



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۴ سی و پنجم، پاییز ۱۳۹۹

صص ۲۰-۱

DOI: <https://dx.doi.org/10.22067/geo.v9i3.87260>

مقاله پژوهشی

## بررسی الگوهای همدیدی آلودگی‌های شدید هوا، در لایه وردسپهر زیرین کلان‌شهر تهران

حسن لشکری<sup>۱</sup> - دانشیار گروه آب و هواشناسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

قاسم کیخسروی - استادیار گروه آب و هواشناسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

ندا کریمیان - کارشناسی ارشد آب و هواشناسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۲۱ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۶/۲۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۷/۵

### چکیده

آلودگی هوا امروزه یک مشکل اساسی در کلان‌شهر تهران محسوب می‌شود. هدف این تحقیق معرفی الگوهای همدیدی پر تکرار و شایع در بروز آلودگی‌های شدید و بحرانی شهر تهران است. برای این منظور ابتدا داده‌های مربوط به آلودگی هوا در بازه زمانی (۲۰۱۷-۲۰۰۷) دریافت و سپس براساس شاخص AQI روزه‌های خطرناک در هر یک از ایستگاه‌های سنجش آلودگی شناسایی گردید. در ادامه از داده‌های بازتحلیل پایگاه NCEP/NCAR با قدرت تفکیک افقی ۲/۵ در ۲/۵ درجه برای ترازهای ۹۲۵، ۸۵۰، ۷۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال دریافت شد. پس از ترسیم نقشه‌های همدیدی ترازهای فوق، الگوهای همدیدی غالب و پرتکرار شناسایی شد. در طول دوره آماری ۱۵۷ روز همراه با آلودگی شدید و خطرناک شناسایی گردید. از میان آلاینده‌ها تأثیرگذار بر روی شهر تهران بیش‌ترین میزان تأثیرگذاری آلاینده‌ها مربوط به آلاینده‌های  $PM_{2.5}$ ،  $PM_{10}$  و  $NO_2$  می‌باشد. در مجموع ۵ الگوهای همدیدی آلودگی شدید شناسایی گردید. الگوی پرفشارهای مهاجر، پرفشار سیبری، الگوی ترکیبی پرفشار سیبری و پرفشار عربستان و کم فشار پاکستان. سه الگو از پنج الگوی فوق بیش‌ترین تکرار را داشتند. در یک الگو که عموماً در دوره گرم سال رخ می‌دهد، کم فشار پاکستان مهم‌ترین نقش را در ایجاد بادهای شدید در بیابان‌های اطراف تهران داشته و بیش‌ترین آلاینده‌ها در این‌گونه آلودگی‌ها ذرات ریزگرد  $PM_{10}$  و  $PM_{2.5}$  می‌باشد. الگوی دوم مرتبط با آلودگی‌های دوره سرد سال می‌باشد. در این الگو پرفشار سیبری در لایه زیرین وردسپهر با فرارفت سرد عامل اصلی پایداری و انباشت آلاینده‌ها و در ترازهای بالاتر پشته‌ای از پرفشار عربستان باعث تشدید پایداری و ماندگاری شرایط جوی است. در الگوی غالب سوم پرفشار عربستان و زیانه آن در تمام لایه‌های

جوی سبب پایداری خیلی شدید و ماندگاری آلودگی و پایداری هوا می‌شود. در این الگو به دلیل ماهیت دینامیکی سامانه علیرغم پایداری، دمای هوا به تدریج افزایش یافته و شرایطی کاملاً متفاوت از شرایط فصلی حاکم می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** آلودگی‌های شدید، شاخص کیفیت هوا، لایه مرزی جوی، الگوهای همدید، تهران

## ۱. مقدمه

هوای پاک برای زندگی سالم هر انسانی، از غذا و آب ضروری‌تر است و جز نیازهای اساسی یک انسان برای ادامه زندگی محسوب می‌شود، اضافه شدن هر عنصری که برای زندگی انسان، جانوران، گیاهان، خطرناک باشد به عنوان آلودگی هوا تلقی می‌شود. بر اساس تعریف انجمن مشترک مهندسان آلودگی هوا و کنترل آن، به وجود یک یا چند آلوده‌کننده در هوا مانند گرد و غبار، گازها، بو، دود و بخار که در هوای آزاد برای زندگی انسان، گیاه یا زندگی حیوانات مضر باشند و یا به‌طور غیر قابل قبولی، منحل استفاده راحت از زندگی و اموال شوند، آلودگی هوا گفته می‌شود (غیاث‌الدین، ۱۳۸۵). اصولاً آلودگی کلان‌شهرها ناشی از وضعیت توپوگرافی، مانند محصور شدن محیط شهری ما بین کوهستان‌های مرتفع و یا اینکه ناشی از مساله افزایش جمعیت، افزایش تردد خودروها، صنایع و ... می‌باشد. اگرچه عوامل یاد شده از اهمیت و جایگاه خاصی در رابطه با مساله آلودگی برخوردارند، لیکن عامل یا عوامل مهم فرآیندهای جوی می‌باشند که اثر عوامل مذکور را شدت داده و به صورت گسترده‌تری عمل می‌کنند. در این راستا مساله مهم، توجه به وارونگی دما می‌باشد که به عنوان یک فرآیند جوی در لایه مرزی جو، به همراه مساله پایداری هوا مطرح می‌شود به این دلیل که پایداری هوا مانع از صعود و جابه‌جایی توده‌های هوایی شده و پالایش و جابه‌جایی معمولی در درون هوای شهری را دچار اختلال می‌کند و باعث اشباع شدن جو سطح زمین از آلاینده‌ها می‌شود. وارونگی‌های شدید به تبع آن آلودگی هوا، آثار مستقیم و غیرمستقیمی بر انسان و محیط پیرامون آن دارد. اولین کار در مورد آلودگی هوای تهران اولین بار به وسیله رولف آلیسن در سال ۱۹۷۱ انجام گرفته است. وی عناصر آلاینده موجود در هوای تهران را مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌دهد و رابطه این عناصر را برخی بیماری‌ها بیان می‌کند. (کوکویلو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۲) در بررسی ارتباط سامانه‌های هواشناسی با غلظت آلاینده ذرات معلق در برزیل به این نتیجه رسیدند که مقادیر بالای غلظت آلاینده‌ها، همراه با سیستم‌های پرفشار جنب حاره‌ای اطلس جنوبی می‌باشد. (دوهرتی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳) با بررسی اثرات تغییر اقلیم بر اوزون سطح زمین، دریافتند که بین تغییرات دما و نوسانات آلودگی هوا ارتباط مثبت وجود دارد. (فنگ<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۳) در بررسی ارتباط تغییر اقلیم و آلودگی هوا در جهان به این نتیجه رسیدند که کاهش کربن و متان می‌تواند منجر به کاهش سرعت تغییر اقلیم و کاهش غلظت آلودگی هوا از نظر PM<sub>2.5</sub> و O<sub>3</sub> شود.

1 Ccoyllo

2 Doherty

3 Fang

(ماکرا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۷) با بررسی رابطه میان الگوهای جوی بزرگ مقیاس و آلودگی هوا نشان دادند که افزایش غلظت آلاینده‌های هوا در پیکزلی مجارستان، هم در تابستان و هم در زمستان در شرایط استقرار سامانه واچرخندی و پراتفاح سطوح میانی جو رخ می‌دهد و کاهش آلاینده‌ها نه فقط هنگام استقرار چرخنده‌های دینامیکی، بلکه به هنگام استقرار پراتفاح‌ها، هم می‌تواند رخ دهد. (گوانگ<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳) در بررسی تأثیر الگوی سینوپتیکی و لایه مرزی جوی بر PM<sub>10</sub> و جزیره گرمایی شهری به این نتیجه رسیدند که بین الگوهای سینوپتیک و خصوصیات دینامیکی لایه مرزی شهری با غلظت PM<sub>10</sub> و شدت جزیره گرمایی شهری رابطه معنی داری وجود دارد. ارتفاع لایه مرزی جوی با اختلاط زیاد و عمق وارونگی ضعیف باعث کاهش غلظت PM<sub>10</sub> و شدت جزیره گرمایی شهری می‌شود. (ایگید<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۸) در بررسی رابطه بین دما و آلودگی هوا و ارتباط آن با امواج گرمایی در مناطق شهری و روستایی بیرمنگام به این نتیجه رسیدند که رابطه خطی مثبت بین دما و آلودگی هوا در زمان‌های وقوع امواج گرمایی وجود دارد و آلاینده‌های هوا (PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) با افزایش دما، زیادتر می‌شوند. (هوئی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۲) در تحقیقی تحت عنوان استفاده از شاخص استاندارد مواد آلاینده به عنوان شاخص کیفیت هوا در تایوان، کشور تایوان را به چهار بخش شمالی، مرکزی، شرقی و جنوبی تقسیم و PSI این مناطق را در طول یک سال تعیین کردند. (بی<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۶) تأثیر شرایط همدیدی بر آلودگی هوا در فصل زمستان را در حوضه گانزونگ چین با استفاده از شش مدل برای شش روز از سال ۲۰۱۳ بررسی کردند و تغییرات PM<sub>2.5</sub> را به وارونگی دما، سطح پایین سرعت باد افقی، وقوع شرایط نامطلوب سینوپتیکی در طول فصل زمستان مربوط دانستند. دلجو (۱۳۷۸)، با مطالعه و بررسی وارونگی دما و ناپایداری بر روی آلودگی هوای شهر تهران نتیجه گرفت که حداقل ارتفاع وارونگی در اواخر پاییز و اوایل زمستان رخ می‌دهد و ارتفاع وارونگی با شدت آن ضریب همبستگی منفی دارد و اینکه گاز منواکسیدکربن به سمت و سرعت باد ضریب همبستگی منفی و غلظت آن با شدت وارونگی رابطه مستقیم دارد و گاز دی‌اکسید نیتروژن در برابر شدت وارونگی افزایش کلی نشان می‌دهد. چراغی (۱۳۸۱)، در تحقیقی تحت عنوان بررسی و مقایسه کیفیت هوا در شهرهای تهران و اصفهان و ارائه راهکارهایی جهت بهبود آن، کیفیت هوای این دو شهر را با شاخص استاندارد آلاینده تعیین و مشخص نمودند که غلظت آلاینده‌ها با توجه به شاخص محاسبه شده ۳۲۹ روز در شهر تهران و ۳۴ روز در شهر اصفهان از حد استاندارد تجاوز کرده بود. همچنین در این تحقیق مشخص شده است که در موارد تجاوز کیفیت هوا از حد استاندارد در شهر تهران در ۹۶ درصد از موارد و در شهر اصفهان در ۷۰ درصد از موارد آلاینده مسئول منواکسید کربن بوده است. بیدختی و بنی‌هاشم (۱۳۸۳)، به مطالعه لایه آمیخته شهری و رابطه آن با شدت و ضعف هوا پرداخته و دریافتند

1 Makra  
2 Guang  
3 Egide  
4 Huei  
5 Bei

که نحوه رشد لایه آمیخته نقش مؤثری در غلظت آلودگی هوا دارد. آن‌ها دو مدل یکی تلاطمی و دیگری انتگرالی جهت پیش‌بینی آلودگی هوا در محیط‌های شهری ارائه نمودند. شرعی پور و بیدختی (۱۳۸۳)، داده‌های گازهای SO<sub>2</sub>-NO<sub>2</sub>-CO-PM از ایستگاه‌های سنجش آلودگی شهر تهران و چگونگی تغییرات میانگین ماهانه آلاینده‌ها را در ارتباط با پارامترهای هواشناسی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بررسی‌های بیات و همکاران (۱۳۸۳)، نشان داد که ۹۰ درصد وزن کل آلاینده‌های هوای شهر تهران از وسایل نقلیه منتشر شده و ۱۰ درصد مابقی مربوط به منابع ثابت می‌باشد. بیش از سه چهارم وزن آلاینده‌های هوا را مونواکسیدکربن تشکیل می‌دهد که ۹۸/۷٪ آن مربوط به وسایل نقلیه است. نزدیک به نیمی از این مقدار را خودروهای سبک شهری و ۲۰٪ آن را موتورسیکلت‌ها منتشر می‌نمایند. آلاینده بعدی هیدروکربن‌ها با سهم ۱۱/۴٪ است که بیش از ۷۰٪ مربوط به منابع متحرک می‌باشد. اکسیدهای نیتروژن با سهم ۸/۴٪ در رده بعد قرار دارند که ۶۷/۵٪ آن مربوط به منابع متحرک است. اکسیدهای گوگرد ۲/۹٪ کل آلاینده‌ها را تشکیل می‌دهند و سهم عمده به میزان ۸۵/۸٪ از منابع ثابت منتشر می‌شود. ذرات معلق با سهم ۲/۴٪ از نظر وزنی در رده آخر قرار می‌گیرند. قسامی و همکاران (۱۳۸۶)، به بررسی وضعیت همدیدی برخی شرایط حاد آلودگی هوای تهران در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ میلادی پرداخته‌اند. در این بررسی ابتدا نحوه تغییرات روزانه و ماهانه آلاینده‌ها در ماه‌های سرد سال بررسی شده و سپس نوع و عمده‌ترین آلاینده‌های شهر تهران، شامل منواکسید کربن، دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر پدیده‌های هواشناسی از قبیل وارونگی دمایی همراه با شرایط همدیدی بر کمیت و کیفیت آلاینده‌ها بررسی شده است. نتیجه نشان داد، زمانی که سامانه پرفشار منطقه‌ای، از نوع سامانه‌های عرض‌های میانی در ناحیه حاکم باشد غلظت آلاینده‌ها افزایش یافته و گاهی اوقات ممکن است دو تا سه برابر بیشتر از حد مجاز باشد. عطایی و هاشمی نسب (۱۳۹۰)، در پژوهشی تحت عنوان شناسایی، تجزیه و تحلیل الگوهای تراز میانی جو مؤثر در آلودگی هوای شهر اصفهان، به این نتیجه رسیدند که الگوهای تراز میانی جو تأثیر به‌سزایی در آلودگی هوای شهر اصفهان داشته که در دوره‌های سرد و گرم کانونی از پرفشارهای گسترده بر روی قلمروی وسیعی از ایران و به خصوص منطقه مورد مطالعه مشاهده شده که حضور این کانون پرفشار سبب پایداری و تراکم ذرات بر روی شهر اصفهان شده است. نتایج تحقیقات شمسی پور و همکاران (۱۳۹۱)، در مدل‌سازی ترمودینامیکی و واکاوی همدید آلودگی هوای شهر تهران (ذرات معلق PM<sub>10</sub>) نشان داد که استقرار الگوهای واپرخندی روی شهر بیش از دیگر سامانه‌های جوی در تشدید آلودگی هوای تهران مؤثر هستند، به‌طوری که علاوه بر ایجاد پایداری و هوای آرام از عوامل مهم رخداد پدیده وارونگی دمایی هستند. در ضمن در دوره سرد سال کاهش ضخامت لایه آمیخته ناشی از انقباض و برودت هوا به‌طور غالب در شرایط حاکمیت شرایط پرفشار رخ می‌دهد. کیخسروی و لشکری (۱۳۹۳)، در تحقیقی تحت عنوان تحلیل رابطه بین ضخامت و ارتفاع وارونگی و شدت آلودگی هوا در شهر تهران، به بررسی عوامل آلودگی شهر تهران پرداخته و نتایج کار آن‌ها نشان داد که علاوه بر عوامل جغرافیایی عوامل اقلیمی مانند پایداری هوا

و بادهای آرام و وارونگی هوا در تشدید آلودگی هوای شهر تهران مؤثر است و زمانی که ارتفاع اینورژن به سطح زمین نزدیک می‌شود بر شدت آلودگی هوا افزوده شده است. زبردست و همکاران (۱۳۹۳)، در بررسی آلودگی هوای شهر تهران به وسیله‌ی مدل علی معلولی (DPSIR) به این نتیجه رسیدند که تمرکز و تراکم جمعیت (ساکن و غیرساکن) در تهران و به دنبال آن نیاز به حمل‌ونقل و در نتیجه استفاده از سوخت‌های فسیلی از جمله مهم‌ترین نیروهای محرکه ایجاد آلودگی هواست. او مهم‌ترین دلیل تأثیر آلودگی هوا را بر سلامت انسان بیماری‌های قلبی عروقی می‌داند. نتایج تحقیق ذوالفقاری و همکاران (۱۳۹۳)، در بررسی آلودگی هوای کرمانشاه نشان داد که تمام انواع آلودگی‌های هوای کرمانشاه در قالب سه الگو قابل ارائه است. الگوی نوع A زمانی شکل می‌گیرد که پرفشارهای دینامیکی اروپایی در دوره سرد سال با پرفشار کوچک قفقاز ادغام شده و تا منطقه زاگرس جنوبی نفوذ می‌کنند. این وضعیت سبب پایداری هوا و کاهش ارتفاع لایه وارونگی دما شده و شدیدترین آلودگی‌های هوا را موجب می‌شود. در الگوی نوع B پرفشارهای آسیایی و سیبری که ناشی از سرمایش سطح زمین در دوره سرد سال هستند، با نفوذ به ایران از سمت شمال شرق و گسترش تا ارتفاعات زاگرس، شرایط را برای تقویت پایداری هوا در کرمانشاه فراهم می‌کنند. در الگوی نوع C آلودگی‌های که می‌توان آن را آلودگی ذرات معلق نیز نامید با استقرار فرود مدیترانه‌ای در شرق این پهنه آبی تا شبه‌جزیره عربستان در سطوح بالای جو و تقویت سیستم کم فشار دینامیک در سطح زمین، انتقال ریزگرد بیابان‌های عراق و سوریه به داخل ایران و از جمله کرمانشاه صورت می‌گیرد. مسلماً آنچه در رابطه با شدت آلودگی کلان‌شهر تهران نقش اساسی دارد، عملکرد فرایندهای جوی می‌باشند که اثرات عوامل ثابتی نظیر توپوگرافی و ... را شدت بخشیده و به‌طور گسترده‌ای عمل می‌کنند. در نتیجه با توجه به اهمیت پایداری هوا در این زمینه، پیش‌بینی این عامل که در شرایط اقلیمی و سینوپتیکی خاص اتفاق می‌افتد از اهمیت بالایی برخوردار است. از طریق مطالعه شرایط سینوپتیکی جو در دوره‌های وقوع پایداری و وارونگی‌های جوی می‌توان به میزان فراوانی وقوع اینورژن‌ها، شدت و تداوم آن‌ها دست یافت و الگو و الگوهای سینوپتیکی منجر به اینورژن و پایداری‌های جوی شهر تهران را شناسایی کرد.

## ۲. روش‌شناسی تحقیق

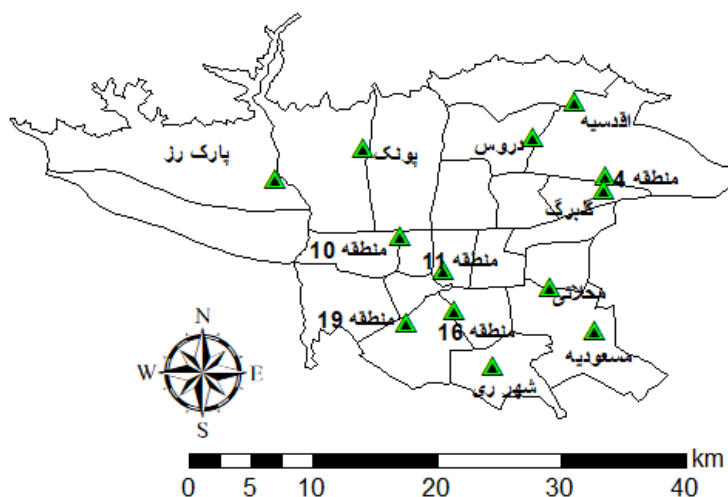
در این پژوهش، ابتدا داده‌های مربوط به آلودگی هوا در بازه زمانی (۲۰۱۷-۲۰۰۷) از اداره کنترل کیفیت هوای شهر تهران دریافت و سپس براساس شاخص کیفیت هوا<sup>۱</sup>، تعداد روزهای خطرناک آلودگی هوا طی ۱۲ ماه برای آلاینده‌های هوا، شامل ذرات معلق (PM10-PM2/5) میکرون، ازن (O<sub>3</sub>)، دی‌اکسید گوگرد (SO<sub>2</sub>)، دی‌اکسید نیتروژن (NO<sub>2</sub>)، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. با مشخص شدن روزهای آلودگی شدید، برای تعیین الگوهای همدیدی، از داده‌های بازتحلیل پایگاه NCEP/NCAR با قدرت تفکیک افقی ۲/۵ در ۲/۵ درجه شامل داده‌های میانگین روزانه و ماهانه فشار تراز دریا (Slp)، دما (Air)، بادمداری (Uwind)، باد نصف‌نهاری (Vwind) برای

1 Air quality index

ترازهای ۷۰۰، ۹۲۵، ۸۵۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال (چون عموماً آلاینده‌ها در لایه وردسپهر زیرین نمود پیدا می‌کنند) در عرض‌های ۷۰-۰ و طول ۸۰-۰ و تراز دریا استفاده گردید. همچنین برای بررسی روزهای انتخاب شده به عنوان روز خطرناک نقشه‌های اسکیتی آن روزها تهیه گردید و ضخامت لایه اینورژن در این روزها تعیین شد.

### ۳. مواد و روش‌ها

مجموع ایستگاه‌های آلودگی سنجی شهر تهران ۲۳ ایستگاه می‌باشد که از میان این تعداد تنها ۱۳ ایستگاه، که داده‌های این ایستگاه‌ها با دوره زمانی پژوهش مطابقت داشتند، انتخاب گردید. موقعیت مکانی ایستگاه‌های آلودگی سنجی در شهر تهران در شکل (۱) مشخص شده است.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های آلودگی سنجی شهر تهران

### ۳.۱. شاخص آلودگی هوا

به‌طور کلی AQI شاخصی جهت گزارش روزانه کیفیت هوا است. این شاخص مردم را از کیفیت هوا (پاک بودن یا آلوده بودن آن) آگاه می‌سازد و اثرات سلامتی مرتبط با آن را ارائه می‌کند؛ به عبارت دیگر AQI به اثرات سلامتی ناشی از مواجهه با هوای آلوده (ناسالم) می‌پردازد. شاخص کیفیت هوا (AQI) برای پنج آلاینده اصلی هوا یعنی ذرات معلق، دی‌اکسید نیتروژن، ازن سطح زمین، منواکسیدکربن و دی‌اکسید گوگرد محاسبه می‌شود. به منظور درک آسان، شاخص کیفیت هوا (AQI) به شش دسته طبقه‌بندی شده است که هر دسته را به سطوح مختلف سلامت انسان مربوط می‌سازد، این شش دسته به شرح جدول (۱) است. پارامترهای مندرج در جدول (۱) که نقاط شکست برای AQI را نشان می‌دهد از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$IP = \frac{IHI - ILO}{BPHI - BPLO} (CP - BPHI) + ILO$$

$IP$  = شاخص کیفیت هوا برای آلاینده  $p$

$CP$  = غلظت اندازه‌گیری شده برای آلاینده  $p$

$BPHI$  = نقطه شکستی که طبق جدول (بزرگ‌تر یا مساوی  $CP$ ) است.

$BPLO$  = نقطه شکستی که طبق جدول (کوچک‌تر یا مساوی  $CP$ ).

$IHI$  = مقدار  $AQI$  منطبق با  $BPHI$  طبق جدول ( $ILO$  = مقدار  $AQI$  منطبق با  $BPLO$  طبق جدول (۱)

(ایلز، ۲۰۱۰).

اطلاعات حاصله از ایستگاه‌های سنجش آلاینده هوا، با توجه به جدول استانداردهای ملی کیفیت هوای آزاد و شاخص کیفیت هوا، به غلظت میانگین زمانی معیار تبدیل گردیدند. در این استانداردها، برای منواکسید کربن از ماکزیمم غلظت ۸ ساعته، برای دی اکسید نیتروژن از ماکزیمم غلظت ۱ ساعته و برای ذرات معلق و دی اکسید گوگرد از متوسط غلظت ۲۴ ساعته استفاده شده است. جهت پایش غلظت گاز  $CO$  در طول ۲۴ ساعت، سه بار میانگین غلظت بیشینه انتخاب و در جهت تبدیل به شاخص کیفیت هوا استفاده می‌شود (EPA, 2009)، (کرمانی و همکاران، ۱۳۹۶).

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص کیفیت هوا بر اساس شاخص  $AQI$

نقاط شکست				$AQI$	وضعیت کیفیت هوا
$PM_{10}(PMM)$ ۲۴ ساعته	$CO(PMM)$ ۸ ساعته	$SO_2(PMM)$ ۲۴ ساعته	$NO_2(PMM)$ یک ساعته		
0-54	0-4/4	0-0/034	0-0/053	۰-۵۰	پاک
55-154	4/5-9/4	0/035-0/144	0/054-0/1	۵۱-۱۰۰	سالم (متوسط)
155-254	9/5-12/4	0/145-0/224	0/101-0/36	۱۰۱-۱۵۰	ناسالم برای گروه‌های حساس
255-354	12/5-15/4	0/225-0/304	0/361-0/640	۱۵۱-۲۰۰	ناسالم
355-424	15/5-30/4	0/305-0/604	0/65-1/24	۲۰۱-۳۰۰	بسیار ناسالم
425-604	30/5-50/04	0/605-0/805	1/25-2/04	>۳۰۰	خطرناک

#### ۴. بحث و نتایج

##### ۴.۱. بررسی تعداد روزهای خطرناک

در دوره آماری پژوهش (۱۳۸۶-۱۳۹۶) مقدار  $pm_{10}$  به نسبت سایر آلاینده‌ها بیش‌ترین میزان غلظت را دارد و بعد از این آلاینده، میزان  $No_2$  فراتر از حد استاندارد بوده و باعث ایجاد شرایط نامطلوبی شده است. به دلیل نقص داده‌های آلاینده  $pm_{2.5}$  در دوره آماری پژوهش، این آلاینده تا سال ۱۳۹۳ در دسترس نبوده و از سال ۱۳۹۳ به بعد در تمامی ایستگاه‌ها ثبت شده است و از سال ۱۳۹۳ تا پایان دوره پژوهش این آلاینده به نسبت سایر آلاینده‌ها بیش‌ترین میزان غلظت را دارد و می‌توان گفت که شرایط نامطلوب و فراتر از حد استاندارد را برای اقلیم شهر تهران به وجود

آورده است. بر اساس جدول (۲) بیشترین تعداد فراوانی روزهای خطرناک (AQI بالاتر از ۳۰۰) در آبان ماه است و بعدازآن به ترتیب آذرماه و دی ماه در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند همچنین می‌توان گفت که فصل پاییز به نسبت سایر فصل‌ها با این موضوع بیشتر درگیر می‌باشد. مسلماً یکی از علت‌های اصلی افزایش روزهای خطرناک علاوه بر پایداری هوا بازگشایی مدارس و ادارات و افزایش ترافیک در این فصل می‌باشد.

جدول ۲- تعداد روزهای خطرناک هر ماه در دوره آماری (۱۳۸۶-۱۳۹۶)

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
روزهای خطرناک	۱۰	۷	۹	۱۵	۹	۷	۲۰	۲۸	۲۶	۲۱	۲	۳

#### ۲.۴. بررسی الگوهای همدیدی آلودگی‌های شدید (روزهای خطرناک)

بررسی انجام شده بر روی نقشه‌های همدیدی ۳۵ نمونه آلودگی شدید و خیلی شدید بر روی شهر تهران نشان داد که آلودگی‌های شدید شهر تهران در ۵ الگوی همدیدی کلی رخ می‌دهد. از این ۵ الگوی همدیدی سه الگو که دارای بیشترین فراوانی (پرفشار سبیری، پرفشار مهاجر، کم فشار پاکستان) و بالاترین جمعیت عضو بوده‌اند در این مقاله به تفصیل تحلیل شده‌اند (جدول شماره ۳).

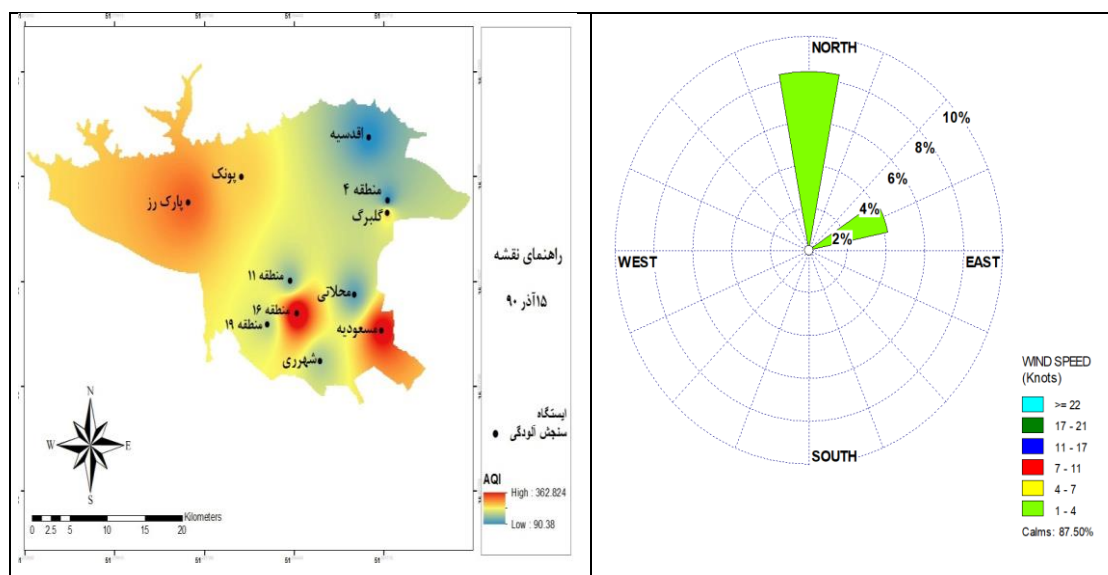
جدول ۳- بررسی وضعیت ضخامت لایه اینورژن در روزهای انتخابی دوره آماری (۱۳۸۶-۱۳۹۶)

نمونه انتخابی	الگوهای سینوپتیکی	ساعت (گرینویچ)	وضعیت	ضخامت وارونگی بر اساس نقشه‌های اسکوتی (بر حسب متر)
۹ مارس ۲۰۱۵	پرفشار مهاجر	۰۰	پایداری کامل	۱۸۷
		۱۲		
۵ دسامبر ۲۰۱۲	پرفشار سبیری	۰۰	پایداری -	-
		۱۲		
۶ دسامبر ۲۰۱۱	ادغام پرفشار سبیری	۰۰	پایداری کامل	۱۸۱
		۱۲		
۲۹ نوامبر ۲۰۱۰	پرفشار عربستان	۰۰	پایداری کامل	۳۷
		۱۲		
۵ جولای ۲۰۰۹	کم فشار پاکستان	۰۰	ناپایداری قوی -	-
		۱۲		



#### ۴. ۲. ۱. الگوی پرفشار سیبری (نمونه مطالعاتی ۶ دسامبر ۲۰۱۱)

این سامانه نمونه و الگوی سامانه‌هایی می‌باشد که پرفشار سیبری عامل اصلی ایجاد کننده آلودگی شهر تهران می‌باشند. در نمونه مطالعاتی ۶ دسامبر ۲۰۱۱ (۱۵ آذر ۱۳۹۰) ایستگاه منطقه ۱۶ و مسعودیه شاخص غلظت آلاینده‌ها AQI آن‌ها در وضعیت خطرناک می‌باشد. بالا بودن میزان غلظت آلاینده PM10 در ایستگاه موجب این وضعیت شده است. ایستگاه‌های محلاتی و منطقه ۱۱ ناسالم برای گروه‌های حساس هستند. همچنین ایستگاه‌های اقدسیه و منطقه ۴ در وضعیت سالم (متوسط) است، اما با این تفاوت که در ایستگاه منطقه ۴ بالارفتن شاخص NO2 موجب شده که این ایستگاه در وضعیت ناسالم قرار بگیرد و در ایستگاه اقدسیه بالارفتن غلظت PM2/5 موجب ناسالم شدن این ایستگاه شده است. ایستگاه‌های منطقه ۱۹ و شهرری مقادیر غلظت آلاینده‌ها در وضعیت ناسالم است. اما در ایستگاه‌های پارک رز، پونک و گلبرگ غلظت آلاینده‌ها در رده بسیار ناسالم است و مقدار PM10 بیش‌ترین میزان غلظت را دارد. در این نمونه نیمه غربی شهر تهران در شرایط کاملاً بحرانی قرار دارد به طوری که مقادیر آلاینده‌ها به بیش از ۳۵۰ واحد رسیده و در شمال غرب تهران کمترین مقادیر آلاینده‌ها، به بالای ۹۰ واحد می‌رسد.

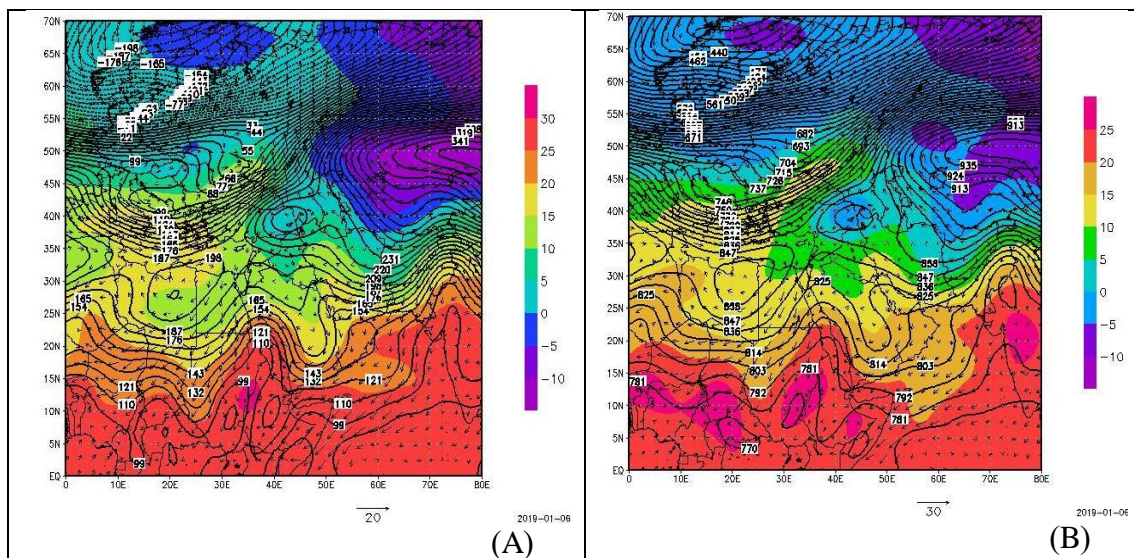


شکل ۲- بررسی وضعیت ایستگاه‌های آلوده سنجی شهر تهران و گلباد ایستگاه چیتگر در تاریخ ۶ دسامبر

(۲۰۱۱) (۱۵ آذر ۹۰)

الگوی همدیدی حاکم در ترازهای مختلف جو در این الگو به شرح زیر می‌باشد. در تراز زیرین وردسپهر زبانه‌ای از بخش جنوبی و اچرخند سیبری با راستای شمالی - جنوبی از سمت شمال شرق بر روی ایران گسترش یافته

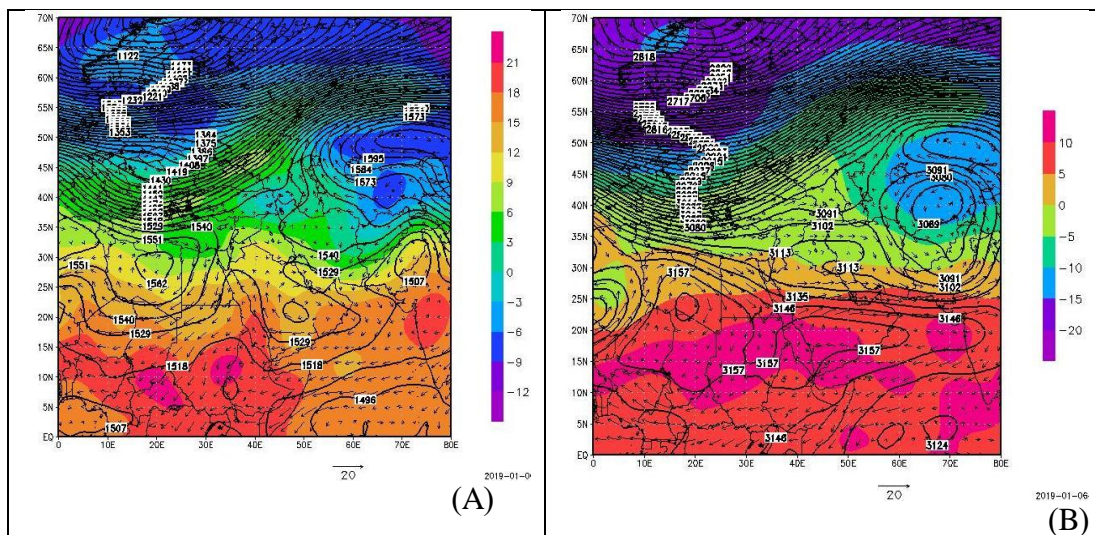
است. همان‌طور که دیده می‌شود زبانه سردی در امتداد این زبانه فشاری بر روی ایران و به خصوص نیمه شمالی گسترش دارد. با فرارفت این زبانه سرد در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال دما به کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد رسیده است. علاوه بر کاهش شدید دما بر روی نوار شمالی ایران، هوای پایداری بر روی این منطقه و شهر تهران مسلط شده است. همان‌طور که دیده می‌شود هوا کاملاً در شرایط سکون قرار دارد (شکل A۳). در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال که به‌طور متوسط در ارتفاعی حدود ۸۰۰ متری بالای تراز دریا را در بر می‌گیرد همچنان نوار شمالی کشور و شهر تهران در دامنه جنوبی البرز در مسیر زبانه واچرخند سیبری قرار دارد. در امتداد این زبانه ارتفاعی زبانه سردی بر روی منطقه گسترش می‌یابد که با فرارفت سرد عرض‌های جنب قطبی هوای پایداری را بر روی شهر تهران مسلط شده است (شکل B۳). همان‌طور که در نقشه پهنه آلودگی شهر تهران نیز دیده می‌شود نیمه غربی شهر تهران دارای بالاترین شاخص آلودگی است. در بررسی نقشه‌های ارتفاعی دو تراز زیرین و ردسپهر نیز ملاحظه می‌شود در لایه زیرین هوای کاملاً پایداری حاکم بوده است. این سکون و پایداری سبب شده است که عناصر آلاینده خروجی از منابع آلاینده در درون این جو پایدار تجمع پیدا کرده و بر غلظت آلاینده‌ها افزوده شود. در تمام ایستگاه‌های داخل شهر تهران در بیش از ۸۰ تا ۸۵ درصد از اوقات روز هوا کاملاً آرام بوده و در سایر اوقات نیز جریان هوا شمالی بوده و سرعت باد در محدوده‌ای بین ۱ تا ۴ نات بوده است. این شرایط به خوبی پهنه آلودگی شهر را توجیه می‌کند (شکل ۲).



شکل ۳- نقشه روزانه دما و فشار تراز ۱۰۰۰ (A) و ۹۲۵ (B) هکتوپاسکال در تاریخ ۶ دسامبر ۲۰۱۱

الگوی همدیدی حاکم در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز شباهت زیادی با الگوهای تراز زیرین لایه مرزی دارد. همچنان زبانه واچرخند سیبری، پدیده غالب بر روی نوار شمالی کشور و تهران می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه

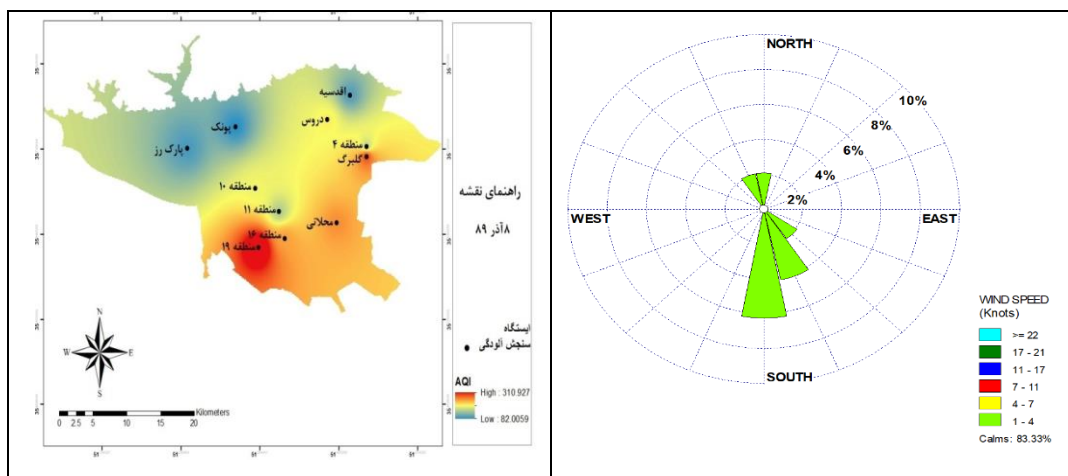
می شود در این تراز نیز زبانه سردی با امتداد شمال شرقی - جنوب غربی تمام عرصه نوار شمالی کشور را فراگرفته است. فرارفت سرد باعث شکل گیری هوای پایدار بر سطح منطقه شده است. همان طور که مشاهده می شود جریان هوا در پهنه این زبانه کاملاً آرام، و سرعت باد به کمتر از یک نات کاهش یافته و فرونشینی هوا را در این تراز توجیه می کند. در جو بالای لایه مرزی، شرایط همدیدی تغییر پیدا کرده و زبانه حرارتی لایه زیرین به تدریج به یک جریان همدید دینامیکی تغییر ماهیت داده است (شکل A۴). همان طور که دیده می شود در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال مرکز واپرخندی در امتداد مرکز واپرخندی عربستان بر روی جنوب غرب ایران تشکیل می شود، زبانه آن بخش عمده از عرصه کشور ایران را در بر گرفته است. در نتیجه جریان آرام لایه زیرین و ردسپهر به جریانات با سوی غربی تبدیل شده است. بر خلاف لایه زیرین جریان فرارفت شده بر روی شهر تهران فرارفت گرم عرض های جنوبی می باشد این تغییر الگوی وزشی سبب شده است یک لایه وارونه قوی بر روی لایه سرد زیرین و ردسپهر حاکم شده و بر شدت پایداری هوا بر روی نوار شمالی و شهر تهران بیفزاید. همان طور که ملاحظه شد دمای فرارفت شده بر روی منطقه در تمام لایه زیرین مرزی کمتر از ۵ درجه سانتی گراد بوده و در تراز ۸۵۰ هکتوپاسال به ۳ درجه سانتی گراد می رسد، در حالی که در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ( در ارتفاعی بیش از ۳۰۰۰ متر) دمای فرارفت شده در محدوده ای بین صفر تا ۵- درجه قرار دارد. این مساله وارونگی قوی را در تراز ۸۵۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسال نشان می دهد (شکل B۴).



شکل ۴- نقشه روزانه دما و فشار تراز (A) ۸۵۰ و (B) ۷۰۰ هکتوپاسکال در تاریخ ۶ دسامبر ۲۰۱۱

#### ۴.۲.۲. الگوی پرفشار عربستان (نمونه مطالعاتی ۲۹ نوامبر ۲۰۱۰)

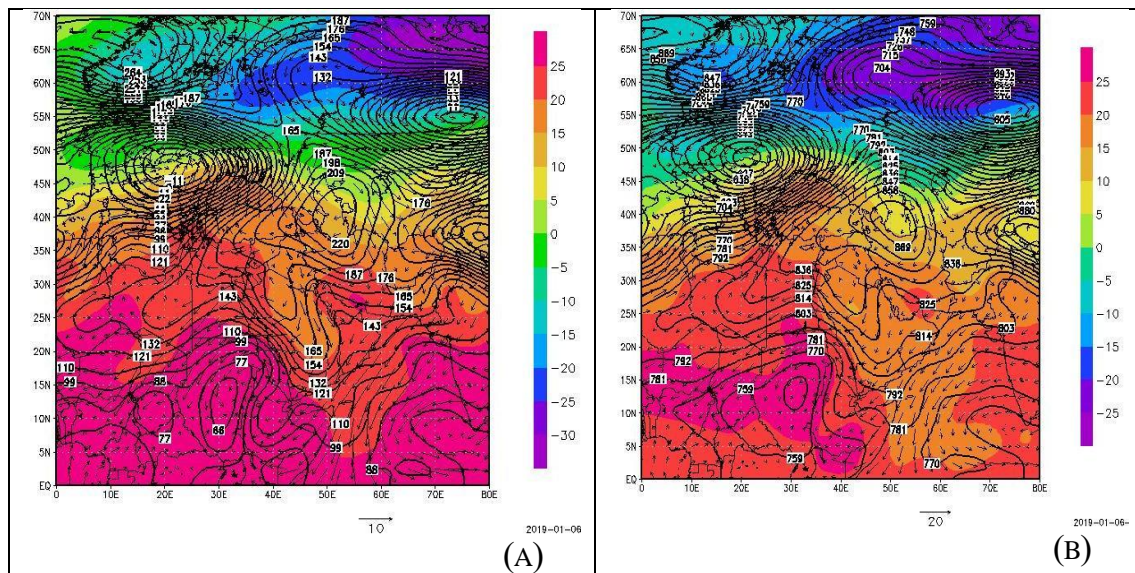
در نمونه مطالعاتی ۲۹ نوامبر ۲۰۱۰ (۱۳۸۹ آذر) تنها ایستگاه گلبرگ شاخص غلظت آلاینده‌ها AQI آن‌ها در وضعیت خطرناک می‌باشد و مسبب این وضعیت بالا بودن میزان غلظت آلاینده PM10 در ایستگاه است. ایستگاه‌های محلاتی و منطقه ۱۹ در وضعیت بسیار ناسالم هستند. همچنین ایستگاه‌های اقدسیه، پارک رز و پونک در وضعیت سالم (متوسط) هستند. ایستگاه‌های منطقه ۴ و منطقه ۱۱، در وضعیت ناسالم برای گروه‌های حساس قرار دارد با این تفاوت که در ایستگاه منطقه ۴ بالابودن میزان غلظت NO2 موجب وضعیت ناسالم شده است. ایستگاه منطقه ۱۱، بالا رفتن غلظت آلاینده PM10 این وضعیت را به وجود آورده است. در این الگوی اساس شکل (۵) بیش‌ترین تجمع آلاینده‌ها در نیمه شرقی تهران و به خصوص بخش جنوبی مشاهده می‌شود.



شکل ۵- نقشه بررسی وضعیت ایستگاه‌های آلوده سنجی تهران و گلباد ایستگاه مهرآباد در تاریخ ۲۹ نوامبر ۲۰۱۰

شرایط هم‌دیدگی حاکم در این الگو در ترازهای مختلف جو به صورت زیر بوده است. همان‌طور که دیده می‌شود در تراز زیرین وردسپهر مرکز و اچرخندی با پریند ۲۲۰ ژئوپتانسیل متر بر روی دریای مازندران قرار دارد. زبان‌های این مرکز و اچرخندی تقریباً تمام پهنه ایران را در بر می‌گیرد. استقرار دو مرکز چرخندی قوی در ضلع غربی و شرقی این و اچرخند و شیو حرارتی ناشی از آن سبب ایجاد تندی باد در دو بال غربی و شرقی و اچرخندی، بر روی بیابان‌های دشت کویر و بیابان‌های اطراف تهران (بیش از ۱۰ نات) شده است. در نتیجه بر خلاف الگوی قبل (الگوی پرفشار سیبری) که جریان باد در تمام لایه زیرین وردسپهر بسیار آرام بوده و در شرایط سکون قرار داشت. در این الگو باد حاشیه‌ای تهران از تندی زیادی برخوردار است. با توجه به دینامیک سامانه غالب بر روی منطقه دما در این الگو در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال در محدوده‌ای بین ۱۰ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. بنابراین سرما دلیلی برای

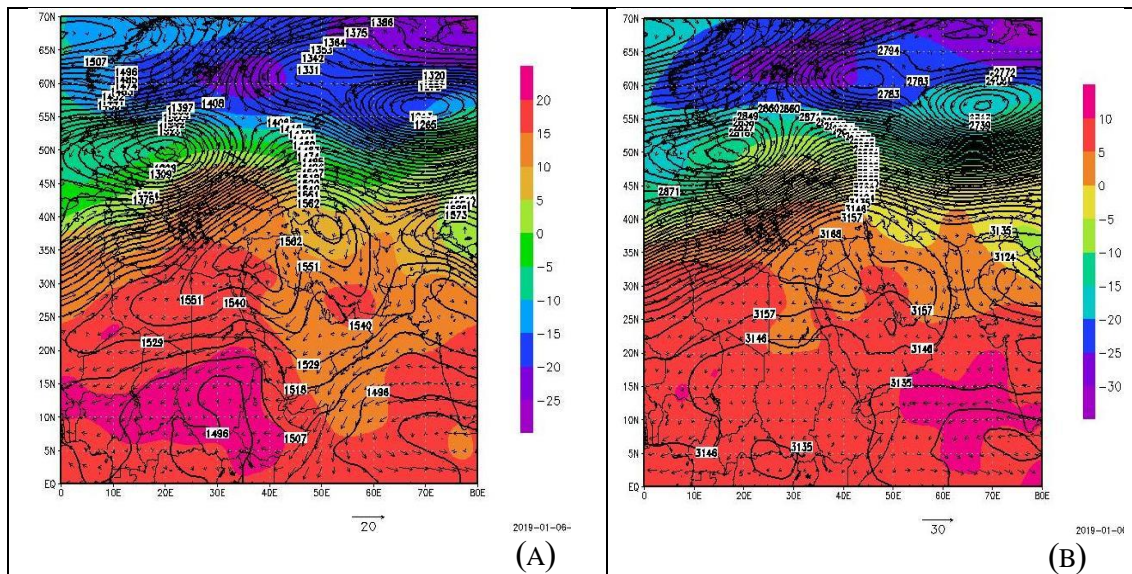
تشدید آلودگی هوا نیست. بلکه سامانه ماهیتی دینامیکی دارد. بر عکس جریان تند باد اطراف شهر، هوا بر روی شهر از تندی زیادی برخوردار نیست (شکل A6). در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال نیز که لایه نزدیک به سطح زمین و در ارتفاعی معادل ۸۰۰ تا ۹۰۰ متری و تقریباً در ارتفاعی معادل ارتفاع شهر تهران قرار دارد الگوی همدیدی حاکم شباهت زیادی به تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال دارد. مرکز و اچرخندی همچنان بر روی دریای مازندران قرار دارد و با تراز زیرین کاملاً منطبق است. زبانه جنوبی این و اچرخند علاوه بر ایران در گسترش جنوب سوی خود تمام شبه جزیره عربستان و بخش شرقی صحرا را در بر گرفته است. همانند لایه زیرین جریانات تند باد شمالی بر روی بیابانهای جنوبی تهران حاکمیت دارد. ولی بر روی تهران تندی باد بشدت کاهش یافته است (شکل B6).



شکل ۶- نقشه روزانه دما و فشار تراز ۱۰۰۰ (A) و ۹۲۵ (B) هکتوپاسکال در تاریخ ۲۹ نوامبر ۲۰۱۰

در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل A۷) که با لایه پر تلاطم مرزی نزدیک می شود همچنان الگوی غالب همان الگوی تراز زیرین وردسپهر پایینی می باشد. هسته مرکزی و اچرخند با جابجایی جنوب سو نسبت با ترازهای زیرین در جنوب دریای مازندران استقرار دارد. الگوی گسترش زبانه همچنان با گسترش جنوب سو تمام ایران و شبه جزیره عربستان را در بر گرفته است. در این تراز نیز با وجود این که تندی باد در حاشیه و اچرخند زیاد است ولی در اطراف هسته مرکزی و اچرخند به دلیل دینامیک حاکم در مرکز سامانه تندی باد بشدت تقلیل یافته و سکون نسبی حاکمیت دارد. این دینامیک پایداری را بر روی شهر تهران تشدید کرده و بر غلظت آلاینده ها افزوده است. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال هسته مرکزی و اچرخند با تمایل به عرض های جنوبی و با غلبه جریانات گرم جنوبی به داخل هسته و اچرخندی سبب تقویت ترمودینامیک و اچرخند شده است. هسته مرکزی و اچرخند در این تراز بر روی شمال شرق

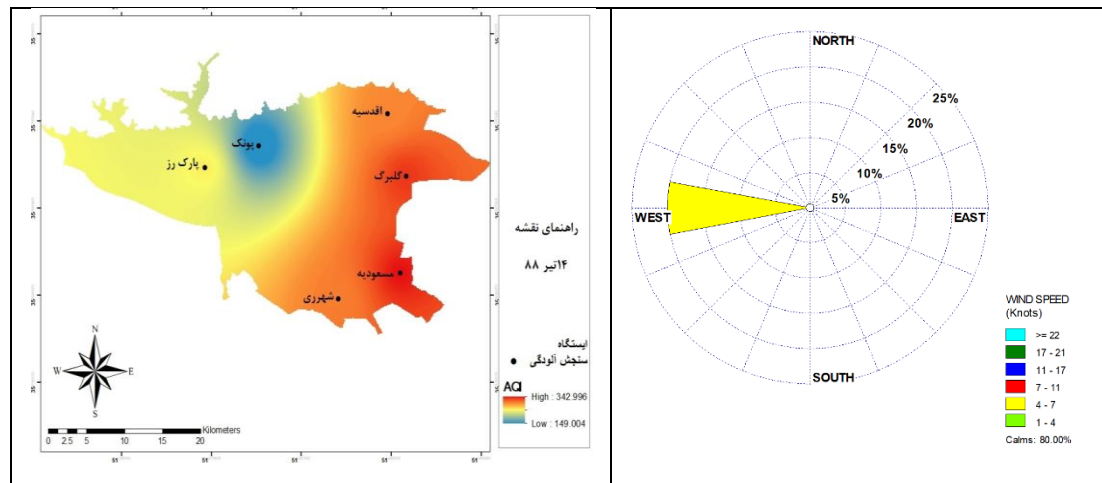
عربستان قرار دارد. دامنه شمالی این واچرخند تمام پهنه کشور ایران را در بر گرفته می‌گیرد. این شرایط دینامیکی سبب ایجاد جوی پایدار بر روی منطقه شده است، به طوری که تندی باد حاکم در ترازهای زیرین کاملاً از بین رفته و جوی ساکن بر کل پهنه کشور حاکمیت پیدا کرده است. دامنه دمایی بر روی شهر تهران به بالاتر از ۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است که این نشان دهنده وارونگی قوی در این تراز می‌باشد. بنابراین الگو هم‌دیدگی، ماهیتی دینامیکی دارد. پایداری حاکم در ضخامت زیادی از جو عامل اصلی این آلودگی در شهر تهران می‌باشد (شکل BV).



شکل ۷- نقشه روزانه دما و فشار تراز ۸۵۰ (A) و ۷۰۰ (B) هکتوپاسکال در تاریخ ۲۹ نوامبر ۲۰۱۰

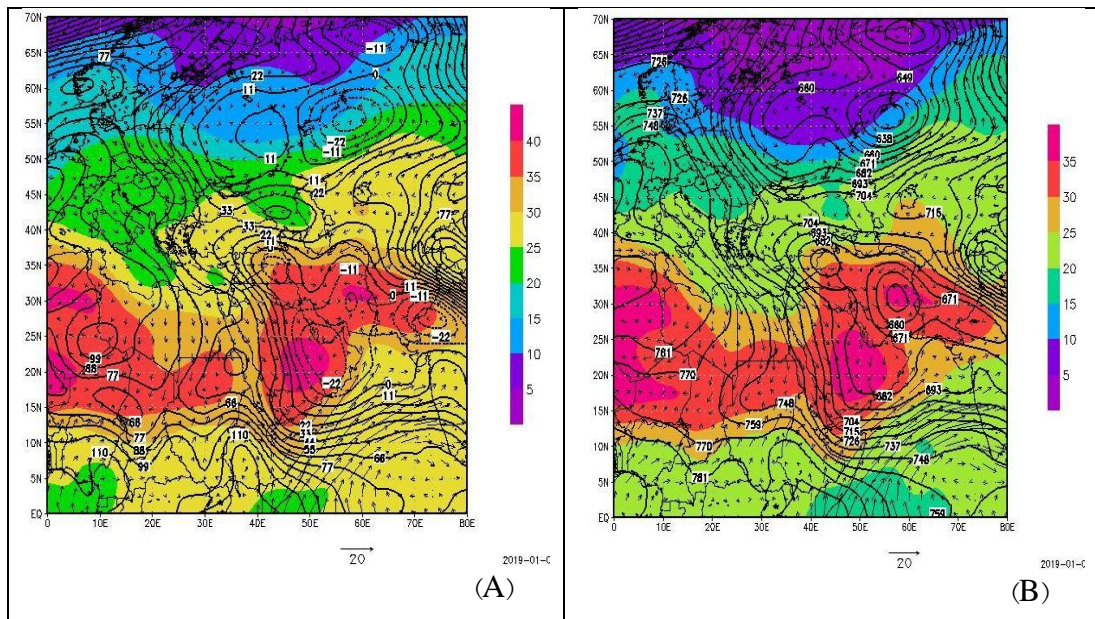
#### ۴.۲.۳. الگوی کم فشار پاکستان و ایران مرکزی (نمونه مطالعاتی ۵ جولای ۲۰۰۹)

این الگو نمونه الگوی سامانه‌هایی است که یک سامانه کم فشار و ناپایدار سبب آلودگی هوای شهر تهران شده است. شکل شماره (۸) نقشه پراکنش آلودگی شهر تهران و گلباد را برای روز ۵ جولای ۲۰۰۹ نشان می‌دهد. در این روز نیمه شرقی شهر تهران کاملاً در شرایط بحرانی و آلودگی خیلی شدید قرار داشته است به طوری که مقادیر آلاینده‌ها در بخش‌هایی از شرق و جنوب شرق تا بالای ۳۴۰ واحد نیز رسیده است. حتی در بخش شمال غرب و منطقه ۵ شهرداری تهران که کمترین مقادیر آلاینده‌ها را داشته‌اند مقادیر آلاینده‌ها بیش از ۱۴۹ واحد و یا در شرایط ناسالم برای تمام گروه‌های مردم قرار دارد. اشکال شماره (۹) و (۱۰) نقشه‌های ترکیبی جریان، دما و ارتفاع ژئوپتانسیل ترازهای زیرین و میانی جو را نشان می‌دهد.



شکل ۸- بررسی وضعیت ایستگاه‌های آلوده سنجی تهران و گلباد ایستگاه چیتگر در تاریخ ۵ جولای ۲۰۰۹ (۱۴ تیر ۱۳۸۸)

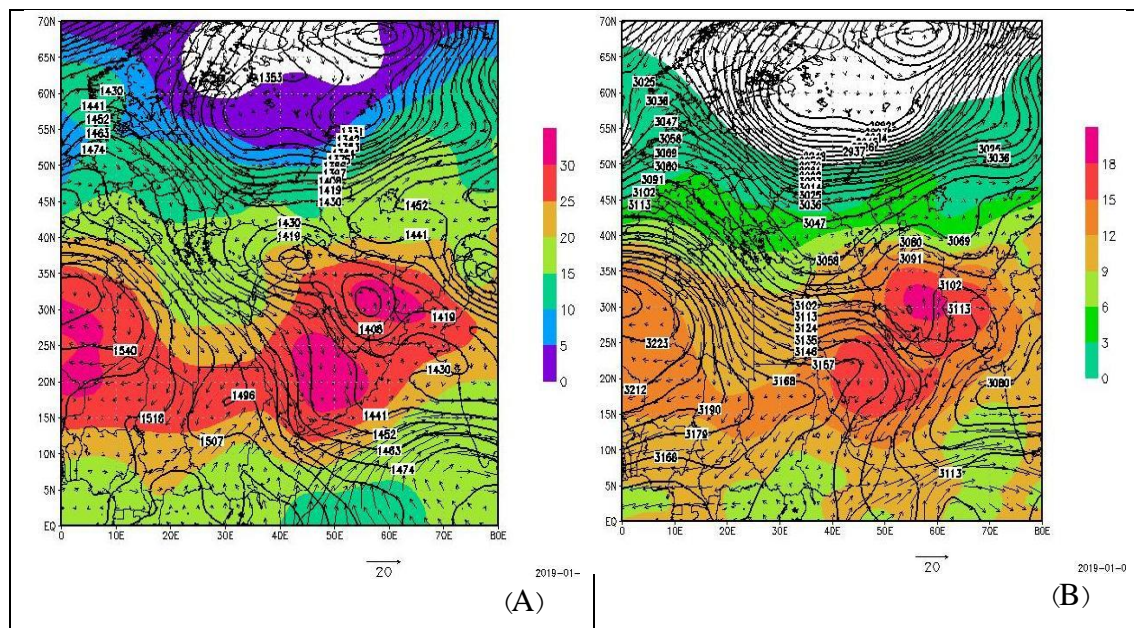
در این الگو از دو تا سه روز قبل از شروع آلودگی مرکز کم فشاری ترکیبی بر روی شبه جزیره عربستان و پاکستان تشکیل می‌شود که زبانه شمالی آن با امتداد جنوب شرقی - شمال غربی بر روی ایران مرکزی و در ادامه استان تهران گسترش دارد. این زبانه گرم با جریان گرمی همراه است که با دمای بیش از ۳۵ درجه سانتی‌گراد همراهی می‌شود. این فرارفت گرم شیو حرارتی و به تبع ناپایداری را بر روی منطقه بشدت افزایش داده است (شکل A۹). به طوری که سرعت باد در برخی ایستگاه‌های داخل و اطراف شهر تهران بشدت افزایش یافته است. سرعت باد در برخی ایستگاه‌ها همانند ایستگاه فرودگاه امام خمینی به بیش از ۱۱ نات نیز رسیده است (شکل ۸). در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال هسته کم فشار کاملاً به سمت شمال و بر روی دشت کویر منتقل شده است. با جابجایی هسته کم فشار به سمت دشت کویر شیو حرارتی و چینش قائم باد نیز قوی‌تر شده و بر شدت ناپایداری افزوده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود جریان باد در شرق تهران شرقی می‌باشد و سرعت باد در ساعاتی به بیش از ۱۰ تا ۱۵ نات نیز رسیده است. شهر تهران درست در حاشیه شمالی این چرخند حرارتی قرار دارد. هسته گرمایی این چرخند در جنوب دشت کویر استقرار دارد که با فرارفت گرم به دامنه‌های جنوبی البرز شیو حرارتی افزایش یافته و شدت جریان در شرق تهران تشدید شده و باعث انتقال ریزگرد از روی بیابان‌های اطراف بر روی شرق تهران شده است. به همین دلیل شدت آلودگی در شرق شهر تهران بشدت افزایش داشته و در نقاطی از آن به ۳۴۰ واحد نیز رسیده است (شکل B۹).



شکل ۹- نقشه روزانه دما و فشار تراز ۱۰۰۰ (A) و ۹۲۵ (B) هکتوپاسکال در تاریخ ۵ جولای ۲۰۰۹

در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل ۱۰A) نیز الگویی شبیه لایه زیرین حاکمیت دارد. مرکز چرخند همچنان در همان موقعیت چرخند لایه‌های زیرین قرار دارد. توسعه قائم چرخند تا این تراز بیانگر عمق ناپایداری چرخند و تشدید ناپایداری تا این ارتفاع از جو می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود دمای هسته گرمایی در این تراز نیز همچنان به بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این زبانه گرمایی همچنان بر روی شهر تهران گسترش دارد. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۱۰B). ناوه عمیقی در غرب ایران با راستای شمالی جنوبی تا شمال عربستان امتداد دارد. در این الگو کشور ایران در جلو ناوه قرار گرفته است. مزید بر آن مرکز کم ارتفاعی بر روی چرخند لایه زیرین قرار دارد که با هسته گرمی همراهی می‌شود. چینش قائم ایجاد شده در یک ضخامت مناسب از جو منجر به ایجاد ناپایداری قوی در لایه زیرین با سرعت باد نسبتاً زیاد گردیده است که عامل اصلی انتقال ذرات ریزگرد بر روی تهران و تشدید آلودگی گردیده است. سرعت باد در برخی از ایستگاه‌های شهر تهران و اطراف آن مانند ایستگاه فرودگاه امام خمینی تا بیش از ده نات نیز رسیده است. بیش‌ترین عناصر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های آلوده سنجی تهران در این نمونه مطالعاتی ذرات ریز گرد PM10 و MP2.5 بوده است.





شکل ۱۰- نقشه روزانه دما و فشار تراز ۸۵۰ (A) و ۷۰۰ (B) هکتوپاسکال در تاریخ ۵ جولای ۲۰۰۹

#### ۵. نتیجه‌گیری

در بررسی داده‌های آلودگی هوا در طول دوره آماری (۱۳۹۶-۱۳۸۶)، تعداد روزهای خطرناک در تمامی ایستگاه‌های آلوده سنجی انتخاب شده شهر تهران ۱۵۷ روز بوده است. آبان (نوامبر) ماه با ۲۸ بار و ماه آذر با ۲۶ بار تکرار بیش‌ترین روزهای خطرناک در دوره آماری این پژوهش را دارد. مقدار آلاینده‌های  $PM_{10}$ ،  $PM_{2.5}$  و  $NO_2$  نسبت به سایر آلاینده‌ها بالاترین میزان درصد آلودگی را داشته‌اند. بالاترین تعداد روزهای خطرناک در این دوره آماری در ایستگاه منطقه ۱۰ با ۷۴ روز بوده که غلظت آلاینده  $NO_2$  نسبت به سایر آلاینده‌ها بیش‌ترین میزان را داشته است، این امر می‌تواند ناشی از موقعیت جغرافیایی منطقه ۱۰ نیز باشد که بیش‌ترین میزان تردد وسایل نقلیه در این منطقه است. کمترین تعداد روزهای خطرناک در ایستگاه منطقه ۴ و دروس به ثبت رسیده است. به‌طور کلی عمده سامانه‌های هم‌مدیدی منجر به آلودگی در شهر تهران، از ۳ الگوی کلی پیروی می‌کنند. در الگوهای پرفشار سیبری در تراز زیرین و ردسپهر زبانه‌ای از بخش جنوبی و اچرخند سیبری با راستای شمالی - جنوبی از سمت شمال شرق بر روی ایران گسترش می‌یابد. با فرارفت این زبانه سرد در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال دمای آن به کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد بالغ می‌شود علاوه بر کاهش شدید دما بر روی نوار شمالی ایران، هوای پایداری بر روی شهر تهران حاکم می‌شود. در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال نوار شمالی کشور و شهر تهران در دامنه جنوبی البرز در مسیر زبانه پرفشار سیبری قرار دارد. در امتداد این زبانه ارتفاعی زبانه سردی بر روی منطقه گسترش می‌یابد که با فرارفت سرد عرض‌های جنب قطبی هوای پایداری را بر روی شهر تهران حاکم می‌کند. بنابراین در الگوهای پرفشار سیبری عامل اصلی پدید

آورنده شرایط آلودگی در شهر تهران فرارفت سرد همراه با یک پایداری حرارتی به وسیله پرفشار سیبری، و در لایه زیرین و میانی وردسپهر زبانه‌ای از واچرخند دینامیکی عربستان می‌باشد که شرایط همدیدی را برای ایجاد یک جو پایدار برای تجمع و تشدید آلودگی بر روی شهر تهران فراهم می‌کند. در الگوهای کم فشار پاکستان و ایران مرکزی از دو تا سه روز قبل از شروع آلودگی مرکز کم فشاری ترکیبی بر روی شبه‌جزیره عربستان و پاکستان شکل می‌گیرد و زبانه‌های آن تا استان تهران گسترش می‌یابد. این زبانه‌های گرم با فرارفت گرم شیو حرارتی و به تبع آن ناپایداری را بر روی منطقه افزایش می‌دهد. در ترازهای ۸۵۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال با جابجایی هسته کم فشار به سمت دشت کویر شیو حرارتی و چینش قائم باد نیز قوی‌تر شده و بر شدت ناپایداری می‌افزاید. هسته گرمایی این چرخند با فرارفت گرم به دامنه‌های جنوبی البرز شیو حرارتی افزایش داده و شدت جریان را در شرق تهران تشدید و باعث انتقال ریزگرد از روی بیابان‌های اطراف بر روی شرق تهران می‌شود. بنابراین در الگوهای کم فشار پاکستان و ایران مرکزی در لایه‌های زیرین وردسپهر تا سطوح میانی شاهد وجود جوی ناپایدار بر روی ایران هستیم. مرکز این سامانه‌ها در محدوده جنوب شرقی کشور، پاکستان و شبه‌جزیره عربستان واقع گردیده است. معمولاً در فصول گرم سال تشکیل می‌شوند و با گردش پا ساعت گرد چرخند در ترازهای زیرین و میانی جو و با ایجاد فرارفت گرم و شیو حرارتی باعث انتقال ریزگردها از بیابان اطراف بر روی شهر تهران می‌گردند. در الگوهای پرفشار عربستان بیش‌ترین تجمع آلاینده‌ها در نیمه شرقی تهران و به خصوص بخش جنوبی مشاهده می‌شود. پراارتفاع عربستان به عرض‌های شمالی جابه‌جا شده، نقش پایداری و نزول هوا را بر روی منطقه به وجود می‌آورد. این الگو ماهیت دینامیکی دارد و با پایداری حاکم در ضخامت زیادی از جو عامل اصلی آلودگی در شهر تهران می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد الگوهای گردشی تراز میانی جو و پرفشار و کم فشارهای تشکیل شده در سطح زمین، تأثیر بسزایی در آلودگی کلان‌شهر تهران ایفاء می‌کنند. پژوهشگران دیگری نیز که در این زمینه در مناطق مختلف ایران تحقیق کردند از جمله مطالعات (عطایی و هاشمی نسب، ۱۳۹۰)، (پناهی، ۱۳۹۵)، (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۲)، (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۳)، به نتایج مشابهی دست پیدا کردند.

#### کتابنامه

- بیات، رضا؛ ترکیان، ایوب؛ ۱۳۸۳. سهم بندی منابع آلودگی هوای شهر تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گرایش محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران، صص ۱-۳۲.
- بیدختی، علی‌اکبر؛ بنی‌هاشم، تاج‌الدین؛ ۱۳۸۳. لایه آمیخته شهری و آلودگی هوا، مجله محیط‌شناسی دانشگاه تهران، شماره ۲۰.
- پناهی، علی؛ ۱۳۹۵. بررسی الگوهای همدیدی بر اساس دوره‌های بحرانی آلودگی هوا در وارونگی دمایی شدید شهر تبریز، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۲۸، شماره ۴، صص ۶۰۷-۶۲۵.

چراغی، مهرداد؛ ۱۳۸۰. بررسی و مقایسه کیفیت هوا در شهرهای تهران و اصفهان در سالهای ۱۳۷۸ و ارائه راهکارهایی جهت بهبود آن، پایان نامه کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

حسین زاده، سید رضا؛ دوستان، رضا؛ حقیقت ضایری، مرضیه؛ حقیقت ضایری، مریم؛ ۱۳۹۲. بررسی الگوهای همدید مؤثر بر آلودگی هوا در کلان شهر مشهد، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه ای، دوره ۱۱، شماره ۲۱، صص ۱۰۱-۸۱.

دلجو، امیر هوشنگ؛ ۱۳۸۷. مطالعه و بررسی وارونگی دما و ناپایداری بر روی آلودگی هوای شهر تهران، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز.

ذوالفقاری، حسن؛ صحرایی، جلیل؛ شاقبادی، فریاد؛ جلیلیان، آذر؛ ۱۳۹۳. تحلیلی بر جنبه های سینوپتیکی - دینامیکی آلودگی هوا در کرمانشاه، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره نهم، صص ۷۵-۹۶.

زبردست، لعبت؛ صالحی، اسماعیل؛ مؤمنی، محمود رضا؛ افراسیابی، هادی؛ محمدامینی، مروارید؛ ۱۳۹۴. ارائه ی رهیافت سیستمی در برنامه ریزی محیط زیستی آلودگی هوا با استفاده از چهارچوب نیروی محرکه، فشار، وضعیت، اثر و پاسخ (DPSIR)، مطالعه موردی شهر تهران، محیط شناسی، شماره ۱، صص ۱۲۹-۱۴۱.

شرعی پور، بیدختی؛ ۱۳۸۴. بررسی آلودگی هوای شهر تهران و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی، همایش ملی آلودگی هوا.

شمسی پور، علی اکبر؛ حسین پور، زینب؛ نجیب زاده، فهیمه؛ ۱۳۹۱. مدل سازی ترمودینامیکی و واکاوی همدید آلودگی هوای شهر تهران (ذرات معلق  $PM_{10}$ )، پژوهش های اقلیم شناسی، سال سوم، شماره دوازدهم.

ضرابی، اصغر؛ محمدی، جمال؛ عبدالمهدی، علی اصغر؛ ۱۳۸۹. بررسی و ارزیابی منابع ثابت و متحرک در آلودگی هوای شهر اصفهان، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن جغرافیای ایران، سال هشتم، شماره ۲۶.

عطایی، هوشمند؛ هاشمی نسب، سادات؛ ۱۳۹۰. شناسایی و تجزیه و تحلیل الگوهای تراز میانی جو مؤثر در آلودگی هوای شهر اصفهان، فصلنامه پژوهش و برنامه ریزی شهری، دوره ۲، شماره ۴، صص ۹۷-۱۱۲.

غیاث الدین، منصور؛ ۱۳۸۵. آلودگی هوا، منابع، اثرات و کنترل، انتشارات دانشگاه تهران.

قسامی، طاهره؛ بیدختی، علی اکبر؛ صداقت کردار، عبدالله؛ صحرائیان، فاطمه؛ ۱۳۸۶. بررسی شرایط همدیدی حاکم در چند دوره بحرانی آلودگی هوای شهر تهران، مجله علوم تکنولوژی محیط زیست.

کرمانی، مجید؛ دولتی، محسن؛ لنگری زاده، شکاریان، رضا؛ اسدزاده، سیده نسترن؛ ۱۳۹۶. کیفیت بهداشتی هوای شهر بجنورد بر اساس شاخص AQI در سال ۹۳، مجله دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، دوره ۹، صص ۲۶۲-۲۵۳.

کیخسروی، قاسم؛ لشکری، حسن؛ ۱۳۹۳. تحلیل رابطه بین ضخامت و ارتفاع وارونگی و شدت آلودگی هوا در شهر تهران، علمی-پژوهشی جغرافیا و برنامه ریزی، سال ۱۸، شماره ۴۹، صص ۲۵۷-۲۳۱.

Bei, N., Li, G., Huang, R., Cao, J., Meng, N., Feng, T., Liu, S., Zhang, T., Zhang, Q., Molina, L. T., 2016. Typical synoptic situations and their impacts on the wintertime air pollution in the Guanzhong basin, China, *Journal Atmospheric Chemistry and Physics*, NO.0:1-34.

- Ccoyllo, S. O. R., Andrade, M. F., 2002. The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in São Paulo, Brazil, *Environmental Pollution*, 116, Issue 2, 257-263.
- Doherty, R. M., Wild, O., Shindell, D. T., Zeng, G., MacKenzie, I. A., Collins, W. J., Fiore, A. M., Stevenson, D. S., Dentener, F. J., Schultz, M. G., Hess, P., Derwent, R. G., Keating, T. J., 2013. Impacts of climate change on surface ozone and intercontinental ozone pollution: A multi-model study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 118, 1– 20, doi:10.1002/jgrd.50266.
- Egide, K., Sulaiman, F., Mabano, A., Lamek, N., Gabriel, H., 2018. Temperature and air pollution relationship during heatwaves in Birmingham, UK, *Sustainable Cities and Society*, Volume 43, Pages 111-120.
- Ellis, J., 2010. The effects of fossil-fuel subsidy reform: a review of modeling and empirical studies, Geneva: International Institute for Sustainable Development Global Subsidies Initiative.
- EPA., 2009. Air Quality Index (AQI) - A Guide to Air Quality and Your Health, U.S.A.
- Fang, Y., Mauzerall, D. L., Liu, J., Fiore, A. M., Horowitz, L. W., 2013. Impacts of 21st century climate change on global air pollution-related premature mortality.
- Guang-Xing, H., Chuck, W. F., Yua, C. L., Hong Deng, Q., 2013. The Influence of Synoptic Pattern and Atmospheric Boundary Layer on PM10 and Urban Heat Island, *Indoor Built Environ* 2013;22;5:796–807.
- HueiLin, N. and Yang, C., 2002. Use of Pollution Standard Index as the Indicator of Air Quality in Taiwan, Cloud and Aerosol Lab Dept, Atmospheric Sciences, National Central University Chung-Li, Taiwan. P.17.
- Makra, L., Mika, J., Bartzokas, A., Sumeghy, Z., 2007. Relationship between the Peczeley's large-scale weather types and air pollution levels in Szeged southern Hungary. *Fresenius Environmental Bulletin* Vol. 16, No. 6, pp. 660-673.