

Investigating the CAMS model ability to predict the concentration of PM₁₀, PM_{2.5}, and NO₂ pollutants in Tehran (3 case studies)

Karami, S.¹  | Ghassabi, Z.¹  

1. Assistant Professor, Institute of Meteorology and Atmospheric Sciences, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: z.ghassabi@gmail.com

(Received: 08 Apr 2025, Revised: 07 Jun 2025, Accepted: 04 Aug 2025, Published online: 23 Sep 2025)

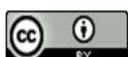
Abstract

In recent years, air pollution has become a major problem in industrial cities around the world. Issuing timely warnings as a result of accurate prediction of pollutant concentrations in metropolitan areas can greatly reduce the damage caused by air pollution. In this study, three cases of air pollution caused by PM₁₀, PM_{2.5} and NO₂ pollutants in Tehran were investigated and the output of the CAMS model in predicting the concentrations of these pollutants was compared with observational data. For this purpose, data from the Mehrabad Airport Synoptic Station, ERA5 reanalysis data and air pollution data from air quality monitoring stations in Tehran were used. Comparison of time series of pollutant concentration, horizontal visibility and relative humidity (RH) showed that in the case of PM₁₀ pollution, no relationship was observed between pollutant concentration and RH. In the case of PM_{2.5} and NO₂ pollutions, it can be said to some extent that RH had an inverse relationship with horizontal visibility and a direct relationship with concentration. Based on synoptic analysis, during the PM₁₀ case study, a thermal low pressure was located on the Iranian plateau, but in the cases of PM_{2.5} and NO₂, high pressure patterns prevailed in the region and the 10-meter wind was weak. Comparing the 24-hour forecast of the CAMS model with the pollutant concentration map obtained from air pollution monitoring stations in Tehran showed that the model had a large underestimation in estimating the concentration value. The highest underestimation was related to PM₁₀ pollutant and the lowest was related to NO₂.

Keywords: Tehran city, synoptic analysis, forecast, pollutant concentration, CAMS model

Cite this article: karami,S. and Ghassabi,Z. (2025). Investigating the CAMS model ability to predict the concentration of PM₁₀, PM_{2.5}, and NO₂ pollutants in Tehran (3 case studies). Journal of the Nivar, 49(130-131), 79-99. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.515545.1330>

E-mail: (1) karamis.62@gmail.com



بررسی توانایی مدل CAMS در پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و NO_2 در شهر تهران در ۳ مورد مطالعاتی

سارا کرمی^۱ | زهرا قصابی^۱ ✉

۱. استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: z.ghassabi@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱)

چکیده

در سال‌های اخیر آلودگی هوا به معضل بزرگی در شهرهای صنعتی دنیا تبدیل شده است. پیش‌بینی درست غلظت آلاینده‌ها در سطح کلان‌شهرها با صدور هشدارهای بهنگام می‌تواند تا حدود زیادی از خسارات ناشی از آلودگی هوا بکاهد. در این مطالعه سه مورد آلودگی هوای ناشی از آلاینده‌های PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و NO_2 در سطح شهر تهران بررسی شده و خروجی مدل CAMS در پیش‌بینی غلظت این آلاینده‌ها با داده‌های مشاهداتی مقایسه شده است. به این منظور از داده‌های ایستگاه هواشناسی همدیدی فرودگاه مهرآباد، داده‌های بازتحلیل ERA5 و داده‌های آلودگی هوا از ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا در شهر تهران استفاده شده است. مقایسه سری زمانی غلظت آلاینده، دیدافتی و رطوبت نسبی در موارد مطالعاتی مختلف نشان داد که در مورد آلاینده PM_{10} ارتباطی میان غلظت آلاینده با مقدار رطوبت نسبی مشاهده نشده است. در مورد آلاینده‌های $PM_{2.5}$ و NO_2 تا حدودی می‌توان بیان کرد که رطوبت نسبی با دید افقی رابطه عکس و با غلظت رابطه مستقیم نشان داده است. بر اساس تحلیل همدیدی، در زمان رخداد مورد مطالعاتی مربوط به آلاینده PM_{10} کم‌فشار حرارتی بر روی فلات ایران مستقر بوده ولی در موارد مطالعاتی مربوط به $PM_{2.5}$ و NO_2 الگوهای پرفشار در منطقه حاکم بوده و جریان باد ۱۰ متری ضعیف بوده است. مقایسه پیش‌بینی ۲۴ ساعته مدل CAMS با الگوی غلظت حاصل از ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا در شهر تهران نشان داد که مدل در تمام موارد مطالعاتی در پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها فروتخمین زیادی داشته است. بیشترین مقدار فروتخمین مربوط به آلاینده PM_{10} و کمترین آن مربوط به NO_2 است.

کلیدواژه‌ها: شهر تهران، تحلیل همدیدی، پیش‌بینی، غلظت آلاینده‌ها، مدل CAMS

۱. مقدمه

آلودگی هوا در کشورهای در حال توسعه به علت صنعتی شدن در حال افزایش است (سومایرا و سیدیکو، ۲۰۲۳؛ ما و همکاران، ۲۰۱۷). در سال‌های اخیر آلودگی هوا یکی از اصلی‌ترین معضلات زیست‌محیطی این جوامع بوده که سلامت محیط‌زیست و انسان را به خطر می‌اندازد. آلودگی هوا با افزایش خطر ابتلا به بیماری‌های حاد و مزمن و مرگ

در ارتباط است (مانیسالیدیس و همکاران، ۲۰۲۰؛ تو و همکاران، ۲۰۱۵) و به بروز بیماری‌های قلبی (برونکریف و هافمن، ۲۰۱۶)، ریوی (ژوهانسون و همکاران، ۲۰۱۵)، تنفسی (بالا و همکاران، ۲۰۲۱)، سوزش چشم (لین و همکاران، ۲۰۲۲) و حتی سرطان (وایت و همکاران، ۲۰۱۸) منجر می‌شود. از طرف دیگر نشان داده شده است که حتی مقادیر

استناد: افروغ، بهنوش، بابائیان، ایمان و مفیدی، عباس. (۱۴۰۴). مطالعه فرین‌های بارشی نیمه شرقی کشور در دوره ۱۹۷۷-۲۰۲۴ و تاثیر دما بر بر حداکثر بارش یک روزه. مجله

نیوار، ۴۹ (۱۳۱-۱۳۰)، ۷۹-۹۹. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.513157.1329>

رایانامه: (۱) karamis.62@gmail.com



پیش‌بینی عددی آلودگی هوا یکی از ابزارهای مهم است که امروزه در سطح دنیا و بویژه کلان‌شهرها مورد استفاده قرار می‌گیرد (شریو و همکاران، ۲۰۱۹؛ اولیوری کنتی و همکاران، ۲۰۱۹). در این زمینه مطالعات زیادی انجام شده است (مانند: باکلانو و همکاران، ۲۰۰۲؛ فرون و همکاران، ۲۰۰۲؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۳). علی‌رغم توسعه این مدل‌ها در سال‌های اخیر، همچنان نیاز به اصلاح دارند و خروجی‌های آنها بویژه از نظر کمی چندان قابل اعتماد نیست (سوخی و همکاران، ۲۰۲۳؛ زانتي، ۲۰۲۴).

کلان‌شهر تهران به عنوان پایتخت ایران همواره با آلودگی هوا مواجه بوده است. در بسیاری از مواقع بویژه در ماه‌های سرد سال غلظت آلاینده‌ها در شهر تهران به حدی می‌رسد که سبب تعطیلی مدارس و حتی ادارات در این کلان‌شهر می‌شود. مطالعات زیادی در زمینه بررسی عوامل موثر بر آلودگی هوای شهر تهران انجام شده است (هگر و صراف، ۲۰۱۸؛ بیات و همکاران، ۲۰۱۹). عوامل هواشناسی مانند وارونگی دما، کاهش ارتفاع لایه مرزی، کاهش سرعت باد و استقرار سامانه پرفشار در منطقه در وقوع پدیده‌های آلودگی هوا در تهران نقش مهمی دارند (نژاد و همکاران، ۲۰۲۳؛ سبزواری و همکاران، ۲۰۱۴). توپوگرافی تهران و همچنین ساخت‌وساز ساختمان‌های بلند در اطراف شهر از جمله عواملی است که مانع تهویه طبیعی هوا در سطح شهر و تجمع آلاینده‌ها در آن می‌شود (آفریده و همکاران، ۲۰۲۳). از طرف دیگر وجود ترافیک سنگین در تهران و تجمع مراکز صنعتی، اداری و مسکونی گسیل آلاینده‌ها در سطح شهر را به شدت افزایش می‌دهند (تربتیان و همکاران، ۲۰۲۰؛ محمدیها و همکاران، ۲۰۱۸).

پیش‌بینی مقادیر غلظت آلاینده‌ها در شهر تهران با استفاده از مدل‌های عددی تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته و همچنان به عنوان یک چالش مطرح است. از آنجا که پیش‌بینی دقیق غلظت آلاینده‌ها نقش مهمی در مدیریت آلودگی هوای کلانشهر تهران دارد، هدف از این مطالعه بررسی

کم آلاینده‌های هوا برای گروه‌های حساس شامل کودکان، افراد مسن و بیماران مبتلا به بیماری‌های تنفسی و قلبی-عروقی بسیار خطرناک می‌باشد (یوسفی و همکاران، ۲۰۲۲؛ نواز و همکاران، ۲۰۲۳). آلودگی هوا اثرات شدید و مخربی بر روی آب و خاک نیز دارد که زندگی حیوانات و گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (دومینگو و همکاران، ۲۰۲۱؛ سیلمن و همکاران، ۲۰۲۱).

آلودگی هوا نقش مهمی در تغییر سیستم آب‌وهوای زمین بر عهده دارد و سبب تغییر الگوهای کوتاه‌مدت و بلندمدت آب‌وهوا می‌شود (کبیر و همکاران، ۲۰۲۳؛ کومار، ۲۰۲۱؛ فرید و همکاران، ۲۰۲۲). بسیاری از آلاینده‌های هوا مانند دی‌اکسید کربن، متان و اکسید نیتروژن به عنوان گازهای گلخانه‌ای عمل کرده و سبب افزایش دمای جو می‌شوند (فیلونچیک و همکاران، ۲۰۲۴). هواویزها می‌توانند نور خورشید را جذب یا منعکس کنند (چن و همکاران، ۲۰۲۲). این بر تعادل انرژی زمین تأثیر می‌گذارد و بسته به نوع هواویز و برهمکنش آن با ابرها، منجر به گرم شدن یا سرد شدن آن می‌شود (ونگ و همکاران، ۲۰۲۳). آلاینده‌های هوا می‌توانند شکل‌گیری ابرها و الگوهای بارش را تغییر دهند که به نوبه خود می‌تواند بر حلقه‌های بازخورد آب‌وهوا تأثیر بگذارد (ژائو و همکاران، ۲۰۲۴؛ لویز-رومرو و همکاران، ۲۰۲۱). آلودگی می‌تواند اثرات موضعی بر آب‌وهوا داشته باشد، مانند اثرات جزیره گرمایی شهری، که در آن شهرها به دلیل آلاینده‌ها و تغییرات سطحی، دمای بالاتری را تجربه می‌کنند (کنگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ هوبک، ۲۰۲۴).

یکی از مسائل مهم در بحث آلودگی هوا، پیش‌بینی درست آن به منظور صدور هشدارهای سریع و بهنگام و در نتیجه کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از آن است (البز و همکاران، ۲۰۲۳؛ لی و همکاران، ۲۰۲۲). شناسایی الگوهای هم‌دید حاکم بر منطقه در زمان رخدادهای شدید آلودگی هوا می‌تواند به پیش‌بینی آن کمک کند (چنگ و همکاران، ۲۰۲۴؛ ژان و همکاران، ۲۰۲۴). از طرف دیگر مدل‌های

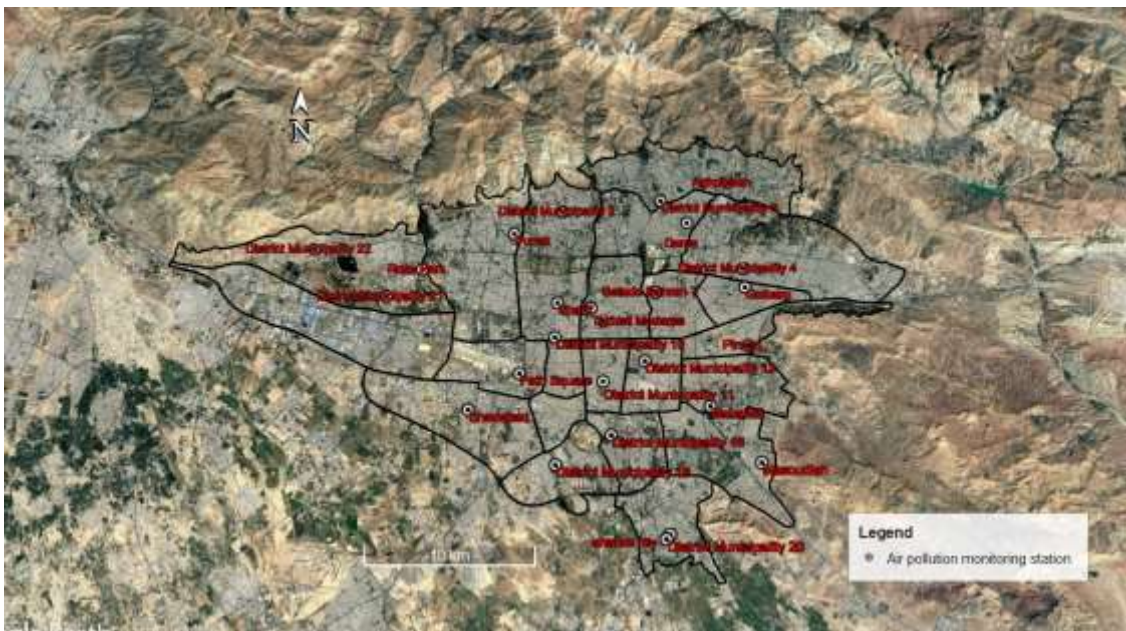
کیلومتر مربع در ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این شهر در دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز واقع شده و از جنوب به کوه‌های ری و بی‌بی‌شهربانو و دشت‌های هموار شهربار و ورامین منتهی می‌شود. پستی و بلندی اطراف پهنه شهر دارای اختلاف ارتفاعی حدود ۴۸۷۸ متر از قله دماوند تا نقاط پست دشت کویر با حدود ۸۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا می‌باشد. این اختلاف ارتفاع در خود شهر تهران نیز به چشم می‌خورد به گونه‌ای که ارتفاع در شمال شهر حدود ۱۷۰۰ متر و در جنوب شهر حدود ۹۰۰ متر از سطح دریا است.

توانایی مدل $CAMS^1$ در پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در شهر تهران است. به این منظور سه مورد مطالعاتی آلودگی هوای ناشی از آلاینده‌های PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و NO_2 مورد بررسی قرار گرفته و خروجی غلظت این آلاینده‌ها از مدل $CAMS$ با داده‌های مشاهداتی حاصل از ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا در سطح شهر تهران به صورت کیفی مقایسه می‌شود.

۲. داده و روش کار

منطقه مورد مطالعه

شکل ۱ نقشه مناطق ۲۲ گانه شهر تهران به همراه ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا که داده‌های آنها در این مطالعه استفاده شده را نشان می‌دهد. کلان شهر تهران با وسعتی بالغ بر ۷۳۳



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا در شهر تهران.

۱۵، ۱۸ و ۲۱ گزارش می‌شوند. این داده‌ها از سازمان هواشناسی ایران گرفته شده‌اند.

به منظور تحلیل همیدی و نیز رسم نمودار SKEW-T در موقعیت ایستگاه هواشناسی همیدی فرودگاه مهرآباد تهران، از داده‌های بازتحلیل ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه استفاده شده است که از <https://cds.climate.copernicus.eu> به دست آمده

۲-۲. داده‌ها

داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه شامل کمیت‌های دید افقی و رطوبت نسبی از ایستگاه هواشناسی همیدی فرودگاه مهرآباد تهران هستند که ۸ بار در روز در بازه زمانی ۳ ساعته در ساعت‌های UTC ۰۳، ۰۶، ۰۹، ۱۲،

¹ Copernicus Atmosphere Monitoring Service

موارد آلودگی هوا بررسی می‌شود. در نهایت به منظور امکان سنجی پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در زمان رخداد آلودگی هوا، پیش‌بینی ۲۴ ساعته مدل CAMS با الگوی غلظت حاصل از ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا در شهر تهران مقایسه می‌شود.

۲-۳-۱. مدل CAMS

مدل CAMS که توسط ECMWF¹ ارائه شده پیش‌بینی کیفیت هوا را در سطح جهانی و منطقه‌ای (بر روی اروپا) به صورت روزانه ارائه می‌دهد. مدل مورد استفاده در پیش‌بینی جهانی ترکیب جو CAMS، سیستم پیش‌بینی یکپارچه (IFS²) است که پیش‌بینی وضع هوای ECMWF را نیز تولید می‌کند، اما برای پیش‌بینی غلظت ذرات معلق، گازهای واکنش‌پذیر و گازهای گلخانه‌ای بخش‌های اضافه‌ای را شامل می‌شود.

CAMS پیش‌بینی جهانی پنج روزه ترکیب جوی را دو بار در روز (ساعت ۰۰ و ۱۲ UTC)، منتشر می‌کند. این پیش‌بینی شامل ۵۶ آلاینده گازی در وردسپهر، ازن پوشن سپهر و هفت نوع مختلف هواویز از جمله گردو خاک بیابان، نمک دریا، ماده آلی، کربن سیاه، سولفات و (از ۹ ژوئیه ۲۰۱۹) نیترات و آمونیوم است. شرایط اولیه پیش‌بینی از ترکیب پیش‌بینی قبلی با مشاهدات ماهواره‌ای عمق نوری هواویزها، ازن (O₃)، مونوکسید کربن (CO)، دی اکسید نیتروژن (NO₂) و دی اکسید گوگرد (SO₂) از طریق روش داده گواری 4D-VAR به دست می‌آید. داده‌های جهانی پیش‌بینی ترکیب جو CAMS دارای تفکیک افقی تقریبی ۴۰ کیلومتر (۰/۳۵ درجه) هستند. در حال حاضر تفکیک قائم مدل ۱۳۷ تراز است ولی پیش از سال ۲۰۱۹ این تعداد ۶۰ تراز قائم بود.

۳. بحث و نتایج

۳-۱. مورد مطالعاتی آلاینده PM10

است. این داده‌ها شامل میانگین فشار سطح دریا و باد در ارتفاع ۱۰ متری، ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، رطوبت نسبی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، دما، دمای تر و سرعت باد از تراز ۱۰۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال می‌باشند.

داده‌های آلودگی هوا شامل غلظت آلاینده‌های PM10، PM2.5، NO2 و O3 از ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا در شهر تهران هستند که در بازه زمانی یک ساعته و در زمان محلی گزارش می‌شوند. این داده‌ها از وبسایت شرکت کنترل کیفیت هوای تهران وابسته به شهرداری تهران <https://airnow.tehran.ir> گرفته شده است. در این مطالعه برای بررسی ارتباط میان کاهش دید و غلظت آلاینده‌ها صرفاً از داده‌های ایستگاه شادآباد که نزدیکترین ایستگاه به ایستگاه هواشناسی همدیدی فرودگاه مهرآباد بوده، استفاده شده است. برای مقایسه این داده‌ها با داده‌های ایستگاه هواشناسی، زمان آنها به UTC تبدیل شد.

۲-۳. روش کار

در این مطالعه یک مورد آلودگی هوای ناشی از هر یک از آلاینده‌های PM10، PM2.5 و NO2 بررسی می‌شود. برای هر یک از این موارد مطالعاتی، سری زمانی غلظت آلاینده مسئول از ایستگاه پایش آلودگی هوای شادآباد به همراه دید افقی و رطوبت نسبی از ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد ارائه می‌شود. همچنین نقشه‌های میانگین فشار سطح دریا و باد در ارتفاع ۱۰ متری، ارتفاع ژئوپتانسیل و باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، رطوبت نسبی و خط جریان در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و نمودار SKew-T در موقعیت ایستگاه مهرآباد با استفاده از داده‌های ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه برای تعیین شرایط جوی حاکم بر منطقه در زمان رخداد هر یک از این

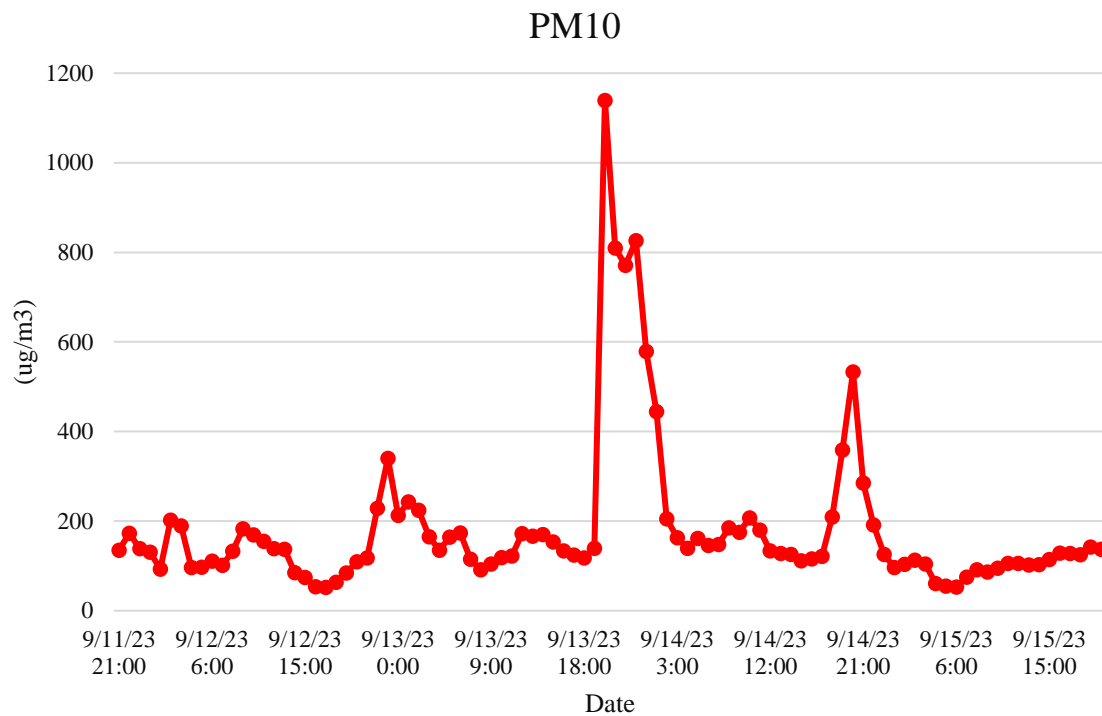
² Integrated Forecasting System

¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

۳-۱-۱. سری زمانی

نمودار نیز یک دوره روزانه مشاهده می‌شود به گونه‌ای که در ساعات انتهایی هر روز مقدار غلظت به بیشینه خود در آن روز می‌رسد.

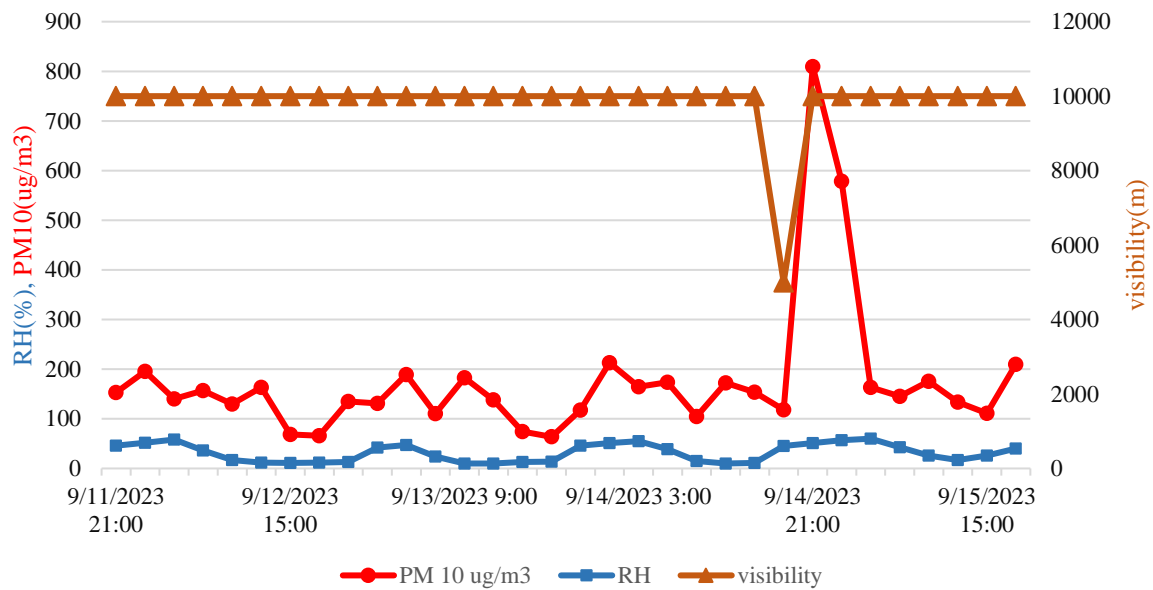
سری زمانی غلظت ذرات معلق PM_{10} طی روزهای ۱۲ تا ۱۵ سپتامبر ۲۰۲۳ با بازه زمانی یک ساعته در شکل ۲ نشان داده شده است. بیشترین مقدار غلظت PM_{10} در این دوره زمانی مربوط به ساعت ۲۰ UTC روز ۱۳ سپتامبر است. در این



شکل ۲. سری زمانی غلظت PM_{10} با بازه زمانی یک ساعته در روزهای ۱۱ تا ۱۵ ماه سپتامبر سال ۲۰۲۳.

افقی به ۵۰۰۰ متر، روند افزایشی در غلظت ذرات معلق مشاهده می‌شود. در این مورد مطالعاتی نیز تغییرات چندانی در مقدار رطوبت نسبی مشاهده نمی‌شود.

شکل ۳ سری زمانی غلظت ذرات معلق، دیدافقی و رطوبت نسبی در روزهای ۱۱ تا ۱۵ سپتامبر ۲۰۲۳ با بازه زمانی ۳ ساعته را نشان می‌دهد. در ساعت ۱۸ روز ۱۴ سپتامبر با کاهش دید

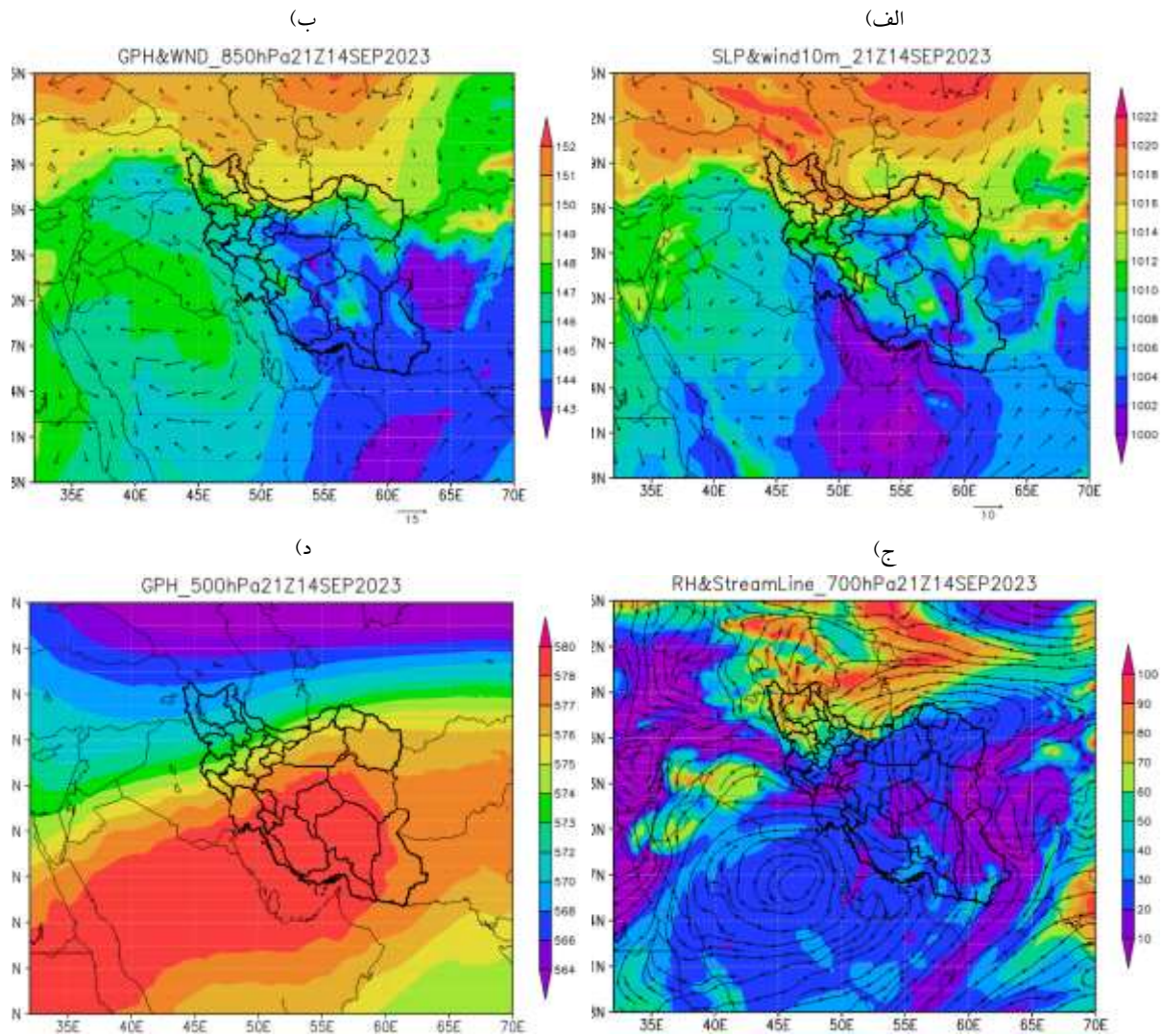


شکل ۱. سری زمانی غلظت PM10، دید افقی و رطوبت نسبی در روزهای ۱۱ تا ۱۵ ماه سپتامبر سال ۲۰۲۳.

۳-۱-۲. تحلیل همدیدی

در نقشه سطح زمین نفوذ سامانه پرفشار از روی روسیه و عرض‌های بالا بر روی دریای خزر و بخش‌های شمالی تا غرب و شمال شرق ایران دیده می‌شود. مراکز پرفشار بر روی افغانستان، شمال شرق و غرب دریای خزر مستقر هستند. کم‌فشار حرارتی با توجه به حاکمیت در این فصل سال در جنوب شرق، جنوب و بخش‌هایی از مرکز ایران، شرق عربستان، جنوب افغانستان و جنوب غرب پاکستان مشاهده می‌شود. منطقه مورد مطالعه (محدوده شهر تهران) تحت تاثیر کم‌فشار نسبی ۱۰۰۸ هکتوپاسکال در بخش‌های مرکزی و جنوبی و ۱۰۱۰ هکتوپاسکال در نوار شمالی استان است و جریان باد ۱۰ متری در راستای شرقی با توجه به گردش پادساعتگرد کم‌فشار مستقر در منطقه از جنوب استان سمنان و شمال استان اصفهان به سوی منطقه وجود دارد

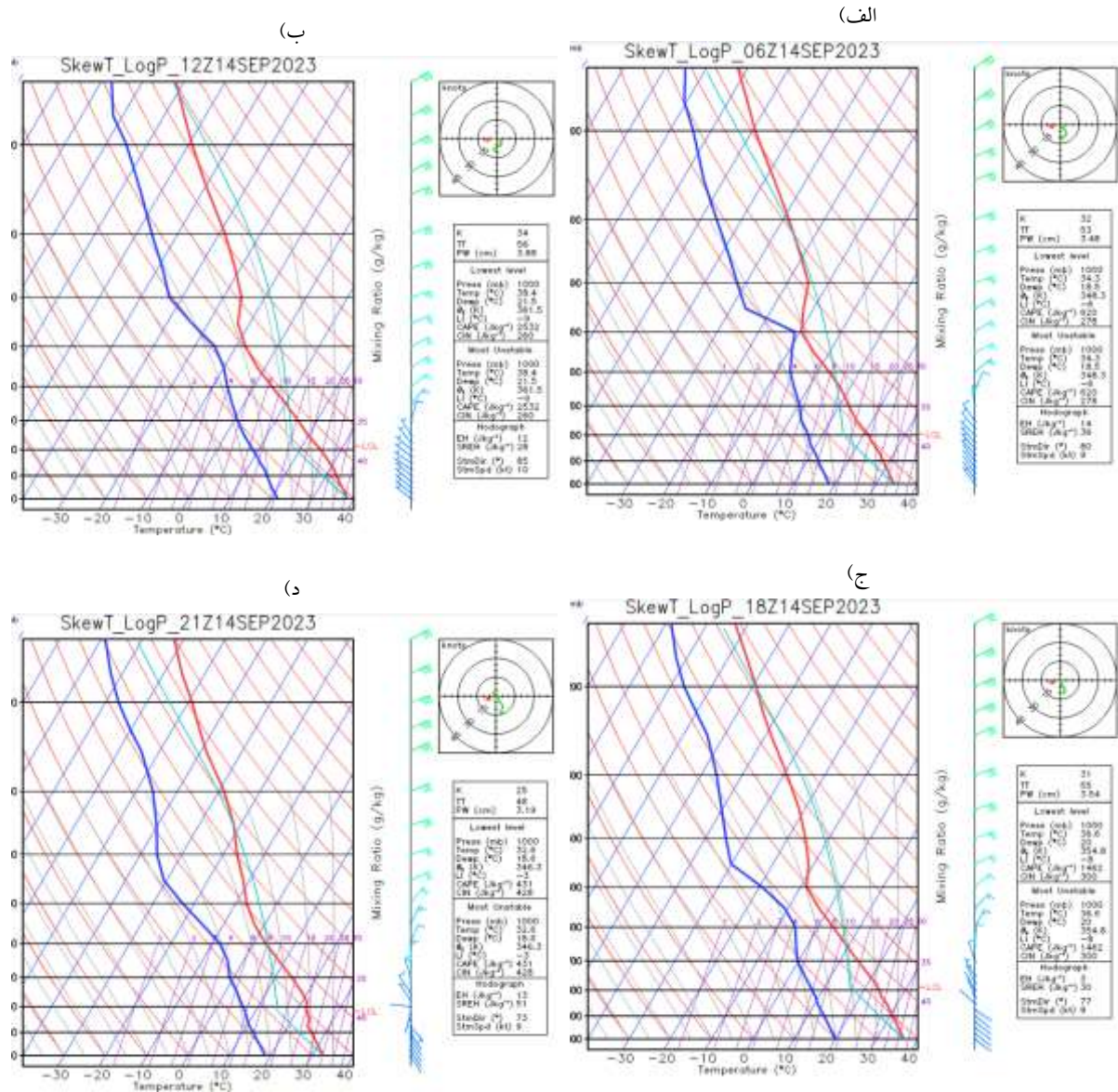
(شکل ۴.الف). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، پرا ارتفاع بر روی نوار شمالی ایران، دریای خزر، شمال ترکیه و شمال افغانستان دیده می‌شود. کم‌ارتفاع مناطق زیادی از مرکز تا جنوب و جنوب شرق ایران را دربر گرفته و نیز بر روی پاکستان، جنوب افغانستان و دریای عرب دیده می‌شود. در استان تهران کم‌ارتفاع نسبی ۱۴۴ ژئوپتانسیل متر قرار دارد و وزش باد در راستای جنوب شرقی با سرعت ۱۰ تا ۱۵ متر بر ثانیه در مناطق جنوبی استان دیده می‌شود (شکل ۴.ب). با توجه به جریانات خشک جنوبی، در استان تهران رطوبت نسبی کمتر از ۳۰ درصد است (شکل ۴.ج). الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، استقرار پرا ارتفاع جنب‌حاره‌ای را روی اغلب مناطق کشور به جز شمال غرب و سواحل جنوبی دریای خزر نشان می‌دهد. در استان تهران پرا ارتفاع نسبی ۵۷۵ ژئوپتانسیل - متر قرار دارد (شکل ۴.د)



شکل ۲. الف) میانگین فشار سطح دریا (hPa) و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (m/s)، ب) ارتفاع ژئوپتانسیل (gpm) و سرعت باد (m/s) در تراز ۸۵۰ hPa، ج) رطوبت نسبی (درصد) و خطوط جریان در تراز ۷۰۰ hPa، د) ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ hPa در ساعت UTC ۲۱ روز ۱۴ سپتامبر سال ۲۰۲۳.

یکدیگر قرار دارند) و باد آرام را نشان می‌دهد (شکل ۵).

نمودار Skew-T در ساعت UTC ۲۱ و ساعت‌های قبل از آن خشکی هوا (نمودار دما و نقطه شبنم با اختلاف زیادی از

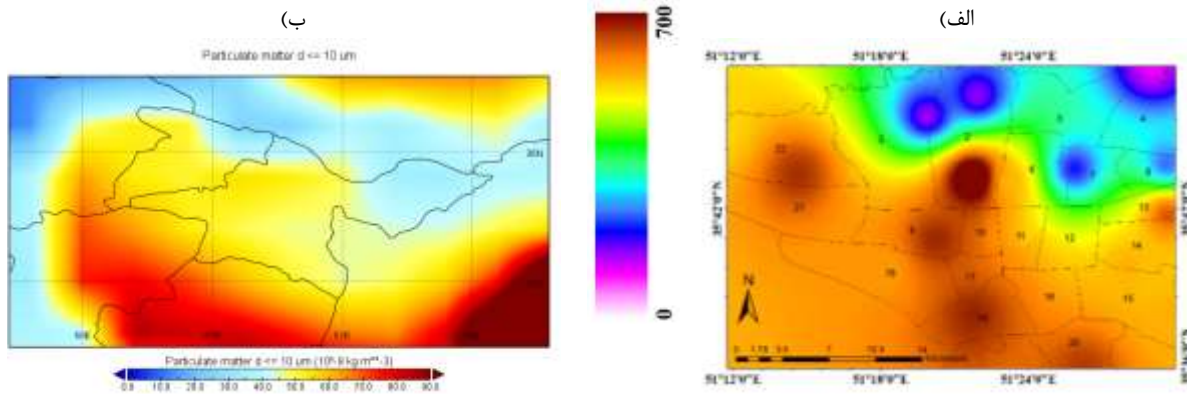


شکل ۳. نمودار Skew-T در ساعت الف) ۰۶، ب) ۱۲، ج) ۱۸، د) ۲۱ UTC روز ۱۴ سپتامبر سال ۲۰۲۳.

۳-۱-۳. پیش‌بینی غلظت آلاینده در شهر تهران

غلظت آلاینده PM10 در سطح شهر تهران در ساعت ۰۰ UTC روز ۱۵ سپتامبر سال ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های پایش آلودگی هوای شهر تهران در شکل ۶ الف نشان داده شده است. خروجی غلظت PM10 پیش‌بینی ۲۴ ساعته مدل CAMS در همان زمان در شکل ۶ ب مشاهده می‌شود. در این ساعت در بخش وسیعی از شهر تهران به جز

مناطق شمال و شمال شرقی آن غلظت PM10 زیاد است که مدل نیز به درستی آن را پیش‌بینی کرده است. در این مورد مدل فروتخمین زیادی داشته و غلظت‌ها را بسیار کمتر از مقادیر مشاهداتی پیش‌بینی کرده است. مقدار فروتخمین به گونه‌ای است که امکان نمایش شکل‌ها با رنگ‌های مشابه وجود ندارد.



شکل ۴. غلظت آلاینده PM₁₀ بر حسب (از الف) ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا، (ب) پیش‌بینی ۲۴ ساعته مدل CAMS، در ساعت ۰۰ UTC روز ۱۵ سپتامبر سال ۲۰۲۳.

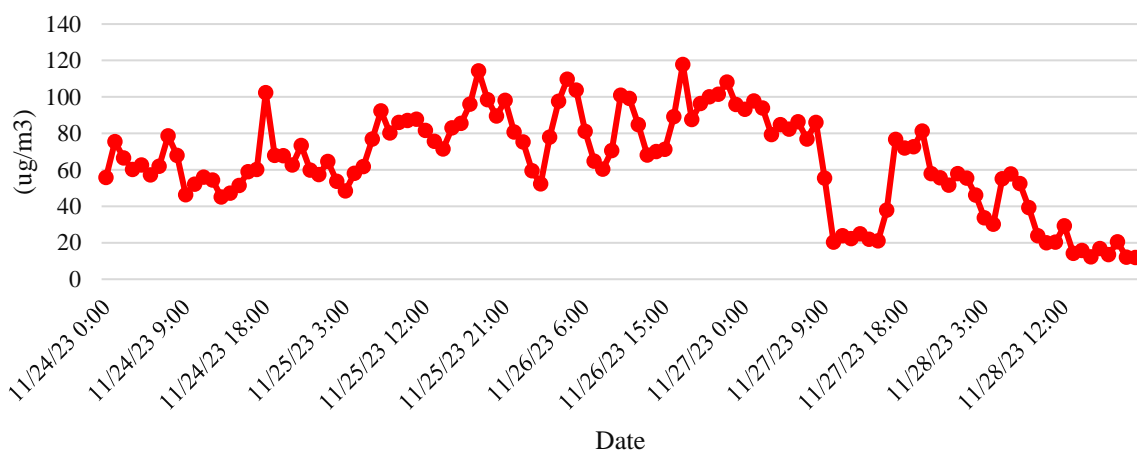
۲-۳. مورد مطالعاتی آلاینده PM_{2.5}

۱-۲-۳. سری زمانی

سری زمانی غلظت ذرات معلق PM_{2.5} در روزهای ۲۴ تا ۲۸ نوامبر ۲۰۲۳ با بازه زمانی یک ساعته در شکل ۷ نشان داده شده است. در این دوره، غلظت PM_{2.5} به طور کلی زیاد است و تغییرات زیادی در آن مشاهده نمی‌شود. با این وجود

بیشترین غلظت در ساعت ۱۷ UTC روز ۲۶ نوامبر برابر $117/8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ و پس از آن ساعت ۱۸ UTC روز ۲۵ نوامبر برابر $114/3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ثبت شده است. در ساعات ۱۰ UTC تا ۱۵ روز ۲۷ نوامبر نسبت به ساعت‌های قبل و بعد کاهش ناگهانی در غلظت PM_{2.5} مشاهده می‌شود.

PM 2.5



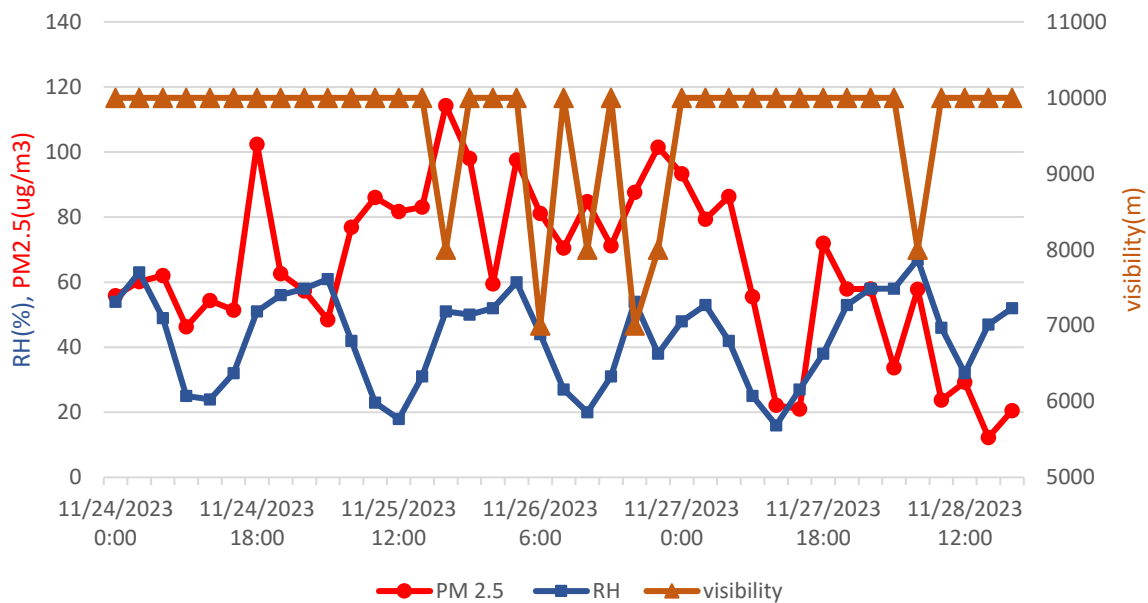
شکل ۵. سری زمانی غلظت PM_{2.5} با بازه زمانی یک ساعته در روزهای ۲۴ تا ۲۸ ماه نوامبر سال ۲۰۲۳.

دوره به خوبی قابل مشاهده است به گونه‌ای که در ساعات ابتدایی و انتهای روز، رطوبت نسبی افزایش و در ساعات میانی روز کاهش یافته است. مقدار رطوبت نسبی بین ۲۰ تا ۶۰ درصد متغیر است. مقایسه روند تغییرات رطوبت نسبی با دید افقی و غلظت PM_{2.5} نشان می‌دهد که با افزایش مقدار

شکل ۸ سری زمانی غلظت PM_{2.5}، دیدافقی و رطوبت نسبی در روزهای ۲۴ تا ۲۸ نوامبر ۲۰۲۳ با بازه زمانی ۳ ساعته را نشان می‌دهد. در ساعت ۱۸ روز ۱۴ سپتامبر با کاهش دید افقی، افزایش غلظت ذرات معلق به مقدار $114 \mu\text{g}/\text{m}^3$ مشاهده می‌شود. دوره روزانه در نمودار رطوبت نسبی در این

عبارتند از فرآیندهایی مانند تشکیل هواپیزهای ثانویه از آلاینده‌های گازی موجود در جو در حضور رطوبت و پایداری جوی که معمولاً در زمان پدیده غبارسبب تجمع ذرات و افزایش غلظت آنها در سطوح پایین جوی و نزدیک سطح زمین می‌شود.

رطوبت نسبی، دید افقی کاهش و غلظت ذرات معلق افزایش یافته است. کاهش دید افقی ناشی از افزایش رطوبت جوی به دلیل پراکندگی نور توسط قطرات آب موجود در هوا تا حدودی بدیهی به نظر می‌رسد. در ارتباط با افزایش غلظت ذرات معلق در زمان افزایش رطوبت، برخی از دلایل احتمالی



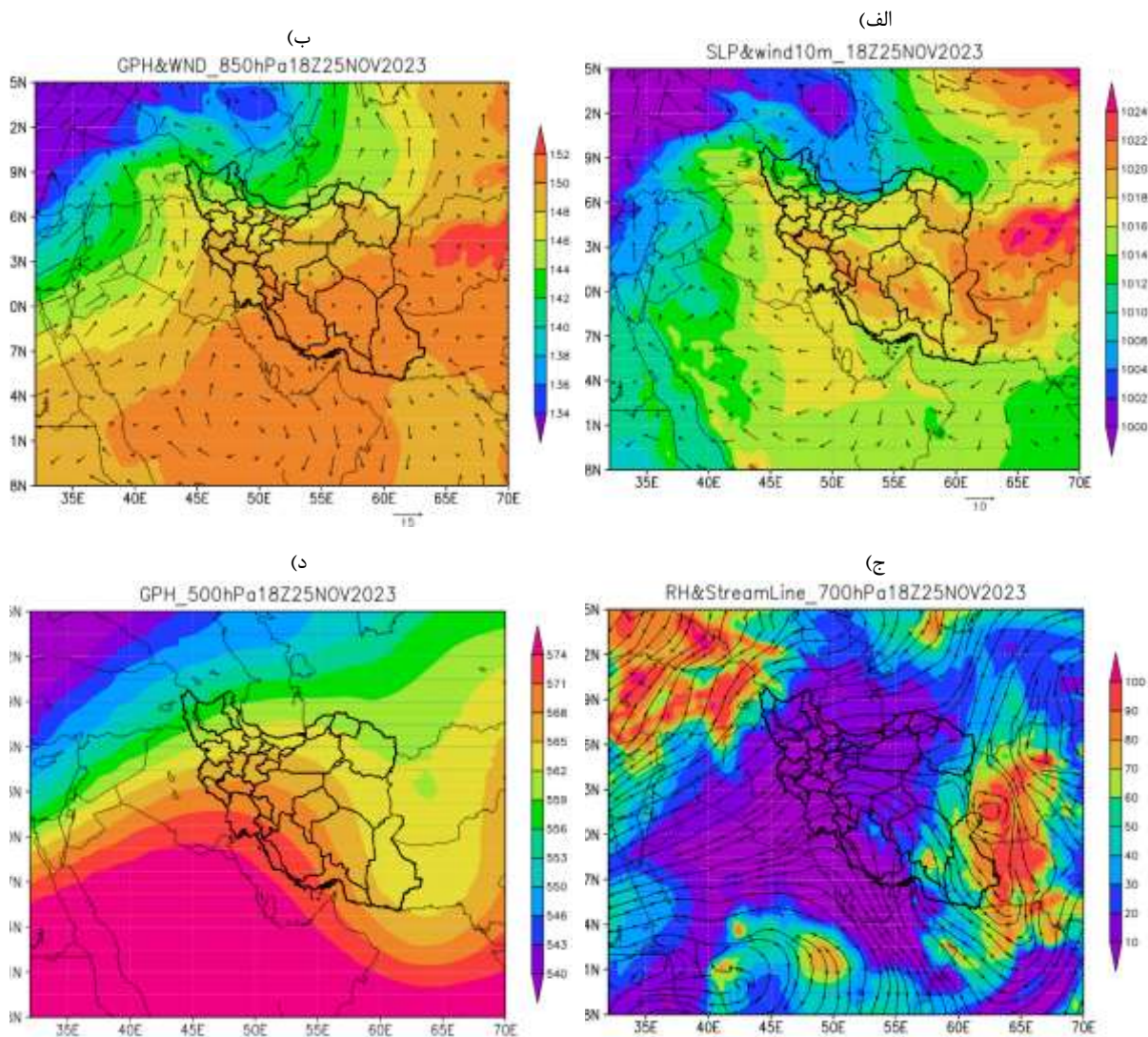
شکل ۶. سری زمانی غلظت $PM_{2.5}$ ، دید افقی و رطوبت نسبی در روزهای ۲۴ تا ۲۸ ماه نوامبر سال ۲۰۲۳.

دریای سیاه، ترکیه و شمال دریای خزر و پرارتفاع بر روی افغانستان، نیمه جنوبی ایران و بر روی عربستان سعودی دیده می‌شود، همچنین در استان تهران پرارتفاع نسبی قرار دارد و وزش باد جنوبی در جنوب استان سمنان و استان قم وجود دارد (شکل ۹.ب). در استان تهران رطوبت نسبی کمتر از ۲۰ درصد است که با جهت جریان خشک جنوبی مطابقت دارد (شکل ۹.ج). الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پشته پرارتفاع را از روی عربستان تا دریای خزر نشان می‌دهد. در استان تهران پرارتفاع نسبی ۵۶۵ ژئوپتانسیل-متر قرار دارد (شکل ۹.د).

۳-۲-۲. تحلیل همدیدی

در نقشه سطح زمین مراکز کم فشار بر روی دریای سیاه، مرکز ترکیه، دریای مدیترانه و شمال دریای خزر دیده می‌شود که زبانه‌های آن تا نوار ساحلی جنوب دریای خزر ادامه دارد. مرکز پرفشاری بر روی روسیه و مرکز پرفشار دیگری بر روی افغانستان مشاهده می‌شود، این پرفشار تا شرق، مرکز، بخش-هایی از جنوب و ارتفاعات زاگرس در ایران گسترش دارد. شهر تهران تحت تاثیر پرفشار نسبی ۱۰۱۶ هکتوپاسکال است و جریان باد ۱۰ متری ۵ تا ۱۰ متر برثانیه در جنوب استان سمنان وجود دارد (شکل ۹.الف). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در همراهی با الگوی دینامیکی سطح زمین، کم ارتفاع بر روی

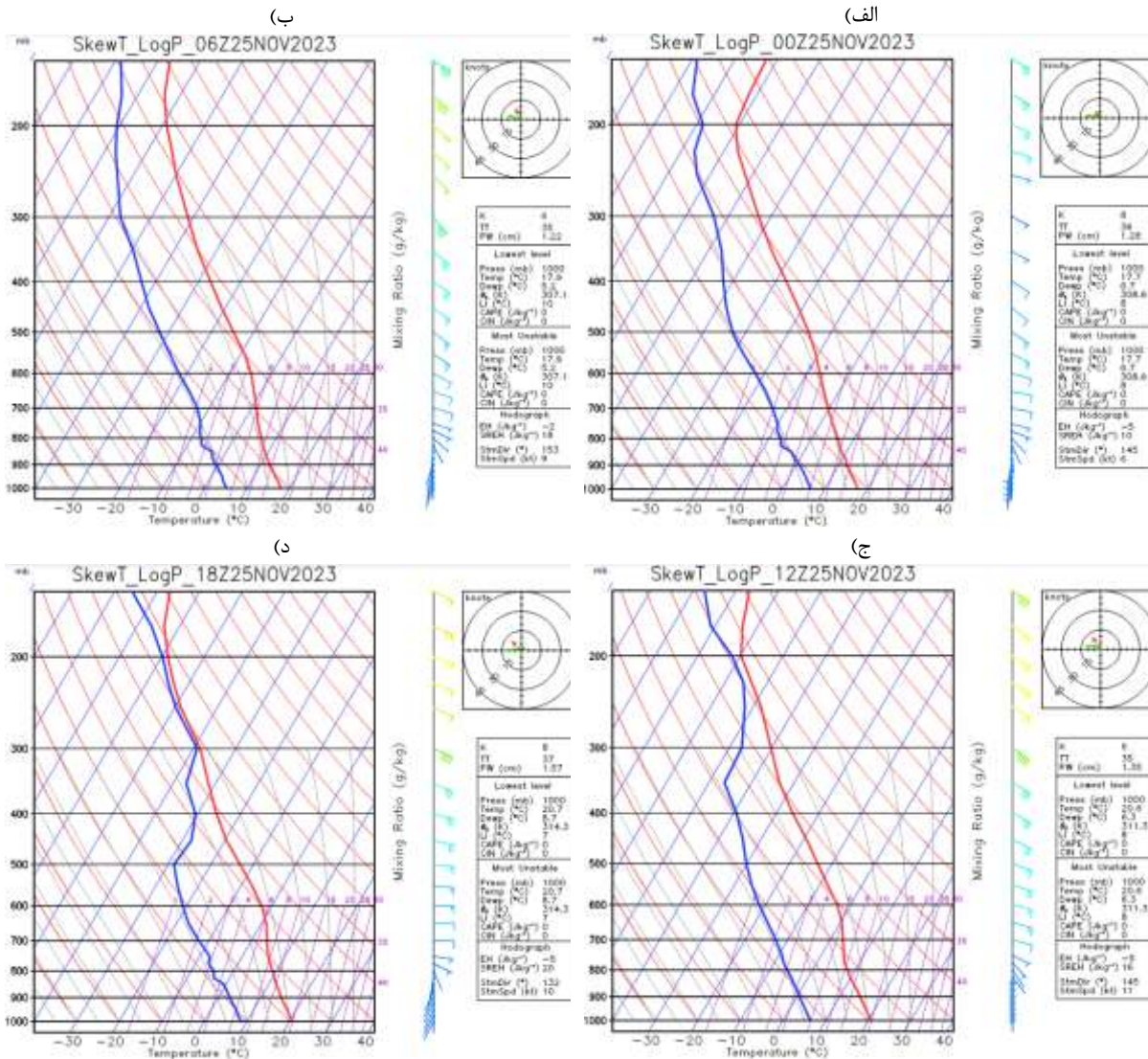
¹ Haze



شکل ۷. الف) میانگین فشار سطح دریا (hPa) و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (m/s)، ب) ارتفاع ژئوپتانسیل (gpm) و سرعت باد (m/s) در تراز ۸۵۰ hPa، ج) رطوبت نسبی (درصد) و خطوط جریان در تراز ۷۰۰ hPa، د) ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ hPa در ساعت ۱۸ UTC روز ۲۵ نوامبر سال ۲۰۲۳.

یکدیگر قرار دارند) و باد آرام را نشان می‌دهد. (شکل ۱۰).

نمودار Skew-T در ساعت ۱۸ UTC و ساعت‌های قبل از آن خشکی هوا (نمودار دما و نقطه شبنم با اختلاف زیادی از

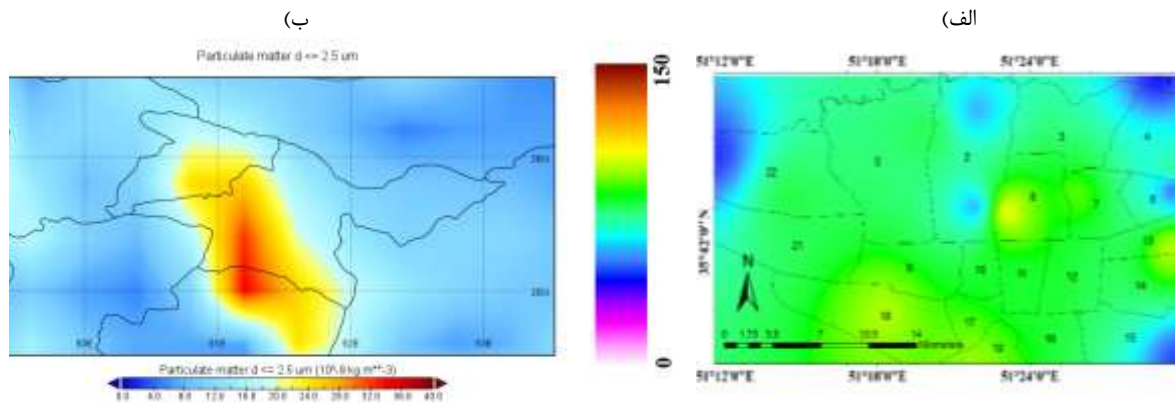


شکل ۸. نمودار Skew-T در ساعت الف (۰۰، ب) ۰۶، ج) ۱۲، د) ۱۸ UTC روز ۲۵ نوامبر سال ۲۰۲۳.

۳-۲-۳. پیش‌بینی غلظت آلاینده در شهر تهران

شکل ۱۱ الف غلظت آلاینده PM_{2.5} در سطح شهر تهران در ساعت ۰۰ UTC روز ۲۶ نوامبر سال ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های پایش آلودگی هوای شهر تهران را نشان می‌دهد. خروجی غلظت PM_{2.5} پیش‌بینی ۲۴ ساعته مدل CAMS در همان زمان در شکل ۱۱ ب مشاهده می‌شود.

این ساعت غلظت PM_{2.5} در بخش وسیعی از شهر تهران به جز مناطق شمالی آن (منطقه ۲) نسبتاً زیاد است. در خروجی مدل پیشینه غلظت در نیمه غربی شهر نشان داده شده است. این مورد مطالعاتی علاوه بر فروتخمین غلظت PM_{2.5}، مدل نتوانسته الگوی غلظت آلاینده را نیز به خوبی پیش‌بینی کند.



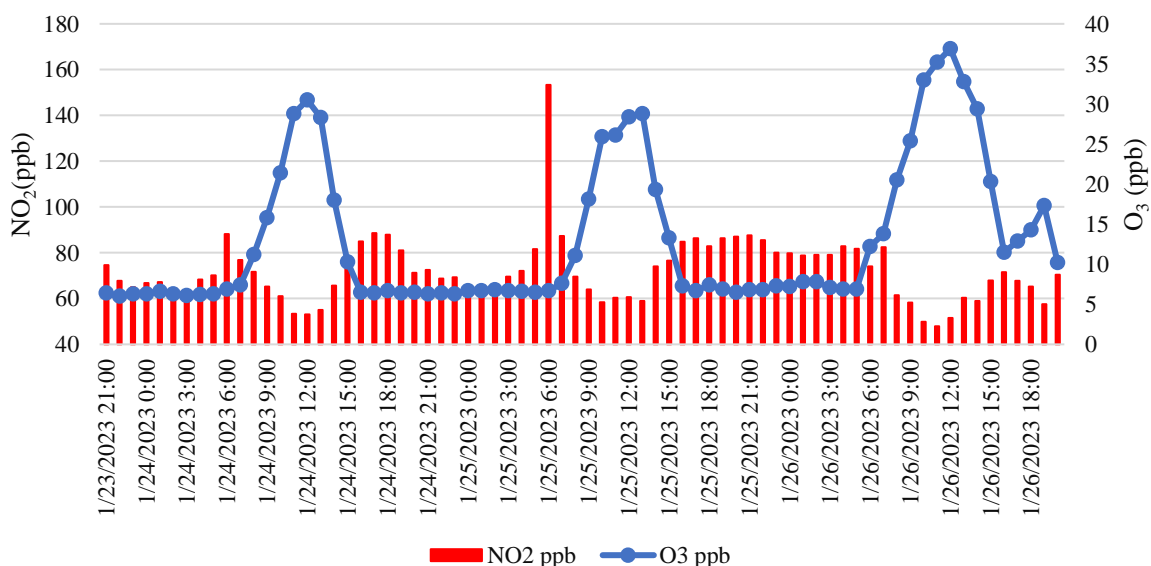
شکل ۹. غلظت آلاینده PM_{2.5} بر حسب (µg/m³) از الف) ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا، ب) پیش‌بینی ۲۴ ساعته مدل CAMS، در ساعت ۰۰ UTC روز ۲۶ نوامبر سال ۲۰۲۳.

۳-۳. مورد مطالعاتی آلاینده NO₂

۱-۳-۳. سری زمانی

سری زمانی غلظت ازن و NO₂ طی ۲۴ تا ۲۷ ژانویه سال ۲۰۲۳ با بازه زمانی یک ساعته در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که با افزایش (کاهش) غلظت ازن، غلظت NO₂ به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش (افزایش) می‌یابد. بیشترین مقدار NO₂ در ساعت ۰۶ UTC روز ۲۵ ژانویه گزارش شده که به حدود

۱۵۳ ppb رسیده بود. تغییرات روزانه در نمودار NO₂ و ازن مشاهده می‌شود به گونه‌ای که در ساعات میانی روز با افزایش دما و همچنین ارتفاع لایه مرزی، غلظت NO₂ کاهش ولی غلظت ازن افزایش یافته است. همچنین افزایش غلظت ازن بعد از بیشینه NO₂ و کاهش ناگهانی غلظت NO₂ در زمان ثبت بیشینه غلظت ازن در این مورد مطالعاتی نیز دیده می‌شود.

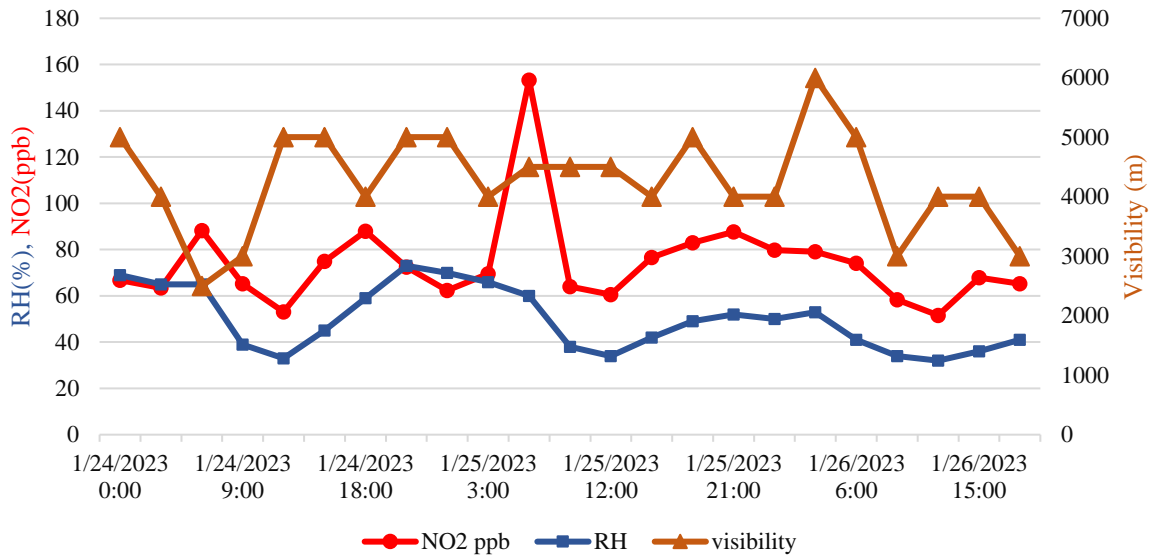


شکل ۱۰. سری زمانی غلظت ازن و NO₂، دید افقی و رطوبت نسبی در روزهای ۲۳ تا ۲۷ ماه ژانویه سال ۲۰۲۳.

کاهش (افزایش) می‌یابد. طوری که در ساعت ۰۶ روز ۲۵ ژانویه دید افقی به ۴۵۰۰ متر کاهش پیدا کرده است و غلظت NO₂ به حدود ۱۵۳ ppb رسیده است. روند تغییر رطوبت

سری زمانی غلظت NO₂، دید افقی و رطوبت نسبی طی ۲۴ تا ۲۶ ژانویه سال ۲۰۲۳ با بازه زمانی سه ساعته در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش (کاهش) غلظت NO₂، دید افقی

نسبی با غلظت NO₂ در این مورد مطالعاتی نیز تا حدودی مشابه است. در بیشتر موارد کاهش دید افقی با افزایش رطوبت نسبی همراه بوه است.

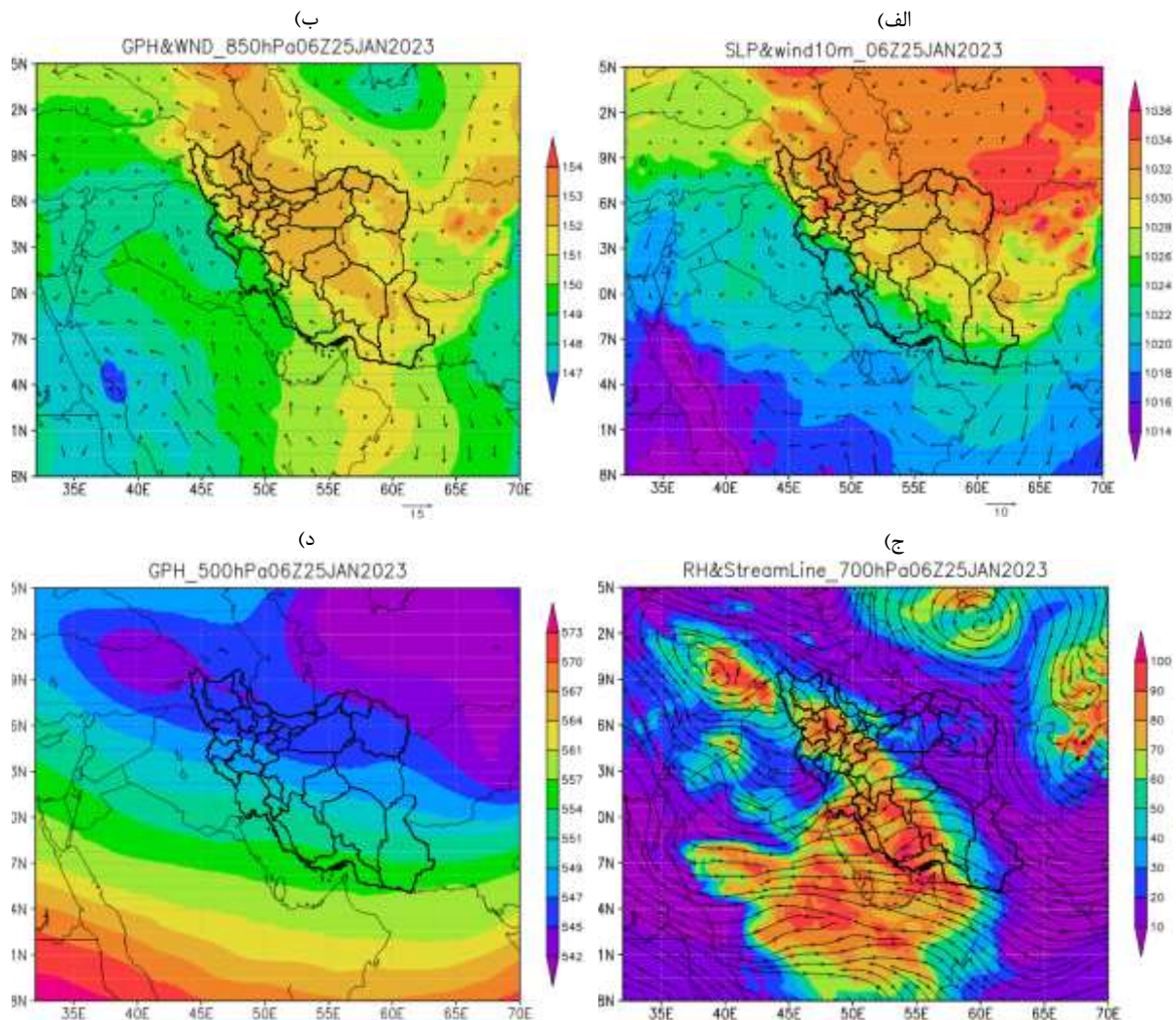


شکل ۱۱. سری زمانی غلظت NO₂، دید افقی و رطوبت نسبی در روزهای ۲۴ تا ۲۶ ماه ژانویه سال ۲۰۲۳.

تهران دیده می‌شود (شکل ۱۴.ب). با توجه به جهت جریان از روی دریای سرخ به سوی عربستان و سپس جنوب ایران و نیز جهت جریان از دریای مدیترانه به سوی غرب و شمال غرب ایران، در مناطق یاد شده رطوبت مناسبی وجود دارد. در استان تهران رطوبت نسبی کمتر بین ۳۰ تا ۶۰ درصد است (شکل ۱۴.ج). الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، کم‌ارتفاع ۵۴۲ ژئوپتانسیل متر را از روی روسیه تا شمال شرق ایران، دریای خزر و افغانستان نشان می‌دهد؛ بعلاوه، کم‌ارتفاع دیگری در شرق ترکیه، جنوب شرق دریای سیاه و شمال غرب ایران قرار دارد. در استان تهران کم‌ارتفاع نسبی ۵۴۶ ژئوپتانسیل متر قرار دارد (شکل ۱۴.د).

۳-۳-۲. تحلیل همدیدی

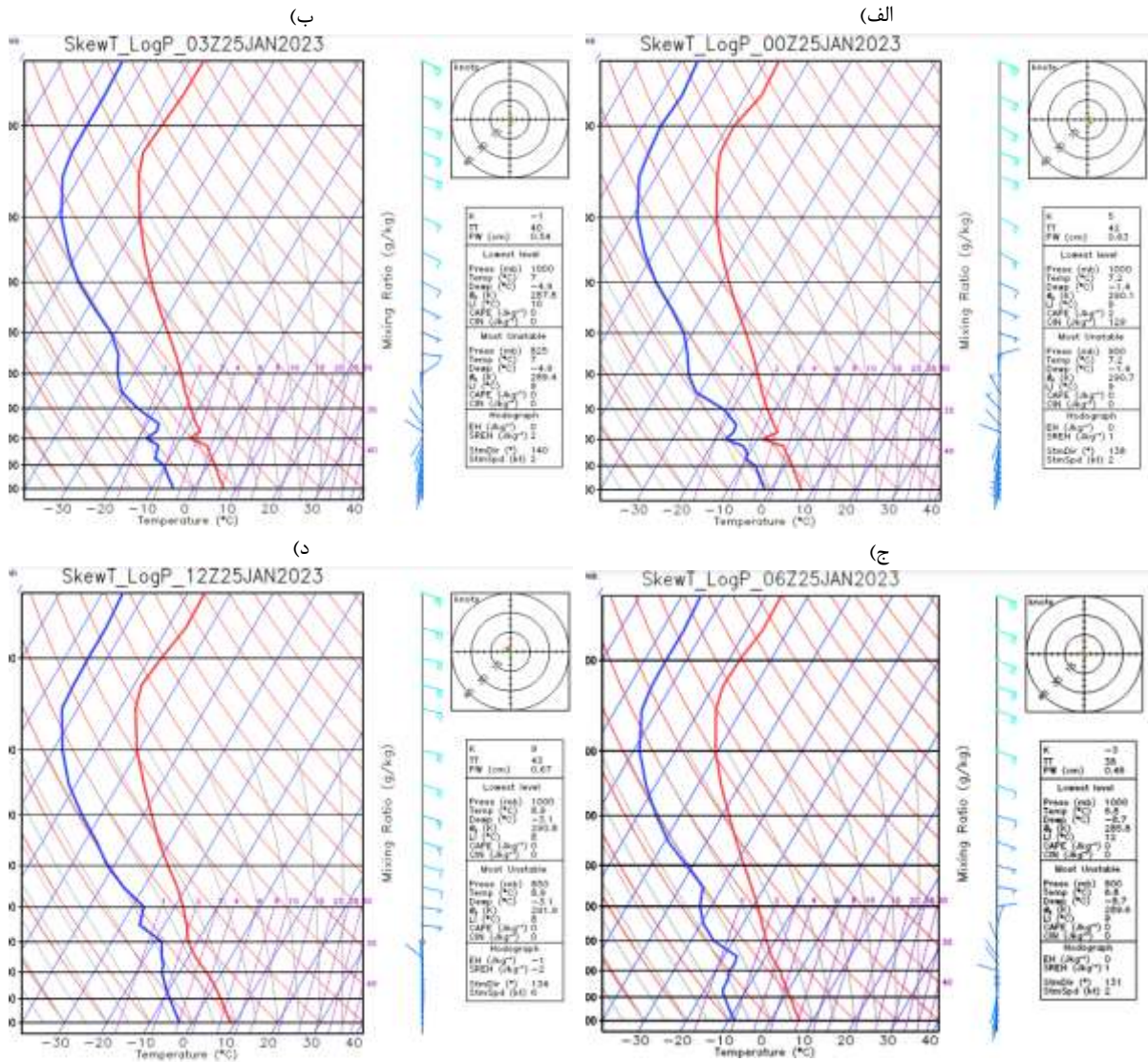
در نقشه سطح زمین نفوذ سامانه پرفشار از روی روسیه و عرض‌های بالا بر روی دریای خزر و بخش‌های شمالی تا مرکزی ایران دیده می‌شود. مراکز پرفشار بر روی افغانستان، شمال شرق، شمال غرب و غرب ایران مشاهده می‌شود. منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر پرفشار نسبی ۱۰۲۸ هکتوپاسکال است و جریان باد ۱۰ متری بسیار ضعیف است (شکل ۱۴.الف). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، پراارتفاع بر روی ایران، دریای خزر و افغانستان دیده می‌شود، همچنین کم-ارتفاع ۱۴۷ ژئوپتانسیل متر بر روی دریای سرخ و غرب عربستان قرار دارد. در استان تهران پراارتفاع نسبی ۱۵۲ ژئوپتانسیل متر قرار دارد و وزش باد بسیار ضعیف در استان



شکل ۱۲. الف) میانگین فشار سطح دریا (hPa) و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (m/s)، ب) ارتفاع ژئوپتانسیل (gpm) و سرعت باد (m/s) در تراز ۵۰۰hPa، ج) رطوبت نسبی (درصد) و خطوط جریان در تراز ۷۰۰hPa، د) ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰hPa در ساعت ۰۶ UTC روز ۲۵ ژانویه سال ۲۰۲۳.

۰۰ و ۰۳ افزایش دما و لایه وارونگی در لایه ۷۷۰ تا ۸۰۰ هکتوپاسکال دیده می‌شود و در ساعت ۰۶ با شدت کمتر در لایه ۸۰۰ تا ۸۳۰ هکتوپاسکال ادامه دارد (شکل ۱۵).

نمودار Skew-T در ساعت ۰۶ و ساعت‌های قبل از آن خشکی هوا (نمودار دما و نقطه شبنم با اختلاف زیادی از یکدیگر قرار دارند) و باد آرام را نشان می‌دهد. در ساعات

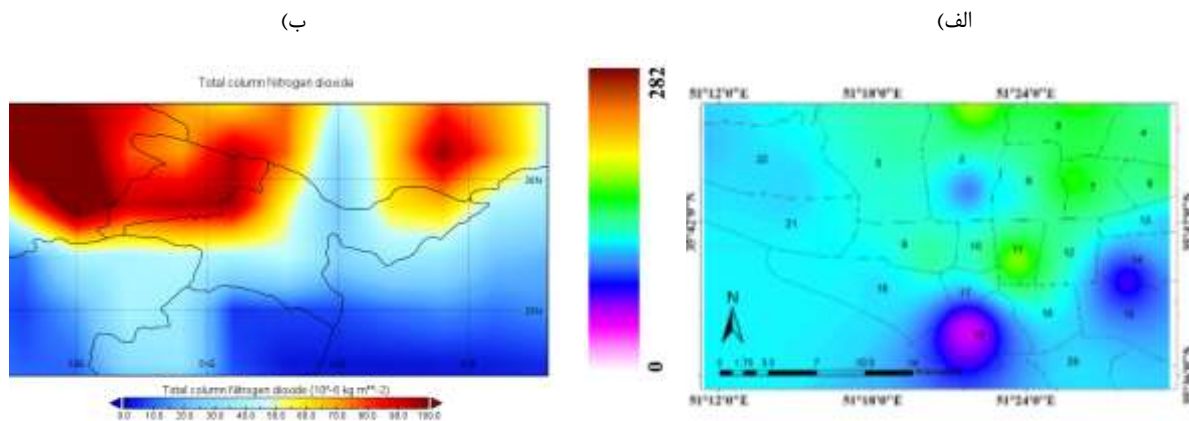


شکل ۱۳. نمودار Skew-T در ساعت الف (۰۰، ب) ۰۳، ج) ۰۶، د) ۱۲ UTC روز ۲۵ ژانویه سال ۲۰۲۳.

۳-۳-۳. پیش‌بینی غلظت آلاینده در شهر تهران

شکل ۱۶ غلظت آلاینده NO₂ در سطح شهر تهران با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های پایش آلودگی هوای شهر تهران و پیش‌بینی ۲۴ ساعته مدل CAMS در ساعت ۰۰ UTC روز

۲۵ ژانویه سال ۲۰۲۳ را نشان می‌دهد. در این ساعت بیشینه غلظت NO₂ در شمال و شمال شرقی شهر تهران نشان داده شده است. در خروجی مدل بیشینه غلظت این آلاینده در شمال شرقی و شمال غربی تهران پیش‌بینی شده است.



شکل ۱۴. غلظت آلاینده NO_2 بر حسب $(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ از الف) ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا، ب) پیش‌بینی ۲۴ ساعته مدل CAMS، در ساعت UTC+۰۰ روز ۲۵ ژانویه سال ۲۰۲۳.

۴. جمع بندی

در فصل گرم سال و استقرار کم‌فشار حرارتی بر روی فلات ایران، در استان تهران و استان‌های همجوار کم‌فشار سطح زمین قرار دارد که با گردش پادساعتگرد جریان در کم‌فشار سبب وزش باد شرقی و جنوب‌شرقی (۱۰ متری) از سوی استان سمنان و شمال استان اصفهان به سوی جنوب استان تهران می‌شود. در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال کم‌ارتفاع نسبی در منطقه مطالعه با وزش باد جنوب‌شرقی ۱۰ تا ۱۵ متر بر ثانیه همراه است و در تراز میانی جو پراارتفاع نسبی حاکم است. رطوبت نسبی تراز ۷۰۰ کمتر از ۳۰ درصد است و شرایط خشکی هوا در نمودار Skew-T ایستگاه مهرآباد نیز تأیید می‌شود.

در تحلیل همدیدی مورد مرتبط با آلاینده $\text{PM}_{2.5}$ مشخص شد این آلاینده اغلب با الگوهای پرفشار در منطقه مطالعه همراه است، طوری که پرفشار از روی روسیه و افغانستان به سوی فلات ایران و منطقه مطالعه امتداد دارد. در ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال پراارتفاع قرار دارد. جریان باد ضعیف است و رطوبت نسبی ۷۰۰ هکتوپاسکال کمتر از ۳۰ درصد است. در این مورد نیز شرایط خشکی هوا و باد آرام در نمودار Skew-T ایستگاه مهرآباد این شرایط را تأیید می‌کند.

در تحلیل همدیدی مورد مربوط به آلاینده NO_2 مشخص شد که در زمان رخداد آن، کشور ایران و البته استان تهران اغلب متأثر از سامانه پرفشار سطح زمین است و جریان باد ۱۰ متری ضعیف است. در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال پراارتفاع حاکم است

در این مطالعه برای هر یک از آلاینده‌های PM_{10} ، $\text{PM}_{2.5}$ و NO_2 یک مورد مطالعاتی بررسی شد و در هر یک از آنها سری زمانی غلظت آلاینده، دیدافقی و رطوبت نسبی ارائه شد. در مورد آلاینده PM_{10} از آنجا که مورد مطالعاتی در فصل گرم سال رخ داده است ارتباطی میان غلظت آلاینده با مقدار رطوبت نسبی مشاهده نمی‌شود. مقایسه روند تغییرات رطوبت نسبی با دید افقی و غلظت $\text{PM}_{2.5}$ نشان داد که با افزایش مقدار رطوبت نسبی، دید افقی کاهش و غلظت ذرات معلق افزایش یافته است. کاهش دید افقی ناشی از افزایش رطوبت جوی به دلیل پراکندگی نور توسط قطرات آب موجود در هوا تا حدودی بدیهی به نظر می‌رسد. در ارتباط با افزایش غلظت ذرات معلق در زمان افزایش رطوبت، فرآیندهایی مانند تشکیل هواپیزهای ثانویه از آلاینده‌های گازی موجود در جو در حضور رطوبت و پایداری جوی که معمولاً در زمان پدیده غبار، سبب تجمع ذرات و افزایش غلظت آنها در سطوح پایین جوی و نزدیک سطح زمین می‌شود، موثر هستند (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۵). در مورد پدیده مربوط به NO_2 تا حدودی می‌توان بیان کرد که رطوبت نسبی با دید افقی رابطه عکس و با غلظت رابطه مستقیم نشان داده است.

در تحلیل همدیدی مورد مطالعاتی مربوط به آلاینده PM_{10} مشخص شد که با توجه به رخداد این نوع از آلودگی اغلب

- Künzli, N., 2019. Health impact and related cost of ambient air pollution in Tehran. *Environmental research*, 176, p.108547.
5. Brunekreef, B. and Hoffmann, B., 2016. Air pollution and heart disease. *The Lancet*, 388(10045), pp.640-642.
 6. Chen, S., Zhang, R., Mao, R., Zhang, Y., Chen, Y., Ji, Z., Gong, Y. and Guan, Y., 2022. Sources, characteristics and climate impact of light-absorbing aerosols over the Tibetan Plateau. *Earth-Science Reviews*, 232, p.104111.
 7. Cheng, B., Ma, Y., Zhao, Y., Qin, P., Feng, F., Liu, Z., Wang, W. and Zhang, Y., 2024. Influence of topography and synoptic weather patterns on air quality in a valley basin city of Northwest China. *Science of The Total Environment*, 934, p.173362.
 8. Domingo, N.G., Balasubramanian, S., Thakrar, S.K., Clark, M.A., Adams, P.J., Marshall, J.D., Muller, N.Z., Pandis, S.N., Polasky, S., Robinson, A.L. and Tessum, C.W., 2021. Air quality-related health damages of food. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(20), p.e2013637118.
 9. Elbaz, K., Hoteit, I., Shaban, W.M. and Shen, S.L., 2023. Spatiotemporal air quality forecasting and health risk assessment over smart city of NEOM. *Chemosphere*, 313, p.137636.
 10. Farid, M., Younas, T., Zaka, S., Ahmed, M., Javed, K., Hussain, A., Asam, Z.U.Z., Farid, S., Ali, S. and Zubair, M., 2022. Atmospheric Chemistry of Aerosols and Their Role in Global Climate Change. In *Managing Plant Production Under Changing Environment* (pp. 421-435). Singapore: Springer Nature Singapore.
 11. Filonchyk, M., Peterson, M.P., Zhang, L., Hurynovich, V. and He, Y., 2024. Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O. *Science of The Total Environment*, p.173359.
 12. Frohn, L.M., Christensen, J.H. and Brandt, J., 2002. Development of a high-resolution nested air pollution model: the numerical approach. *Journal of Computational Physics*, 179(1), pp.68-94.
 13. Gilliam, R.C., Hogrefe, C. and Rao, S.T., 2006. New methods for evaluating meteorological models used in air quality

و جریان باد در این تراز نیز ضعیف است. در تراز میانی جو در ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز پرا ارتفاع مستقر است. رطوبت نسبی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال اغلب کمتر از ۴۰ درصد است. شرایط خشکی هوا و باد آرام در نمودار Skew-T ایستگاه مهرآباد این شرایط را تأیید می‌کند. البته در مواردی وارونگی دما در لایه‌های ۸۳۰ تا ۷۷۰ هکتوپاسکال نیز محتمل است.

در نهایت به منظور امکان‌سنجی پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در زمان رخداد آلودگی هوا پیش‌بینی ۲۴ ساعته مدل CAMS با الگوی غلظت حاصل از ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا در شهر تهران مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مدل تقریباً در تمام موارد مطالعاتی الگوی مکانی غلظت آلاینده‌ها در سطح شهر را به درستی پیش‌بینی کرده ولی مقادیر بیشینه غلظت را کمتر برآورد کرده است. بیشترین مقدار فروتخمین مربوط به آلاینده PM₁₀ و کمترین آن مربوط به NO₂ است. یکی از دلایل احتمالی وجود خطا در خروجی مدل‌های پیش‌بینی عددی کیفیت هوا، عدم وجود داده‌های درست و بروز از میزان گسیل آلاینده‌ها از مناطق مختلف به جو (سیاهه انتشار) است (ژو و همکاران، ۲۰۱۷).

همچنین خطا در پیش‌بینی کمیت‌های جوی از دیگر عوامل موثر بر خطای آن‌ها می‌باشد (گیلیام و همکاران، ۲۰۰۶).

منابع

1. Afarideh, F., Ramasht, M.H. and Mortyn, G., 2023. Air pollution and topography in Tehran. *AUC GEOGRAPHICA*, 58(2), pp.157-171.
2. Baklanov, A., Rasmussen, A., Fay, B., Berge, E. and Finardi, S., 2002. Potential and shortcomings of numerical weather prediction models in providing meteorological data for urban air pollution forecasting. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 2, pp.43-60.
3. Bălă, G.P., Răjnoveanu, R.M., Tudorache, E., Motișan, R. and Oancea, C., 2021. Air pollution exposure—the (in) visible risk factor for respiratory diseases. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(16), pp.19615-19628.
4. Bayat, R., Ashrafi, K., Motlagh, M.S., Hassanvand, M.S., Daroudi, R., Fink, G. and

- air pollution in rapidly industrializing countries. *Environmental Science & Technology*, 51(20), pp.11497-11501.
25. Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A. and Bezirtzoglou, E., 2020. Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, 8, p.14.
 26. Mohammadiha, A., Malakooti, H. and Esfahanian, V., 2018. Development of reduction scenarios for criteria air pollutants emission in Tehran Traffic Sector, Iran. *Science of the Total Environment*, 622, pp.17-28.
 27. Nawaz, R., Ashraf, A., Nasim, I., Irshad, M.A., Zaman, Q.U. and Latif, M., 2023. Assessing the Status of Air Pollution in the selected Cities of Pakistan. *Pollution*, 9(1), pp.381-391.
 28. Nejad, M.T., Ghalehtemouri, K.J., Talkhabi, H. and Dolatshahi, Z., 2023. The relationship between atmospheric temperature inversion and urban air pollution characteristics: a case study of Tehran, Iran. *Discover Environment*, 1(1), p.17.
 29. Oliveri Conti, G., Heibati, B., Kloog, I., Fiore, M. and Ferrante, M., 2017. A review of AirQ Models and their applications for forecasting the air pollution health outcomes. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, pp.6426-6445.
 30. Sabzevari, A.A., Panahi, A. and Hashemi, M.M., 2014. The study and investigation on temperature inversion and effective factors on tehran air pollution by means of statistical climatic analyses and gis system. *Advances in Environmental Biology*, pp.1651-1659.
 31. Sharipov, D., Muradov, F. and Akhmedov, D., 2019. Numerical modeling method for short-term air quality forecast in industrial regions. *Applied Mathematics E-Notes*, 19, pp.575-584.
 32. Sillmann, J., Aunan, K., Emberson, L., Büker, P., Van Oort, B., O'Neill, C., Otero, N., Pandey, D. and Brisebois, A., 2021. Combined impacts of climate and air pollution on human health and agricultural productivity. *Environmental Research Letters*, 16(9), p.093004.
 33. Sokhi, R.S., Moussiopoulos, N., Baklanov, A., Bartzis, J., Coll, I., Finardi, S., Friedrich, R., Geels, C., Grönholm, T., Halenka, T. and Ketznel, M., 2021. Advances in air quality research—current and emerging applications. *Atmospheric Environment*, 40(26), pp.5073-5086.
 14. Heger, M. and Sarraf, M., 2018. Air pollution in Tehran: health costs, sources, and policies.
 15. Hoback, A., 2024. Effectiveness of Using Calcite as an Aerosol to Remediate the Urban Heat Island. *Urban Science*, 8(3), p.124.
 16. Johannson, K.A., Balmes, J.R. and Collard, H.R., 2015. Air pollution exposure: a novel environmental risk factor for interstitial lung disease?. *Chest*, 147(4), pp.1161-1167.
 17. Kabir, M., Habiba, U.E., Khan, W., Shah, A., Rahim, S., Patricio, R., Ali, L. and Shafiq, M., 2023. Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review. *Journal of King Saud University-Science*, 35(5), p.102693.
 18. Kang, H., Zhu, B., de Leeuw, G., Yu, B., van der A, R.J. and Lu, W., 2022. Impact of urban heat island on inorganic aerosol in the lower free troposphere: a case study in Hangzhou, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(16), pp.10623-10634.
 19. Kumar, P., 2021. Climate change and cities: challenges ahead. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3, p.645613.
 20. Li, Y., Guo, J.E., Sun, S., Li, J., Wang, S. and Zhang, C., 2022. Air quality forecasting with artificial intelligence techniques: A scientometric and content analysis. *Environmental Modelling & Software*, 149, p.105329.
 21. Lin, C.C., Chiu, C.C., Lee, P.Y., Chen, K.J., He, C.X., Hsu, S.K. and Cheng, K.C., 2022. The adverse effects of air pollution on the eye: a review. *International journal of environmental research and Public Health*, 19(3), p.1186.
 22. Liu, C., Wu, C., Kang, X., Zhang, H., Fang, Q., Su, Y., Li, Z., Ye, Y., Chang, M. and Guo, J., 2023. Evaluation of the prediction performance of air quality numerical forecast models in Shenzhen. *Atmospheric Environment*, 314, p.120058.
 23. López-Romero, J.M., Montávez, J.P., Jerez, S., Lorente-Plazas, R., Palacios-Peña, L. and Jiménez-Guerrero, P., 2021. Precipitation response to aerosol–radiation and aerosol–cloud interactions in regional climate simulations over Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(1), pp.415-430.
 24. Ma, J., Simonich, S. and Tao, S., 2017. New discoveries to old problems: a virtual issue on

39. Zannetti, P., 2024. Numerical simulation modeling of air pollution: an overview. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 1.
40. Zhan, Y., Xie, M., Zhuang, B., Gao, D., Zhu, K., Lu, H., Wang, T., Li, S., Li, M., Luo, Y. and Zhao, R., 2024. Particle-ozone complex pollution under diverse synoptic weather patterns in the Yangtze River Delta region: Synergistic relationships and the effects of meteorology and chemical compositions. *Science of The Total Environment*, 946, p.174365.
41. Zhang, R., Wang, G., Guo, S., Zamora, M.L., Ying, Q., Lin, Y., Wang, W., Hu, M. and Wang, Y., 2015. Formation of urban fine particulate matter. *Chemical reviews*, 115(10), pp.3803-3855.
42. Zhao, C., Sun, Y., Yang, J., Li, J., Zhou, Y., Yang, Y., Fan, H. and Zhao, X., 2024. Observational evidence and mechanisms of aerosol effects on precipitation. *Science Bulletin*.
43. Zhou, Y., Zhao, Y., Mao, P., Zhang, Q., Zhang, J., Qiu, L. and Yang, Y., 2017. Development of a high-resolution emission inventory and its evaluation and application through air quality modeling for Jiangsu Province, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(1), pp.211-233.
- challenges. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2021, pp.1-133.
34. Sumaira and Siddique, H.M.A., 2023. Industrialization, energy consumption, and environmental pollution: evidence from South Asia. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(2), pp.4094-4102.
35. To, T., Zhu, J., Villeneuve, P.J., Simatovic, J., Feldman, L., Gao, C., Williams, D., Chen, H., Weichenthal, S., Wall, C. and Miller, A.B., 2015. Chronic disease prevalence in women and air pollution—A 30-year longitudinal cohort study. *Environment international*, 80, pp.26-32.
36. Torbatian, S., Hoshyaripour, A., Shahbazi, H. and Hosseini, V., 2020. Air pollution trends in Tehran and their anthropogenic drivers. *Atmospheric Pollution Research*, 11(3), pp.429-442.
37. Wang, P., Yang, Y., Xue, D., Ren, L., Tang, J., Leung, L.R. and Liao, H., 2023. Aerosols overtake greenhouse gases causing a warmer climate and more weather extremes toward carbon neutrality. *Nature Communications*, 14(1), p.7257.
38. Yousefi, H., Lak, E., Mohammadi, M.J. and Shahriyari, H.A., 2022. Carcinogenic risk assessment among children and adult due to exposure to toxic air pollutants. *Environmental science and pollution research*, 29(16), pp.23015-23025.