداختند و پنج الگوی همدیدی آلودگی شدید از جمله الگوی پرفشارهای مهاجر، پرفشار سبیری، الگوی ترکیبی پرفشار سبیری و پرفشار عربستان و کم فشار پاکستان شناسایی کردند. عزیززی و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی تحت عنوان، تاثیرپذیری شدت جزیره گرمایی شهری تهران از الگوهای همدیدی جو، به این نتیجه رسیدند که در زمان سلطه شرایط پرفشاری به علت پایداری هوا، شدت جزیره گرمایی افزایش می‌یابد در صورتی که در شرایط کم فشاری خلاف این حالت رخ می‌دهد. پناهی (۱۳۹۵)، به بررسی الگوهای همدیدی بر اساس دوره‌های بحرانی آلودگی هوا در وارونگی دمایی شدید در شهر تبریز پرداخت. یافته‌های وی نشان می‌دهد هنگامی که سیستم پرفشاری به صورت مداوم در مقطع چندروزه در منطقه متمرکز می‌شود شدت وارونگی دما به اوج خود می‌رسد. سلطانی‌گردفرامزی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی همدیدی روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد پرداختند. نتایج تحلیل همدیدی آن‌ها بیانگر آن است که روزهای بسیار آلوده ۱۳ و ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷ در شهر مشهد در قالب الگوی پرفشار مهاجر که عبور امواج غربی از روی منطقه استقرار پشته‌ای قوی در محدوده رشته کوه‌های اورال و دریای خزر را در پی دارد سبب شکل‌گیری هم‌زمان چند لایه کم ضخامت وارونگی در زیر تراز ۴۰۰ هکتوپاسکال می‌شود.

مظفری و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی تحت عنوان، تحلیل رابطه الگوهای همدید با میزان آلاینده ذرات معلق و منو اکسید کربن در شیراز به این نتیجه رسیدند که حاکمیت پرفشار جنب حاره علل اصلی بالا رفتن غلظت آلاینده‌ها است. رنجبر سعادت‌آبادی و قصابی (۱۳۸۹)، به بررسی و مطالعه همدیدی الگوهای جوی حاکم بر روی تهران در روزهای با آلودگی بسیار شدید هوا پرداخته‌اند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که الگوهای فشاری برای روزهای با

آلودگی بسیار شدید در شهر تهران هر چند در فصول مختلف روی داده است، اما شباهت‌هایی از نظر محل استقرار و نوع سامانه‌ها دیده می‌شود و در همه موارد مطالعه شده، استقرار سامانه پرفشار بر روی زاگرس و جنوب البرز و کم فشار حرارتی در نواحی شمال البرز همراه با پرارتفاع سطوح میانی جو، شرایط باد آرام در تهران از ویژگی‌های مهم این سامانه‌ها می‌باشند.

افشاری آزاد و همکاران (۱۴۰۰)، در تحقیقی تحلیلی همدیدی آلودگی هوای مناطق ۲، ۵، ۹ و ۱۸ شهرداری تهران را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که در زمان آلودگی شدید و مخاطره‌ای هوا پرفشار بر سطح شهر تسلط دارد و هوا پایدار است و باد یا وجود ندارد و یا کمتر از ۳ متر بر ثانیه است که قدرت صاف کنندگی هوا را ندارد. کرمانی و همکاران (۱۳۹۵)، به تحلیل آماری- همدیدی غلظت آلاینده مونواکسیدکربن براساس سمت و سرعت باد و مخاطره آن در شهر تهران با سه روش آماری، همدیدی و ترمودینامیکی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در بیشتر روزهای آلوده، الگوی پرفشاری در لایه های میانی جو حاکمیت داشته و فرونشینی هوا در سطح زمین رخ می‌دهد.

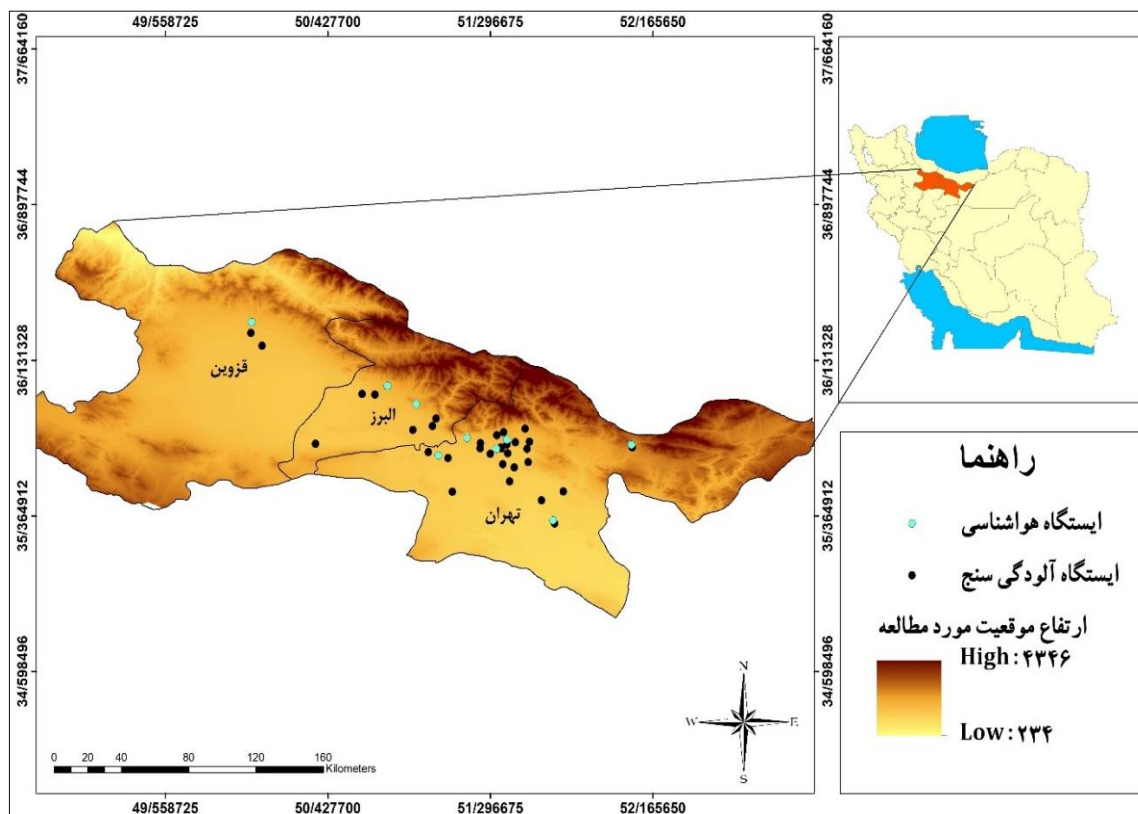
پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد عمده مطالعات پیشین به‌صورت ایستگاهی بوده و پژوهش قابل‌توجهی در رابطه با تداوم و انباشت آلودگی هوا در پهنه‌های جمعیتی - صنعتی همانند ناحیه بین تهران تا قزوین در سه استان تهران، البرز و قزوین با کمک تلفیق داده‌های ایستگاهی - ماهواره‌ای و جوی به انجام نرسیده است. در منطقه ذکر شده عوامل اقلیمی ثابتی طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع و... وجود دارد و به عبارتی پهنه فیزیکی ثابت است. اما این سؤال مطرح می‌شود که چرا برخی روزها هوا به شدت آلوده می‌شود و این آلودگی هوا تداوم پیدا می‌کند. با توجه به ضرورت دید یکپارچه در مطالعه آلودگی هوا که همسو با حفظ پایداری محیط است، این پژوهش با رویکرد پایداری محیط قصد دارد علاوه بر تحلیل توزیع فضایی آلودگی، علل تداوم آلودگی هوا در دامنه جنوبی البرز مرکزی را با توجه به گردش جو و الگوهای همدیدی مورد مطالعه و تحلیل قرار دهد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی، شامل استان‌های تهران، البرز و قزوین است. کوهپایه‌های این منطقه از جهت شمال به وسیله رشته کوه البرز محصور شده است و شمالی‌ترین فرونشست ایران مرکزی به حساب می‌آید. قرار گرفتن پایتخت سیاسی کشور در این منطقه، این محدوده را حائز اهمیت نموده است. این سه استان در مجموع دارای مساحت ۴۰.۲۱۴ کیلومترمربع و از نظر موقعیت جغرافیایی بین ۳۴ درجه و ۸۶ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۸۱ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۹۶ دقیقه طول شرقی قرار دارند (شکل ۱). طبق آخرین سرشماری نفوس و مسکن این سه کلان‌شهر دارای ۱۵.۹۱۷.۱۱۶ جمعیت ساکن می‌باشند (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). شکل ۱ نقشه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه و توزیع ناهمواری‌ها را نشان داده است. به خوبی می‌توان مشاهده نمود که شهر تهران و کرج از طرف شمال و شمال غرب با رشته کوه های البرز محدود شده‌اند که می‌تواند در سرعت و جهت باد و به تبع آن در آلودگی هوای این منطقه تأثیر گذار باشد. محدوده مرکزی و شرق استان قزوین را دشت تشکیل می‌دهد که شیب آن از شمال غرب به جنوب شرق امتداد دارد (منصور مقدم و همکاران، ۱۴۰۱).

داده‌های آلودگی هوا از ۳۲ ایستگاه آلودگی سنجی شرکت کنترل کیفیت هوای تهران و سازمان محیط زیست بین سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ اخذ گردیده است. ۱۶ ایستگاه مربوط به شرکت کنترل کیفیت هوا و ۱۶ ایستگاه دیگر مربوط به سازمان محیط زیست می‌باشد که اسامی و مشخصات آن‌ها در جدول ۱ و موقعیت جغرافیای آن‌ها نیز در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه و ایستگاه‌های هواشناسی و سنجش آلودگی مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سنج آلودگی

ردیف	نام ایستگاه	پایش شده توسط	ردیف	نام ایستگاه	پایش شده توسط
۱	اقدسیه، منطقه ۱	شرکت کنترل کیفیت هوا	۱۷	پاکدشت	سازمان محیط‌زیست
۲	پونک، منطقه ۵	شرکت کنترل کیفیت هوا	۱۸	باقرشهر	سازمان محیط‌زیست
۳	پیروزی، منطقه ۱۳	شرکت کنترل کیفیت هوا	۱۹	شهریار	سازمان محیط‌زیست
۴	تربیت مدرس، منطقه ۶	شرکت کنترل کیفیت هوا	۲۰	ورامین	سازمان محیط‌زیست
۵	ستاد، بحران، منطقه ۷	شرکت کنترل کیفیت هوا	۲۱	رباط کریم	سازمان محیط‌زیست
۶	شادآباد، منطقه ۱۸	شرکت کنترل کیفیت هوا	۲۲	دماوند	سازمان محیط‌زیست
۷	شریف، منطقه ۲	شرکت کنترل کیفیت هوا	۲۳	ملارد	سازمان محیط‌زیست
۸	شهر ری، منطقه ۲۰	شرکت کنترل کیفیت هوا	۲۴	قرچک	سازمان محیط‌زیست
۹	شهرداری، منطقه ۲	شرکت کنترل کیفیت هوا	۲۵	اشتهارد	سازمان محیط‌زیست
۱۰	شهرداری، منطقه ۱۰	شرکت کنترل کیفیت هوا	۲۶	فرهنگ‌سرا کرج	سازمان محیط‌زیست
۱۱	شهرداری، منطقه ۱۱	شرکت کنترل کیفیت هوا	۲۷	ساوجبلاغ	سازمان محیط‌زیست
۱۲	شهرداری، منطقه ۱۹	شرکت کنترل کیفیت هوا	۲۸	نظرآباد	سازمان محیط‌زیست
۱۳	شهرداری، منطقه ۲۱	شرکت کنترل کیفیت هوا	۲۹	کرج منطقه ۸	سازمان محیط‌زیست
۱۴	شهرداری، منطقه ۲۲	شرکت کنترل کیفیت هوا	۳۰	کرج منطقه ۳	سازمان محیط‌زیست
۱۵	گلبرگ، منطقه ۸	شرکت کنترل کیفیت هوا	۳۱	قزوین	سازمان محیط‌زیست
۱۶	مسعودیه، منطقه ۱۵	شرکت کنترل کیفیت هوا	۳۲	الوند	سازمان محیط‌زیست

در پژوهش حاضر جهت شناسایی روزهای آلوده از شاخص کیفیت هوا (AQI^۱) استفاده شد. شاخص کیفیت هوا میزان تأثیر هوای آلوده بر سلامت انسان را نشان داده و درک آن را برای شهروندان آسان تر می‌سازد. این شاخص معیاری است که

از صفر تا ۵۰۰ متغیر است و هرچه شاخص کیفیت هوا بزرگ‌تر باشد خطرات آلودگی هوا بیشتر می‌شود (شرکت کنترل کیفیت هوای تهران، ۱۴۰۱). به منظور درک بهتر، شاخص کیفیت هوا به شش گروه تقسیم‌بندی شده است (جدول ۲). داده‌های شاخص کیفیت هوا پس از دریافت در نرم افزار Excel مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و روزهای آلوده، با تداوم بالا شناسایی شد.

جدول ۲. سطوح مختلف شاخص کیفیت هوا

خطرناک	بسیار ناسالم	ناسالم	ناسالم برای گروه‌های حساس	قابل قبول	پاک
(۳۰۱-۵۰۰)	(۲۰۱-۳۰۰)	(۱۵۱-۲۰۰)	(۱۰۱-۱۵۰)	(۵۱-۱۰۰)	(۰-۵۰)

در ادامه جهت شناسایی الگوهای همدیدی مؤثر در تداوم آلودگی هوا، داده‌های ساعتی شبکه‌بندی تحلیل مجدد^۱ ارتفاع ژئوپتانسیل از پایگاه داده (ERA5) با وضوح افقی ۰.۲۵ درجه از مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان مدت جوی (ECMWF^۲) برای ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال اخذ گردید. نقشه‌های هم‌ارتفاع ژئوپتانسیل برای تراز ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال در محیط نرم افزار GrADS^۳ به میانگین روزانه تبدیل و ترسیم شد. به منظور بررسی ارتباط الگوهای گردش جو با داده‌های زمینی در مواردی که آلودگی هوا تداوم داشته است، داده‌های دید افقی و دمای ۳ ایستگاه همدید سازمان هواشناسی در منطقه مورد مطالعه نیز اخذ گردید و در نرم‌افزار Excel مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از آنجایی که مطالعه وارونگی دمایی و پایداری هوا در تشدید و تداوم آلودگی هوا از اهمیت بالایی برخوردار است و پدیده غالب منطقه مورد مطالعه به حساب می‌آید، برای بررسی شرایط قائم جو در روزهای منتخب، داده‌های نیمرخ قائم جو بالا (Skew-T) ایستگاه همدید مهرآباد، از پایگاه داده‌های جوی دانشگاه وایومینگ^۴ (۲۰۲۲) استفاده شد.

این داده‌ها در منطقه مورد مطالعه با توجه به محدودیت‌های موجود، صرفاً در ایستگاه مهرآباد اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به فاصله ۱۵۰ کیلومتری تهران تا قزوین این نمودار ممکن است نماینده مناسبی برای قزوین نباشد. به همین دلیل نتایج صرفاً بر اساس این نمودار نیست. داده‌های نیمرخ قائم جو بالا در دو زمان ۰۰:۰۰ و ۱۲:۰۰ به وقت گرینویچ ثبت می‌شود که مطابق با ساعت ۳/۵ شب و ۱۵/۵ به ساعت محلی تهران است. به منظور مشخص نمودن نحوه پراکنش و بررسی کانون آلاینده‌ها در جهت تکمیل داده‌های زمینی از محصولات ماهواره سنتینل ۵ و سنجنده آن یعنی Tropomi استفاده شده است. محصولات مختلف مربوط به آلاینده‌های CO، NO₂، SO₂ و AAI5، غلظت و پراکنش آلاینده با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون در محیط GEE^۶ با تفکیک مکانی یک کیلومتری استخراج شد. نقشه مکانی میانگین غلظت آلاینده‌ها در نرم‌افزار ArcMap طبقه‌بندی و برای تجزیه و تحلیل تولید گردید.

در واقع این پژوهش با دید یکپارچه به منطقه مورد مطالعه، با تلفیق داده‌های ایستگاهی - ماهواره‌ای و جوی و با کمک روش همدیدی و سنجش از دوری به علل تداوم آلودگی هوا می‌پردازد.

نتایج

با توجه به هدف اصلی پژوهش که تحلیل روزهای آلودگی هوا با تداوم بالا بوده است، به کمک شاخص کیفیت هوا روزهایی که در چهار سال دوره آماری میانگین شاخص روزانه بالای ۱۵۰ و در وضعیت ناسالم قرار داشته و حداقل ۶ روز و بیشتر تداوم داشته است استخراج گردید. در دوره مطالعاتی کلا هفت مورد روزهای آلوده با شاخص میانگین روزانه ۱۵۰ و بیشتر شناسایی شد (جدول ۳). همان‌طور که ملاحظه می‌شود روزهای آلوده با دوام ۶ روز و بیشتر در فصل سرد سال از اواخر آبان

1. Reanalysis

2. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts(cds.climate.copernicus.eu)

3. Grid Analysis and Display System

4. <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

۵. Absorbing Aerosol Index(شاخص UVAI بر اساس کنتراست طیفی در محدوده طیفی فرابنفش (UV) برای یک جفت طول موج مشخص است، جایی که تفاوت بین بازتاب مشاهده شده و مدل‌سازی شده منجر به یک مقدار باقیمانده می‌شود، هنگامی که این باقیمانده مثبت باشد، نشان دهنده وجود ذرات معلق در هوای جاذب UV، مانند گرد و غبار و دود است)

6. Google Earth Engine

تا بهمن ماه رخ می‌دهد. بنابراین دو تاریخ ۲۷ دی تا ۹ بهمن ۱۴۰۱ (۱۳ روز) و ۱۷ تا ۲۸ آذر ۱۴۰۱ (۱۲ روز) که آلودگی هوا پرتداوم‌تر بوده جهت تجزیه و تحلیل با روش همدیدی و سنجش‌ازدوری انتخاب شد. لازم به ذکر است نتیجه‌گیری صرفاً بر اساس دو تاریخ ذکر شده نیست و در پایان، نتایج بررسی پنج مورد دیگر شرح داده می‌شود.

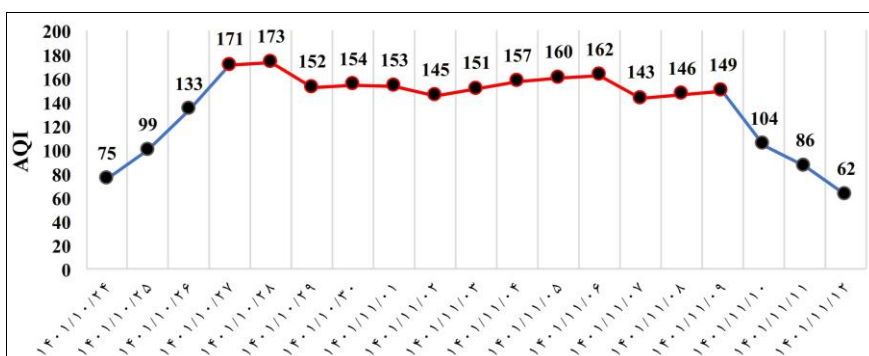
جدول ۳. مشخصات روزهای آلوده با دوام ۶ روز و بیشتر

ردیف	تاریخ	تعداد روز تداوم آلودگی
۱	۱۱ الی ۱۶ آذر ۱۴۰۲	۶ روز
۲	۲۷ دی الی ۹ بهمن ۱۴۰۱	۱۳ روز
۳	۹ الی ۱۷ دی ۱۴۰۱	۹ روز
۴	۱۷ الی ۲۸ آذر ۱۴۰۱	۱۲ روز
۵	۲۹ آبان الی ۴ آذر ۱۴۰۱	۶ روز
۶	۱۸ الی ۲۶ دی ۱۳۹۹	۹ روز
۷	۹ الی ۱۵ دی ۱۳۹۹	۷ روز

جهت تحلیل شرایط جوی، کل هفت دوره معرفی شده در جدول ۳ مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به مشابهت شرایط همدیدی و همینطور فضای محدود صفحات مقاله دو مورد که بیشترین تداوم آلودگی مشاهده شده است ارائه می‌گردد:

دوره اول: ۲۷ دی الی ۹ بهمن ۱۴۰۱

روند تغییرات میانگین شاخص کیفیت هوا از ۲۴ دی ماه (سه روز قبل از اوج آلودگی) الی ۱۲ بهمن (سه روز پس از اوج آلودگی) در شکل ۲ نشان داده است. مطابق آن، شاخص کیفیت هوا طی سه روز از ۷۵ به ۱۷۱ رسیده و ۱۳ روز تداوم داشته است. در برخی روزها میانگین شاخص به زیر ۱۵۰ رسیده است که دلیل آن مقادیر کم برخی ایستگاه‌های حاشیه‌ای شرکت‌کننده در میانگین‌گیری مثل دماوند، ملارد و اشتهارد است، به طوری که در بیشتر ایستگاه‌ها مقدار این شاخص بالای ۱۵۰ است. طی این بازه زمانی ایستگاه شهرداری منطقه ۱۲ در تهران با مقدار ۱۸۷، ایستگاه ساوجبلاغ در البرز با مقدار ۱۷۲ و ایستگاه قزوین با مقدار ۱۷۳ بالاترین مقدار شاخص کیفیت هوا را ثبت کرده‌اند. بالا بودن میزان غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در این ایستگاه‌ها موجب این وضعیت شده است. با توجه به این که در منطقه مورد مطالعه عوامل اقلیمی ثابتی نظیر طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، جهت و پوشش سطح زمین وجود دارد و به عبارتی در این منطقه پهنه فیزیکی ثابت است در برخی روزها هوا بشدت آلوده می‌شود و این آلودگی هوا تداوم پیدا می‌کند. در همین راستا جهت بررسی دلیل تداوم آلودگی هوا با روش همدیدی، شرایط جوی مسلط بر منطقه مورد مطالعه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

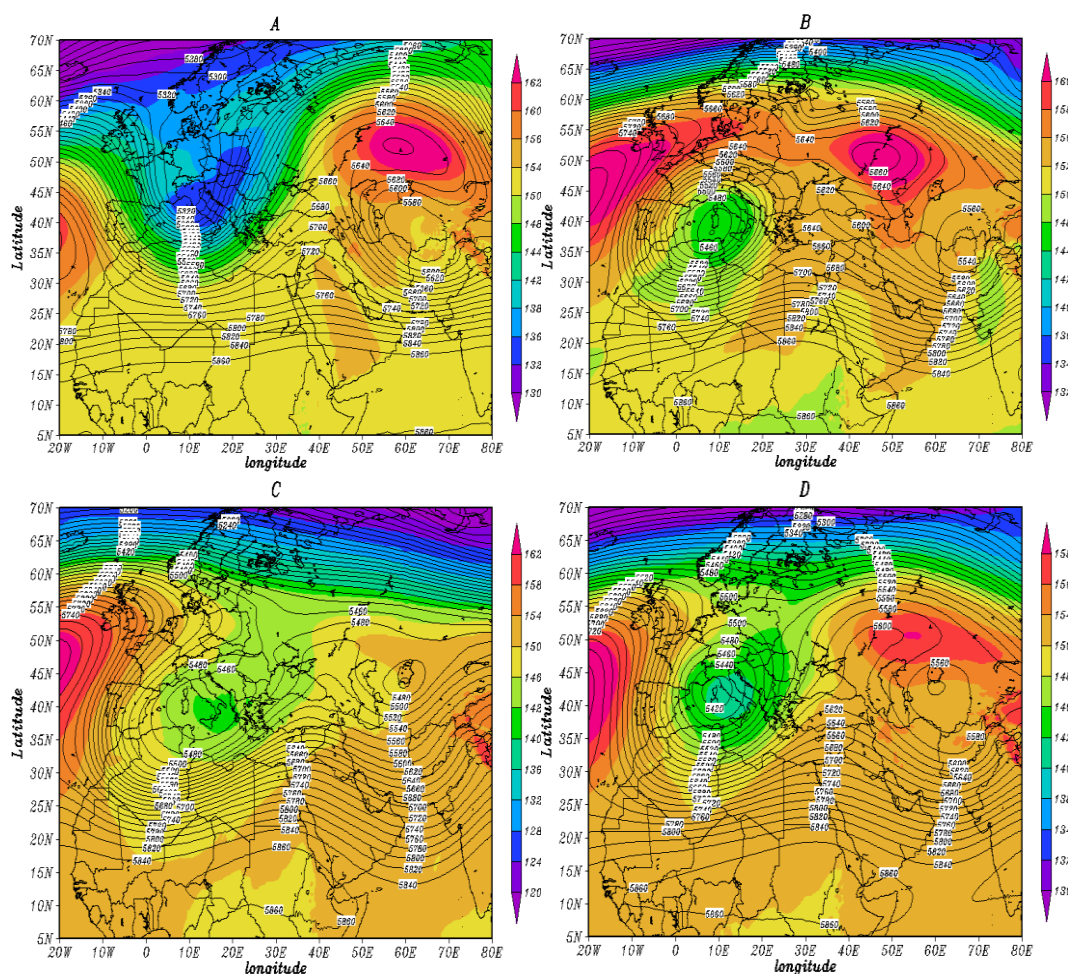


شکل ۲. میانگین شاخص کیفیت هوا (۲۴ دی تا ۱۲ بهمن ۱۴۰۱) (روزهای با تداوم آلودگی شدید با خط قرمز نشان داده شده است)

الگوی همدیدی حاکم در تراز ۸۵۰ و ۵۰۰ ژئوپتانسیل متر در این بازه ۱۳ روزه که آلودگی هوا تداوم داشته به صورت میانگین ۴ روزه و میانگین کل دوره آلوده به شرح زیر است (شکل ۳). همان گونه که ملاحظه می‌شود در نقشه میانگین تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در تاریخ ۲۷ تا ۳۰ دی (شکل A۳)، بر روی اروپای مرکزی یک مرکز کم ارتفاع با مقدار ۵۳۰۰ ژئوپتانسیل متر بسته شده است. زبانه‌های این کم ارتفاع به صورت ناوه بر غرب مدیترانه تا شمال آفریقا در لیبی گسترش یافته است. در

ادامه بادهای غربی یک مرکز پر ارتفاع با مقدار ۵۶۶۰ ژئوپتانسیل متر در شمال شرق دریای خزر بسته شده است که طی چند روز در جای خود بدون حرکت باقی مانده است. محور این پر ارتفاع به صورت پشته‌ای قوی ایران و منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داده است. پر ارتفاع ذکر شده با جریانی واچرخندی سبب فرونشینی و نزول هوا در منطقه مورد مطالعه شده و به صورت سیستم بندالی عمل کرده و از ورود چرخندهای غربی به ایران جلوگیری می‌کند. بنابراین شرایط ایجاد شده سبب افزایش یکباره شاخص کیفیت هوا شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود هوا کاملاً در شرایط سکون قرار دارد و این الگوی بندالی تا ۹ بهمن ماه ادامه داشته است (شکل ۳ C).

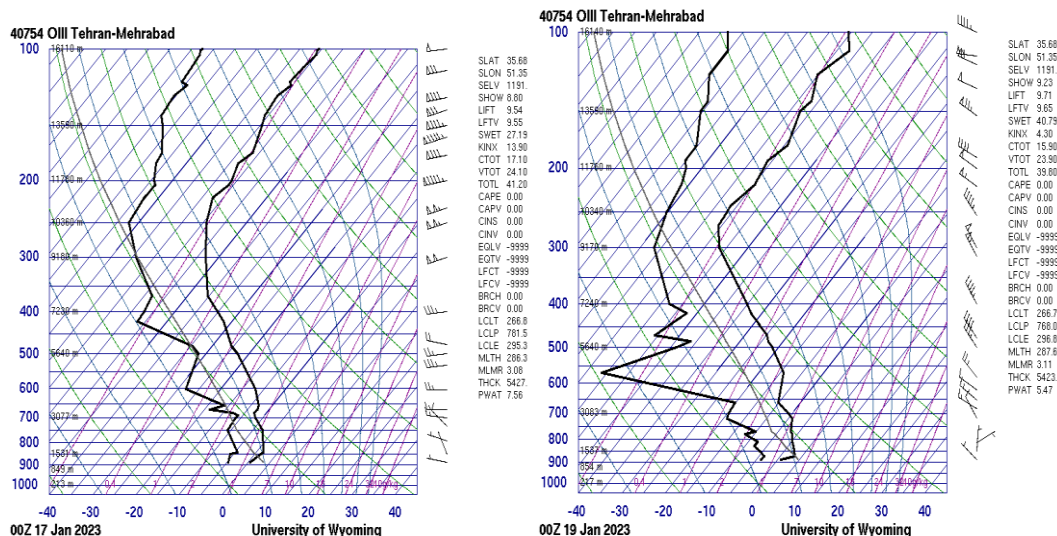
الگوی همدیدی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز شباهت زیادی به الگوی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال دارد. در نقشه میانگین این روز که آلودگی هوا تداوم داشته است (D) پر ارتفاعی در شمال دریای خزر شکل گرفته است. با تداوم این الگوی بندالی و در امتداد این زبانه پر ارتفاع زبانه سردی بر روی منطقه گسترش می‌یابد. فرارفت هوای سرد در تاریخ ۲۸ دی ماه که شاخص آلودگی به اوج می‌رسد باعث شده است میانگین دما در ایستگاه مهرآباد، کرج و قزوین به ترتیب در این روز با مقدار ۱، ۳- و ۳- ثبت شود. علاوه بر کاهش شدید دما بر منطقه مورد مطالعه، هوای پایدار بر روی این منطقه و دامنه جنوبی البرز مسلط شده است. این الگوی بندالی با سکون و پایداری هوا سبب شده است که عناصر آلاینده در درون جو پایدار تجمع پیدا کرده و بر غلظت آن‌ها افزوده شود.



شکل ۳. A: ارتفاع ژئوپتانسیل ۸۵۰ و ۵۰۰ تاریخ ۲۷ الی ۳۰ دی B: ارتفاع ژئوپتانسیل ۸۵۰ و ۵۰۰ تاریخ ۱ الی ۴ بهمن C: ارتفاع ژئوپتانسیل ۸۵۰ و ۵۰۰ تاریخ ۵ الی ۹ بهمن D: ارتفاع ژئوپتانسیل ۸۵۰ و ۵۰۰ میانگین ۱۳ روز آلوده (سایه‌دار رنگی مربوط به تراز ۸۵۰ و خطوط مربوط به تراز ۵۰۰)

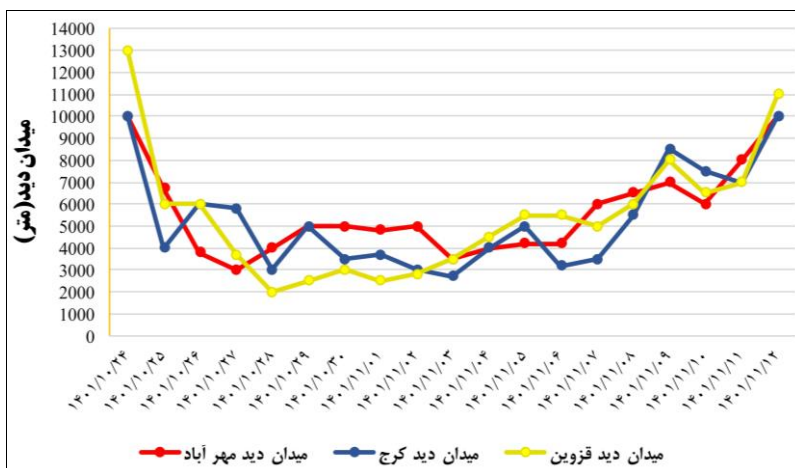
باتوجه به اینکه حاکمیت پرفشاری در یک منطقه رخداد وارونگی دمایی است، با مراجعه به نمودار ترمودینامیکی Skew-

T نرخ افت آهنگ دما، نوع و ارتفاع وارونگی هوا در دو تاریخ ۲۷ و ۲۹ دی ماه، در ساعت ۰۰:۰۰ به وقت گرینویچ از دانشگاه ایومینگ اخذ شد (شکل ۴). وارونگی دما بین تراز ۹۰۰ و ۸۰۰ هکتوپاسکال مشاهده می‌شود. در لایه وارونگی، دما نسبت به لایه‌های پایین‌تر بیشتر است در نتیجه نمی‌گذارد هوای سرد زیرین صعود کند و در نهایت باعث انباشت آلاینده‌ها می‌شود. با فاصله بین دو منحنی دمای هوا و دمای نقطه شبنم نیز می‌توان پایداری در منطقه مورد نظر که سبب تشدید آلودگی هوا و وارونگی دما شده است مشاهده نمود. بر اساس این نمودار سرعت باد از سطح زمین تا ارتفاع ۷۰۰ هکتوپاسکال کمتر ۵ نات (۲.۵ متر بر ثانیه) است. سرعت باد در سطوح میانی جو به بیشتر از ۱۵ نات (۷.۵ متر بر ثانیه) نمی‌رسد که نشان‌دهنده پایداری در تراز میانی جو است. می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل فرونشینی هوا، از سطح ایستگاه تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال جو پایدار و آرامی حاکم است که امکان جابه‌جایی و خروج آلاینده‌ها از منطقه مورد مطالعه محدود کرده است.



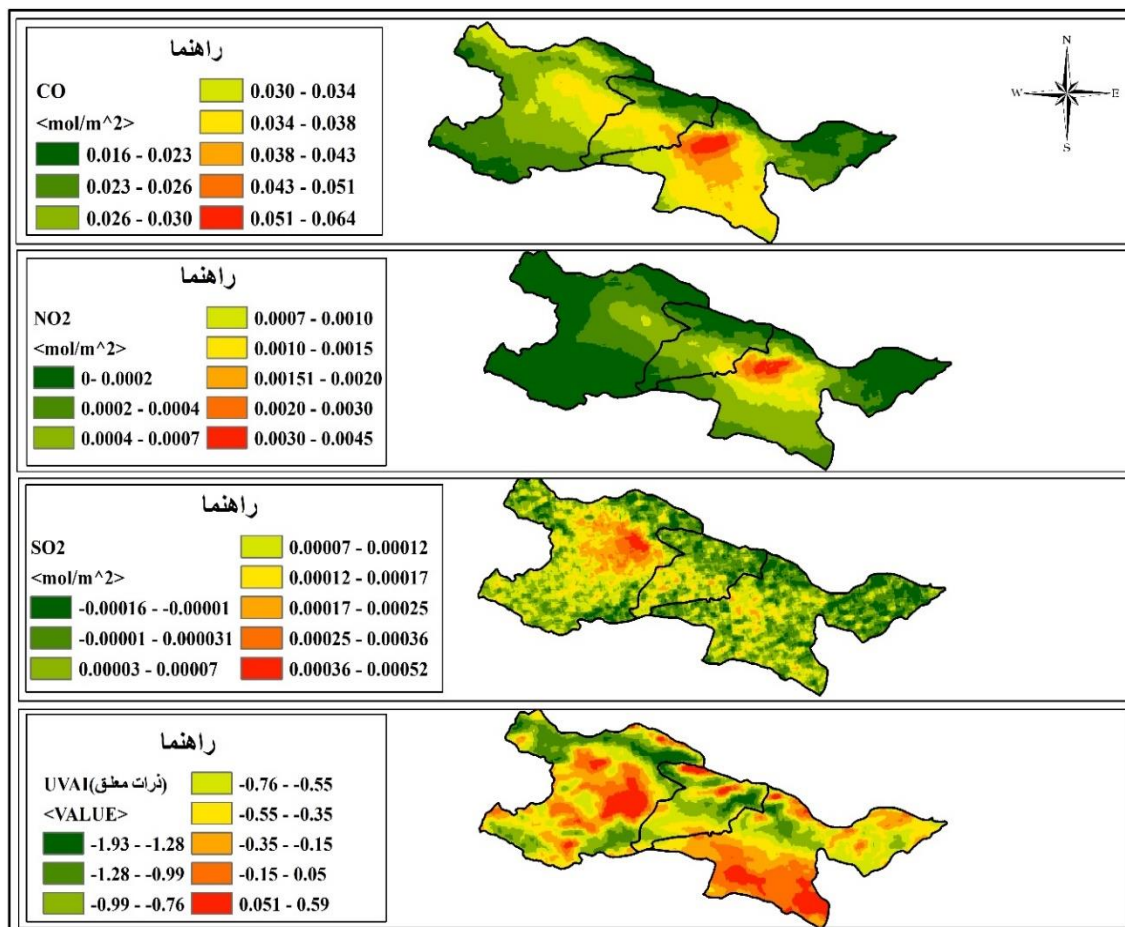
شکل ۴. نمودار Skew-T-T ایستگاه مهرآباد ۲۷ و ۲۹ دی ماه ۱۴۰۱

یکی از پیامدهای مهم آلودگی هوا، کاهش میدان دید افقی است. ذرات معلق با قطر کوچک‌تر از ۱۰ میکرون تأثیر بسزایی در دید افقی دارد. میزان دید افقی در بازه زمانی سه روز قبل و سه روز بعد از دوره ۱۳ روزه که آلودگی هوا تداوم داشته در سه ایستگاه هواشناسی مهرآباد، کرج و قزوین در شکل ۵ نشان داده شده است. تداوم الگوی بندالی و پایداری جو سبب انباشت ذرات معلق در محدوده مورد مطالعه شده است. روند نزولی شدید میدان دید در سه ایستگاه آشکار است. کمترین میزان میدان دید در ایستگاه مهرآباد برابر ۳۰۰۰ متر، ایستگاه کرج ۲۷۰۰ و در ایستگاه قزوین برابر ۲۰۰۰ متر می‌باشد. با کاهش شاخص آلودگی هوا در ۹ آذر ماه میدان دید افزایش پیدا می‌کند و به حداکثر خود می‌رسد.



شکل ۵. میدان دید افقی ۲۴ دی تا ۱۲ بهمن ۱۴۰۱ در ایستگاه هواشناسی مهرآباد، کرج و قزوین

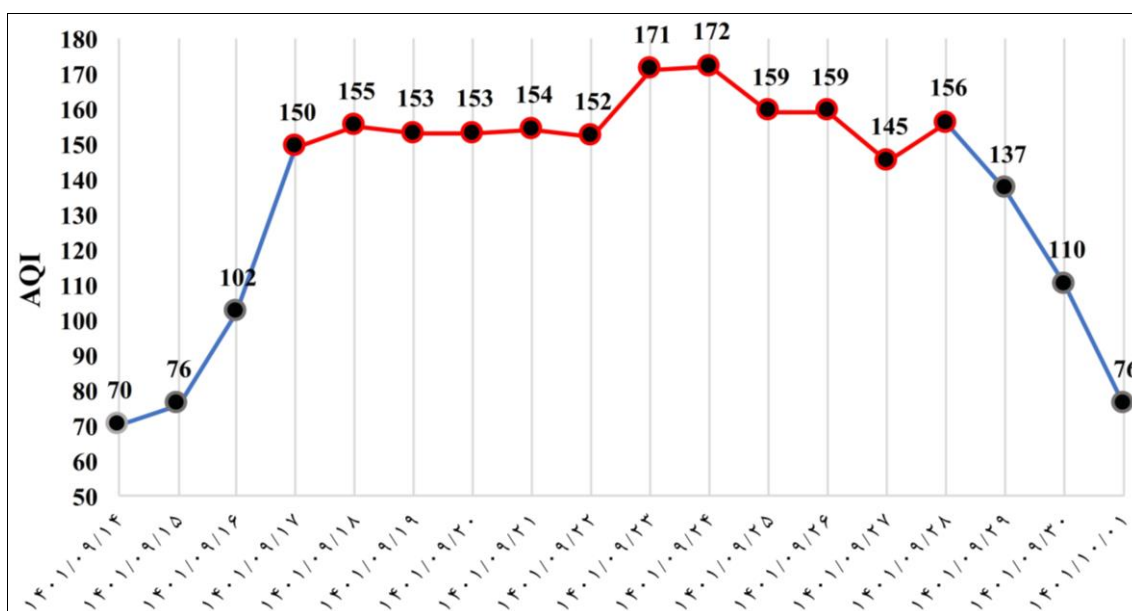
از آنجایی که الگوی بندالی (شکل ۳) در این بازه ۱۳ روزه با سکون و پایداری هوا، سبب شده است که عناصر آلاینده درون جو پایدار تجمع پیدا کنند، ضمن دید یکپارچه سه کلان‌شهر تهران، البرز و قزوین از تصاویر ماهواره سنتینل ۵ استفاده شد. در همین راستا پراکنش و کانون آلاینده‌ها به صورت میانگین در این بازه ۱۳ روزه برای آلاینده‌های دی‌اکسید نیتروژن، کربن منواکسید، دی‌اکسید گوگرد و ذرات معلق، استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (شکل ۶). مطابق شکل رفتار آلاینده کربن منواکسید و نیتروژن دی‌اکسید به یکدیگر شبیه بوده، با این تفاوت که آلاینده کربن منواکسید پهنه بیشتری را در معرض خود قرار داده است. این دو آلاینده در اثر احتراق ناقص سوخت ایجاد شده و با پایداری جو و وقوع وارونگی دما غلظت آن افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار این دو آلاینده در شهر تهران ضمن انتشار آن از وسیله نقلیه بنزین‌سوز و تردد بیش از حد خودروها تمرکز یافته و در جهت آزاد راه تهران - قزوین به سمت کلان‌شهرهای کرج و قزوین امتداد یافته است. بالاترین مقدار دی‌اکسید گوگرد در استان قزوین تمرکز دارد. با توجه به این که یکی از اصلی‌ترین منابع تولید دی‌اکسید گوگرد، نیروگاه‌های حرارتی و شهرک‌های صنعتی می‌باشند، نیروگاه شهید رجایی در قزوین مقدار بالایی از این آلاینده را انباشته کرده است. سوخت اصلی مصرفی این نیروگاه گاز طبیعی در این نیروگاه از سوخت اضطراری یعنی مازوت استفاده می‌شود. در این بازه زمانی که انتشار این آلاینده افزایش می‌یابد با تشکیل الگوهای بندالی، تداوم پایداری جو و عدم خروج آلاینده‌ها باعث انباشت دی‌اکسید گوگرد می‌شود. در آخر هم رفتار شاخص ذرات معلق به دی‌اکسید گوگرد شبیه بوده. هنگامی که باقیمانده این شاخص مثبت باشد، نشان‌دهنده وجود ذرات معلق در هوای جاذب اشعه ماوراء بنفش، مانند گرد و غبار و دود است. که مقادیر مثبت آن (گرد و غبار و دود) بر نیروگاه شهید رجایی و جنوب تهران تمرکز دارد.



شکل ۶. میانگین پراکنش آلاینده‌های جوی (دی‌اکسید نیتروژن، کربن منواکسید، دی‌اکسید گوگرد و ذرات معلق) در ۲۷ دی الی ۹

دوره دوم: ۱۷ الی ۲۸ آذر ۱۴۰۱

روند تغییرات میانگین شاخص کیفیت هوا از ۱۴ آذر ماه (سه روز قبل از اوج آلودگی) الی اول دی ماه (سه روز پس از اوج آلودگی) در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق نمودار، شاخص کیفیت هوا طی سه روز از ۷۰ به ۱۵۰ رسیده و ۱۲ روز تداوم داشته است (روند تداوم آلودگی به رنگ قرمز نشان داده شده است). در تاریخ ۲۷ آذر میانگین شاخص به زیر ۱۵۰ رسیده است که دلیل آن مقادیر کم برخی ایستگاه‌های حاشیه‌ای مثل دماوند، ملارد، اشتهارد و نظر آباد است، به طوری که در بیشتر ایستگاه‌ها مقدار این شاخص بالای ۱۵۰ است. در تاریخ ۲۴ آذر میانگین شاخص آلودگی هوا به مقدار ۱۷۲ و به اوج خود رسیده. در این تاریخ ایستگاه شهرداری منطقه ۱۹ در تهران با مقدار ۲۰۶ (وضعیت بسیار ناسالم)، ایستگاه ساوجبلاغ در البرز با مقدار ۱۶۷ و ایستگاه قزوین با مقدار ۱۶۲ بالاترین مقدار شاخص کیفیت هوا را ثبت کرده‌اند. بالا بودن میزان غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در این ایستگاه‌ها موجب این وضعیت شده است. جهت بررسی شدت و دلیل تداوم آلودگی هوا با روش همدیدی، شرایط جوی مسلط بر منطقه مورد مطالعه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

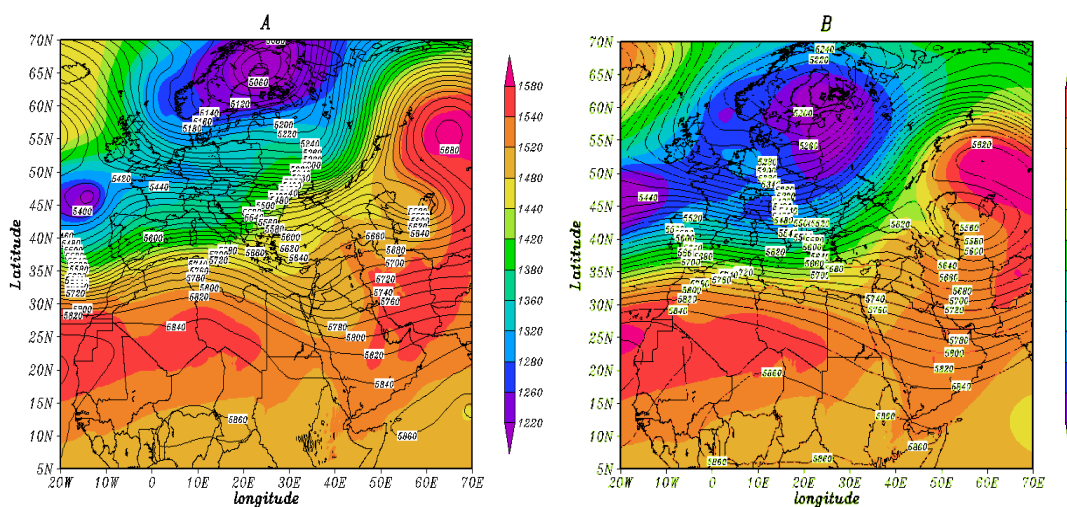


شکل ۷. میانگین شاخص کیفیت هوا (۱۴ آذر الی ۱ دی ۱۴۰۱) (روزهای با تداوم آلودگی شدید با رنگ قرمز نشان داده شده است)

الگوی همدیدی حاکم در تراز ۸۵۰ و ۵۰۰ ژئوپتانسیل متر در این بازه ۱۲ روزه که آلودگی هوا تداوم داشته است به شرح زیر است (شکل ۸). همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در نقشه میانگین تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در تاریخ ۲۲ تا ۲۴ آذر (شکل ۸ A) که شاخص آلودگی به اوج خود می‌رسد، بر روی شمال اروپا یک مرکز کم ارتفاع قطبی با مقدار ۵۰۴۰ هکتوپاسکال بر روی فنلاند بسته شده است. زبانه‌های این کم ارتفاع به صورت ناوه تا شرق مدیترانه گسترش یافته است. با توجه به شدت این کم ارتفاع در ادامه بادهای غربی یک مرکز پر ارتفاع با مقدار ۵۶۸۰ هکتوپاسکال در شمال شرق دریای خزر بسته شده است که طی چند روز در جای خود بدون حرکت باقی مانده است. این پر ارتفاع به صورت یک مانع عمل و از ورود چرخندهای غربی به ایران جلوگیری می‌کند و یا سبب انحراف مسیر حرکت چرخند به سوی جنوب می‌شود. محور این پر ارتفاع به صورت پشته‌ای قوی، ایران و منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داده است. پر ارتفاع ذکر شده با جریانی واچرخندی و به کمک کم فشار بریده شده و جریانی همگرا، سبب فرونشینی و نزول هوا در منطقه مورد مطالعه شده است. بنابراین شرایط ایجاد شده سبب اوج شاخص کیفیت هوا شده است. همان‌گونه که در نقشه میانگین ۱۲ روزه دیده می‌شود هوا کاملاً در شرایط سکون قرار دارد و این الگوی بندالی تا ۱۲ روز ماه تداوم

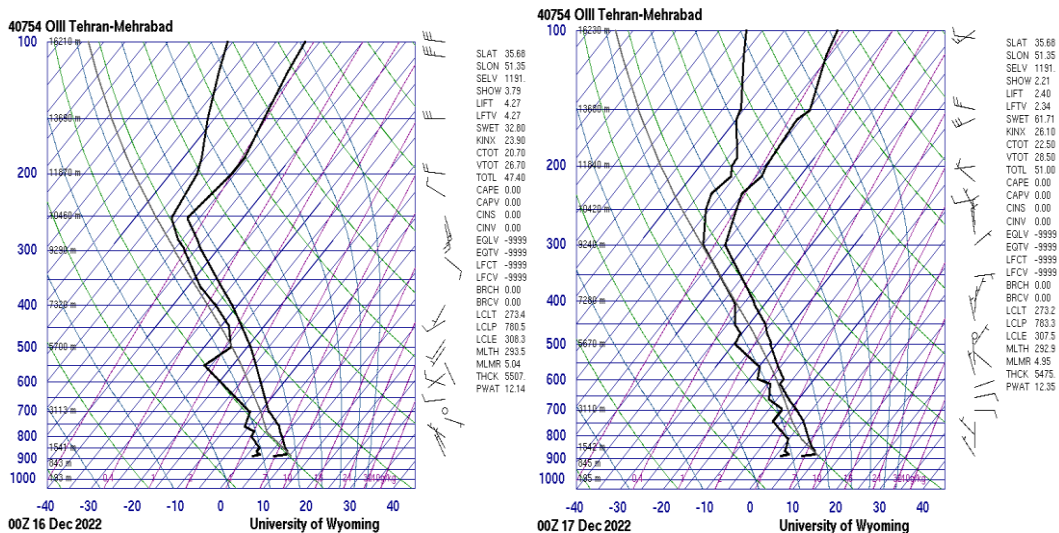
داشته است (شکل ۸ B).

الگوی همدیدی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز شباهت زیادی به الگوی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال دارد. در نقشه میانگین این ۱۲ روز که آلودگی هوا تداوم داشته است (B) با تقویت کم ارتفاع قطبی و گسترش شرق سوی آن سبب تقویت پرفشار سیبری شده است. الگوی بندال دو قطبی سبب ریزش هوای سرد و خشک از خشکی های وسیع شمال آسیا از سمت شمال شرق بر روی ایران و منطقه مورد مطالعه می شود. با شروع فرارفت هوای سرد در منطقه مورد مطالعه میانگین دمای ایستگاه مهرآباد، کرج و قزوین به ترتیب در ۱۸ آذر به مقدار ۵، ۳.۵ و ۲ می رسد. این الگوی بندالی با سکون و پایداری هوا سبب شده است که عناصر آلاینده در درون جو پایدار تجمع پیدا کرده و بر غلظت آن ها افزوده شود.



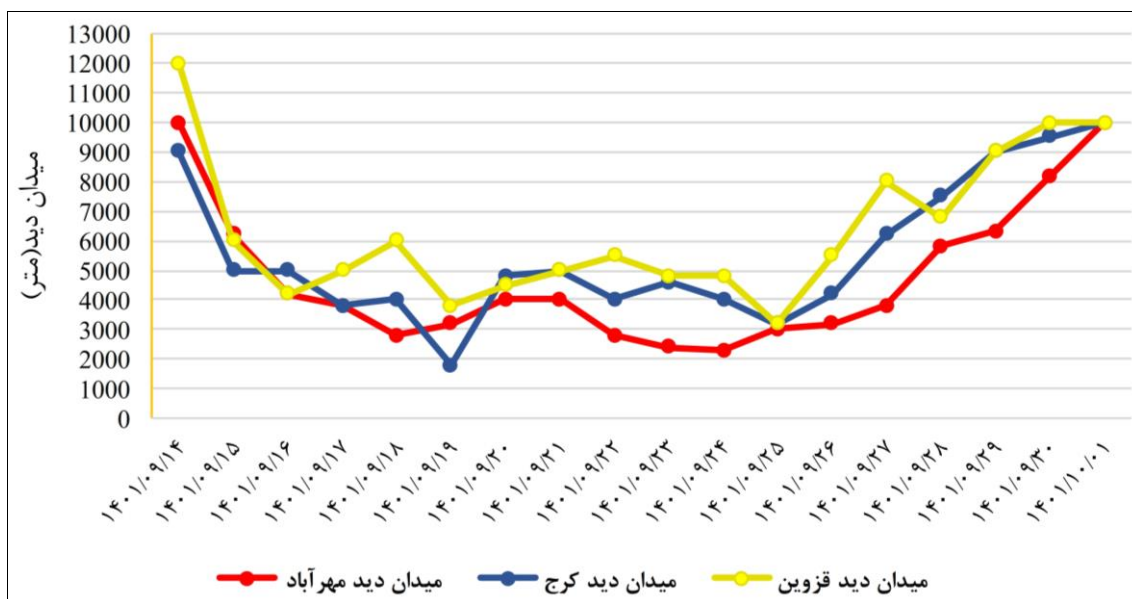
شکل ۸. A: ارتفاع ژئوپتانسیل ۸۵۰ و ۵۰۰ در تاریخ ۲۲ الی ۲۴ آذر که شاخص کیفیت هوا به اوج می رسد B: ارتفاع ژئوپتانسیل ۸۵۰ و ۵۰۰ میانگین ۱۲ روز

مراجعه به نمودار ترمودینامیکی Skew-T نرخ افت آهنگ دما، و ارتفاع وارونگی هوا در دو تاریخ ۲۵ و ۲۶ آذر ماه در ساعت ۰۰:۰۰ به وقت گرینویچ از دانشگاه وایومینگ اخذ شد (شکل ۹). مطابق شکل وارونگی دما بین ارتفاع ۸۵۰ و ۱۵۰۰ متری از سطح زمین مشاهده می شود که با افزایش ارتفاع، دما افزایش می یابد. بر اساس این نمودار، سرعت باد از سطح زمین تا ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال کمتر ۵ نات (۲.۵ متر بر ثانیه) است که نشان دهنده پایداری از سطح ایستگاه تا در تراز میانی جو است.



شکل ۹. نمودار Skew-T ایستگاه مهرآباد ۲۵ و ۲۶ آذر ماه ۱۴۰۱

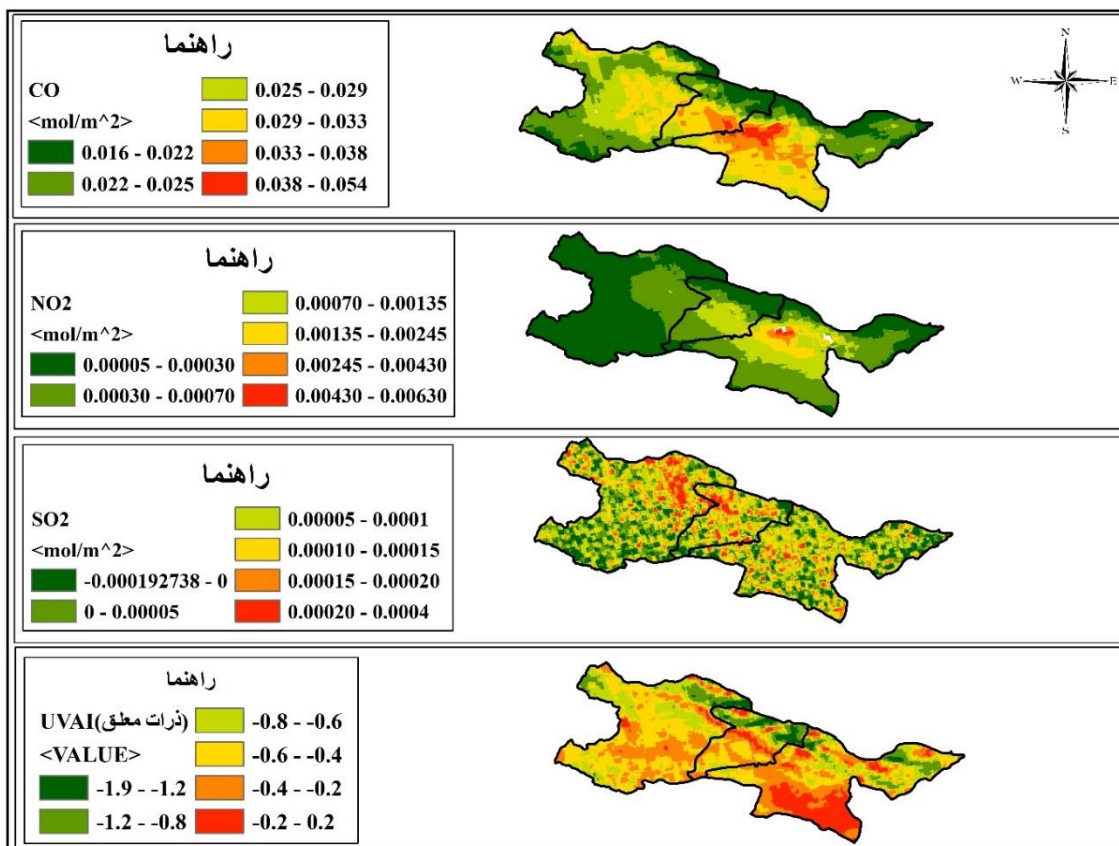
میزان دید افقی در بازه زمانی سه روز قبل و سه روز بعد از دوره ۱۲ روزه، که آلودگی هوا تداوم داشته در سه ایستگاه هواشناسی مهرآباد، کرج و قزوین در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تداوم الگوی بندالی و پایداری جو سبب انباشت ذرات معلق در محدوده مورد مطالعه شده است. روند نزولی میدان دید در سه ایستگاه آشکار است. کمترین میزان میدان دید در ایستگاه مهرآباد برابر ۲۳۰۰ متر، ایستگاه کرج ۱۸۰۰ و در ایستگاه قزوین برابر ۳۲۰۰ متر می‌باشد. با کاهش شاخص آلودگی هوا در ۲۹ آذر ماه میدان دید افزایش پیدا می‌کند و به حداکثر خود می‌رسد.



شکل ۱۰. میدان دید افقی ۱۴ آذر الی ۱۴ بهمن ماه ۱۴۰۱ در ایستگاه هواشناسی مهرآباد، کرج و قزوین

از آنجایی که الگوی بندالی (شکل ۸) در این بازه ۱۲ روزه با سکون و پایداری هوا، سبب شده است که عناصر آلاینده در درون جو پایدار تجمع پیدا کنند، ضمن دید یکپارچه از منطقه مورد مطالعه از تصاویر ماهواره سنتینل ۵ استفاده شد. در همین راستا پراکنش و کانون آلاینده‌ها به صورت میانگین در این بازه ۱۲ روزه برای آلاینده‌های دی‌اکسید نیتروژن، کربن منواکسید، دی‌اکسید گوگرد و ذرات معلق، استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (شکل ۱۱). رفتار آلاینده کربن منواکسید و نیتروژن دی‌اکسید به یکدیگر شبیه است، با این تفاوت که کربن منواکسید پهنه بیشتری را تحت تأثیر قرار داده است. این دو آلاینده در اثر احتراق ناقص سوخت ایجاد شده و با پایداری جو و وقوع وارونگی دما غلظت آن افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار این دو آلاینده در شهر تهران ضمن انتشار آن از وسیله نقلیه بنزین‌سوز و تردد پیش از حد خودروها تمرکز یافته و در جهت آزاد راه تهران - قزوین به سمت کلان‌شهرهای کرج و قزوین امتداد یافته است و با فاصله گرفتن از مراکز شهری از میزان آن کاسته می‌شود.

بالاترین مقدار دی‌اکسید گوگرد در استان قزوین تمرکز دارد. با توجه به تداوم پایداری جو و عدم خروج آلاینده‌ها، نیروگاه شهید رجایی، شهرک صنعتی کاسپین در قزوین و باقرشهر در جنوب تهران مقدار بالایی از این آلاینده را انباشته کرده است. در واقع با شروع فصل سرد به دلیل کمبود گاز طبیعی در این نیروگاه‌ها از سوخت اضطراری یعنی مازوت استفاده می‌شود. تشکیل الگوهای بندالی در این فصول سرد که انتشار آلاینده دی‌اکسید گوگرد افزایش می‌یابد، با پایداری جو و وقوع وارونگی دما سلامت افراد آسیب پذیر را در معرض خطر قرار می‌دهد و سبب وقوع شرایط بحرانی می‌شود. در آخر هم رفتار شاخص ذرات معلق بررسی شد. هنگامی که باقیمانده این شاخص مثبت باشد، نشان دهنده وجود ذرات معلق در هوای جاذب پرتو ماوراء بنفش، مانند گرد و غبار و دود است. مقادیر مثبت ذرات معلق (گرد و غبار و دود) در جنوب تهران و با جهت شرقی-غربی بر آزاد راه تهران-قزوین منطبق شده است.



شکل ۱۱. میانگین پراکنش آلاینده های جوی (دی اکسید نیتروژن، کربن منواکسید، دی اکسید گوگرد و ذرات معلق) در ۱۷ تا ۲۸ آذر ۱۴۰۱

بحث

آلودگی هوا ضمن ایجاد خسارت در سازه ها و آسیب رسانی به رویش طبیعی و آب و خاک، می تواند باعث بیماری های تنفسی و قلبی - عروقی شود که سهم عمده ای در میزان مرگ و میر جهانی دارند. سیاست ها و اقدامات مقابله با آلودگی هوا تأثیر مثبت مستقیمی بر سلامت جمعیت دارد که منجر به افزایش بهره وری نیروی کار و رشد اقتصادی و آموزش بهتر می شود (United Nations, 2023). بدین دلیل و با توجه اثرات پدیده آلودگی هوا بر جوامع بشری تحقیقا بسیاری در مورد پدیده آلودگی هوا در نقاط مختلف دنیا انجام شده است. نکته ای که در پژوهش های پیشین کمتر به آن اشاره شده است تداوم و انباشت آلودگی هوا است که یکی از مولفه های اصلی پایداری محیط به حساب می آید. پژوهش حاضر با هدف توزیع فضایی آلودگی و علل تداوم آلودگی هوا در دامنه جنوبی البرز مرکزی با توجه به گردش جو، الگوهای همبستگی و تصاویر ماهواره ای انجام شد. در پژوهش انجام شده، نتایج نشانگر تأثیر سامانه های بندالی بر رخداد شدید آلودگی هوا و تدام آن است که با پژوهش انجام شده توسط (Jafari & Pazhoh, 2022) همخوانی دارد. این مقاله نیز نفوذ پرفشار سیبری از شرق و گسترش و اچرخند نیمه گرمسیری در سطح میانی از غرب است که تابع استقرار الگوی بندالی است را عامل تداوم آلودگی دانسته اند. همچنین نتایج مقاله حاضر با پژوهش کای و همکاران در زمینه تأثیر ساختار "بندال ها" در تروپوسفر بر آلودگی شدید هوای زمستانی در شمال چین همراستا است. آنان نشان دادند علل تداوم آلودگی های ۶ روز و بیشتر در ۶۲.۵ درصد مواقع مربوط به الگوهای بندالی می باشد (Cai et al., 2020). در این پژوهش، بررسی الگوهای جوی ۷ موردی که آلودگی هوا ۶ روز و بیشتر تداوم داشته نشان داد که الگوهای بندالی سبب پایداری هوا و در نتیجه تداوم و انباشت آلودگی هوا شده است. همچنین به طور عمده مراکز پر ارتفاع به صورت پشته ای قوی ایران و منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار می دهند. پر ارتفاع ذکر شده با جریانی و اچرخندی سبب فرونشینی و نزول هوا در منطقه مورد مطالعه شده و به صورت سیستم بلاک شده از ورود چرخندهای غربی به ایران جلوگیری کرده است. این نتایج توسط دیگر پژوهشگران به ویژه، افشاری آزاد و

همکاران (۱۴۰۰)، پناهی (۱۳۹۵)، سلطانی‌گردفرامرز و همکاران (۱۳۹۴)، پیشداد و همکاران (۱۳۹۹) و حسین زاده و همکاران (۱۳۹۲) که در این زمینه تحقیق کرده‌اند همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

شناخت چرایی آلودگی و آلاینده‌های جوی نقش مهمی در تأمین محیطی سالم و پایداری برای زیست بشر ایفا می‌کند. سامانه‌های همدیدی نقش بسزایی در پتانسیل تداوم و پایداری آلودگی هوا دارند. در این مقاله به تحلیل چرایی تداوم آلودگی هوا و عوامل ایجادکننده آن به طور هم‌زمان در سه کلان‌شهر تهران، کرج و قزوین با رویکرد تداوم و تقویت پایداری محیط پرداخته شد. به نظر می‌رسد که منبع آلودگی هوا در هر سه منطقه مورد مطالعه با اغماض ثابت است، به این معنی که تولید و انتشار آلودگی هوا هر روزه ثابت و ادامه‌دار است. در برخی از دوره‌ها باتوجه به ثابت بودن تولید و انتشار آلودگی، شاخص کیفیت هوا افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند و تداوم می‌یابد که دلیل آن شرایط اقلیمی است. در بررسی داده‌های آلودگی هوا طی بازه زمانی ۱۳۹۸ الی ۱۴۰۲، با توجه به هدف اصلی مقاله که تحلیل تداوم روزهای آلوده بوده است، ۷ تاریخ به کمک شاخص کیفیت هوا که میانگین شاخص بالای ۱۵۰ و در وضعیت ناسالم قرار داشته و حداقل ۶ روز و بیشتر تداوم داشته است شناسایی شد. بررسی الگوهای جوی این ۷ دوره نشان داد که الگوهای بندالی سبب پایداری هوا و در نتیجه تداوم و انباشت آلودگی هوا شده است.

بندالی شدن سامانه‌های جوی باعث توقف حرکت الگوهای هواشناسی می‌شود که در طی آن الگوهای حاکم بر جو نیز روزها و حتی هفته‌ها در محل خود باقی می‌مانند. در این حالت، وقوع پدیده‌هایی نظیر سیل، ناهنجاری‌های دمایی و دیگر فرین‌های جوی از جمله آلودگی هوا به وقوع می‌پیوندد. دو تاریخ ۲۷ دی الی ۹ بهمن ۱۴۰۱ (۱۳ روز) و ۱۷ تا ۲۸ آذر ۱۴۰۱ (۱۲ روز) که آلودگی هوا پرتداوم‌تر بوده به نمایندگی از ۵ مورد دیگر، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. باتوجه به الگوی بندالی دوقطبی زبانه سردی از شمال شرق وارد کشور می‌شود و بر روی منطقه مورد مطالعه گسترش می‌یابد. این الگوی بندالی با سکون و پایداری هوا سبب شده است که عناصر آلاینده در درون جو پایدار تجمع پیدا کرده و بر غلظت آن‌ها افزوده شود. پراکنش و کانون آلاینده‌ها طی این بازه زمانی نشان می‌دهد که بیشترین مقدار آلاینده کربن منواکسید و نیتروژن دی‌اکسید در شهر تهران ضمن انتشار آن از وسیله نقلیه بنزین سوز و تردد پیش از حد خودروها تمرکز یافته و بافاصله گرفتن از مراکز شهری از میزان آن کاسته می‌شود.

پراکنش این پهنه آلوده بر محدوده صنعتی تهران - قزوین و آزادراه اصلی این دو شهر منطبق شده است. بالاترین مقدار دی‌اکسید گوگرد در استان قزوین تمرکز دارد و نیروگاه شهید رجایی در قزوین مقدار بالایی از این آلاینده را انباشته کرده است. باتوجه به این که یکی از اصلی‌ترین منابع تولید دی‌اکسید گوگرد، نیروگاه‌های حرارتی و شهرک‌های صنعتی می‌باشند با شروع فصل سرد، به دلیل مصرف زیاد گاز در سه کلان‌شهر تهران، کرج و قزوین باتوجه به جمعیت بالا، در نتیجه کمبود گاز طبیعی در این نیروگاه از سوخت اضطراری یعنی مازوت استفاده می‌شود. در این بازه زمانی که انتشار این آلاینده افزایش می‌یابد با تشکیل الگوهای بندالی، تداوم پایداری جو و عدم خروج آلاینده‌ها باعث انباشت دی‌اکسید گوگرد می‌شود. در این میان سلامت افراد آسیب‌پذیر را در معرض خطر قرار می‌دهد و سبب وقوع شرایط بحرانی می‌شود. باتوجه به این شرایط لازم است سازمان‌های مربوطه در جهت کنترل و پایداری محیطی آلودگی هوا، نگاه یکپارچه‌تری نسبت به سه کلان‌شهر تهران، کرج و قزوین داشته باشند. چرا که در زمان تداوم و آلودگی‌های شدید این سه کلان‌شهر هم‌زمان شرایطی بحرانی را تجربه می‌کنند.

منابع

افشاری آزاد، علی؛ رضانی، بهمن؛ بیگدلی، اتوسا؛ افشاری آزاد، محمدرضا (۱۴۰۰). تحلیل سینوپتیکی آلودگی هوای مناطق
 ۹، ۵، ۲ و ۱۸ شهرداری تهران. *مهندسی جغرافیای سرزمین*، ۶ (۲)، ۳۴۵-۳۶۱ <https://sid.ir/paper/1044690/fa>
 براتی، غلامرضا؛ شکیبا، هانیه (۱۴۰۳). تحلیل همدید موقیعت‌یابی فراز موثر بر آلودگی هوا در پنج کلان‌شهر برگزیده ایران.

- جغرافیا و پایداری محیط، ۱۴(۱)، ۶۹-۸۳. doi: 10.22126/ges.2024.10013.2719
- پناهی، علی (۱۳۹۵). بررسی الگوهای همدیدی بر اساس دوره‌های بحرانی آلودگی هوا در وارونگی دمایی شدید شهر تبریز. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۴۱(۴)، ۶۰۷-۶۲۵. doi: 10.22059/jphgr.2016.60831
- پیشداد، الهام؛ علیجانی، بهلول؛ علی اکبری، بیدختی؛ عباسعلی، اکبری مهری (۱۳۹۹). تحلیل وضعیت بلندمدت آلاینده‌های اصلی و تعیین دوره‌های آلودگی هوا در کلان‌شهر تهران. فیزیک زمین و فضا، ۴۶(۲)، ۳۵۵-۳۷۷. doi:10.22059/JESPHYS.2020.292565.1007177
- حسین‌زاده، سید رضا؛ دوستان، رضا؛ حقیقت ضیابری، سیده مرضیه؛ حقیقت ضیابری، سیده مریم. (۱۳۹۲). بررسی الگوهای همدید مؤثر بر آلودگی هوا در کلان شهر مشهد. جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، ۱۱(۲). doi: 10.22067/geography.v11i21.36332
- رنجبر سعادت آبادی، عباس؛ قصابی، زهرا (۱۳۹۰). مطالعه همدیدی الگوهای جوی حاکم بر روی تهران در روزهای با آلودگی بسیار شدید هوا. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۲(۶)، ۳۹-۵۶. SID. <https://sid.ir/paper/391439/fa>
- سلطانی گردفرامری، طاهره؛ مغیدی، عباس؛ گندمکار، امیر (۱۳۹۴). بررسی همدیدی روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد مورد مطالعه: ۱۳ و ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۲(۴)، ۹۵-۱۱۲. doi: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.4.95
- شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (۱۴۰۲). آرشو شاخص کیفیت هوا بر گرفته از: <https://airnow.tehran.ir/home/AQIArchive.aspx>
- شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (۱۴۰۰). گزارش سالانه کیفیت هوا و صدای تهران در سال ۱۴۰۰، برگرفته از: <https://air.tehran.ir>
- صیادی، سیداسکندر؛ حسینی، سیده سمیه؛ یزدان بخش، بنت الهدی (۱۳۹۷). ارزیابی پایداری زیست محیطی شهر اصفهان با تاکید بر آلودگی هوا. جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۹(۱)، ۱۱۳-۱۲۶. SID. <https://sid.ir/paper/153268/fa>
- قنبری، حسینعلی؛ عزیزی، قاسم (۱۳۸۸). شبیه‌سازی عددی رفتار آلودگی هوای تهران بر اساس الگوی باد. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۴۱(۶۸)، ۱۵-۳۲. SID. <https://sid.ir/paper/138825/fa>
- عزیزی، قاسم؛ شمسی پور، علی اکبر؛ مهدیان ماهفروزی، مجتبی؛ میری، مرتضی (۱۳۹۲). تأثیرپذیری شدت جزیره گرمایی شهری تهران از الگوهای همدیدی جو. محیط‌شناسی، ۳۹(۴)، ۵۵-۶۶. doi: 10.22059/jes.2014.36462
- کرمانی، آذر؛ اکبری، مهری؛ علیجانی، بهلول؛ مفاخری، امید (۱۳۹۴). تحلیل آماری - همدیدی غلظت آلاینده مونواکسیدکربن بر اساس سمت و سرعت باد و مخاطره‌ی آن در شهر تهران. مدیریت مخاطرات محیطی، ۲(۴)، ۴۳۹-۴۵۰. doi: 10.22059/jhsci.2015.58272
- لشکری، حسن؛ کیخسروی، قاسم؛ کریمیان، ندا (۱۳۹۹). بررسی الگوهای همدیدی آلودگی‌های شدید هوا در لایه وردسپهر زیرین کلان‌شهر تهران. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۹(۳)، ۱-۲۰. doi: 10.22067/geo.v9i3.87260
- مرکز آمار ایران (۱۳۹۵). داده‌ها و اطلاعات آماری، برگرفته از: www.amar.org.ir
- مظفری، غلامعلی؛ نارنگی فرد، مهدی؛ حقیقت، سیده مرضیه (۱۳۹۴). تحلیل رابطه الگوهای همدید با میزان آلاینده ذرات معلق و مونواکسید کربن در شهر شیراز. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۴(۲)، ۹۵-۱۱۵. doi: 10.22067/geo.v4i2.24849
- منصورمقدم، محمد؛ نقی پور، نگار، روستا، ایمان؛ غفاریان مالمیری، حمیدرضا (۱۴۰۱). پایش و پیش‌بینی زمانی و مکانی گردوغبار معلق در جو در استان قزوین با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین، مجله مدیریت بیابان، ۱۰(۱)، ۷۷-۹۸. doi: 10.22034/jdmal.2022.544754

References

Afshari Azad, A., Ramezani, B., Bigdeli, A., & Afshari Azad, M.R (2022). Synoptical Analysis of Air Pollution in 2, 5, 9 and 18 Municipal Zones of Tehran. *Geographical Engineering of*

- Territory*, 6(2), 345-361. <https://sid.ir/paper/1044690/en> (In Persian).
- Azizi, Gh., Shamsipour, A., Mahdian Mahforouzi, M., & Miri, M. (2014). Intensities of the Urban Heat Island of Tehran under the Influence of Atmospheric Synoptic Patterns. *Journal of Environmental Studies*, 39(4), 55-66. doi: 10.22059/jes.2014.36462 (In Persian).
- Barati, G., & Shakiba, H. (2024). Synoptic Analysis of Effective Ridge Positioning on Air Pollution Over Five Selected Metropolises of Iran. *Geography and Environmental Sustainability*, 14(1), 69-83. doi: 10.22126/ges.2024.10013.2719 (In Persian).
- Cai, W., Xu, X., Cheng, X., Wei, F., Qiu, X., & Zhu, W. (2020). Science of the Total Environment Impact of “ blocking ” structure in the troposphere on the wintertime persistent heavy air pollution in northern China. *Science of the Total Environment*, 741, 140325. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140325.
- Di Bernardino, A., Iannarelli, A. M., Casadio, S., Perrino, C., Barnaba, F., Tofful, L., Campanelli, M., Di Liberto, L., Mevi, G., Siani, A. M., & Cacciani, M. (2021). Impact of synoptic meteorological conditions on air quality in three different case studies in Rome, Italy. *Atmospheric Pollution Research*, 12(4), 76–88. doi: 10.1016/j.apr.2021.02.019.
- European Center for Medium-Range Climate Predictions (2022). *Reanalysis data*, retrieved from: <https://cds.climate.copernicus.eu/>, DOI: 10.24381/cds.bd0915c6.
- Finardi, S., & Pellegrini, U. (2002). Systematic analysis of meteorological conditions causing severe urban air pollution episodes in the central Po valley. *9th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, 2, 250–254. https://www.harmon.org/Conferences/Proceedings/_GarmischPartenkirchen/publishedSections/6.13.pdf.
- Ghanbari, H., & Azizi, Gh. (2010). Numerical Simulation of Air Pollutants in Tehran, Based on Wind Patterns By TAPM. *Physical Geography Research*, 41(68), - SID. <https://sid.ir/paper/138825/en> (In Persian).
- Hodgson, E. C., & Phillips, I. D. (2021). Seasonal variations in the synoptic climatology of air pollution in Birmingham, UK. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(3–4), 1421–1439. doi: 10.1007/s00704-021-03779-7.
- Hsu, C. H., & Cheng, F. Y. (2019). Synoptic weather patterns and associated air pollution in Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(5), 1139–1151. doi: 10.4209/aaqr.2018.09.0348 .
- Hosseinzadeh, S. R., Dostan, R., Haqit Ziabari, S. M., & Haqit Ziabari, S. M. (2012). Investigating the synergistic patterns affecting air pollution in the metropolis of Mashhad. *Regional Geography and Development*, 11(2), -. doi: 10.22067/geography.v11i21.36332 (In Persian).
- Iran Statistics Center, (2015). *Data and statistical information*, from: www.amar.org.ir.
- Jafari, F., & Pazhoh, f. (2022). Synoptic analysis of the most durable pollution and clean waves during 2009 – 2019 in Tehran City (capital of Iran). *Natural Hazards*, 110(2), 1247–1272. doi: 10.1007/s11069-021-04990-5.
- Krzyzanowski, M., Apte, J. S., Bonjour, S. P., Brauer, M., Cohen, A. J., & Prüss-Ustun, A. M. (2014). Air Pollution in the Mega-cities. *Current Environmental Health Reports*, 1(3), 185–191. doi: 10.1007/s40572-014-0019-7.
- Kermani, A., Akbari, M., Alijani, B., Mofakheri, O. (2014). Collaborative statistical analysis of carbon monoxide pollutant concentration based on wind direction and speed and its risk in Tehran city. *Environmental Risk Management*, 2(4), 439-450. doi: 10.22059/jhsci.2015.58272 (In Persian).
- Lai, H. C., Dai, Y. T., Mkasimongwa, S. W., Hsiao, M. C., & Lai, L. W. (2023). The Impact of Atmospheric Synoptic Weather Condition and Long-Range Transportation of Air Mass on Extreme PM10 Concentration Events. *Atmosphere*, 14 (2). doi: 10.3390/atmos14020406.
- Lashkari, H., Keikhosravi, G., & Karimian, N. (2020). Investigating Patterns of Severe Air Pollution in the Lower Tropospheric Layer of Tehran Metropolis. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(3), 1-20. doi: 10.22067/geo.v9i3.87260 (In Persian).
- Makra, L., Mika, J., Bartzokas, A., & Sümegehy, Z. (2007). Relationship between the Péczeley's large-scale weather types and air pollution levels in Szeged, Southern Hungary. *Fresenius Environmental Bulletin*, 16(6), 660–673. <https://www.researchgate.net/publication/>

- 233905508_Relationship_between_the_groups_of_Peczely's_large-scale_weather_types_and_air_pollution_levels_in_Szeged_Hungary
- Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. *Atmospheric Environment*, 33(24), 4029–4037. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00144-2.
- Mozafari, G., Narangifard, M., & Haghghat Zeyabary, M. (2015). Analysis of the Relationship between synoptic patterns Pollutants of Dust and carbon monoxide in the Shiraz city. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 4(2), 95-115. doi: 10.22067/geo.v4i2.24849 (In Persian).
- Mansourmoghaddam, M., Naghipur, N., Rousta, M., & Ghaffarian, H. (2022). Temporal and Spatial Monitoring and Forecasting of Suspended Dust Using Google Earth Engine and Remote Sensing Data (Case Study: Qazvin Province), *Desert Management*, 10 (21), 77-98. doi: 10.22034/jdmal.2022.544754 (In Persian).
- Panahi, A. (2017). A survey on the synoptic patterns based on critical periods of air pollution in severe inversions of Tabriz, Iran. *PHYSICAL GEOGRAPHY RESEARCH QUARTERLY*, 48 (4), 12-13. SID. <https://sid.ir/paper/369216/en> (In Persian).
- Pishdad, E., Alijani, B., Aliakbari Bidokhti, A., & Mehri, A. (2020). Long Term Status Analysis of Major Air Pollutants and Determination of Air Pollution Periods in Tehran Metropolis, *Journal of the Earth and Space Physics*, 46(2), 355-376. Doi: 10.22059/JESPHYS.2020.292565.1007177 (In Persian).
- Ranjbar Asadatabadi, A., & Ghasabi, Z. (2012). A study of the synoptic patterns with severe air pollution episodes in tehran. *Journal Of Climate Research*, 2 (6), 147-14. <https://sid.ir/paper/391439/en> (In Persian).
- Russo, A., Trigo, R. M., Martins, H., & Mendes, M. T. (2014). NO₂, PM₁₀ and O₃ urban concentrations and its association with circulation weather types in Portugal. *Atmospheric Environment*, 89(2), 768–785. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.02.010.
- Soltani Gardframarzi, T., Mofidi, A., & Gandhamkar, A. (2014). Observational survey of highly polluted days in the studied city of Mashhad: November 13 and 14, 2007. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 2(4), 95-112. SID. <https://sid.ir/paper/264725/fa> (In Persian).
- Seydaei, S. S., hosseini, S. S., & Yazdanbaks, B. A. (2018). Evaluation of the Environmental Sustainability of Isfahan with an Emphasis on Air Pollution. *Geography and Environmental Planning*, 29(1), 113-126. doi: 10.22108/gep.2018.97857.0 (In Persian).
- Tehran Air Quality Control Company (2023). *Air quality index archive*, from: <https://airnow.tehran.ir/home/AQIArchive.aspx> (In Persian).
- Tehran Air Quality Control Company (2021). *Annual report of air quality and sound of Tehran in 1400*, from: <https://air.tehran.ir> (In Persian).
- United Nations (2023). *Sustainable Development Goals and Air Pollution*, taken from: www.cleanairfund.org.
- University of Wyoming Biodatabase (2022). *Sciotti diagram*, taken from: <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
- Yang, Y., Zheng, X., Gao, Z., Wang, H., & Wang, T. (2018). Long-Term Trends of Persistent Synoptic Circulation Events in Planetary Boundary Layer and Their Relationships With Haze Pollution in Winter Half Year Over Eastern China *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. doi: 10.1029/2018JD028982.