

مقدمه

آلودگی هوا در زندگی انسان زمانی محسوس شد که سکونت انسان به صورت اجتماعات متمرکز و ثابت شکل گرفت. به تدریج با گذشت زمان و گسترش آبادانی‌ها و به‌ویژه با شروع انقلاب صنعتی، آلودگی هوا مخصوصاً در زمان حاضر، به مسئله‌ای بین‌المللی تبدیل شده است (پرکینز، ۱۳۶۷). آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین مخاطرات انسانی به‌ویژه در کلان‌شهرهاست که مطالعه اثرات آن یکی از اولویت عمده در پژوهش‌های اقلیمی به‌شمار می‌رود. دانش آب و هواشناسی نمی‌تواند آلودگی جوی را نادیده بگیرد. آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین موضوعاتی است که مطالعه اثرات آن در پی گسترش تکنولوژیک آلودگی‌های آلاینده‌ها در دهه‌های اخیر از اولویت عمده در پژوهش‌های اقلیمی برخوردار بوده است. امروزه افزایش شهرنشینی و بالا رفتن استانداردهای زندگی و توسعه صنایع باعث افزایش غلظت آلاینده‌ها در حد خطرناک شده است.

افزایش سریع جمعیت در مادرشهرها، برخی مسائل را برای توسعه پایدار ایجاد می‌کند. هم‌زمان آلودگی‌های محیطی و کاهش پوشش گیاهی، افزایش دما، به‌خصوص دمای سطحی را تبدیل به یک مشکل محیطی تبدیل کرده که نیازمند راه‌حل است (بیدختی و شرعی‌پور، ۱۳۸۸: ۱۴)؛ شرایط هواشناسی و تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و دینامیکی جو نقش مهمی بر سطوح آلودگی‌های هوا ایفا می‌کنند. مهم‌ترین عاملی که سبب پراکندگی و انتقال آلودگی هوا می‌گردد، باد سطح زمین در ترازهای پایین جو است و شیب‌های حرارتی قائم نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد حرکات صعودی و پخش قائم آلاینده‌های جو دارند (دستجردی و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۰). در تعریف آلودگی هوا پرکینز چنین بیان می‌کند؛ آلودگی هوا یعنی وجود یک یا چند آلوده‌کننده مانند گردوغبار، فیوم، گازها، میست، دود، ویژگی‌ها و زمان ماند که برای زندگی استان، گیاه یا زندگی حیوانات خطرناک و برای اموال مضر باشند و یا به‌طور غیرقابل تحمل استفاده راحت از زندگی و اموال گردد (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۰۲).

راینهام و همکاران (۲۰۰۵: ۳۶۰) به بررسی الگوهای همدید آب‌وهواشناسی و ارتباط بین آلودگی هوا و مرگ‌ومیر بشر پرداختند و برای بررسی این ارتباط مثبت بین آلودگی هوا و کل مرگ‌ومیر وجود داشته است. به‌ویژه از بین توده‌های هوا، توده هوای گرم و خشک، بالاترین غلظت آلودگی را به‌همراه دارد و در مقابل توده‌های سرد مرطوب و سرد خشک دارای پایین‌ترین غلظت آلودگی بوده‌اند که با شرایطی مثل درجه حرارت پایین و شرایط ابری بودن هوا همراه هستند. گائو و همکاران (۲۰۱۱: ۲۰۶۹) بر اساس شاخص روزانه آلودگی هوا و به‌کارگیری داده‌های سنجش از دور در چین، هفت خوشه آلوده شهری طبقه‌بندی گردید. آدم و همکاران (۲۰۱۲: ۲۵۴) در پژوهشی به ارزیابی یک رویداد استثنایی آلودگی هوا پرداختند، در این مطالعه عناصر ازن سطحی، CO و PM10 را در شبه جزیره ایبری؛ خدیرا و تارک خدیر (۲۰۱۲: ۸۹) تأثیر پارامترهای اقلیمی در میزان غلظت آلاینده‌های هوا با استفاده از الگوریتم K-mean و شبکه عصبی مصنوعی در منطقه آنابا الجزایر مورد پژوهش قرار دادند. حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۲: ۱۰۰) در پژوهشی به بررسی الگوهای همدید مؤثر بر آلودگی هوا در کلانشهر مشهد با استفاده از روش‌های چند متغیره، تحلیل مؤلفه اصلی و خوشه‌بندی داده‌های روزانه فشار سطح دریا و تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پرداختند. خوشحال دستجردی و همکاران (۱۳۹۱: ۳۱) با استفاده از داده‌های فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال، جهت باد، سرعت قائم، دما با رویکرد گردشی تحلیل همدید توفان‌های گردوخاک استان ایلام را انجام دادند. نتایج نشان داد که کم‌فشار

سودان و گنگ در سطح زمین و ناوه عمیق مدیترانه، ناوه دریای سرخ و پراارتفاع جنب حاره آזור مهم‌ترین سامانه‌های همدید تأثیرگذار و انتقال گردوغبار به‌غرب ایران و منطقه مطالعاتی هستند. شرعی‌پور (۱۷:۱۳۸۸) تغییرات فصلی و روزانه آلاینده‌های هوا (PM10, O3, SO2, CO, NO2) را در ارتباط با عناصر هواشناسی بررسی نمود و به این نتیجه رسید که دما و رطوبت دو عنصر مؤثر بر غلظت آلاینده‌ها هستند. بیدختی و شرعی‌پور (۲:۱۳۸۸) وضعیت آلودگی هوای تهران را در ارتباط با شرایط هواشناختی جو بالا بررسی کرده و به این نتیجه دست یافتند که آلودگی‌های شدید با افزایش فشار سطحی، شرایط سکون در جو و کاهش سرعت باد و افزایش نسبی دمای جو، همراه است. شمسی‌پور و امینی (۱۰۳:۱۳۹۲)، وضعیت آلودگی شهر کرمانشاه را در رابطه با عناصر جوی و محیطی در دو مقیاس فصلی و روزانه برای آلاینده‌های گازی و ذرات معلق، مورد بررسی قرار دادند. لشکری و هدایت (۸۲:۱۳۸۴) چهار الگوی همدید وقوع وارونگی‌های دمایی را در شهر تهران مشخص کردند که آلودگی‌های شدید هوا را به‌دنبال دارند. رنجبر سعادت‌آبادی و همکاران (۶۳:۱۳۸۴) در مطالعه موردی جزیره گرمایی تهران و شبیه‌سازی عددی آن نتیجه گرفتند که با توجه به نتایج مدل پیش‌بینی و مقادیر دیده‌بانی شده عناصر آب‌وهوایی و آلودگی، در صورت پیش‌بینی میدان‌های دما و باد، امکان پیش‌بینی آلودگی هوای تهران می‌تواند فراهم شود. فیناردی و پلیگینی (۲۵۴:۲۰۰۲) شرایط همدید حاکم بر یک مورد آلودگی بسیار شدید هوای شهری را در دره پو ایتالیا بررسی و به این نتیجه رسیدند که فرارفت هوای گرم بر روی لایه‌های سرد نزدیک سطح زمین منجر به ایجاد ساختار دمایی پایدار در جو پایین می‌گردد. وارونگی‌ها و یا نمایه‌های قائم دمای بسیار پایدار در ارتفاعات صفر و دو هزار متری در موارد آلودگی‌های شدید دیده می‌شود. در تحقیقی دیگر هارلی (۵۳۵:۲۰۰۷)، با بهره‌گیری از روش EDMF، لایه مرزی همرفت خشک را در بعدازظهر یک روز تابستانی شبیه‌سازی کرد. نتایج حاصل از مقایسه این مدل با آزمایشگاه و مشاهدات در چارچوب مقیاس لایه آمیخته نشان داد که روش EDMF می‌تواند زمینه‌های آشفتنگی در سطوح لایه مرزی را به‌خوبی پیش‌بینی کند. براساس نتایج واردولسکی و کاسمنوس (۳۲۴۴:۲۰۰۱)، در دو شهر آتن یونان و بیرمنگام انگلیس مشخص شد که طی فصل سرد، همبستگی مثبتی بین آلاینده PM10 و آلاینده‌های CO و NO3 و تابش خورشیدی و همبستگی منفی بین آلاینده PM10 و از ن و سرعت باد و بارش وجود دارد و این همبستگی در طی فصل گرم ضعیف شده است. همچنین بررسی دوره‌های حاد آلودگی PM2.5 و PM10 در آن دو شهر نشان داده که اکثر این دوره‌ها در بیرمنگام منشأ فرامحلی و در آتن منشأ محلی داشته است. یاوری و سلیقه (۱۰۴:۱۳۹۰) به بررسی سطوح وارونگی در آلودگی‌های شهر تهران پرداختند. نتایج نشان داد که آلودگی‌های ایستگاههای تهران در سطح وسیعی ناشی از وارونگی دمایی می‌باشد که متأثر از سامانه‌های فشار و تشعشع زیاد سطح زمین است.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شهر تهران است که در کوهپایه‌های جنوبی ارتفاعات البرز و در حداثصل طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی گسترده شده است. ارتفاع شهر در شمالی‌ترین نقطه به ۱۸۰۰ و تا ۱۲۰۰ متر در مرکز و ۱۰۵۰ متر در جنوب می‌رسد. شکل شماره ۱ موقعیت جغرافیایی شهر تهران را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی استان تهران و ایستگاههای آلوده‌سنجی

جهت انجام این تحقیق، ابتدا داده‌های مربوط به عناصر آلاینده هوا شامل آلاینده‌های گازی SO_2 , O_3 , N_2O , CO و ذرات معلق $PM_{2.5}$ و PM_{10} از مرکز کنترل کیفیت هوا برای ۲۲ ایستگاه واقع در استان تهران مطابق شکل ۱ تهیه و شرایط شش‌گانه آلودگی (پاک تا خطرناک) به صورت فراگیر در استان تهران تعیین و بررسی گردید. سپس با در نظر گرفتن ۳ شرط شدت، تداوم و فراگیری برای هر فصل نمونه‌ای از روزهای آلودگی شدید با وضعیت بسیار ناسالم برای واکاوی سینوپتیکی انتخاب شدند. برای پیمایش قائم جو از پایگاه داده‌های اقلیمی دانشگاه وایومینگ برای ایستگاه مهرآباد استفاده شد. پس از اخذ اطلاعات مربوط به پیمایش قائم جو در ایستگاه مهرآباد شاخص‌ها و اطلاعات نیمرخ شرایط جوی برای شناخت وضعیت دینامیکی و ترمودینامیکی جو طی روزهای با آلودگی شدید در محیط نرم‌افزار RAOB ترسیم شد. برای بررسی شرایط همدید روزهای آلوده منتخب در استان تهران، داده‌های فشار تراز دریا؛ ارتفاع ژئوپتانسیل، بردار باد، رطوبت و سرعت قائم جو از پایگاه مرکز میان مقیاس اروپا (ECMWF) دریافت و با استفاده از نرم‌افزار گرادس نقشه‌های مربوطه ترسیم گردید. جدول ۱ شاخص استاندارد آلودگی هوا براساس آستانه‌های مختلف وضعیت سلامتی نشان می‌دهد.

جدول ۱: طبقه‌بندی غلظت آلاینده‌ها جهت محاسبه شاخص استاندارد آلودگی هوا (USEPA, 1998)

| O_3 (ppm) | $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) | PM_{10} ($\mu g/m^3$) | CO (ppm) | SO_2 (ppb) | NO_2 (ppb) | AQI | طبقه بندی کیفیت هوا |
|-------------|----------------------------|---------------------------|-----------|--------------|--------------|---------|---------------------------|
| - | ۰/۰-۱۲/۰ | ۰-۵۴ | ۰/۰-۴/۴ | ۰-۳۵ | ۵۳-۰ | ۵۰-۰ | خوب |
| - | ۱۲/۱-۲۵/۴ | ۵۵-۱۵۴ | ۴/۵-۹/۴ | ۳۶-۷۵ | ۱۰۰-۵۴ | ۱۰۰-۵۱ | متوسط |
| ۰/۱۲۵-۰/۱۶۴ | ۲۵/۵-۵۵/۴ | ۱۵۵-۲۵۴ | ۹/۵-۱۲/۴ | ۷۶-۱۸۵ | ۱۰۱-۲۶۰ | ۱۵۰-۱۰۱ | ناسالم برای گروه‌های حساس |
| ۰/۱۶۵-۰/۲۰۴ | ۵۵/۵-۱۵۰/۴ | ۲۵۵-۳۵۴ | ۱۲/۵-۱۵/۴ | ۱۸۶-۳۰۴ | ۳۶۱-۶۴۹ | ۲۰۰-۱۵۱ | ناسالم |
| ۰/۲۰۵-۰/۴۰۴ | ۱۵۰/۵-۲۵۰/۴ | ۳۵۵-۴۲۴ | ۱۵/۵-۲۰/۴ | ۳۰۵-۶۰۴ | ۶۵۰-۱۲۴۹ | ۳۰۰-۲۰۱ | خیلی ناسالم |
| ۰/۴۰۵-۰/۵۰۴ | ۲۵۰/۵-۳۵۰/۴ | ۴۲۵-۵۰۴ | ۲۰/۵-۴۰/۴ | ۶۰۵-۸۰۴ | ۱۲۵۰-۱۶۴۹ | ۴۰۰-۳۰۱ | خطرناک |

یافته‌ها

واکاوای فصلی مقادیر غلظت آلاینده‌ها

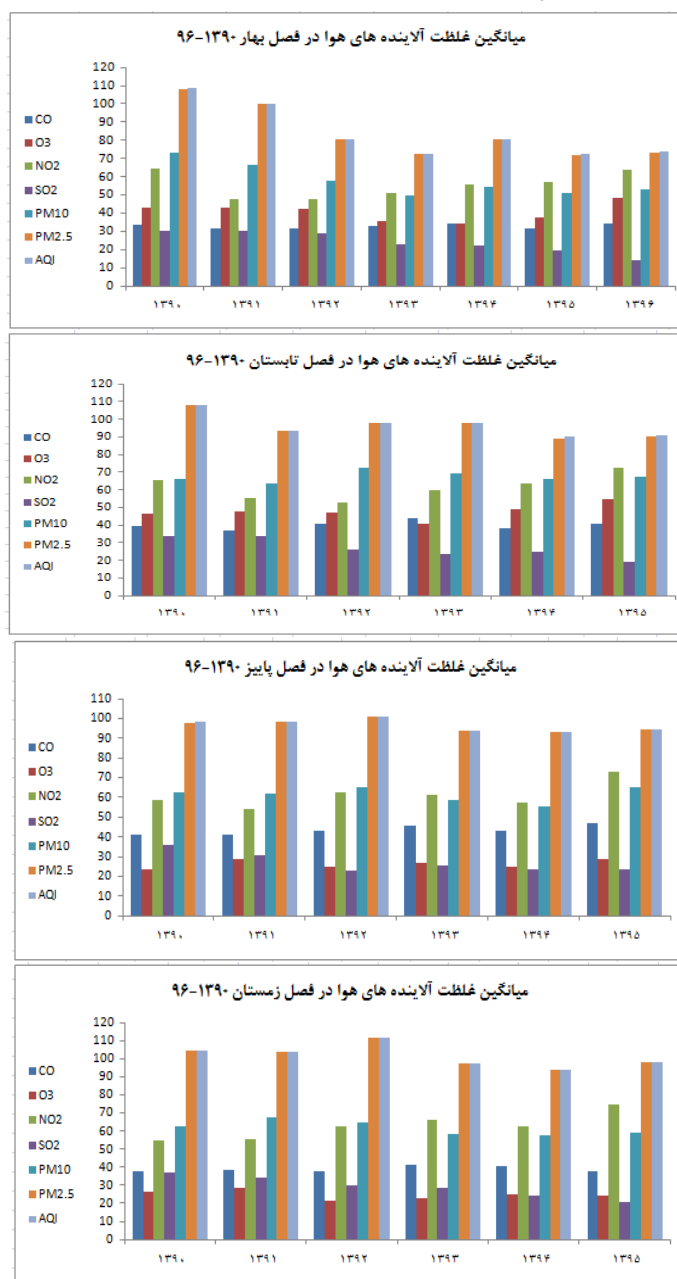
در این پژوهش ابتدا داده‌های میانگین غلظت ۷ آلاینده مهم ایستگاههای استان تهران (۲۲ ایستگاه) را برای هر فصل جداگانه محاسبه گردید. سپس برای هر وضعیت آلودگی هوا مجموع روزها را برای هر فصل طی دوره ۱۳۹۰ تا بهار ۱۳۹۶ بررسی شد.

شکل ۲ میانگین آلاینده‌های هوا در فصول چهارگانه در دوره ۶ ساله را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود روندی کاهشی در فصل بهار در غلظت آلاینده‌هایی همچون SO_2 ، CO ، O_3 و $PM_{2.5}$ شکل گرفته است. آلاینده‌های PM_{10} و NO_2 پس از سیر کاهشی، روندی افزایشی با شیب کم را در پیش گرفته‌اند. که اوج آن در سال ۱۳۹۰ و کمترین مقادیر در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۵ دیده می‌شود. در فصل تابستان همانند بهار وضعیتی کاهشی در آلاینده‌های ذکر شده دیده می‌شود. اما میانگین بالاتری در غلظت آلاینده‌ها نسبت به سایر فصول دارد که می‌توان علت آن را در فرونشینی مداوم هوای گرم و پایدار در این فصل که با هوای آلوده ناشی از صنایع و خودروها همراه است، مرتبط دانست. در فصول پاییز و زمستان نیز همانند سایر فصول روند مقادیر آلاینده‌ها کاهشی بوده است، اما بر حجم و شدت آلاینده‌های $PM_{2.5}$ و AQI افزوده شده است. بررسی غلظت آلاینده‌های جوی در مقیاس فصلی نشان داد که حجم آلاینده‌ها در فصل سرد و به‌ویژه گرم سال بیشترین تداوم، فراگیری و شدت را داشته است و در فصول بهار و پاییز وضعیت متعادلی در غلظت آلاینده‌ها از نظر حجم آلودگی مشاهده می‌گردد.

واکاوای وضعیت آلودگی هوا در طی دوره ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۶

جدول ۳ وضعیت هوا را از نظر شدت آلودگی در فصل بهار دوره ۶ ساله براساس میانگین مقادیر غلظت آلاینده‌های ایستگاههای مورد مطالعه در سطح استان تهران نشان می‌دهد. براساس جدول ۳ طبقه هوای پاک روندی افزایشی و سپس کاهشی را طی دوره مورد نظر داشته است و اوج آن در فصل بهار سال ۱۳۹۳ رخ داده است. در طبقه سالم برعکس طبقه پاک روندی کاهشی- افزایشی از خود نشان داده است که بیشینه آن در بهار سال ۱۳۹۰ با ۶۸ روز بوده است؛ اما در طبقه ناسالم برای گروه حساس در بیشتر سال‌های آماری رخ داده است، که بهار ۱۳۹۰ با ۶ روز در جایگاه نخست قرار گرفته است. در بهار ۱۳۹۱ و ۱۳۹۶ هیچگونه روز ناسالمی ثبت نگردیده است. در سایر رده‌ها نیز تنها ۳ روز بسیار ناسالم در بهار ۱۳۹۰ به وقوع پیوسته است. در این سه روز میانگین ذرات معلق $PM_{2.5}$ و PM_{10} بین ۲۰۰ تا ۲۲۰ متغیر بوده است. اما در فصل تابستان (جدول ۴) از تعداد روزهای پاک به صورت محسوسی کاسته شده است و بر تعداد روزهای سالم و به‌صورت اندکی ناسالم افزوده شده است. این تغییرات منطبق بر مقادیر میانگین ذرات معلق در این فصل می‌باشد که بیشترین افزایش حجم مربوط به ذرات $PM_{2.5}$ و PM_{10} بوده است. نکته قابل توجه اینکه فصل تابستان سال ۱۳۹۲ بیش از ۹۰ روز با وضعیت جوی سالم را ثبت کرده است. در فصل پاییز (جدول ۵) وضعیت سالم بیشترین فراوانی را داشته است. سپس رده‌های پاک و ناسالم برای گروههای حساس قرار داشته‌اند. همچنین تنها فصلی است که هیچگونه روز ناسالم و بالاتر از آن رخ نداده است. در نهایت، در فصل زمستان (جدول ۶) که بعد از فصل بهار با ۱۴۰ روز پاک در رده دوم قرار داشته است و از نظر وضعیت هوای سالم بعد از

فصول تابستان و پاییز با ۳۸۹ روز در رده سوم قرار داشته است. همچنین همانند فصل تابستان ۱ روز ناسالم را با مقدار غلظت $PM_{2.5}$ ۱۵۷ ثبت کرده است.



شکل ۲: نمودار میانگین فصلی غلظت آلاینده‌های ایستگاههای منطقه پژوهش در دوره ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۶

جدول ۲: وضعیت آلودگی هوای استان تهران در فصل بهار ۱۳۹۰-۱۳۹۶

| بهار | پاک | سالم | ناسالم برای گروه حساس | ناسالم | بسیار ناسالم | خطرناک |
|-----------|-----|------|-----------------------|--------|--------------|--------|
| ۱۳۹۰ | ۱۶ | ۶۸ | ۶ | | ۳ | |
| ۱۳۹۱ | ۲۱ | ۶۶ | | | | |
| ۱۳۹۲ | ۳۸ | ۵۴ | ۲ | | | |
| ۱۳۹۳ | ۵۳ | ۳۹ | ۱ | | | |
| ۱۳۹۴ | ۴۲ | ۴۶ | ۵ | | | |
| ۱۳۹۵ | ۴۷ | ۴۵ | ۱ | | | |
| ۱۳۹۶ | ۳۷ | ۵۵ | | | | |
| مجموع روز | ۲۵۴ | ۳۷۳ | ۱۵ | | ۳ | |

جدول ۳: وضعیت آلودگی هوای استان تهران در فصل تابستان ۱۳۹۰-۱۳۹۶

| تابستان | پاک | سالم | ناسالم برای گروه حساس | ناسالم | بسیار ناسالم | خطرناک |
|-----------|-----|------|-----------------------|--------|--------------|--------|
| ۱۳۹۰ | ۷ | ۸۶ | | | | |
| ۱۳۹۱ | ۴ | ۸۹ | | | | |
| ۱۳۹۲ | | ۹۰ | ۳ | | | |
| ۱۳۹۳ | ۵ | ۸۳ | ۴ | ۱ | | |
| ۱۳۹۴ | ۱۲ | ۷۷ | ۲ | ۱ | ۱ | |
| ۱۳۹۵ | ۲ | ۸۹ | ۲ | | | |
| مجموع روز | ۳۰ | ۵۱۴ | ۱۱ | ۲ | ۱ | |

جدول ۴: وضعیت آلودگی هوای استان تهران در فصل پاییز ۱۳۹۰-۱۳۹۶

| پاییز | پاک | سالم | ناسالم برای گروه حساس | ناسالم | بسیار ناسالم | خطرناک |
|-----------|-----|------|-----------------------|--------|--------------|--------|
| ۱۳۹۰ | ۱۷ | ۷۳ | | | | |
| ۱۳۹۱ | ۲۲ | ۶۵ | ۳ | | | |
| ۱۳۹۲ | ۱۹ | ۶۵ | ۶ | | | |
| ۱۳۹۳ | ۲۶ | ۶۲ | ۲ | | | |
| ۱۳۹۴ | ۳۳ | ۵۷ | | | | |
| ۱۳۹۵ | ۱۸ | ۶۹ | ۳ | | | |
| مجموع روز | ۱۳۵ | ۳۹۱ | ۱۴ | | | |

جدول ۵: وضعیت آلودگی هوای استان تهران در فصل زمستان ۱۳۹۰-۱۳۹۶

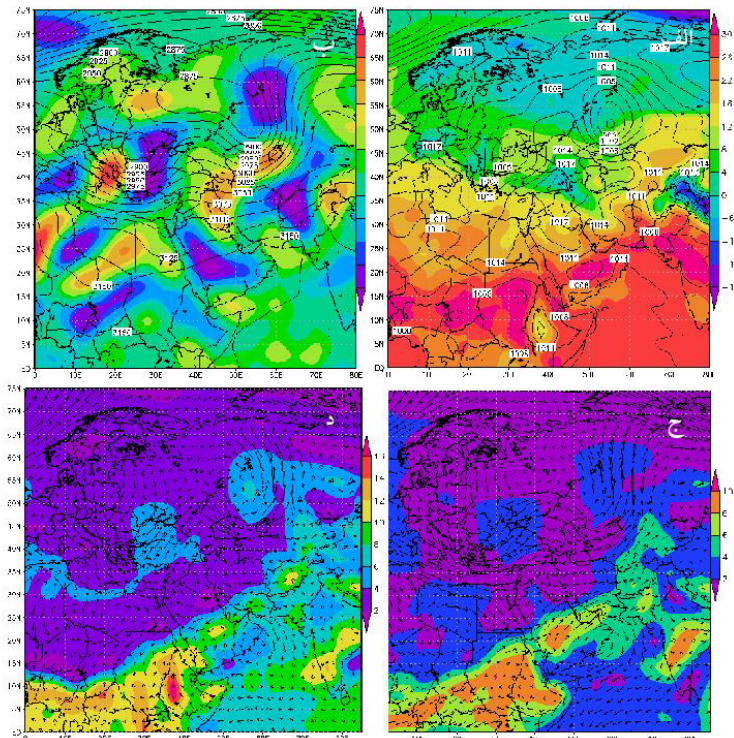
| خطرناک | بسیار ناسالم | ناسالم | ناسالم برای گروه حساس | سالم | پاک | زمستان |
|--------|--------------|--------|-----------------------|------|-----|-----------|
| | | | ۳ | ۶۳ | ۲۳ | ۱۳۹۰ |
| | | | ۱ | ۷۶ | ۱۳ | ۱۳۹۱ |
| | | | | ۷۳ | ۱۶ | ۱۳۹۲ |
| | | ۱ | | ۵۶ | ۳۲ | ۱۳۹۳ |
| | | | ۲ | ۵۵ | ۳۲ | ۱۳۹۴ |
| | | | | ۶۶ | ۲۴ | ۱۳۹۵ |
| | | ۱ | ۶ | ۳۸۹ | ۱۴۰ | مجموع روز |

شناسایی و بررسی الگوهای همدید

در این مرحله برای هر فصل براساس سه شرط: شدت، تداوم و فراگیری یک نمونه منتخب برای هر فصل تفسیر همدیدی و ترمودینامیکی می‌شود.

الگوی بهاره

روز ۲۵ فروردین ۱۳۹۰ آلوده‌ترین روز فصل بهار طی دوره آماری بوده است. در این روز میانگین مقادیر غلظت آلاینده‌های جوی مهم همچون PM_{10} و $PM_{2.5}$ در همه ایستگاههای ۲۲ گانه در کل استان تهران به ترتیب به ۲۷۸ و ۱۹۹ رسیده است. و وضعیت آب و هوایی در رده بسیار ناسالم قرار گرفته است. شکل ۳ الف شرایط فشار تراز دریا را در روز آلودگی فراگیر و شدید ۲۵ فروردین ۱۳۹۰ نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود سامانه پرفشاری با مرکز بسته ۱۰۲۰ هکتوپاسکال با راستایی شمال‌غربی به جنوب‌شرقی در شمال‌غرب ایران قرار گرفته است. این پرفشار از روزهای قبل از غرب اروپا گسترش یافته و در این روز بیشتر کشور تحت تسلط جریانات ساعتگرد آن واقع شده است، به طوری که دمای هسته پرفشار به ۶- درجه سلسیوس رسیده است و در روی جو استان تهران میزان دما بین ۴ تا ۱۲ درجه سلسیوس متغیر شده است. در نیمه شرقی ایران نیز با نفوذ زبانه کم فشاری از جنوب شرق کشور موجب ایجاد گرادیان فشاری قوی با پرفشار سرد عرض‌های بالا شده است. منطبق بر نقشه فشار تراز دریا در شکل ۳ ب نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و امگای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز حاکی از شکل‌گیری یک پشته ضعیف واقع بر پرفشار سطح زمین و قرارگیری استان تهران در نیمه شرقی این پشته می‌باشد که با نزول جریان هوای پایدار و مداری مواجه شده است. اما در شکل ۳ ج نقشه رطوبت و بردار باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال به خوبی نقش پشته ضعیف با جریان مداری غربی در نیمه شمالی کشور و منطقه پژوهش که باعث کاهش رطوبت به کمتر از ۲ گرم بر کیلوگرم و جوی آرام و بدون آشفتنگی جوی گردیده، مشخص است. مجموع این شرایط موجب نزول آرام ذرات معلق و انباشت آن در سطح استان تهران به صورت فراگیر شده است.



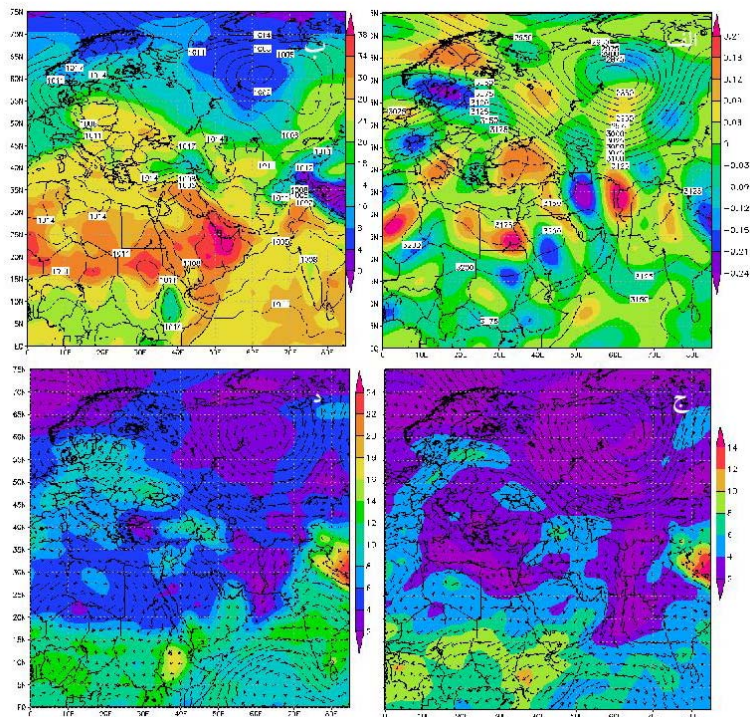
شکل ۳. الف: ترکیبی دما و فشار تراز دریا، ب: ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و امگای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، ج و د: ترکیبی رطوبت و بردار

باد در ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال روز ۲۵ فروردین ۱۳۹۰

الگوی تابستانه

روز ۱۰ شهریور ۱۳۹۴ در سراسر ایستگاههای پژوهش به صورت فراگیر میانگین ذرات معلق PM به ۲۵ و ۱۸۷ و PM ۱۰ به بیش از ۲۵۲ رسیده است و شرایط جوی را در رده بسیار ناسالم قرار داده است. شکل ۴ الف شرایط فشار تراز دریا را در روز ۱۰ شهریور ۱۳۹۴ نشان داده است. براساس شکل گسترش کم فشار حرارتی پاکستان با راستایی جنوب شرقی به شمال غربی و پرفشاری با هسته سرد از گوشه شمال غربی کشور موجب ایجاد گرادیان فشاری شدید و شکل گیری جریان های شرقی قوی بر روی منطقه پژوهش گردیده است. اما در شکل ۴ ب نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و امگای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال شرایط متفاوت شده است به نحوی که با نفوذ سردچال حاصل از کم ارتفاع بسته واقع در مرکز روسیه تا نواحی مرکزی ایران و استقرار هسته امگای منفی واقع در شرق سردچال بر روی منطقه پژوهش با واگرایی جریان ذرات معلق واقع در سطح زمین و افزایش شدت و گستره آلودگی همراه شده است. زبانه های سامانه قدرتمند پراتفاح جنب حاره آזור تا نیمه جنوب ایران گسترش یافته است و شاخه شمالی آن با مرکز بسته ۳۱۹۰ ژئوپتانسیل متر در جنوب اروپا قرار گرفته است در این شرایط هوای گرم و خشکی از روی سرزمین عربستان و عراق بر روی منطقه پژوهش فرارفت می شود و هم اینکه با همسویی قوی جریان هوای جنوب و جنوب غربی بر روی استان تهران موجب انباشت ذرات آلاینده به صورت فراگیر شده است. در نقشه ترکیبی رطوبت و بردار

باد در تراز های ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۴ ج و د) نیز زبانه‌ای از رطوبت از سمت دریای سیاه به علت شمالی شدن جریان باد قسمتی از منطقه پژوهش را در بر گرفته است. اما نکته مهم در بررسی بردار باد در این دو تراز جریان شرقی باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و جنوب‌غربی و تا حدی غربی باد در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در روی جو استان تهران است که موجب محسوس شدن ذرات آلاینده و رخداد شرایط بسیار ناسالم در این روز شده است.

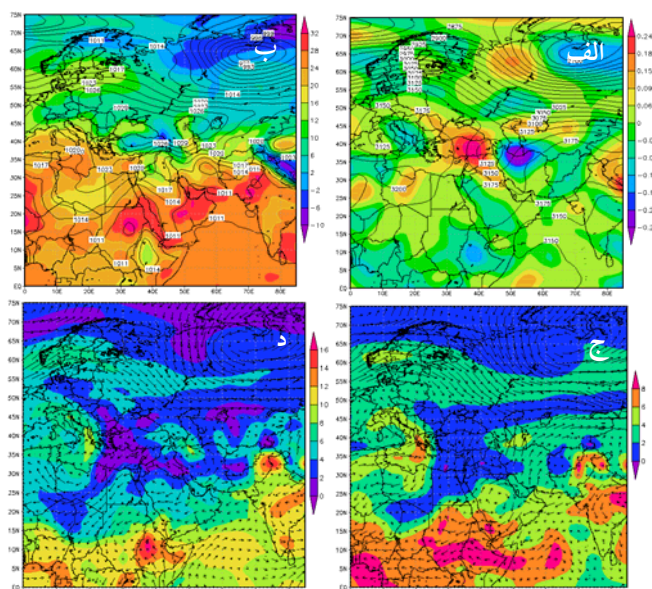


شکل ۴. الف: ترکیبی دما و فشار تراز دریا ، ب: ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و امگای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، ج و د: ترکیبی رطوبت و بردار باد در تراز های ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال روز ۱۰ شهریورماه ۱۳۹۴

الگوی پاییزه

در روز ۱۶ مهرماه ۱۳۹۲ در تمامی ایستگاههای مورد پژوهش به صورت میانگین غلظت آلاینده PM_{۲.۵} به ۱۷۰ و PM_{۱۰} به ۱۳۱ رسیده و به صورت فراگیر در کل استات تهران شرایط بحرانی با وضعیت ناسالم ثبت گردیده است. در فصل گذار از فصل گرم به سرد سامانه‌های سرمازا و ناپایدار از عرض‌های شمالی به تدریج به سرزمین‌های جنوبی نفوذ می‌کنند و در مقابل نیز سامانه‌های حرارتی همچون کم فشار پاکستان به عرض‌های جنوبی عقب‌نشینی می‌کنند. نتیجه چنین تغییراتی را می‌توان در شکل ۵. الف مشاهده نمود. براساس این شکل مرکز پرفشار بسته با فشار مرکزی ۱۰۲۹ هکتوپاسکال در شرق دریای سیاه قرار گرفته است و با راستایی شمال به جنوب تا نواحی مرکزی کشور کشیده شده است. دمای هسته این پرفشار به کمتر از ۲- درجه سلسیوس رسیده است و با کاهش دمای هوای نیمه شمالی ایران همراه گشته است. نفوذ زبانه‌های کم‌فشار حرارتی پاکستان که تضعیف نیز گشته تا مناطق مرکزی ایران موجب

تقویت گردیدن فشاری و همسویی جریان باد شرقی بر روی منطقه پژوهش شده است. در شکل ۵.ب نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و امگای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال مشابه الگوی تابستانه با نفوذ سردچال حاصل از کم ارتفاع بسته شمال روسیه تا نیمه شمالی ایران و واقع شدن هسته امگای منفی در نیمه شرقی ناوه و روی منطقه پژوهش مواجه هستیم. اما در این الگو به جای زبان‌های پراارتفاع جنب حاره آזור، زبان‌های پراارتفاع تبت بر روی نیمه جنوبی ایران و عربستان گسترش یافته است. نقش قرارگیری زبان‌های پراارتفاع بر روی عربستان و دریای مدیترانه این است که اجازه نفوذ ناوه را بر روی منابع آبی و در نتیجه فرارفت گرما و رطوبت بر روی کشور را نمی‌دهد و بیشتر کشور با نبود بارش‌های مناسب همراه می‌شود. بررسی نقشه‌های ترکیبی رطوبت و بردار باد در ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۵. ج و د) نیز تشدید سرعت باد شرقی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و باد غربی و جنوب‌غربی در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بر روی منطقه پژوهش را نشان می‌دهد. چنین آرایشی از جریان باد حاکی از بلند و واگرا شدن ذرات معلق در هوا از ترازهای زیرین تروپوسفر و انتقال و پخش شدن آن به‌صورت فراگیر در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال بر روی استان تهران می‌باشد.

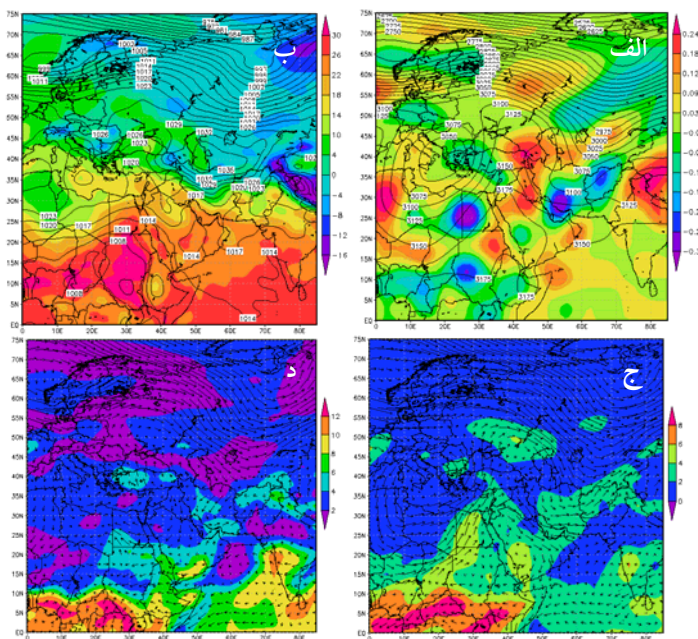


شکل ۵. الف: ترکیبی دما و فشار تراز دریا، ب: ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و امگای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، ج و د: ترکیبی رطوبت و بردار باد در ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال روز ۱۶ مهرماه ۱۳۹۲

الگوی زمستانه

در روز ۱۹ اسفند ماه ۱۳۹۳ میزان غلظت آلاینده‌ها در سراسر ایستگاههای آلوده‌سنجی افزایش محسوسی یافت به‌طوری‌که غلظت PM_{۲.۵} به ۱۵۰ و PM_{۱۰} به ۱۵۷ رسید و به‌صورت فراگیر وضعیت شرایط ناسالم اعلام گردید. شکل ۶.الف شرایط فشار تراز دریا را در روز ۱۹ اسفند ماه ۱۳۹۳ نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود قرارگیری پرفشاری مهاجر هسته سرد بر روی دریای خزر با مرکز بسته ۱۰۳۶ هکتوپاسکال ضمن تقویت پایداری هوا در سطح زمین موجب کاهش مقادیر دمای

نیمه شمالی کشور به کمتر از صفر درجه سلسیوس شده است. این سامانه پرفشار بیشتر کشور را تا مناطق مرکزی پوشش داده است و با چرخش ساعتگرد خود جریان باد غرب سو را بر روی منطقه پژوهش حاکم نموده است. اما در نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و امگای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۶ب) با نفوذ زبانه‌های پراتفاح جنب حاره‌ای آזור از روی عربستان و شکل‌گیری پشته عمیق با راستایی نصف‌النهاری و واقع شدن یال شرقی این پشته بر روی پرفشار سطح زمین موجب تقویت همگرایی و نزول جریان هوا و پایداری جو در ری منطقه پژوهش گردیده است. نقشه‌های ترکیبی رطوبت و بردار باد در ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۶ج و د) نیز نشان داد که لکه‌هایی از رطوبت به میزان ۲ تا ۴ گرم بر کیلوگرم جو استان تهران را پوشش داده است. اما نقش اصلی را جریان باد ایفا می‌کند که باز هم در این الگو با تقابل جریان باد شمال‌شرقی و شرقی در ترازهای زیرین و شمال‌غرب و شمالی در ترازهای بالاتر مواجه می‌باشیم. در این شرایط با ذرات معلق در سطح استان به صورت فراگیر محبوس گردیده و جریان خروجی (همسویی باد در ترازهای زیرین تا بالای جو) که باعث کاهش مقادیر ذرات معلق و یا غیرفراگیر شدن آلودگی در منطقه پژوهش شود، شکل نگرفته است.



شکل ۶ الف: ترکیبی دما و فشار تراز دریا، ب: ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و امگای تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، ج و د: ترکیبی رطوبت و بردار باد در ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال روز ۱۹ اسفندماه ۱۳۹۳

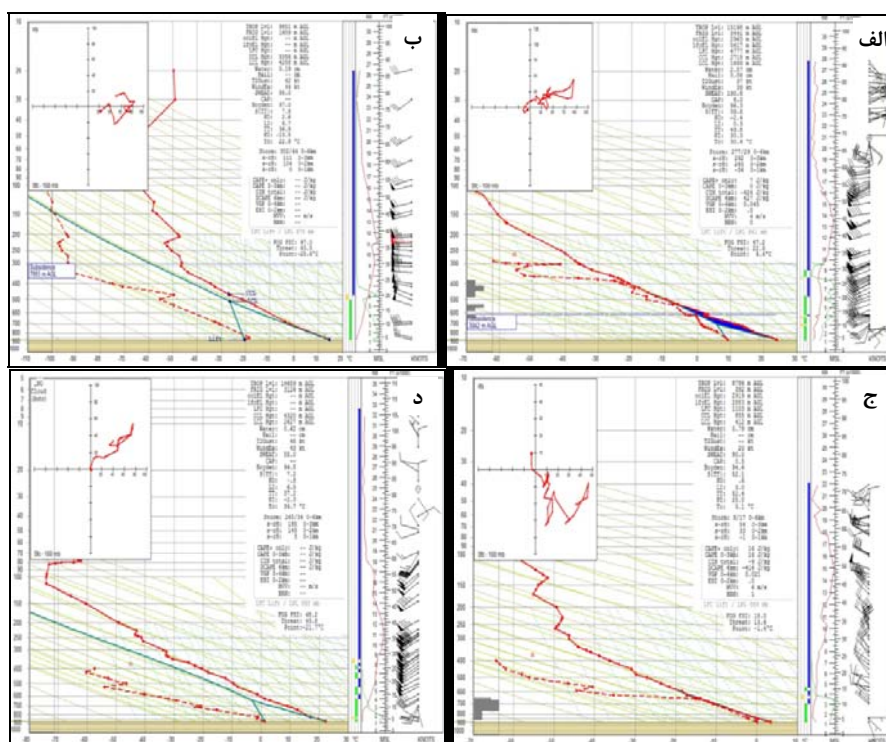
پیمایش قائم جو در روزهای آلودگی شدید و فراگیر استان تهران

جهت بررسی ویژگی‌های لایه مرزی اقدام به ترسیم و تهیه نمودارهای ترمودینامیک جو بر اساس پایگاه داده‌های اقلیمی پایگاه وایومینگ شد. شکل ۷. الف شرایط قائم جو را در روز آلودگی شدید و فراگیر ۲۵ فروردین ۱۳۹۰ نشان می‌دهد. براساس این شکل در این روز هوای پایدار و آرامی در سطح استان تهران حاکم است به‌نحوی که میزان

شاخص انرژی پتانسیل در دسترس (CAPE)، شاخص صعود (LFC) و سایر شاخص‌های ناپایداری عدد صفر را نشان می‌دهد که همگرایی، نزول جریان هوا و پایداری را در روی جو شهر تهران تأیید می‌کند. همچنین وارونگی دمایی از نوع فرونشینی در ارتفاع ۷۹۹۳ متری و سطح ۳۵۰ هکتوپاسکال شکل گرفته است. سرعت باد تا تراز حدوداً ۶۰۰ هکتوپاسکالی کمتر از ۲۵ متر بر ثانیه و جهت باد نیز غربی می‌باشد. شکل ۷. ب شرایط قائم جو را در روز ۱۰ شهریور ۱۳۹۴ نشان می‌دهد. در این روز علی‌رغم وجود ابرناکی، افزایش سطح انرژی، میزان رطوبت و آب جو در ترازهای ۷۰۰ هکتوپاسکال به بالا، اما در سطح زمین تا ارتفاع حدوداً ۳ هزار متری وجود شرایط وارونگی دمایی از نوع فرونشینی و همچنین سرعت و جهت متغیر باد در سطوح مختلف با وضعیت آلودگی بسیار شدید و فراگیر مواجه بوده‌ایم. در فصل پاییز (شکل ۷. ج) در روز ۱۶ مهر ۱۳۹۲ وجود شرایط بدون ابرناکی، پایداری قوی جریان هوا، کاهش سطح رطوبت، کاهش شدت همگرایی و واگرایی بسته هوا و کاهش سرعت باد تا سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال موجب ایجاد وضعیت بدون آشفتگی جوی و افزایش میزان غلظت آلاینده گردیده است. در نهایت، در روز ۱۹ اسفند ماه ۱۳۹۳ (شکل ۷. د) تمامی شاخص‌های شدت پایداری در رده ضعیف قرار دارند و از تراز ۹۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال پوشش ابر در بخشی از جو استان تهران حاکم است. نکته مهم افزایش وزش باد شرقی تا تراز ۸۰۰ هکتوپاسکالی است که با جهت مخالف باد در ترازهای بالاتر مواجه شده است که در این شرایط ذرات معلق آلاینده را به صورت فراگیر گسترش داده است.

بحث و نتیجه‌گیری

سامانه‌های همدید جوی نقش تعیین‌کننده‌ای در پتانسیل آلودگی هوا و تنظیم لایه مرزی ایفا می‌کنند؛ بر همین اساس بررسی نقش الگوهای همدید بر شدید و فراگیرترین روزهای آلوده براساس هفت آلاینده در ۲۲ ایستگاه آلوده‌سنجی در سطح استان تهران مبنای پژوهش قرار گرفت. بدین منظور بر اساس میانگین مقادیر هفت آلاینده در ایستگاههای مورد بررسی تمامی روزهای دوره آماری ۱۳۹۰-۱۳۹۶ از نظر سطح آلودگی تعیین و سپس براساس شدت، تداوم و فراگیری نمونه‌های منتخب در هر فصل مورد تفسیر همدیدی قرار گرفت. از نظر تعداد روز فراگیر در ایستگاههای واقع در استان تهران با وضعیت‌های مختلف، وضعیت پاک در فصل بهار با ۲۵۴ روز، وضعیت سالم در تابستان با ۵۱۴ روز، وضعیت ناسالم برای گروه حساس در بهار با ۱۵ روز، وضعیت ناسالم در تابستان با ۲ روز و وضعیت بسیار ناسالم با ۳ روز در فصل بهار از بیشترین فراوانی طی بازه زمانی مورد مطالعه برخوردار بودند.



شکل ۷. نمودارهای اسکیتی برای روزهای الف: ۲۵ فروردین ۱۳۹۰، ب: ۱۰ شهریور ۱۳۹۴، ج: ۱۶ مهر ۱۳۹۲، د: ۱۹ اسفند ۱۳۹۳

واکوی همدید روزهای منتخب با آلودگی بسیار شدید و فراگیر در فصل زمستان و بهار مشابه هم نشان داد که با گسترش سامانه پرفشار سرد مهاجر از نیمه شرقی اروپا بر روی نیمه شمالی کشور در سطح زمین و در تراز میانی وردسپهر نفوذ پشته‌ای از روی سرزمین‌های عربستان و عراق و منطبق بر پرفشار سطح زمین با تقویت جریان‌ات همگرا و نزولی ذرات آلاینده باعث رخداد آلودگی با وضعیت بسیار ناسالم در سراسر استان تهران گردیده است. اما در فصول تابستان و پاییز نیز شبیه هم با استقرار پرفشار سرد بسته در روی خزر و نفوذ جنوب سوی آن تا مناطق مرکزی کشور و در مقابل با شمال سو شدن زیانه‌های کم فشار گرم پاکستان موجب ایجاد گرادیان فشاری می‌شود. در تراز میانی وردسپهر نیز با گسترش جنوب سوی ناوه کم عمق وابسته به کم ارتفاع شمال روسیه و با قرارگیری هسته امگای منفی ضعیف بر روی منطقه پژوهش مواجه شده است. شرایطی مشابه در هر چهار فصل در زمان رخداد آلودگی اینکه با نفوذ پشته عمیق بر روی سرزمین عربستان و نیمه‌شرقی مدیترانه از ورود سامانه‌های کم فشار سودانی و مدیترانه‌ای و تزریق رطوبت و گرمای منابع آبی جنوبی بر روی کشور و منطقه پژوهش جلوگیری کرده است که با تقویت جریان هوای پایدار و آرام شرایط مناسبی را برای افزایش شدت آلودگی در استان تهران به‌وجود آورده است. بررسی نقشه‌های باد نیز حاکی از تقابل بادهای شرقی و جنوب‌شرقی در سطح زمین با بادهای جنوب‌غرب و غربی در سطوح میانی وردسپهر است که هم موجب محبوس شدن ذرات آلاینده در سطح استان تهران و هم اینکه با توجه به

شکل‌گیری جریان باد آرام جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی و برخورد آن به مناطق مرتفع و کوههای مناطق شمالی استان تهران موجب انباشت آلودگی و رخداد آن به صورت فراگیر می‌شود. بررسی نمودار پیمایش قائم جو نشان از نقش جریان باد آرام و وزش غالب باد جنوب‌شرقی تا غربی باد از سطح زمین تا سطوح میانی وردسپهر، رطوبت اندک، کاهش ارتفاع لایه مرزی و وارونگی‌های قوی از نوع فرونشینی در زمان رخداد افزایش غلظت آلاینده‌ها به صورت فراگیر در منطقه پژوهش می‌باشد.

کتابشناسی

۱. پرکینز، هنری (۱۳۶۷)، «آلودگی هوا»، مترجم منصور غیاث‌الدین، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران؛
۲. بیدختی علی‌اکبری، عباسعلی و زهرا شرعی‌پور (۱۳۸۸)، «شرایط هواشناختی و وضعیت حاد آلودگی هوا (مطالعه موردی: شهر تهران)»، محیط‌شناسی، شماره ۳۵، صص ۱-۱۴؛
۳. خوشحال دستجردی، جواد و سیدحجت موسوی و عبدالرضا کاشکی (۱۳۹۱)، «تحلیل همدید توفان‌های گردو غبار ایلام»، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۲، صص ۳۴-۱۵؛
۴. حسین‌زاده، سیدرضا، رضا دوستان، سیده مرضیه حقیقت و سیده مریم حقیقت (۱۳۹۲)، «بررسی الگوهای همدید مؤثر بر آلودگی هوا در کلان‌شهر مشهد»، جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، شماره ۲۱، صص ۱۰۲-۸۱؛
۵. دبیری، مینو (۱۳۷۹)، آلودگی محیط زیست (هوا- آب - خاک - صوت)، نشر اتحاد، تهران؛
۶. رنگرن، کاظم (۱۳۹۰)، «تهیه نقشه LST با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (نمونه موردی شهر اهواز)، همایش ملی ژئوماتیک»؛
۷. رنجبر سعادت‌آبادی، علی‌اکبر و لیلا محمدیان (۱۳۸۹)، «مطالعه میانگین الگوهای همدیدی بر اساس رخداد غلظت‌های مختلف آلاینده CO در فصول تابستان و پاییز در تهران، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، شماره ۷۲، صص ۱۲۸-۱۱۱؛
۸. رنجبر سعادت‌آبادی، عباس؛ مجید آزادی، عباس علی‌اکبری، بیدختی، سید علیرضا صادقی حسینی (۱۳۸۴)، مطالعه موردی جزیره گرمایی شهر تهران و شبیه‌سازی عددی آن، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۱، شماره ۱، صص ۶۳-۷۸؛
۹. شرعی‌پور، زهرا (۱۳۸۸)، «بررسی غلظت آلاینده‌های هوا و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛
۱۰. شمسی‌پور، علی‌اکبر و ژوان امینی (۱۳۹۲)، «شبیه‌سازی الگوی پراکنش CO با مدل خرداقلیمی ENVI-MET در مسیر آزادی-تهرانپارس، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۷، صص ۱۰۳-۸۵؛
۱۱. عزیزی قاسم و حسینعلی قنبری (۱۳۸۸)، «شبیه‌سازی عددی رفتار آلودگی هوای تهران بر اساس الگوی باد»، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، شماره ۶۸، صص ۱۵-۳۲؛
۱۲. لشکری، حسن و پریسا هدایت (۱۳۸۴)، «تحلیل الگوی سینوپتیکی اینورژن‌های شدید شهر تهران»، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۶، صص ۸۲-۶۵؛
۱۳. یآوری، حسین و محمد سلیقه (۱۳۹۰)، «سطوح وارونگی در آلودگی‌های شهر تهران»، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۱۷(۲۰)، صص ۱۰۵-۸۹؛
14. Adame, J.A. Hernandez-Ceballos, M.A. Bolívar, J.P. De la Morena, B. (2012), "Assessment of an air pollution event in the southwestern Iberian Peninsula", Vol 55, pp 245-256;
15. Finardi, S., U. Pellegrini (2002), "Systematic Analysis of Meteorological Conditions Causing Severe Urban Air Episodes in the Central Po Valley", 9th Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modeling for Regulatory Purposes, pp. 250-254;
16. Gao, Huiwang., Chen, Jing., Wang, Bin., Tan, Sai-Chun., Lee, olin M., Yao, Xiaohong., Yan, Han., Shi, Jinhui (2011), "A study of air pollution of city clusters", Vol 45, pp 3069-3077;

17. Hurley, P. (2007), "Modeling mean and turbulence fields in the dry convective boundary layer the with eddy-diffusivity/mass-flux approach". *Boundary-Layer Meteorol*, No, 125, pp525-536;
18. Khedairia, S., & Khadir, M. T. (2012), "Impact of clustered meteorological parameters on air pollutants concentrations in the region of Annaba", *Algeria. Atmospheric Research*, No, 113, pp89-101;
19. Rainham, D. G., Smoyer-Tomic, K. E., Sheridan, S. C., & Burnett, R. T. (2005)," Synoptic weather patterns and modification of the association between air pollution and human mortality", *International Journal of Environmental Health Research*, No,15(5),pp 347-360;
20. USEPA, (1998), "Air quality index: A guide to air quality and your health", *Environmental Protection Agency*, Washington, DC;
21. Vardoulakis, S.; Kassomenos, P (2001),"Sources and factors affecting PM10 levels in two cities: European Implications for local air quality management", *Atmospheric Environment*, No, 24 (77),pp 3242-3263.