نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، شماره پیاپی ۱، بهار ۱۳۹۳
صفحات ۳٤-۱۷

# بررسی تغییرات شبانه‌روزی و فصلی باد و دمای هوا و آلاینده‌های CO و PM۱۰ در لایه‌ی سطحی جو شهر تهران

محمدعلی ثقفی، کارشناس ارشد هواشناسی، دانشگاه تهران*
عباسعلی علی‌اکبری‌بیدختی، استاد آب و هواشناسی دینامیک، دانشگاه تهران

دریافت مقاله:۱۳۹۲/۱۱/۱۶ پذیرش نهایی: ۱۳۹۳/۴/۲۷

## چکیده

براساس داده‌های بادسنج فوق صوتی سال ۲۰۰۷، بیشتر زمان‌ها تندی باد بین ۰/۵ m/s تا ۲ و دامنه چرخه سالانه آن کوچک است که شرایط حاد آلودگی هوا را در تهران فراهم می‌کند. همچنین CO و PM۱۰ تغییرات فصلی از خود نشان می‌دهند که به شرایط هواشناختی و منابع آلاینده‌ها وابسته است. بررسی چرخه سالانه CO و PM۱۰ نشان می‌دهد که غلظت CO در روزهای پاییز تا زمستان افزایش دارند. غلظت PM۱۰ در روزهای زمستان تا بهار مقادیر پایینی دارد. افزایش غلظت آلاینده‌ها در زمستان عمدتا ناشی از کمبود سامانه‌های همدیدی فعال و وارونگی دمایی سطحی، بر اساس پارامتر پایداری $N^2$، که در پاییز و زمستان نسبت به بهار و تابستان بیشتر است.) است. در چرخه سالانه براساس میانگین‌های شبانه‌روزی، ضریب همبستگی CO و PM۱۰، ۰/۴ و در زمستان، ۰/۷ است که نشانگر ارتباط قوی منابع این دو در این فصل است. در بهار، خودروها، گرد و غبار ناشی از سطح و یا از منابع دورتر، منشا PM۱۰ هستند، اما در پاییز، منابع عمدتاً خودروها و وسایل گرمایشی هستند. دو بیشینه در نمودار تغییرات CO در ابتدای صبح و شب رخ داده است که تقریباً با کمینه‌های تندی باد همزمان و وابسته به تغییرات فصلی نیز هستند. طی شب، شارش-های کوه‌دشت (سرد) و نشست هوا ناشی از سامانه‌های پرفشار سبب ایجاد وارونگی دما بر روی منطقه می‌شوند که افزایش غلظت آلاینده‌ها را در پی دارد. نمودارهای سه‌بعدی مؤلفه‌های افقی سرعت باد، دمای هوا و آلاینده‌ها نشان می‌دهند که مؤلفه نصف‌النهاری باد، نقش برجسته‌تری در انتقال CO که مستقل از دما است، به عهده دارد که با توجه به وضعیت توپوگرافی منطقه، می‌تواند نشانگر محلی بودن منابع آن باشد. در حالی که هردو مؤلفه سرعت باد در انتقال PM۱۰ نقش دارند. همچنین بیشینه‌های PM۱۰ در فصل سرد با باد کم همزمان و در فصل گرم مستقل از تندی باد هستند.

واژگان کلیدی: تغییرات روزانه، تغییرات فصلی، باد، دما، پایداری، CO، PM۱۰

* نویسنده مسئول masaghafi@ut.ac.ir

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

**مقدمه**

بررسی تغییرات شبانه‌روزی، روز به روز، فصلی و سالانه‌ی پارامترهای مختلف هواشناسی، به‌ویژه باد و دمای هوا، در لایه‌ی سطحی جو شهری کاربردهای گوناگونی دارد. برای مثال، آگاهی از چگونگی شکل‌گیری سامانه‌های محلی گردش باد و نحوه‌ی تغییرات دمای هوا طی شبانه‌روز و فصل سبب شناخت شرایط منجر به وقایع حاد آلودگی هوا می‌شود. بررسی تغییرات غلظت آلاینده‌های هوا، به‌ویژه منوکسید کربن (CO) و ذرات معلق با قطر آیرودینامیکی کمتر از ۱۰ میکرون (PM۱۰)، از دیدگاه تأثیرگذاری آن بر سلامت بشر و محیط زیست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شناسایی نحوه‌ی تغییرات شبانه‌روزی و فصلی پارامترهای هواشناسی ـ و عوامل مؤثر بر این تغییرات همچون ساختار توپوگرافی،[۱] جزیره‌های گرمایی شهری[۲] و سامانه‌های بزرگ-مقیاس و میان‌مقیاس که سبب ایجاد و تقویت پایداری هوا، وارونگی دما، باد کم و تغییرات میزان تابش خورشیدی می‌شوند ـ و آلاینده‌های هوا و میزان همبستگی آن‌ها، شناخت منابع، شرایط و چگونگی تولید و انتشار آلاینده‌ها و سهم هر یک از این منابع در آلودگی هوا امکان مدیریت آلودگی هوا را فراهم می‌کند (Tiwary and Colls, ۲۰۱۰). از این رو، با مروری بر کارهای پژوهشی گذشته، در اینجا به لزوم انجام این پژوهش پرداخته می‌شود.

افزایش غلظت PM۱۰ سبب کاهش دید می‌شود که هم از دیدگاه هواشناسی اهمیت دارد ـ بروز تصادف و سانحه هوایی ـ و هم از دیدگاه سلامتی ـ کاهش میدان دید به منزله‌ی تنشی روانی (Griffin, ۲۰۰۷). همچنین، این آلاینده سبب تیره کردن سطوح می‌شود. ذرات معلق جامد با مواد دیگر به جز مایعات واکنش نمی‌دهد. اندازه‌ی ذرات معلق در جو از ۰/۰۱ تا ۱۰۰ میکرون متغیر است. ذرات PM۱۰، که به کلیه‌ی ذرات معلق موجود در هوا با قطر آیرودینامیکی کمتر از ۱۰ میکرون اطلاق می‌شود، از عمده‌ترین ذرات آلاینده در شهرهای صنعتی و پرجمعیت است. بخش اعظم جرم ذرات PM۱۰ در منطقه‌ی تهران مربوط به گسیل ذرات گرد و غبار در مدهای درشت است (مشایخی و همکاران، ۱۳۸۹).

احتراق کامل و ناقص سوخت در وسایل نقلیه‌ای که از بنزین و گازوئیل برای سوخت استفاده می‌کنند ترکیب پیچیده‌ای از آلاینده‌های گازی و ذرات ایجاد می‌کند که بسیاری از آن ها برای سلامتی بشر مضر است. هنگام افزایش شدآمد، حرکت و ایست و در ابتدای سفر (۲ تا ۳ کیلومتر نخست)، که موتور خودرو سرد است، انتشار CO افزایش پیدا می‌کند.

آهنگ انتشار آلاینده‌ها ممکن است مستقیم با شرایط هواشناسی (مانند انتشار بر اثر تبخیر) یا غیرمستقیم (مانند افزایش استفاده از وسایل گرمایشی در ماه‌های سرد سال) مرتبط باشد (Oanh et al., ۲۰۰۵). معمولاً، غلظت آلاینده‌ها در محیط‌های شهری مستقیماً ناشی از افزایش انتشار آلاینده‌ها نیست، بلکه نتیجه‌ی شرایط هواشناسی نامطلوب است. این شرایط ممکن است توانایی جو در پخش آلاینده‌ها را کاهش دهد و آن‌ها را از منابع آلودگی به نواحی دیگر انتقال دهد یا ترکیبی از دو حالت فوق باشد (Lalas et al., ۱۹۸۰). همچنین، بررسی شرایط هواشناختی که موجب آلودگی هوا روی دره‌ی مرکزی پو (Po) شده بود نشان داد که در تمام دوره‌های آلودگی هوا، واچرخند[۳] حاکم بوده و در وردسپهر[۴] میانی، فرارفت[۵] هوای گرم وجود داشته است (Sandro and Pellegrini, ۲۰۰۴).

---

[۱] Topography
[۲] Urban heat island
[۳] Anticyclone
[۴] Troposphere
[۵] Advection

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

در کل، در شهر، دو سازوکار تهویه‌ی طبیعی هوا وجود دارد. نخست، شارش[۶] افقی باد که انتقال آلودگی به بیرون شهر را انجام می‌دهد. این شارش‌ها، آلاینده‌ها را از نقطه‌ای به نقطه دیگر جابه جا می‌کند و سبب پخش و رقیق‌سازی آلودگی هوا می‌شود. کاهش تندی باد (حالت سکون جو) اغلب با افزایش غلظت آلاینده‌ها همراه است، ولی جهت باد و ارتفاع سرچشمه‌های آلاینده‌ها نیز در این زمینه مؤثر هستند. سازوکار دوم، همرفت[۷] قائم است که انتقال آلودگی سطح زمین به سطوح بالای جو و آوردن هوای پاک از بالا به پایین را صورت می‌دهد. معمولاً، این دو سازوکار در هر شهر رخ می‌دهد، ولی در برخی روزها، شرایط همدیدی[۸] خاصی بر منطقه حاکم می‌شود که باعث توقف یک یا هر دو سازوکار تهویه می‌شود. توقف باد افقی هوای آرام خوانده شده و، معمولاً، توقف همرفت قائم نتیجه‌ی رخداد وارونگی دمایی است. زمانی که هردو سازوکار برای مدت طولانی (مثلاً بیش از ۳۶ ساعت) متوقف شوند، ایستایی رخ می‌دهد و آلاینده‌ها طی این دوره در هوای منطقه باقی می‌ماند و منجر به رخداد پدیده‌ی آلودگی خطرناک می‌شود. شارش‌های بالارو مواد آلاینده را به طرف بالا می‌برد و هوای پاک را جانشین می‌کند، در حالی که شارش نزولی هوا از حرکت آلاینده‌ها به سمت بالا جلوگیری می‌کند و، در نتیجه، آلاینده‌ها با غلظت زیاد در سطح زمین باقی می‌ماند.

در نواحی مرتفع (مثل تهران) غلظت اکسیژن کم است، در نتیجه عمل احتراق، به ویژه در وسایل نقلیه موتوری فرسوده‌تر، به‌خوبی صورت نمی‌گیرد. بنابراین، هرچه ارتفاع منطقه‌ای از سطح دریا بیشتر باشد، اثر آلودگی شدیدتری در آنجا می‌تواند رخ دهد. پژوهشی که در ایتالیا انجام شده، نشان داد که همبستگی بالایی بین غلظت سه آلاینده‌ی NO۲، CO و O۳ با میانگین شبانه‌روزی تندی باد، گردش گرمایی شبانه‌روزی (تفاوت دمای کمینه و بیشینه هوا در هر روز) و شاخص آلودگی روز گذشته وجود دارد. به این ترتیب، می‌توان با استخراج معادله همبستگی در فصل‌های مختلف، ابزاری برای پیش‌بینی روزهای با آلودگی بالا به دست آورد (Cogliani, ۲۰۰۱).

در زمینه‌ی، ارتباط عوامل هواشناختی با آلاینده‌های هوا پژوهش‌هایی انجام شده است که برای نمونه می‌توان به پدیده حاد آلودگی هوای تهران (بیدختی و شرعی‌پور، ۱۳۸۸)، که بر اثر شرایط خاص همدیدی در آذر ۱۳۸۶رخ داد و منجر به زوج و فرد کردن حرکت خودروها در تهران شد، و مطالعه‌ی موردی توزیع مکانی آلاینده‌ها در شهر تهران (قبادی، ۱۳۸۷) اشاره کرد.

در این تحقیق، به تفسیر تغییرات آلاینده های CO و PM۱۰ در هوای تهران به همراه نحوه‌ی وابستگی آن‌ها به باد و دمای نزدیک سطح، با تأکید بر تغییرات شبانه‌روزی و فصلی و علل آن‌ها، پرداخته می‌شود. در این پژوهش، از داده‌های بادسنج فوق صوتی، با تفکیک زمانی یک دقیقه برای بررسی تندی و جهت باد و دما و نحوه‌ی ارتباط آن‌ها با آلاینده‌های مذکور، استفاده می‌شود. همچنین، از دو روش میانگین‌گیری بردار باد حقیقی[۹] و بردار باد واحد[۱۰] برای میانگین‌گیری‌های لازم از داده‌های یک دقیقه‌ای به منظور محاسبه میانگین‌های ساعتی، با هدف مقایسه با داده‌های آلودگی هوای ساعتی، استفاده می‌شود. درباره‌ی نوع داده‌برداری دستگاه بادسنج فوق‌صوتی دوبعدی[۱۱] و ایستگاه سیار سنجش آلودگی هوا و، همچنین، درباره‌ی موقعیت جغرافیایی محل مطالعه و روش میانگین‌گیری داده‌ها در بخش بعد توضیح داده می‌شود. در بخش نتایج و بحث، بررسی و تفسیر نمودارهای مربوط به پارامترهای هواشناسی و آلاینده‌های هوا ارائه و، در پایان، نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

---

[۶] Flow
[۷] Convection
[۸] Synoptic
[۹] Real wind vector
[۱۰] Unit wind vector
[۱۱] Ultrasonic anemometer ۲d

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

## داده ها و روش‌ها

در این پژوهش، با استفاده از داده‌های بادسنج فوق صوتی دوبعدی (واقع در ارتفاع ۱۰ متری) و ایستگاه سیار سنجش آلودگی هوا، که در کنار ساختمان هواشناسی مؤسسه‌ی ژئوفیزیک دانشگاه تهران نصب شده است، نمودارهای شبانه‌روزی (نمونه‌ی فصل‌های مختلف و میانگین ساعتی در هر ماه)، میانگین شبانه‌روزی، میانگین ماهانه، گلباد[۱۲] سالانه و پراکندگی کمیت‌های مختلف (تندی و جهت باد، دمای هوا و آلاینده‌های CO و PM۱۰) بررسی می‌شود. برای بررسی ارتباط بین پارامترهای مختلف، ضریب همبستگی آن‌ها با یکدیگر محاسبه می‌شود. دستگاه بادسنج فوق صوتی در نیمه‌ی سال ۲۰۰۵ و ایستگاه سیار سنجش آلودگی هوا در ابتدای سال ۲۰۰۷ نصب شده است. برای بررسی پایداری جوی در لایه مرزی (با محاسبه پارامتر پایداری ($N^2$) از داده‌های جو بالای ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران در سال ۲۰۰۷ استفاده شده است.

دو روش متفاوت و مفید برای میانگین‌گیری باد وجود دارد: میانگین‌گیری برداری و نرده‌ای. هر یک از این دو روش را می‌توان، وابسته به نوع کاربرد، برای میانگین‌گیری تندی و جهت باد استفاده کرد. میانگین‌گیری برداری خود به دو روش انجام می‌گیرد: میانگین‌گیری بردار باد حقیقی، که در میانگین‌گیری جهت باد تندی باد هم اندازه گرفته می‌شود، و میانگین‌گیری بردار باد واحد، که در محاسبه‌ی میانگین جهت باد، تندی باد در نظر گرفته نمی‌شود. روش‌های برداری برای اندازه‌گیری و تحلیل انتشار آلاینده‌ها مناسب است. در روش میانگین‌گیری نرده‌ای[۱۳]، میانگین‌گیری تندی باد به تنهایی صورت می‌گیرد. این روش برای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی مفید است که در آن تندی باد برای تولید انرژی اهمیت دارد. در مطالعات پیشین، توجه خاصی به این مسئله نشده است.

دستگاه بادسنج فوق صوتی دوبعدی میانگین یک دقیقه‌ای داده‌های تندی و جهت باد و دمای مجازی هوا را ثبت می‌کند. این دستگاه میانگین برداری باد و جهت آن را محاسبه می‌کند، در حالی‌که بادسنج‌های دیگر، مانند بادسنج‌های فنجانی ـ تندی و جهت جداگانه اندازه‌گیری می‌شوند ـ میانگین نرده‌ای را محاسبه می‌کند. طی دوره‌هایی که تندی باد در حد متوسط تا زیاد است، تفاوت چشمگیری بین میانگین برداری و نرده‌ای نیست. هیچ‌گاه، مقادیر میانگین برداری از نرده‌ای فراتر نمی‌رود و در کل کمتر از آن است. تفاوت‌های بزرگ زمانی رخ می‌دهند که واریانس جهت باد بزرگ است و، معمولاً، هم‌زمان با تندی باد کمتر از ۲ متر بر ثانیه رخ می‌دهند. در این مطالعه، ضمن اینکه برای نخستین بار از داده‌های یک دقیقه‌ای دستگاه بادسنج فوق صوتی دوبعدی در مطالعات آلودگی هوا استفاده شده، در محاسبات نیز از میانگین‌گیری برداری استفاده شده است. ایستگاه سیار سنجش آلودگی هوا شامل حساسه‌هایی[۱۴] برای اندازه‌گیری آلاینده‌های مختلف هوا همچون CO و PM۱۰ است که این داده‌ها در رأس هر ساعت ثبت می‌شوند. داده‌های جو بالای ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران با استفاده از رادیوسوند[۱۵] در هر ۲۴ ساعت دوبار و در ساعت‌های ۰۰:۰۰ و ۱۲:۰۰ به وقت گرینویچ تهیه می‌شوند.

از نظر موقعیت جغرافیایی ساختمان هواشناسی در طول ۵۱ درجه و ۲۳ دقیقه و عرض ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه و در ارتفاع ۱۴۱۸/۶ متری از سطح تراز دریا قرار دارد. مقدار میانگین باد در سال ۲۰۰۷، ۱/۶ متر بر ثانیه محاسبه شده است. در این سال،

---

[۱۲] Wind rose
[۱۳] Scalar
[۱۴] Sensor
[۱۵] Radiosonde

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

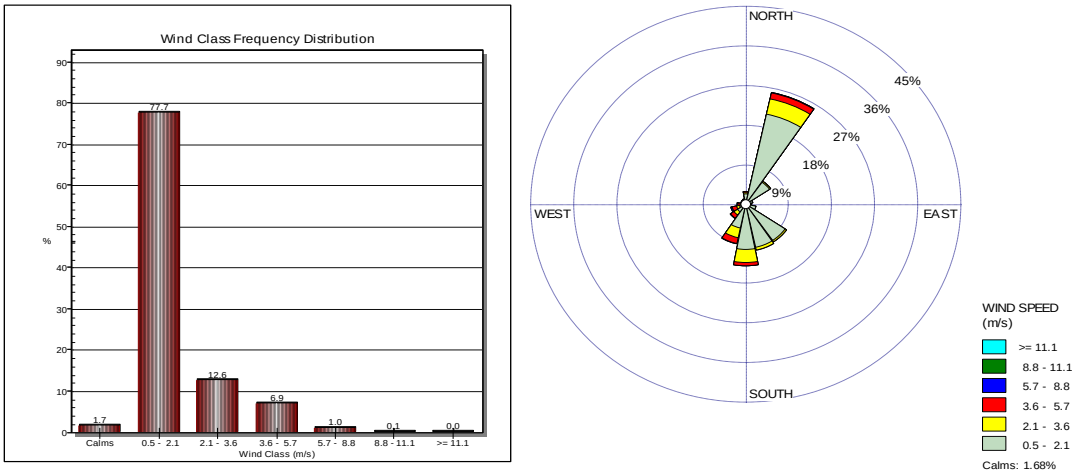
تندی بیشینه‌ی باد ۱۶/۵ متر بر ثانیه بوده که در ساعت ۱۸:۲۴ روز۲۶ اردیبهشت ۱۳۸۶(۲۰۰۷/۵/۱۳) رخ داده که احتمالاً، در ارتباط با عبور جبهه‌های جستناک توفان‌های همرفتی[۱۶] است (بیدختی و همکاران، ۱۳۸۳). ساختمان هواشناسی مؤسسه‌ی ژئوفیزیک دانشگاه تهران هم در مکانی محصور به چهار بزرگراه (چمران، همت، حکیم و شیخ بهایی) قرار گرفته است که از مناطق آلوده تهران محسوب می‌شود.

## شرح و تفسیرنتایج

### الف)توزیع سالانه باد و ارتباط باد با دما

شکل ۱ نمودار گلباد (با استفاده از ۱۶ قطاع ۲۲/۵ درجه‌ای) و توزیع فراوانی رده‌های باد را در سال ۲۰۰۷ نشان می‌دهد. مقدار درصدی که روی قطاع‌ها ثبت شده، درصد زمانی را نشان می‌دهد که باد در آن جهت می‌وزد. مقدار تندی باد کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه باد آرام (calm) فرض شده است. شکل ۱ـ الف نیز بادهای شمال شرق و جنوب ناشی از سامانه‌ی بادهای محلی ناشی از کوهستان منطقه را نشان می‌دهد. شکل ۱ـ ب نشان می‌دهد، که بیشتر زمان‌ها، بادها دارای تندی بین ۰/۵ تا ۲ متر برثانیه هستند که در برخی کتاب‌های هواشناسی این محدوده باد آرام در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، کلاً در طول سال، همواره یکی از شرایط زمینه‌ساز انباشت آلاینده‌ها در تهران فراهم است.

بررسی فصلی نمودارهای گلباد و توزیع فراوانی رده‌های باد به تفکیک روز و شب (برای نشان دادن بهتر سامانه‌ی بادهای محلی) به بادهای روز (از ساعت ۸ صبح تا ۶ عصر) و بادهای شب (از ۶ عصر تا ۸ صبح) تفکیک شدند. در فصل‌های مختلف (به‌ترتیب زمستان، بهار، تابستان و پاییز) نشان می‌دهد که الگوی مشترک این شکل‌ها، بادهای کوه‌دشت[۱۷] هنگام روز و دشت‌کوه[۱۸] هنگام شب است (شکل‌ها آورده نشده است.). بادهای جنوب تا جنوب غرب از بادهای شمال شرق و این بادها نیز از بادهای جنوب شرق قوی‌تر هستند. احتمالاً برهم‌کنش سامانه‌های همدیدی با سامانه بادهای محلی (اثر توپوگرافی و جزیره‌های گرمایی) سبب این شدت و ضعف است (Banata and Cotton, ۱۹۸۱).




**شکل ۱. الف) نمودار گلباد و ب) نمودار توزیع فراوانی رده‌های باد در سال ۲۰۰۷ (داده‌های میانگین یک دقیقه‌ای).**

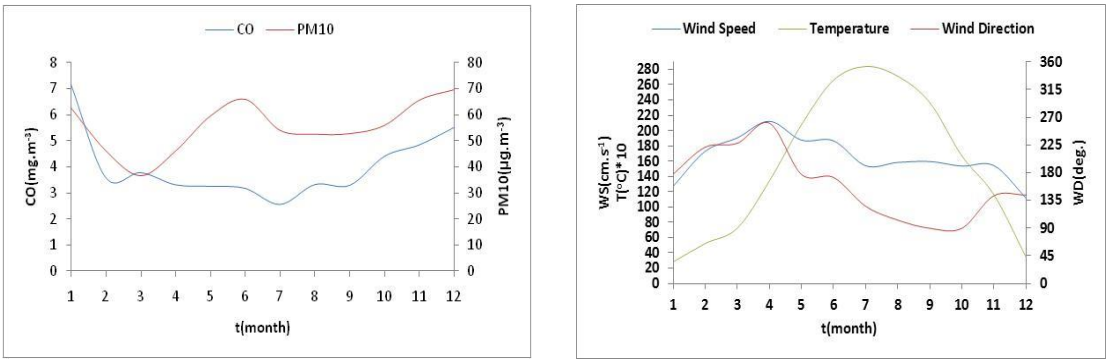
[۱۶] Thunderstorm gust front
[۱۷] Katabatic
[۱۸] Anabatic

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

نمودارهای پراکندگی تندی و جهت باد و دمای هوا در سال ۲۰۰۷ و فصل‌های مختلف (در اینجا آورده نشده است) نیـز تقریبـاً دارای الگویی مشابه بوده و نشانگر حاکمیت سامانه محلی کوه‌دشت و دشت‌کوه هستند.

**ب)چرخه‌ی سالانه پارامترهای هواشناختی و آلودگی هوا براساس میانگین‌های ماهانه**

شکل ۲ چرخه‌ی سالانه تندی و جهت باد، دمای هوا، CO و PM۱۰ را بر اساس میانگین‌های ماهانه در سال ۲۰۰۷ نشان مـی-دهد. در شکل ۲ـ الف، در نمودار تندی باد، بیشینه از میانه‌ی زمستان تـا انتهـای بهـار رخ داده اسـت. در کـل، دامنـه‌ی چرخـه‌ی سالانه‌ی باد ماهانه کوچک است (اختلاف بیشینه و کمینه حدود یک متر بر ثانیه است). اثر توپوگرافی منطقه می‌تواند سبب کـم-شدن تندی باد شود (Yu et al. ۲۰۰۸). همچنین، تندی و جهت باد، در زمستان و بهار بیشتر با سامانه‌های بزرگ‌مقیاس و میـان-مقیاس (که سبب وزش بادهای شدیدتر می‌شود) و در فصل‌های دیگر، بیشتر با سامانه‌های محلی کنترل می‌شود. جهـت بـاد، طـی فصل‌های زمستان و بهار، شارش‌های جنوبی تا غربی و طی تابستان و پاییز، شارش‌های جنوبی تا شرقی را نشان مـی‌دهـد. بیشـینه دمای هوا در فصل تابستان و کمینه آن در فصل زمستان رخ داده است که مطابق الگوی تغییرات تـابش خورشـیدی اسـت و نقـش مؤثری بر رشد لایه‌ی آمیخته[۱۹] جو شهری دارد. همبستگی نسبتاً ضعیفی بین تغییرات ماهانه تندی باد و دمای هوا مشاهده مـی-شود که در مطالعه‌ی ویژگی‌های باد در پورتوریکو نیز گزارش شده اسـت (Altaii and Farrugia, ۲۰۰۳). شـکل ۲ــب تغییـرات CO و PM۱۰ را نشان می‌دهد.




(ب) (الف)

**شکل ۲. چرخه‌ی سالانه، الف) تندی و جهت باد و دما و ب) CO و PM۱۰ بر اساس میانگین‌های ماهانه در سال ۲۰۰۷.**

در کل، از میانه‌ی زمستان تا میانه‌ی بهار، هر دو آلاینده به‌دلیل بارندگی و وزش بـاد، مقـادیر کمینـه دارنـد. احتمـالاً، بیشـینه PM۱۰ در ماه ژون مربوط به توفان‌های گرد و غبار است. در پی آن، سطح غلظت آلاینده‌ها تا اندازه‌ای کاهش داشته است (به‌ویـژه کمینه‌ی ماه ژولای مربوط به CO که احتمالاً ناشی از عمیق‌تر شدن لایـه‌ی آمیختـه و کـاهش شـدآمد[۲۰] اسـت) و دوبـاره از مـاه سپتامبر، به‌تدریج، روندی افزایشی پیدا کرده است. بالاتر بودن غلظت آلاینده‌ها در پاییز و زمستان می‌تواند ناشی از دلایل مختلفـی همچون پایداری هوا[۲۱]، استفاده از وسایل گرمایشی و افزایش آلاینده CO بر اثر احتراق ناقص در خودروها در فصل‌های سرد باشـد. در شهرهای شمالی کشور تایوان، غلظت بیشینه‌ی آلاینده PM۱۰ در ماه مارچ تا می رخ می‌دهد که به پدیده‌ی توفان‌هـای گـرد و

[۱۹] Mixed layer
[۲۰] Traffic
[۲۱] Atmospheric stability

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

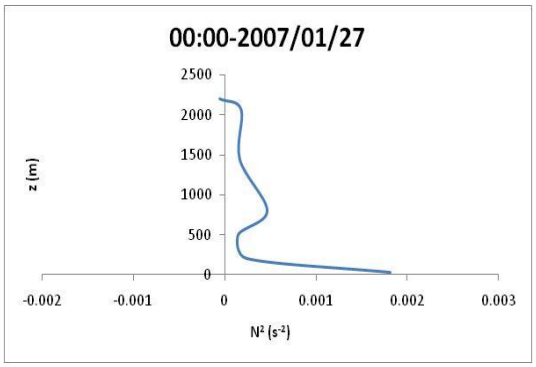
غبار نسبت داده شده است. در شهرهای جنوبی تایوان، بیشترین غلظت این آلاینده در زمستان رخ می‌دهد که بخشی از آن احتمال دارد ناشی از کمبود بارش و، همچنین، دمای پایین باشد (Yang, ۲۰۰۲). همچنین، بالاتر بودن نسبی غلظت آلاینده‌ها در پاییز و زمستان ممکن است ناشی از استفاده وسایل گرمایشی و افزایش آلاینده CO بر اثر احتراق ناقص در خودروها در فصل‌های سرد سال باشد. در شهرهای بزرگ اروپا، در زمستان اغلب افزایش غلظت آلاینده‌ها مشاهده می‌شود که به علت افزایش گسیل از وسایل گرمایشی و شرایط نامطلوب برای پخش آلودگی در لایه‌ی سطحی جو است (Mikhailuta et al., ۲۰۰۹).

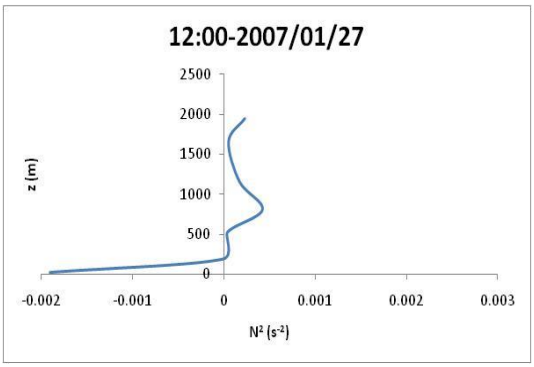
### ج) بررسی پایداری جو در فصل‌های مختلف سال و ارتباط آن با بیشینه‌های آلودگی هوا

در این بخش، با استفاده از داده‌های جو بالای ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران، برای بررسی پایداری جو در روزهای نمونه، از نظر بیشینه‌بودن غلظت آلاینده‌ها در فصل‌های مختلف سال ۲۰۰۷، پارامتر پایداری ـ توان دوم بسامد شناوری[۲۲] ($N^2$) ـ محاسبه و نیمرخ قائم آن رسم شد. N، بسامد شناوری (Buoyancy frequency) است که از رابطه

$$N^2 = \frac{g}{\overline{\theta}_r}\frac{d\overline{\theta}}{dz} \qquad (۱)$$

به‌دست می‌آید که در آن g شتاب گرانی[۲۳] و $\overline{\theta}_r$ دمای پتانسیل[۲۴] مرجع است. همان‌طور که شکل ۳ـالف (نمونه زمستان) نشان می‌دهد مقدار $N^2$ در ساعت ۰۰:۰۰UTC در ارتفاعات مختلف مثبت است که نشان‌دهنده‌ی پایداری هوا است. این کمیت در ساعت ۱۲:۰۰UTC به جز در لایه‌ی نزدیک سطح (که دارای مقداری منفی و نشانه‌ی ناپایداری هوا[۲۵] است) در ارتفاعات دیگر مقادیری مثبت دارد (مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده‌ی جو خنثی[۲۶] است). با توجه به شکل ۳ـب (نمونه‌ی بهار) $N^2$ در لایه‌ی نزدیک سطح، مقادیر منفی (ناپایداری در لایه سطحی) و در بالای آن، مقادیری نزدیک به صفر دارد که نشان‌دهنده‌ی جوی خنثی در ارتفاعات مختلف است. شکل ۳ـپ (نمونه‌ی تابستان)، در ساعت ۰۰:۰۰UTC تا ارتفاع یک کیلومتری پایداری جو و پس از آن جوی خنثی را نشان می‌دهد. گفتنی است که در این روز، نسبتاً، گام داده‌برداری (تفکیک قائم) بیشتر از روزهای پیش بوده است. شکل ۳ـت (نمونه‌ی پاییز) در ساعت ۰۰:۰۰UTC، جوی نسبتاً پایدار را نشان می‌دهد.

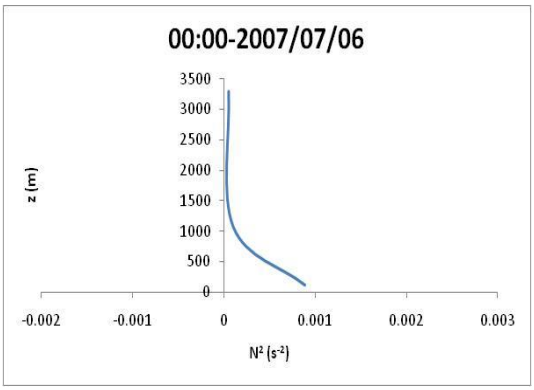


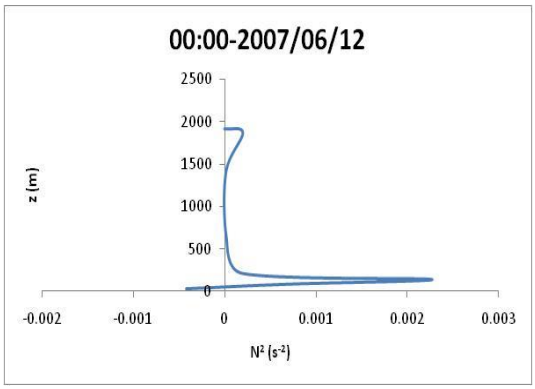




[۲۲] Buoyancy frequency
[۲۳] gravity acceleration
[۲۴] Potential temperature
[۲۵] Atmospheric instability
[۲۶] Neutral atmosphere

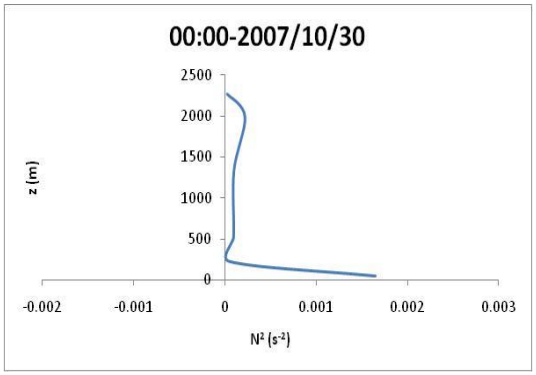
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

(الف)




(پ) (ب)




(ت)

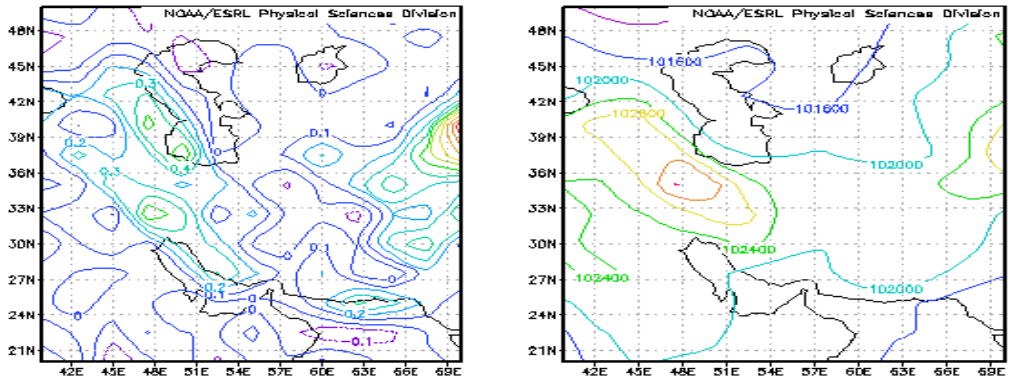
**شکل ۳. نیمرخ قائم توان دوم بسامد شناوری، الف) در تاریخ ۲۰۰۷/۱/۲۷، ساعت UTC ۰۰:۰۰ (سمت راست)، ساعت UTC ۱۲:۰۰ (سمت چپ)، ب) در تاریخ ۲۰۰۷/۶/۱۲، ساعت UTC ۰۰:۰۰، پ) در تاریخ ۲۰۰۷/۷/۶، ساعت UTC ۰۰:۰۰، ت) در تاریخ ۲۰۰۷/۱۰/۳۰، ساعت UTC ۰۰:۰۰.**

در کل، مقادیر پارامتر پایداری مثبت در پاییز و زمستان از بهار و تابستان بیشتر است که این امر ممکن است دلیلی برای افزایش غلظت آلاینده‌ها و، همچنین، تعداد روزهای با آلودگی بیشتر در پاییز و زمستان باشد. شکل ۴الف نقشه‌ی پربندی هم-فشار[۲۷] تراز سطح زمین را در ساعت UTC۰۰:۰۰ و در تاریخ ۲۷ ژانویه‌ی سال ۲۰۰۷ را نشان می‌دهد. چنانکه از این شکل پیداست، سامانه پرفشار[۲۸] با مرکز ۱۰۳۶۰۰ پاسکال بر روی ایران حاکم شده است. همچنین، در شکل ۴ب، که بیانگر نقشه پربندی سرعت قائم[۲۹] در ساعت و تاریخ یاد شده است، پربند مرکزی با مقدار ۰/۵ پاسکال بر ثانیه بر روی ایران قرار دارد. حضور سامانه‌ی پرفشار و متناسب با آن، مقادیر سرعت قائم مثبت، نشان‌دهنده‌ی نشست هوا[۳۰] بر روی منطقه است. در دو فصل پاییز و زمستان، در لایه‌های بالاتر (شکل ۳الف و ت)، بیشینه‌ی دومی برای پارامتر پایداری مشاهده می‌شود که با توجه به شکل ۴الف و

[۲۷] Isobaric contour map
[۲۸] High pressure
[۲۹] Vertical velocity contour map
[۳۰] Air subsidence

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

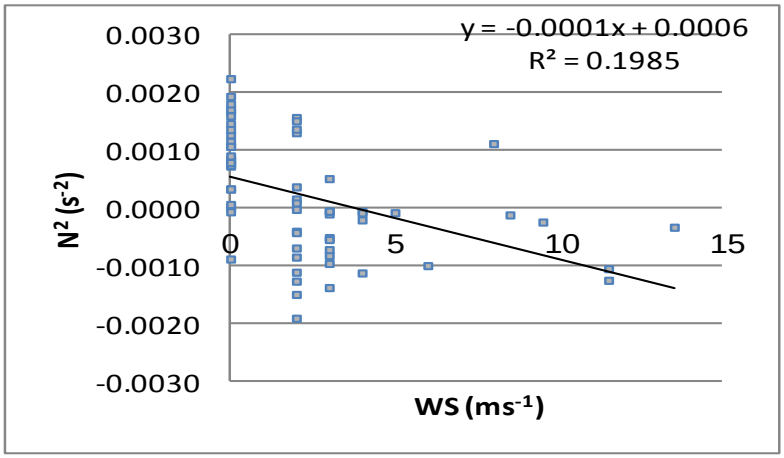
ب، احتمالاً با نشست هوا ناشی از سامانه‌های همدیدی پرفشار مرتبط است. نشست هوا سبب از بین رفتن حرکت‌های بالارو در جو شده و منجر به عدم آمیختگی و سبب افزایش غلظت آلاینده‌های جوی می‌شود.




(ب) (الف)

**شکل ۴. الف) نقشه پربندی همفشار تراز سطح زمین (با یکای Pascal) در ساعت ۰۰:۰۰ در تاریخ ۲۷ ژانویه سال ۲۰۰۷، ب) نقشه‌ی پربندی سرعت قائم (با یکای Pascal/s ) در همان ساعت و تاریخ.**

ارتباط پارامتر پایداری با تندی باد سطحی با استفاده از داده‌های جو بالای ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران در ماه ژانویه‌ی سال ۲۰۰۷، در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، هرچه تندی باد (حرکت افقی هوا) کاهش پیدا می‌کند، مقدار پارامتر پایداری افزایش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی عکس این دو کمیت با یکدیگر است. بنابراین، در منطقه تهران، که در بیشتر سال مقدار تندی باد کم است، این رابطه می‌تواند یکی از دلایل افزایش غلظت آلاینده‌ها باشد.




**شکل ۵. نمودار پراکندگی پایداری جو ($N^2$) و تندی باد (ws) در ژانویه‌ی ۲۰۰۷.**

### د) ارتباط بین امواج تراز ۲۰۰ میلی بار با وقایع حاد آلودگی هوا

گاهی انتشار امواج بلند[۳۱] در جو پیرامون زمین باعث می‌شود که دو یا چند موج جریان باد تند عرض‌های میانی[۳۲] را دو یا چند شاخه کند و، بنابراین، قسمت میانی (بین دو شاخه) را از باد چشمگیر محروم کند. در این مناطق، جریان حالت مسدود شده[۳۳] به

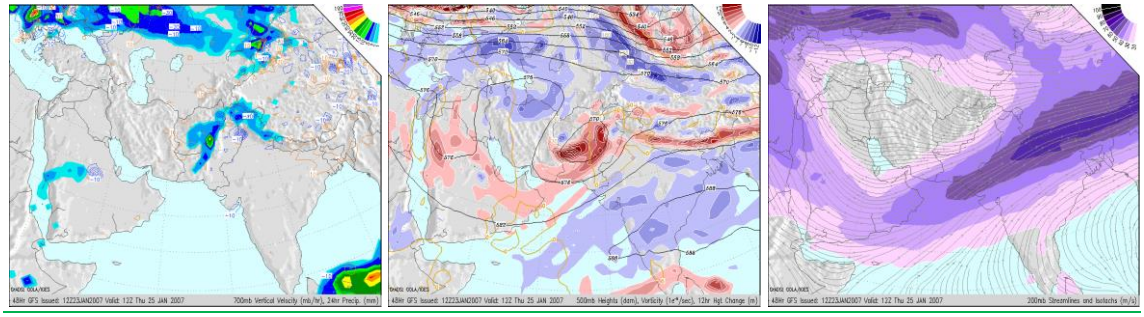
[۳۱] Long wave

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

خود می‌گیرد. برای مثال، شکل ۶ـالف نشان‌دهنده‌ی الگوی باد جو در سطوح بالا برای روز ۲۵ ژانویه ۲۰۰۷ (۶ بهمن ۱۳۸۵) در منطقه‌ی آسیای میانه است. هم‌زمان در نقشه‌ی ۵۰۰ میلی بار (شکل ۶ـب)، پشته[۳۴] بر منطقه حاکم است. همچنین، در نقشه‌ی ۷۰۰ میلی بار (شکل ۶-پ) هیچ نوع پوشش ابری در منطقه دیده نمی‌شود. همه‌ی این موارد تأییدی بر سکون هوا در این منطقه است.

در این حالت، جریان جت عرض‌های میانی دو شاخه شده و ایران بین این دو شاخه حرکت هوای بسیار کمی پیدا می‌کند و اوضاع حاد آلودگی هوا در تهران به وجود می‌آید. در این شرایط غلظت آلاینده‌ها، به‌ویژه ذرات معلق، به شکل خطرناکی افزایش پیدا می‌کند. از طرفی، شرایط زمستانی و تابش کم خورشیدی قسمت زیرین جو نزدیک زمین (لایه‌ی مرزی[۳۵] یا لایه‌ی آمیخته جو) را نیز دچار حالت پایدارتر می‌کند (عمق لایه‌ی آمیخته در زمستان از تابستان کمتر است) و، در نتیجه، آلاینده‌ها تنها در لایه‌ای نازک از هوا مخلوط می‌شوند. بنابراین، پتانسیل آلودگی (قابلیت افزایش آلودگی هوا) در لایه‌ی زیرین جو ممکن است شدیداً (اگر کنترل چشمه‌های آلاینده، که بیشتر ناشی از شدآمد است، صورت نگیرد) افزایش پیدا کند.

از طرفی، وجود کوه‌های مرتفع در اطراف شهرهای بزرگی مثل تهران تخلیه هوای آلوده از محیط شهر، به‌ویژه در شرایط باد کم و لایه‌ی آمیخته‌ی کم ارتفاع (در زمستان)، را با مشکل روبرو می‌کند. البته، شرایط اقلیمی تهران چنان است که شرایط هواشناختی این منطقه در طول سال بیشتر مشابه شرایط پرفشار است و از نظر همدیدی (در ارتفاع‌های بالاتر از یک تا دو کیلومتر) در شرایط کم‌بادی قرار دارد. بنابراین، احتمال حاد شدن شرایط هواشناختی زیاد است که می‌تواند غلظت آلاینده‌ها را تشدید کند. یکی از آن شرایط منشعب شدن نوار جت بادهای[۳۶] جو آزاد است که در شکل ۶ به آن اشاره شد. این وضعیت باعث می‌شود باد حتی در جو بالا بسیار کم شود و، اصطلاحاً، می‌توان گفت که موتور حرکت جو در این منطقه تقریباً از کار می‌افتد.



(الف) (ب) (پ)

**شکل ۶. نقشه‌های سطوح مختلف فشاری در ساعت ۱۲ گرینویچ در تاریخ ۲۵-۱-۲۰۰۷، الف) نقشه سطح ۲۰۰ میلی بار، ب) نقشه‌ی سطح ۵۰۰ میلی بار، پ)نقشه سطح ۷۰۰ میلی بار (برگرفته از سایت www.wxmaps.org).**

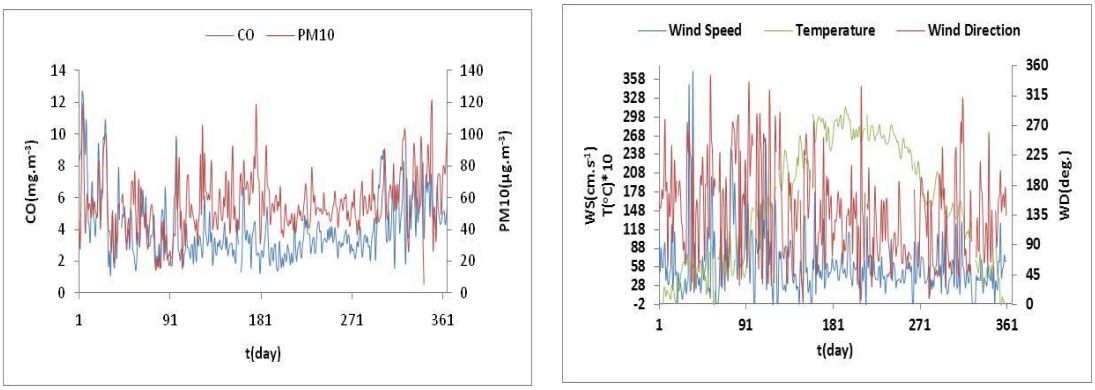
### ه)چرخه‌ی سالانه‌ی پارامترهای هواشناختی و آلودگی هوا براساس میانگین شبانه‌روزی (تغییرات روز به روز)

---

[۳۲] Mid-latitude
[۳۳] Blocking
[۳۴] Ridge
[۳۵] Boundary layer
[۳۶] Jetstream

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

شکل ۷ چرخه سالانه‌ی میانگین شبانه‌روزی تندی و جهت باد دمای هوا، CO و PM۱۰، را در سال ۲۰۰۷ نشان مـی‌دهـد. در طول سال، بادهای سطحی مطابق تغییرات فصلی الگوهای فشار جوی و دینامیک لایه‌ی مرزی تغییر می‌کند. با وجود گرادیان فشار بزرگ‌مقیاس قوی‌تر در زمستان، وارونگی[۳۷] دما طی فصل سرد سال ممکـن اسـت سـبب شـود کـه بادهـای سـطحی تحـت تـأثیر واداشت[۳۸] بزرگ‌مقیاس قرار نگیرد. این امر به روشنی نقش ویژه‌ی پایداری جوی را در بادهای سطحی فصل زمستان نشان می‌دهـد (Achberger et al. ۲۰۰۶). گفتنی است که وارونگی دما با چند عامل امکان‌پذیر است که شامل نشست هوا، جبهه‌هـای جـوی، تابش و فرارفت می‌شود. در این زمینه، نشان داده شد که در شهر میلان، کشور ایتالیا، توپوگرافی می‌تواند نقش مهمی در گسـترش وارونگی دمایی در زمستان داشته باشد (Finardi et al., ۲۰۰۲). این درحالی است‌که سامانه‌ای پرفشار ممکن اسـت سـبب ایجـاد وارونگی دمایی شود. فرایندهای میان‌مقیاس و خردمقیاس، میدان باد محلی را نزدیک سطح زمین تعیین می‌کننـد. گـردش بـاد در سطوح پایین ممکن است از مقیاس همدیدی جدا شده و با اثرهای محلی و میان‌مقیاس هدایت شود. باید توجه داشت که وارونگـی دمایی که طی شب رخ می‌دهد قاعدتاً ناشی از سرمایش تابشی سطح زمین[۳۹] و انتقال گرمای تلاطمی[۴۰] پایین‌سو صورت مـی‌گیـرد. غلظت آلاینده CO از میانه‌ی پاییز تا میانه‌ی زمستان افزایش یافته که پایداری هوا، افزایش شدآمد و استفاده از وسـایل گرمایشـی ممکن است دلایل این افزایش باشند. غلظت PM۱۰ در میانه‌ی فصل زمستان تا ابتدای بهار (احتمالاً به‌دلیل بارش و وزش بـاد)، از مقادیر پایینی برخوردار است. در فصل‌های زمستان و پاییز، تغییرات CO و PM۱۰ همبستگی بهتری از خود نشان می‌دهند.




(ب) (الف)

**شکل ۷. نمودار چرخه‌ی سالانه تغییرات میانگین شبانه‌روزی، الف) تندی (برحسب سانتی‌متر بر ثانیه) و جهت باد و دمای هوا و ب) CO و PM۱۰ در سال ۲۰۰۷.**

### و) چرخه‌ی شبانه‌روزی پارامترهای هواشناختی و آلودگی هوا براساس میانگین ساعتی

شکل ۸ چرخه‌ی شبانه‌روزی میانگین ساعتی تندی و جهت باد، دمای هوا و آلاینده‌های CO و PM۱۰ را در فصل‌های مختلـف سال نشان می‌دهد. در شکل ۸-الف، دو کمینه: یکی، در ابتدای روز (حدود ساعت ۷ تا ۸ صبح) و دیگری، در هنگام غـروب (حـدود ساعت ۱۸ تا ۲۰) مشاهده می‌شود. بیشینه‌ی تندی باد نیز حدود ساعت ۱۴ تا ۱۶ رخ داده است. معمولاً، بیشینه‌ی تندی باد هنگام

[۳۷] Invesion
[۳۸] Forcing
[۳۹] Earth surface radiative cooling
[۴۰] Turbulance heat transfer

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

عصر رخ می‌دهد که هم‌زمان با بیشینه‌ی آمیختگی تلاطمی لایه‌ی مرزی جو است. در این هنگام، لایه آمیخته بیشترین عمق را پیدا می‌کند و، به دلیل حرکات همرفتی، با جو آزاد بیش‌ترین درگیری را دارد. بنابراین، جهت باد تا اندازه‌ی زیادی از جهت باد همدیدی پیروی می‌کند. در بهار، رخداد توفان‌های تندری هنگام عصر باعث افزایش تندی باد می‌شود (برای مثال، بیدختی و همکاران، ۱۳۸۳). رخداد جت سطوح پایین نیز ممکن است سبب ایجاد بیشینه باد شود.

شکل ۸-ب نیز چرخه‌ی شبانه‌روزی جهت باد را نشان می‌دهد. تحقیقات نشان داده است که تندی و جهت باد، در مناطق با اثرهای توپوگرافی چشمگیر، تغییرات شبانه‌روزی بزرگی به همراه دارد (Yu et al., ۲۰۰۸). همان‌طور که مشاهده می‌شود، شارش-ها در طول روز، جنوبی (حدود ۱۸۰ درجه) و هنگام شب، شمالی شرقی هستند که مطابق با وضعیت توپوگرافی منطقه است. در زمستان، به هنگام حضور سامانه‌های همدیدی، جهت باد بیشتر جنوب‌غربی می‌شود که تأثیر آن در میانگین ساعتی طی این فصل در این شکل دیده می‌شود. همچنین، در بهار، به دلیل رخداد توفان‌های تندری (معمولاً در هنگام غروب، حدود ساعت ۱۹)، جهت باد جنوب‌غربی شده است. سامانه‌های محلی باد بیشتر ناشی از اثر تابش خورشید و ایجاد اختلاف دمای دشت و کوه و ایجاد شارش دشت‌کوه (هنگام روز) و کوه‌دشت (هنگام شب) است (تقریباً با چرخهی شبانه‌روزی) که با سامانه‌های محلی دیگر، همچون شارش‌های ناشی از جزیره‌های گرمایی شهری، برهمکنش کرده و الگوی باد را در منطقه پیچیده می‌کند ( سلطان‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰). معمولاً، شارش‌های ناشی از شیب دارای تندی باد بین یک تا پنج متر بر ثانیه است و به هنگام گذار صبح و غروب، با دوره‌هایی با تندی باد کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه همراه است. چنین شرایطی سبب کاهش پخش و انتقال آلاینده‌ها می‌شود و مسائل حاد آلودگی هوا را در پی دارد (Monti et al., ۲۰۰۲).

معمولاً، مناطق شهری چند درجه از محیط اطراف گرم‌تر است که پیامد ظرفیت گرمایی بالای بتن و آسفالت و عامل‌های دیگری همچون وسایل نقلیه در این نواحی است. این موارد سبب ایجاد گرما شده و، در نتیجه، هوایی که به سمت ناحیه شهری می‌وزد، ضمن افزایش دما، بالاروی نیز می‌کند. این مسئله سبب ایجاد گردش جدیدی همانند یک یاخته‌ی همرفتی بر روی منطقه‌ی شهری می‌شود که محدود شدن آن در راستای قائم در نتیجه وارونگی دمایی است (محمد مرادزاده، ۱۳۷۸). با تغییر وارونگی‌های دمایی مرتفع شبانه[۴۱] با دوره‌ی زمانی طولانی‌تر (به‌ویژه با توجه به توپوگرافی منطقه) ممکن است محدوده‌ی این گردش تغییر کند و، بنابراین، بر غلظت آلاینده‌ها مؤثر باشد.

شکل ۸-پ چرخه‌ی شبانه‌روزی میانگین ساعتی دمای هوا در فصل‌های مختلف سال ۲۰۰۷ را نشان می‌دهد. کمینه‌ی دمای هوا بین ساعت‌های ۶ تا ۷ صبح و بیشینه‌ی دمای هوا بین ساعت‌های ۱۵ تا ۱۶ رخ داده است. این امر گذار[۴۲] لایه‌ی مرزی از شرایط پایدار (شب) به ناپایدار (روز) را نشان می‌دهد که وابسته به میزان آفتاب‌گیری سطح زمین (زمان غروب و طلوع) در همه‌ی فصل‌ها است (Naithani and Dutta, ۱۹۹۸). در شکل‌های ۸-الف و پ، همبستگی قوی بین تغییرات تندی باد و دمای هوا مشاهده می‌شود که نشان از وضعیت درگیری لایه‌ی مرزی جو با جو آزاد[۴۳] دارد (درگیری روزانه بیشتر با باد تندتر همراه است و در شب، به‌دلیل پایداری نزدیک سطح، این درگیری کمتر است). این رفتار در نمودارهای چرخه‌ی شبانه‌روزی دمای هوا که در آن کمینه‌ی دمای هوا در ابتدای صبح و بیشینه‌ی دمای هوا هنگام عصر رخ می‌دهد نیز مشهود است.

---

[۴۱] Nocturnal elevated temperature inversion

[۴۲] Transition

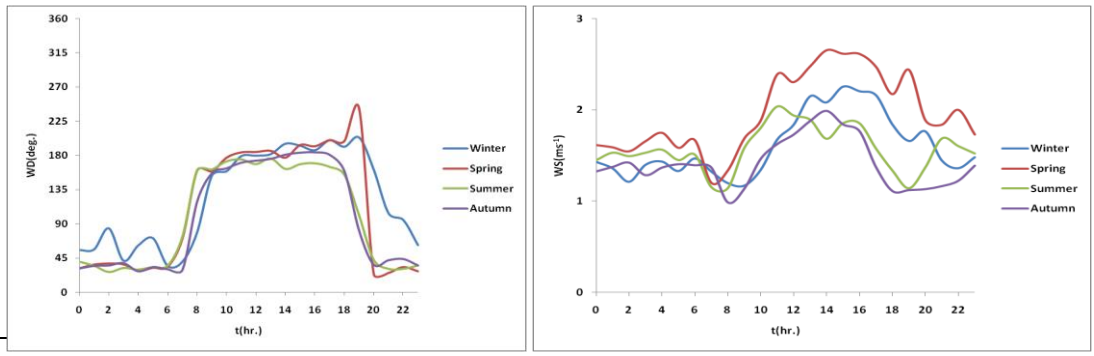
[۴۳] Free atmosphere

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

شکل ۸-ت چرخه‌ی شبانه‌روزی CO را نشان می‌دهد. در این شکل دو بیشینه مشاهده می‌شود که یکی، در ابتدای صبح (بین ساعت ۷ تا ۹) و دیگری، در ابتدای شب (بین ساعت ۲۱ تا ۲۳) رخ داده است که تقریباً با کمینه‌های تندی باد هم‌زمان است. بیشینه‌ی هنگام صبح می‌تواند ناشی از افزایش شدآمد خودروها در آغاز روز و وجود وارونگی دمایی سطحی شدید همراه با کم‌بودن عمق لایه‌ی آمیخته باشد (بیدختی و بنی هاشم، ۱۳۷۶). طی روز، بر اثر رشد لایه‌ی آمیخته، غلظت آلاینده‌ها کاهش پیدا می‌کند. بیشینه‌ی ابتدای شب هم می‌تواند به‌دلایل انباشت آلاینده‌ها در طول روز، روند کاهش عمق لایه‌ی مرزی، تشکیل لایه‌ی وارونگی دمایی سطحی پس از غروب و افزایش شدآمد خودروها در این هنگام باشد (قبادی ۱۳۸۷؛ Zhao et al., ۲۰۰۹). در این شکل نیز، تغییر دامنه و فاز در فصل‌های مختلف سال مشاهده می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رود، بالاترین بیشینه مربوط به پاییز و زمستان است که به علت شرایط پایداری جو، وارونگی دما، باد کم، استفاده از وسایل گرمایشی (به‌ویژه طی شب که غلظت این آلاینده بالاتر است) و احتراق ناقص خودروها (در فصل‌های سرد) غلظت آلاینده‌ها به مرز هشدار می‌رسد که ممکن است با تعطیلی مدارس و ادارات و اجرای طرح‌های خاص (مانند زوج و فرد کردن شدآمد خودروها) در شهر تهران همراه شود.

شکل ۸-ث چرخه‌ی شبانه‌روزی PM۱۰ را نشان می‌دهد. تغییرات این آلاینده مقادیر بیشینه به هنگام عصر و شب را نشان می‌دهد (قبادی، ۱۳۸۷) که با کمینه‌ای در ابتدای روز (حدود ساعت ۷ تا ۸ صبح) همراه است. هنگام روز، تغییرات این کمیت نوسان زیادی دارد، ولی در شب، طی ماه‌های مختلف سال، تغییرات شبانه‌روزی یک‌نواخت است. در پاییز، میزان غلظت این آلاینده بیشتر است که ممکن است با پایداری هوا، استفاده از وسایل گرمایشی، خودروها و یا چشمه‌های فرامنطقه‌ای مرتبط باشد. همچنین، در بهار، افزایش غلظت این آلاینده می‌تواند ناشی از خودروها، گرده‌افشانی گیاهان (گرده با قطر ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون) و نیز ناشی از چشمه‌های فرامنطقه‌ای باشد. در کل، ذرات معلق دیگری همچون دود سیگار (با قطر ۰/۰۱ تا ۱ میکرون)، گرد و غبار سیمان ناشی از ساخت و سازها (۰/۰۵ تا ۱۰۰ میکرون)، هسته احتراق[۴۴] (۰/۰۰۱ تا ۰/۱ میکرون) ناشی از خودروها نیز در افزایش غلظت PM۱۰ مؤثر است. تغییرات شبانه‌روزی ذرات معلق، شاهدی بر تأثیر منابع محلی بر غلظت آن‌هاست. بخش عمده‌ای از این چرخه‌ی شبانه‌روزی مربوط به سامانه‌ی بادهای محلی کوه‌دشت و دشت‌کوه است. همچنین، طی شب، شارش‌های کوه‌دشت (سرد) سبب ایجاد یک لایه وارونگی دما بر روی منطقه می‌شوند که افزایش غلظت آلاینده‌ها را در پی خواهد داشت.

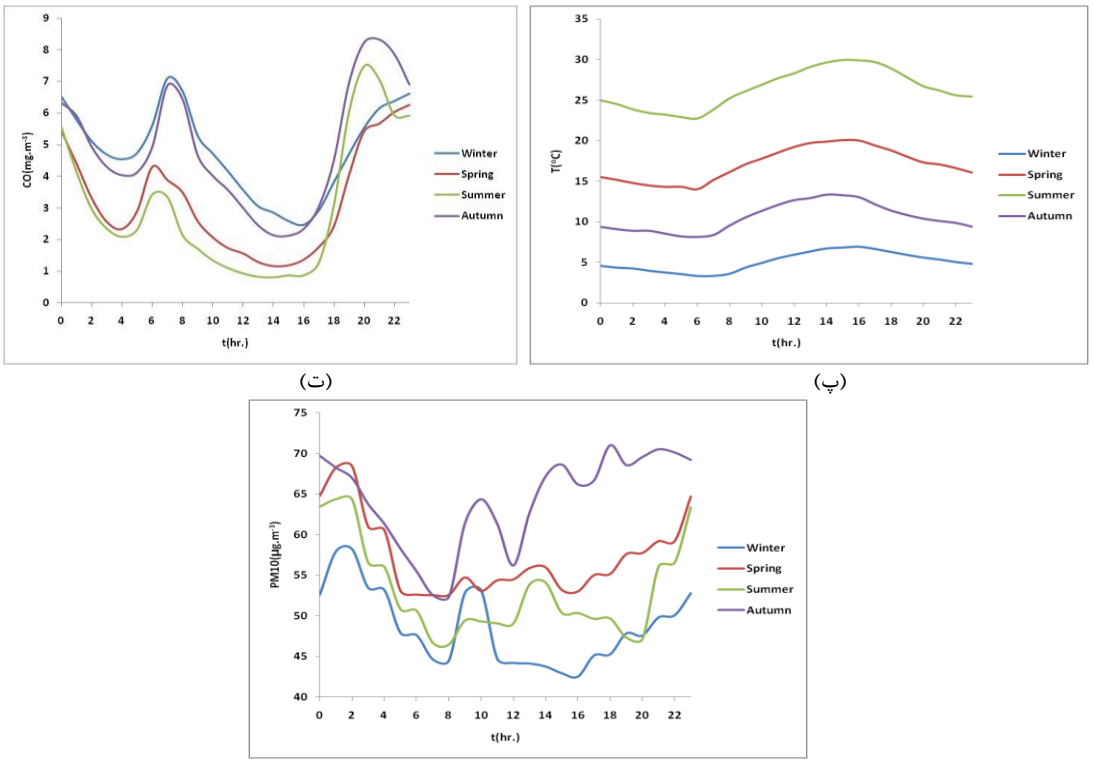
پژوهش در کشور چین، نشان می‌دهد که تغییرات فصلی و شبانه‌روزی غلظت PM۲.۵ (ذرات معلق با قطر آیرودینامیکی کمتر از ۲/۵ میکرون)، در منطقه شهری اغلب به‌دلیل تغییرپذیری فصلی و شبانه‌روزی لایه‌ی مرزی و سرچشمه‌های گسیل به‌وجود می‌آید. باد هم می‌تواند به صورت متغییر مهم در جابه جایی آلاینده‌ها مؤثر باشد (Zhao et al., ۲۰۰۹). در این باره، باید توجه داشت که PM۲.۵ جزئی از PM۱۰ را تشکیل می‌دهد.




[۴۴] combustion nuclei

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

(الف) (ب)




(ت) (پ)

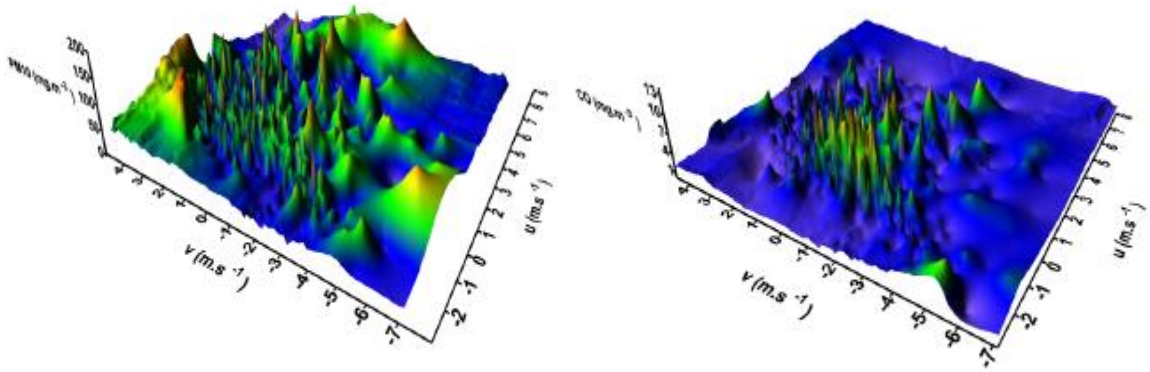
(ث)

**شکل ۸. چرخه‌ی شبانه‌روزی میانگین ساعتی، الف) تندی باد، ب) جهت باد، پ) دما، ت) CO و ث) PM۱۰ در فصل‌های مختلف سال ۲۰۰۷.**

### ز) ارتباط پارامترهای هواشناختی با آلاینده‌ها

شکل ۹ نمودار سه‌بعدی مؤلفه‌های افقی سرعت باد و آلاینده‌های CO و PM۱۰ را با استفاده از داده‌های متوسط یک‌ساعته نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود، در کل، بیشینه‌های غلظت آلاینده CO با مقادیر کم مؤلفه‌های سرعت باد هم‌زمان است. همچنین، نقش مؤلفه نصف‌النهاری سرعت باد در انتقال و جابه‌جایی این آلاینده بیشتر است که با توجه به وضعیت توپوگرافی منطقه ممکن است نشان‌دهنده‌ی محلی بودن منابع این آلاینده باشد. شکل ۹-ب نشان می‌دهد که هر دو مؤلفه سرعت باد در بیشینه‌های PM۱۰ مؤثر بوده است. در نتیجه، می‌توان گفت که این آلاینده از منابع دور و نزدیک سرچشمه می‌گیرد. در تندی‌های کم، مقادیر بیشینه این آلاینده ممکن است بیان‌کننده‌ی انتقال این آلاینده از منابع محلی و مقادیر زیاد آن، در تندی‌های زیاد باد، بیان‌کننده‌ی انتقال این آلاینده از منابع دور باشد.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

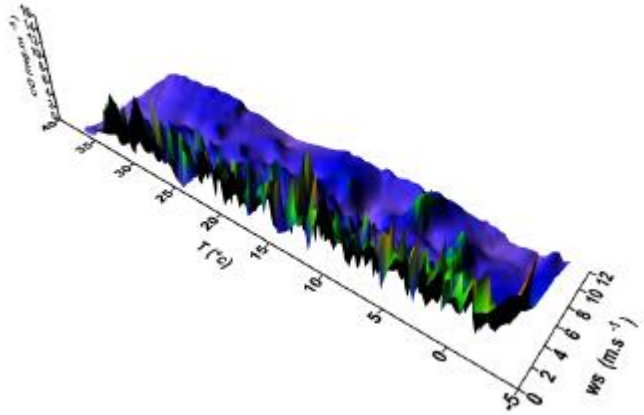



(ب) (الف)

**شکل ۹. نمودار سه‌بعدی، الف) مؤلفه‌های افقی سرعت باد و CO، ب) مؤلفه‌های افقی سرعت باد و PM۱۰ در سال ۲۰۰۷.**

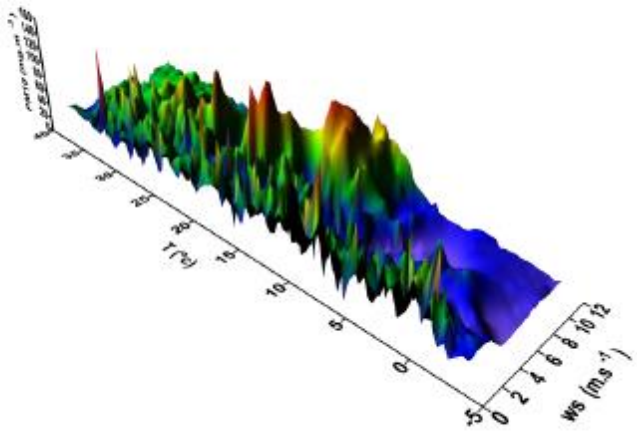
شکل ۱۰ نمودار سه‌بعدی تندی باد، دمای هوا و آلاینده‌ها (با استفاده از داده‌های متوسط یک‌ساعته) را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۰-الف مشاهده می‌شود، در کل بیشینه‌های غلظت آلاینده CO مستقل از دما و با تندی کم باد هم‌زمان است. همچنین، بیشینه‌های آلاینده PM۱۰ (شکل ۱۰-ب) در فصل سرد با تندی کم باد و در فصل گرم مستقل از تندی باد هم‌زمان است. می‌توان گفت در فصل گرم، بیشینه‌های هم‌زمان با تندی زیاد باد نشان‌دهنده‌ی دور بودن منابع این آلاینده و بیشینه‌های هم‌زمان با تندی کم باد نشان‌دهنده‌ی محلی بودن منابع آن است.

بررسی ارتباط بین غلظت جوی ازن و ذرات معلق در شش شهر آمریکا نشان داده است که میزان غلظت CO پیش‌نشان‌دهنده‌ی با اهمیتی برای غلظت PM۱۰ است و غلظت این دو آلاینده همبستگی فراوانی با هم دارد. گاهی، در رابطه‌ی همبستگیِ بین دو آلاینده، در صورتی که برای شرایط همانند به‌دست آمده باشند، می‌توان برای تخمین یکی از دیگری استفاده کرد( Rizzo et al., ۲۰۰۲).




(الف)

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]




(ب)

**شکل ۱۰. نمودار سه‌بعدی، الف) تندی باد، دمای هوا و CO، ب) تندی باد، دمای هوا و PM۱۰ در سال ۲۰۰۷.**

## نتیجه‌گیری

در طی سال، در بیشتر زمان‌ها، دامنه تغییرات تندی باد بین ۰/۵ تا ۲ متر برثانیه است و یکی از دلایل آن ممکن است اثر توپوگرافی باشد که سبب فراهم شدن یکی از شرایط زمینه‌ساز انباشت آلاینده‌ها در تهران می‌شود. در کل، هر دو آلاینده‌ی CO و PM۱۰ از میانه‌ی زمستان تا میانه‌ی بهار مقادیر کمینه دارند. در تابستان، به‌دلیل رشد بیشتر لایه‌ی آمیخته‌ی جو، میانگین سطح غلظت آلاینده‌ها تا اندازه‌ای کاهش پیدا می‌کند و دوباره از پاییز به‌تدریج روندی افزایشی می‌یابد. غلظت آلاینده‌ی CO در پاییز و زمستان افزایش یافته و غلظت PM۱۰ در زمستان و ابتدای بهار مقادیر پایینی دارد. از نیمه زمستان تا نیمه بهار بارندگی و وزش باد ممکن است سبب کاهش چشمگیر غلظت آلاینده‌ها شود. احتمالاً در تابستان، غلظت CO به‌دلیل افزایش میزان تابش خورشیدی و دما و، در نتیجه، عمق لایه‌ی مرزی و کاهش شدآمد پایین می‌آید و از پاییز تا نیمه‌ی زمستان، پایداری هوا ناشی از وارونگی دما و سامانه‌های پرفشار، استفاده از وسایل گرمایشی و احتراق ناقص خودروها ممکن است عامل افزایش غلظت آلاینده‌ها باشند.

در کل، مقادیر پارامتر پایداری ($N^2$) در پاییز و زمستان از بهار و تابستان بیشتر است که این موضوع احتمال دارد دلیلی برای افزایش غلظت آلاینده‌ها و، همچنین، تعداد روزهای با آلودگی بیشتر در فصل‌های پاییز و زمستان باشد. همچنینف در این دو فصل در لایه‌های بالاتر، بیشینه‌ی دومی برای پارامتر پایداری مشاهده می‌شود که احتمالاً با نشست هوا ناشی از سامانه‌های همدیدی پرفشار مرتبط است.

در چرخه‌ی سالانه، براساس میانگین‌های شبانه‌روزی، ضریب همبستگی CO و PM۱۰ ۰/۴ است. این ضریب در زمستان، ۰/۷ است که نشان‌دهنده‌ی ارتباط قوی بین غلظت این دو آلاینده‌ی در این فصل است و غلظت آلاینده‌ای ممکن است پیش‌نشان-

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

دهنده‌ی خوبی برای غلظت آلاینده‌ی دیگر باشد. از طرف دیگر، این ضریب همبستگی نسبتاً بالا می‌تواند نشانه‌ی مشابهت منبع این دو آلاینده باشد.

دامنه و فاز چرخه‌ی شبانه‌روزی تندی باد در فصل‌های مختلف تغییر می‌کند. در بهار، رخداد توفان‌های تندری هنگام عصر باعث افزایش تندی باد می‌شود. معمولاً، شارش‌های ناشی از شیب دارای تندی باد بین یک تا پنج متر بر ثانیه است و، به هنگام گذار صبح و غروب، با دوره‌هایی با تندی باد کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه همراه است. چنین شرایطی سبب کاهش پخش و انتقال آلاینده‌ها می‌شود و مسائل حاد آلودگی هوا را در پی دارد. در مناطق شهری، یاخته‌ی گردشی ناشی از جزیره‌ی گرمایی می‌تواند با وارونگی دمایی در بالای آن محدود شود. بنابراین، تغییر وارونگی‌های دمایی مرتفع شبانه با دوره‌ی زمانی طولانی‌تر (به‌ویژه با توجه به توپوگرافی منطقه) ممکن است تغییرات دوره‌ای طولانی مدت غلظت آلاینده‌ها را در بر داشته باشد. به هنگام صبح، رخداد کمینه‌ی دما گذار لایه‌ی مرزی از شرایط پایدار (شب) به ناپایدار (روز) را نشان می‌دهد که وابسته به میزان آفتاب‌گیری سطح زمین (زمان غروب و طلوع) با توجه به فعالیت کم سامانه‌های همدیدی در اغلب فصل‌ها در این منطقه است. نمودار تغییرات غلظت CO دو بیشینه: یکی، در صبح و دیگری، در شب نشان می‌دهد که تقریباً با کمینه‌های تندی باد هم‌زمان است. بیشینه‌ی هنگام صبح ممکن است ناشی از افزایش شدآمد خودروها در آغاز روز و وجود وارونگی دمایی سطحی شدید همراه با کم‌بودن عمق لایه‌ی آمیخته باشد. طی روز، بر اثر رشد لایه‌ی آمیخته، غلظت آلاینده‌ها کاهش پیدا می‌کند. بیشینه‌ی ابتدای شب نیز ممکن است به‌دلیل انباشت آلاینده‌ها در طول روز و روند کاهش تابش، دما و در پی آن عمق لایه‌ی مرزی و تشکیل لایه‌ی وارونگی دمایی سطحی پس از غروب، مضاف بر افزایش شدآمد خودروها در این هنگام باشد. در اینجا نیز، تغییر دامنه و فاز در فصل‌های مختلف سال مشاهده می‌شود. همان‌طور که احتمال می‌رود، بالاترین بیشینه مربوط به پاییز و زمستان است. تغییرات PM۱۰، مقادیر بیشینه به هنگام عصر و شب را نشان می‌دهد که با کمینه‌ای در ابتدای روز همراه است. هنگام روز تغییرات این کمیت دارای نوسان زیادی است، ولی در شب، طی ماه‌های مختلف سال، (که لایه‌ی سطحی بیشتر تحت تأثیر شرایط محلی است) تغییرات شبانه‌روزی نیز یک‌نواخت است. در پاییز، میزان غلظت این آلاینده بیشتر است که ممکن است ناشی از پایداری هوا، استفاده از وسایل گرمایشی، خودروها و نیز چشمه‌های فرامنطقه‌ای باشد. همچنین، افزایش غلظت این آلاینده در بهار احتمال دارد ناشی از خودروها، گرده‌افشانی گیاهان (گرده با قطر ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون) و نیز ناشی از چشمه‌های فرامنطقه‌ای باشد. تغییرات شبانه‌روزی غلظت ذرات معلق شاهدی بر تأثیر منابع محلی بر غلظت آن‌هاست. بخش عمده‌ای از این چرخه‌ی شبانه‌روزی مربوط به سامانه بادهای محلی کوه‌دشت و دشت‌کوه است. همچنین، در شب، شارش‌های کوه‌دشت (سرد) سبب ایجاد لایه‌ای وارونگی دما بر روی منطقه می‌شود که افزایش غلظت آلاینده‌ها را در پی دارد.

نمودارهای سه‌بعدی مؤلفه‌های افقی سرعت باد و آلاینده‌ها نشان می‌دهد که مؤلفه نصف‌النهاری باد، نقش برجسته‌تری در جابه‌جایی و انتقال آلاینده CO به عهده دارد که با توجه به وضعیت توپوگرافی منطقه، ممکن است نشان‌دهنده‌ی محلی بودن منابع این آلاینده باشد، در حالی که هردو مؤلفه سرعت باد در جابه جایی و انتقال آلاینده‌ی PM۱۰ نقش دارند. در نتیجه، می‌توان گفت که این آلاینده از منابع دور و نزدیک سرچشمه می‌گیرد. نمودارهای سه‌بعدی تندی باد، دمای هوا و آلاینده‌ها نشان می‌دهد که در کل بیشینه‌های غلظت آلاینده CO مستقل از دما و با تندی کم باد هم‌زمان است. همچنین، بیشینه‌های آلاینده PM۱۰ در فصل سرد، با تندی کم باد هم‌زمان و در فصل گرم، مستقل از تندی باد است. می‌توان گفت در فصل گرم، بیشینه‌های هم‌زمان با

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

تندی زیاد باد نشان‌دهنده‌ی دور بودن منابع این آلاینده و بیشینه‌های هم‌زمان با تندی کم باد نشان‌دهنده‌ی محلی بودن منـابع آن است.

**منابع**


- سلطان‌زاده، ایمان؛ پیمان زواررضا؛ عباسعلی علی‌اکبری بیدختی؛ عبدالعلی جلالی و امیرحسن ترک‌زاده. ۱۳۹۰. بررسی جریان‌های محلی روی تهران با استفاده از مدل میان‌مقیاس WRF و شرایط جوی ایده‌آل. *مجله ی پژوهش فیزیک ایران*، **۱۱** ، (۲)، ۱۹۹-۲۱۳.
- علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی و میرتاج الدین بنی هاشم. ۱۳۷۶، لایه‌ی آمیخته شهری و آلودگی هوا، *مجله‌ی محیط‌شناسی*، **۲۰**، ۵۱-۶۰.
- علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی ؛ ندا بیوک و محمد علی ثقفی. ۱۳۸۳. بررسی ساختار چند جریان جستناک توفان‌های همرفتی تهران با استفاده از داده‌های سودار. *مجله‌ی فیزیک زمین و فضا*. **۳۰**، (۲)، ۹۳-۱۱۳.
- علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی و زهرا شرعی‌پور. ۱۳۸۸. شرایط هواشناختی جو بالا و وضعیت حاد آلودگی هوا، *مجله‌ی محیط-شناسی*، **۵۲**، ۱-۱۴.
- قبادی، نسترن. ۱۳۸۷. *مطالعه‌ی موردی توزیع مکانی آلاینده‌ها در شهر تهران*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد. مؤسسه‌ی ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.
- مرادزاده، محمد. ۱۳۷۸. *شبیه‌سازی فیزیکی جزیره گرمایی و الگوهای دمای تهران*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.
- Altaii, K., and Farrugia, R. N. ۲۰۰۳. Wind characteristics on the Caribbean island of Puerto Rico: *Renewable Energy*, **۲۸**, ۱۷۰۱-۱۷۱۰.
- Achberger, C., Chen, D. L. and H. Alexandersson. ۲۰۰۶. The surface winds of Sweden during ۱۹۹۹-۲۰۰۰. Int. J. *Climatol*., **۲۶**, ۱۵۹-۱۷۸.
- Banta, R., and Cotton, W.R. ۱۹۸۱. An analysis of the structure of local wind systems in a broud mountain basin: J. Appl. *Meteorol*., **۲۰**, ۱۲۵۵-۱۲۶۶.
- Cogliani, E. ۲۰۰۱. Air pollution forecast in cities by an air pollution index highly correlated with meteorological variables: Atmos. *Environ*., **۳۵**, ۲۸۷۱-۲۸۷۷.
- Finardi, S., Carboni, G. and G. Tinarelli. ۲۰۰۲. Analysis of three air pollution episode driven by a temperature inversion in a sub-alpine Italian region: Proceedings of the workshop in Toulous, France, ۳-۴ October ۲۰۰۱, ۹۹-۱۰۹.
- Griffin, R. D. ۲۰۰۷. *Principles of air quality management: Second edition*, CRC Taylor and Francis group, ۳۳۴ p.
- Lalas, D., Katsulis, B. and M. Petrakis. ۱۹۸۰. The contribution of the largest local emission sources of sulfur dioxide in Pireaus ,Greece: Hellenic Meteorol. Soc. Bull., **۳**, ۱-۲۴.
- Mikhailuta, S. V., Taseiko, O. V., Anatoli, P., Lezhanin, A. A. and Y. V. Zakharov. ۲۰۰۹. Seasonal variations of air pollutant concentrations within Krasnoyarsk city: *Environ. Moint. Assess*. **۱۴۹**, ۳۲۹-۳۴۱.


[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

- Monti, P., Fernando, H. J. S., Princevad, M., Chan, W. C., Kowalewski, T. A., and Pardjak, E. R. ۲۰۰۲. Observational study of flow and turbulence in the nocturnal boundary layerover a slope: J. Atmos. *Sci*., **۵۹**, ۲۵۱۳-۲۵۳۴.
- Naithani, J. and Dutta, H. N. ۱۹۹۸. Diurnal and seasonal variation in the surface layer parameters observed at Maitri station, Antarctica: Furteenth Indian expedition to Antarctica, scientific report, department of ocean development, technical publication, no. **۱۲**, ۵۷-۷۰.
- Oanh, K. T., Chutimon, P., Ekbordin, W. and W. Supat. ۲۰۰۵. Meteorological pattern classification and application for forcasting air pollution episode potential in a mountain-valley area. *Atmos. Environ*., **۳۹**, ۱۲۱۱-۱۲۲۵.
- Sandro, F. and Pellegrini, U. ۲۰۰۴ .Systematic analysis of meteorological conditions causing severe urban air pollution episodes in the central Po valley: ۹th international conference on harmonization within atmospheric dispersion modeling for regulatory purposes, Garmisch-Partenkir, Germany, ۱-۴ Jane ۲۰۰۴.
- Tiwary, A. and Colls, J. ۲۰۱۰. *Air pollution: Measurement, modelling and mitigation*: Third edition, Routledge, Taylor and Francis group, ۵۲۸ p.
- Yu, R., Li, J., and H. Chen. ۲۰۰۸. Diurnal variation of surface wind over central eastern China: *Earth and Environmetal Science, Climate Dynamics*, **۳۳**, no.۷-۸, ۱۰۸۹-۱۰۹۷.
- Yang, K. L. ۲۰۰۲. Spatial and seasonal variation of PM۱۰ mass concentrations in Tiwan: *Atmos. Inviron*., **۳۶**, ۳۴۰۳-۳۴۱۱.
- Zhao, X., Zhang, X. Xu, X. Xu, J., Meng, W. and W. Pu. ۲۰۰۹. Seasonal and diurnal variations of ambient PM۲.۵ concentration in urban and rural environments in Beijing: *Atmos. Environ*., **۴۳**, ۲۸۹۳-۲۹۰۰.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]