

## تحلیل آماری - همدیدی غلظت آلاینده مونواکسیدکربن براساس سمت و سرعت باد و مخاطره آن در شهر تهران



آذر کرمانی\*

کارشناس ارشد آب‌وهواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی

مهتری اکبری (MehryAkbary@khu.ac.ir)

استادیار آب‌وهواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی

بهلول علیجانی (bralijani@gmail.com)

استاد آب‌وهواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی

امید مفاخری (Mafakhery63@yahoo.com)

دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۵ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۵/۲)

### چکیده

آلودگی هوا از مهم‌ترین مخاطرات محیطی کلانشهرهای ایران است که طی چهار دهه اخیر، زندگی این شهرها را پرهزینه و خطرناک کرده است. هدف این پژوهش بررسی ارتباط باد با آلودگی هوا و شناسایی سیستم‌های حرارتی و دینامیکی در شهر تهران است که به تکوین و تشدید شرایط پایدار جوی در دوره سرد منجر می‌شوند. در این پژوهش از سه روش آماری، همدیدی و ترمودینامیکی برای رسیدن به اهداف یادشده استفاده شده است. در قسمت آماری، ویژگی باد در ۱۶ جهت جغرافیایی با آلودگی هوا در یک دوره ده‌ساله در شهر تهران بررسی شد. به‌منظور محاسبه همبستگی و تحلیل وایزای بین مونواکسیدکربن با سرعت باد از ضریب همبستگی پیرسون و تحلیل وایزای استفاده شده است. نتایج نشان داد که همبستگی معناداری در سطح ۹۹ درصد بین آلاینده مونواکسیدکربن با سرعت باد در کل جهات وجود دارد، اما با تفکیک جهات به ۱۶ جهت اصلی، بیشترین همبستگی (معناداری در سطح ۹۹ درصد) بین سرعت باد در سمت NW، SSE و W است. جهت عکس تغییرات سرعت باد در این سمت‌ها با مونواکسیدکربن، نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد از مقدار آلاینده مونواکسیدکربن کاسته می‌شود و برعکس. نتیجه دیگر این بررسی، جهت تغییرات سمت‌های باد NE و ENE است که مستقیم‌اند و با افزایش سرعت باد، آلاینده مونواکسیدکربن هم افزایش یافته است. همچنین میانگین سرعت باد در روزهای آلوده ۱/۳ متر بر ثانیه است که از میانگین سرعت دوره سرد مطالعاتی که ۲/۵ متر بر ثانیه است، کمتر است. در قسمت همدیدی پژوهش، ۱۴ نمونه روز با آلودگی فراگیر در دوره سرد سال در طول دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ انتخاب شد. نقشه‌های مورد نیاز مرتبط در ترازهای مختلف جو (تراز ۵۰۰، سطح زمین و نقشه تاوایی) با استفاده از داده‌های دوباره پردازش‌شده ECMWF و در محیط GRADS ترسیم شدند. نتایج بررسی نشان داد که در بیشتر روزهای مطالعاتی، آلودگی هوا از الگوی پرفشاری تبعیت کرده و در لایه‌های میانی جو، منطقه تهران با روی محور پشته یا در پایین دست محور قرار گرفته که با همگرایی جریان‌ات سطوح فوقانی جو، فرونشینی هوا در سطح زمین رخ داده است. در قسمت ترمودینامیکی، با ترسیم نمودار Skew-T در نرم‌افزار RAOB و مشخص کردن نوع و ارتفاع لایه وارونگی مشخص شد که غلظت آلودگی هوا در زمانی که وارونگی تابشی زیر ارتفاع ۱۰۰ متر از سطح زمین اتفاق می‌افتد، شدید و مخاطره‌زا می‌شود. همچنین در حالت جو پایدار، از سطح زمین تا تروپوسفر میانی و جو بالاتر، باد، سرعت چندانی ندارد.

واژگان کلیدی: آلاینده CO، باد، دوره سرد، شهر تهران، مخاطره، Skew-T.

## مقدمه

آلودگی هوا از مهم‌ترین مخاطرات محیطی کلانشهرهای ایران است که طی چهار دهه اخیر، زندگی در این شهرها را پرهزینه و خطرناک ساخته است [۱۵]؛ به طوری که تردد زیاد وسایل نقلیه، ترافیک سنگین، مصرف زیاد انرژی، وضعیت توپوگرافی و جغرافیایی خاص و فراوانی سامانه‌های پایداری جوی موجب شده است که شهر تهران از آلوده‌ترین شهرهای جهان باشد [۵]. از میان آلاینده‌ها، مونواکسید کربن مهم‌ترین آلاینده جوی تهران است که حد طبیعی آن در هوا ۰/۱ تا ۰/۲ قسمت در میلیون (حجمی) است. در مناطق شهری به طور معمول زیر ۱۷ قسمت در میلیون است، ولی در شهر تهران در ساعات ترافیک و بعضی مناطق برای کوتاه‌مدت تا ۵۰ PPM و حتی بیشتر هم گزارش شده است [۸]. در زمینه آلودگی هوا مطالعات زیادی در جهان و ایران صورت گرفته که از آن میان می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. دمیرچی و کوهاداراولو [۱۳]، آلودگی هوا را در شهر ترابوزان، با در نظر گرفتن سرعت باد و رابطه آن با آلاینده‌های CO و PM بررسی کردند و نشان دادند که ارتباط ضعیفی بین غلظت آلودگی هوا با سرعت باد وجود دارد. باهاتین چلیک و کاوی [۱۲]، در تحقیقی در زمینه ارتباط مقدار آلودگی و فاکتورهای هواشناسی در کارابوک ترکیه نشان دادند که افزایش سرعت باد، دما و رطوبت نسبی، در تعدیل آلودگی هوا مؤثرند. خدیرا و تارک خدیر [۱۶]، تأثیر پارامترهای اقلیمی در میزان غلظت آلاینده‌های هوا را با استفاده از الگوریتم K-mean و شبکه عصبی مصنوعی در منطقه آنا با در الجزایر بررسی کردند. ییوو و همکاران [۱۷]، به شبیه‌سازی انتقالات جوی و خطر انتشار آلاینده کربن پس از انتشار با استفاده از مدل‌سازی رایانه‌ای پرداختند و نشان دادند که غلظت آلاینده در ماه دسامبر به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در تحقیقات داخلی در خصوص آلودگی هوا می‌توان به کارهای ارزشمند زیر اشاره کرد. علیجانی [۱۱] در تحقیقی به بررسی رابطه بین تغییرات فشار و تمرکز آلودگی هوا پرداخت و به این نتیجه رسید که بین روند تغییرات مونواکسید کربن و فشار همبستگی مثبت وجود دارد. پژوهشگرانی مانند گیوی و ثابت‌قدم [۱۴] و بیدختی و شرعی‌پور [۱۰] تلاش‌های مؤثری در زمینه مطالعه آلودگی هوا و شاخص‌های ترمودینامیکی از قبیل ضخامت لایه آمیخته و پخش آلودگی هوا در رابطه با مؤلفه سرعت قائم امگا در شهر تهران انجام دادند. رضایی و همکاران [۳]، آلودگی هوا و رابطه آن با عوامل اقلیمی شهر بیرجند را بررسی کردند و رابطه مستقیم و معناداری را بین PM<sub>10</sub> با سرعت باد و CO با دما نشان دادند. در مطالعه‌های دیگر، کرمانی و همکاران [۹]، به مطالعه آلودگی هوای شهر تهران با تأکید بر ساعات‌های تراکم آلاینده مونواکسید کربن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین تراکم آلاینده CO در جنوب و جنوب شرق شهر و در ساعات ۰۰ و ۸ تا ۹ صبح است. همچنین ثقفی و

بیدختی [۲] و شرعی‌پور [۶] به بررسی تغییرات شبانه‌روزی و فصلی آلاینده‌های هوا و ارتباط آن با پارامترهای شهر تهران پرداختند. بازگیر و همکاران [۱]، در تحلیل رابطه آلودگی هوای تهران با ترافیک و شرایط جو نشان دادند که شاخص  $k$  بیشترین تأثیر را بر آلودگی هوا دارد. هدف اصلی این پژوهش بررسی ارتباط بین تراکم و غلظت آلاینده مونواکسید کربن با سرعت باد و شناسایی سیستم‌های پرفشار حرارتی و دینامیکی در سطح شهر تهران است که به تشدید شرایط پایدار جوی (به‌ویژه در دوره سرد) منجر می‌شوند. با بررسی پژوهش‌ها درباره آلودگی هوا در ایران، درمی‌یابیم که در زمینه ارتباط آلودگی هوا با سرعت باد در سمت‌های مختلف، مطالعات چندانی انجام نگرفته است. با توجه به خلأ موجود، تلاش این مطالعه بر آن است تا آلودگی هوای تهران را با در نظر گرفتن باد و بر اساس آلاینده CO واکاوی کرده و شرایط همدیدی- ترمودینامیکی حاکم بر هوا را در روز آلوده بررسی کند.

#### داده‌ها و روش تحقیق

در بخش مطالعه آماری، از داده مونواکسید کربن (CO) ایستگاه آزادی از سازمان محیط زیست در طول دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ استفاده شد. در این بخش به‌منظور محاسبه همبستگی بین آلاینده مونواکسید کربن با متغیر سرعت باد در کلیه جهت‌های جغرافیایی و ۱۶ جهت جغرافیایی در مقیاس زمانی روزانه، از ضریب همبستگی پیرسون (رابطه ۱)، که در محیط نرم‌افزاری SPSS و Excel تحلیل آماری شدند، استفاده شد. برای یافتن روابط علی و معلولی بین متغیر سرعت باد در جهت‌های مختلف جغرافیایی با آلاینده مونواکسید کربن از تحلیل وایازی ساده خطی استفاده شد. در این مطالعه آزمون معناداری معادله وایازی، از طریق جدول معنادار بودن  $t$  در سطح ۹۹ و ۹۵ درصد بررسی شد و معنادار بودن همبستگی آزمایش شد.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

در این رابطه،  $X$ ، سرعت باد، به‌عنوان متغیر مستقل؛ و  $Y$ ، آلاینده مونواکسیدکربن، به‌عنوان متغیر وابسته است.  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  میانگین آنهاست.

اطلاعات ایستگاه همدید مهرآباد شامل داده‌های سرعت و جهت باد از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. در بخش همدیدی، داده‌های مونواکسید کربن از سازمان محیط زیست و شرکت کنترل کیفیت هوای تهران شامل ایستگاه‌های قلپک، آزادی، بهمن، فاطمی و سرخه‌حصار در طول دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ دریافت شد. به‌منظور تعیین نمونه روزهای آلوده ایستگاه‌ها، میانگین ۲۴

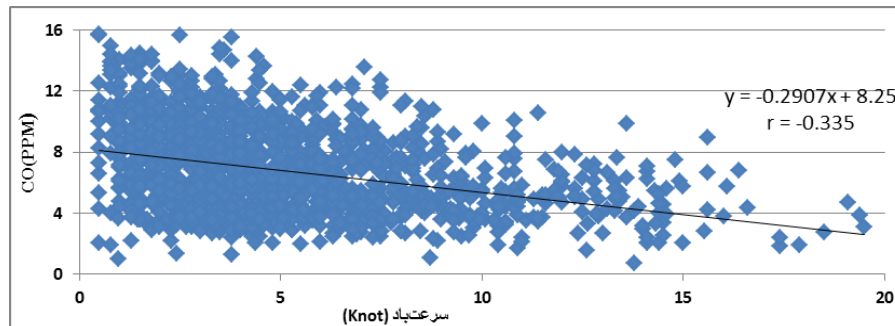
ساعتی آلاینده مذکور تعیین شد و روزهای مورد مطالعه بر مبنای بالاترین مقدار ثبت شده آلاینده CO در هر یک از پنج ایستگاه منتخب در طول دوره سرد هر سال و فراگیر بودن آلودگی در بیشتر ایستگاهها بررسی و انتخاب شدند. داده‌های همدید مورد نیاز نیز از سایت مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت جو (ECMWF)، با تفکیک مکانی یک درجه تهیه شد و در محیط نرم‌افزار Grads، نقشه‌های همدید روزهای مورد نظر ترسیم شد. ابتدا به‌منظور نمایش موقعیت مراکز فشار و اثر آن بر عناصر جوی سرعت و جهت باد و تأثیر آن در افزایش و کاهش آلودگی هوا، وضعیت همدید جو با نقشه‌های میدان فشار تراز دریا تهیه شد. سپس با هدف مشخص کردن ماهیت دینامیکی یا گرمایی سامانه‌های رخ داده در نمونه روزهای مطالعاتی نقشه ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی ترسیم شد. همچنین نقشه وزش تاوایی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی به‌منظور مشخص کردن نزولی و صعودی بودن هوا ترسیم شد. در مرحله بعدی، داده‌های جو بالا ایستگاه مهرآباد از پایگاه داده دانشگاه وایومینگ اخذ شده و به‌منظور تعیین نرخ افتاهنگ دما، نوع و ارتفاع وارونگی هوا، مشخص ساختن سرعت باد در لایه تروپوسفر (سطح زمین و سایر سطوح مؤثر جو) و پایداری و ناپایداری هوا، نمودار ترمودینامیکی SKEW-T در زمان ۰۰، در نرم‌افزار RAOB تهیه و واکاوی شد. در طول دوره آماری مذکور، ۱۴ نمونه روز آلوده با بیشترین مقدار و تراکم آلاینده CO در ایستگاه‌های سنجش آلودگی انتخاب و شرایط همدیدی حاکم بر هر نمونه روز آلوده، بررسی شد. البته شایان ذکر است که در این پژوهش به‌منظور جلوگیری از حجیم شدن مطلب، نتایج یک نمونه روز که بیشترین مقدار آلاینده را در طول دوره آماری داشتند، آورده شده است.

### یافته‌های تحقیق

#### ویژگی باد در همه جهت‌های جغرافیایی با آلودگی هوا در شهر تهران

در محیط‌های شهری، باد سطح زمین نقش اصلی را در انتقال و پخش آلودگی هوا و کاهش غلظت آلاینده‌ها دارد [۴]. با توجه به این موضوع، ابتدا تغییرات سرعت باد سطح زمین با آلاینده مونواکسید کربن در کل جهت‌های جغرافیایی بررسی شد. شکل ۱ و جدول ۱، نتایج را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب همبستگی بین سرعت باد با مونواکسید کربن ۰/۳۳- است که در سطح ۹۹ درصد معنادار شده است. رابطه غیرمستقیم این دو پارامتر اثرگذاری افزایش (کاهش) سرعت باد را در کاهش (افزایش) آلاینده مونواکسید کربن نشان می‌دهد. با توجه به نتایج وایازی خطی می‌توان معادله وایازی برای مونواکسید کربن را با توجه به سرعت باد به‌صورت زیر نوشت:

$$CO = ۸/۲۵ - ۰/۲۹ (X)$$



شکل ۱. نمودار تغییرات روزانه مونواکسید کربن ایستگاه آزادی با سرعت باد (کل جهات)

جدول ۱. نتایج وایزی خطی برای سرعت باد در کل جهات

سرعت باد در کل جهتهای جغرافیایی	
۱۶۶۰	تعداد روزهای بررسی شده
۴/۹۱	میانگین سرعت (نات)
-۰/۳۳۵**	مقدار همبستگی
۸/۲۵	ثابت وایزی
-۰/۲۹	ضریب وایزی
۰/۱۱۲	ضریب تعیین

\*\* معنادر سطح ۱ درصد

بررسی وضعیت آلودگی هوا در شهر تهران به تفکیک باد در ۱۶ جهت جغرافیایی براساس نتایج بررسی سمت و سرعت باد، در طول دوره آماری مورد مطالعه، باد غالب ایستگاه مطالعاتی، غربی و باد نایب غالب آن، جهت غرب جنوب غرب بوده است. میانگین سرعت باد در سمتهای مختلف باد و تعداد روزهای بادی برای دوره آماری مورد نظر در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به این جدول بیشترین تعداد روزهای بادی از سمت غرب ایستگاه با میانگین سرعت ۷/۴۰ نات است. بعد از این سمت باد، سمت غرب جنوب غرب با ۲۴۰ روز با میانگین سرعت باد ۵/۳۱ نات می تواند تأثیر خوبی بر پراکنش آلودگی داشته باشد و سبب کاهش مخاطره آن شود. بعد از تعیین تعداد روزهای بادی و میانگین سرعت باد در هر کدام از سمتهای جغرافیایی، میزان همبستگی بین پارامتر هواشناسی سرعت باد در سمتهای مختلف باد با آلاینده مونواکسید کربن تعیین شد (جدول ۳). طبق نتایج این جدول، بیشترین همبستگی بین سرعت باد در سمتهای NW، E، SSE، S، SW، W و SSW است (با توجه به نتایج جدول ۲، هم تعداد روزهای بادی در

هریک از این سمت‌ها زیاد است و هم میانگین سرعت باد ده‌ساله به نسبت زیادی دارند. جهت عکس تغییرات سرعت باد در این سمت‌ها با مونواکسید کربن، نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد، از مقدار آلاینده مونواکسید کربن کاسته می‌شود و برعکس. با توجه به نتایج این جدول، مشاهده می‌شود که بین سرعت سمت‌های یادشده و آلاینده مورد نظر ارتباط معناداری در سطح ۹۹ درصد برقرار است. همچنین بین سرعت باد در سمت N، SE و WNW و آلاینده مورد نظر همبستگی معنادار ۹۵ درصد وجود دارد که جهت تغییرات آن نیز غیرمستقیم بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بین سرعت باد در سمت‌های غالب و نایب غالب ارتباط معنادار بسیار قوی وجود دارد که این موضوع، خود تأکید بر قدرت پالایندگی سرعت باد این جهت‌ها در آلودگی هوا دارند. اما نکته شایان توجه در جدول ۳، جهت تغییرات سمت‌های باد NE و ENE است که مستقیم‌اند. به نظر می‌رسد علت این مسئله، موقعیت ایستگاه مورد مطالعه در غرب شهر تهران است.

جدول ۲. داده باد فرودگاه مهرآباد اکتبر تا مارس ۲۰۱۲-۲۰۰۲

سمت باد	NW	W	SW	S	SE	E	NE	N
تعداد روز بادی	۲۵	۴۶۷	۱۰۰	۲۱۸	۸۱	۵۶	۱۲	۲۷
میانگین سرعت (نات)	۳/۷۴	۷/۴۰	۳/۸۵	۳/۰۲	۳/۶	۳/۸۲	۳/۴۲	۴/۲۱
سمت باد	NNW	WNW	WSW	SSW	SSE	ESE	ENE	NNE
تعداد روز بادی	۲۷	۱۰۸	۲۴۰	۱۳۴	۱۳۷	۸۵	۴۲	۲۲
میانگین سرعت (نات)	۳/۷	۶/۴۱	۵/۳۱	۳/۰۲	۳/۳۶	۳/۵۷	۳/۷۲	۳/۷۳

با توجه به جدول ۳، مقدار ضریب تعیین جهت باد غالب (W) ۰/۲۲ است که نشان می‌دهد ۲۲ درصد تغییرات آلاینده مونواکسید کربن به سرعت باد بستگی دارد و بقیه آن به عوامل دیگری از قبیل تعداد خودرو، دما، بارش و ... وابسته‌اند که در این تحقیق بررسی نشدند. زمانی که بین دو متغیر همبستگی وجود دارد، می‌توان یک متغیر را از طریق متغیر دیگر برآورد کرد. با توجه به نتایج جدول ۳، معادله وایزی برای مونواکسید کربن و سرعت باد می‌تواند برای سمت‌های  $W = 9/11 - 0/34(V)$  و  $WSW = 8/71 - 0/26(V)$  به این صورت باشند. در این معادله میانگین سرعت باد است. با مقایسه میانگین سرعت باد، مشخص شد که میانگین سرعت باد روزهای آلوده مطالعاتی، ۲/۶ نات (۱/۳ متر بر ثانیه) است که از میانگین سرعت دوره سرد مطالعاتی که ۴/۹ نات (۲/۵ متر بر ثانیه) است کمتر است که خود بیانگر کاهش سرعت باد در شرایط آلودگی هواست که بر تشدید خطر آلودگی هوا اثر دارد.

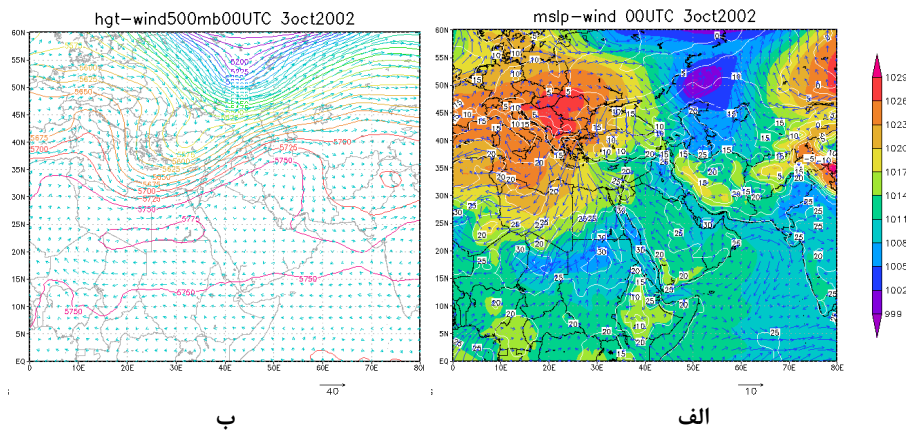
جدول ۳. نتایج همبستگی و وایازی خطی بین سرعت باد با CO در سمت‌های مختلف

جهت باد	NW	SW	SE	NE	W	S	E	N
مقدار همبستگی	-۰/۵۸۳ <sup>**</sup>	-۰/۴۱۳ <sup>**</sup>	-۰/۲۷۶ <sup>*</sup>	۰/۲۹۷ <sup>ns</sup>	-۰/۴۷۰ <sup>**</sup>	-۰/۴۱۳ <sup>**</sup>	-۰/۴۱۵ <sup>**</sup>	-۰/۵۰۹ <sup>*</sup>
تعداد	۲۳	۸۶	۶۹	۱۱	۴۳۱	۲۰۸	۵۳	۲۳
ثابت وایازی	۱۱/۷۳	۸/۹۸	۷/۸۷	۳/۹	۹/۱۱	۹/۶۹	۷/۴۹	۱۱/۰۱
ضریب وایازی	-۰/۹	-۰/۶۱	-۰/۴۷	۰/۵۴	-۰/۳۴	-۰/۸۱	-۰/۴۷	-۰/۷۹
ضریب تعیین	۰/۳۴۰	۰/۱۷	۰/۰۷۶	۰/۰۸۸	۰/۲۲۱	۰/۱۷۰	۰/۱۷	۰/۳۵۹
جهت باد	ESE	SSE	SSW	WSW	WNW	NNW	ENE	NNE
مقدار همبستگی	-۰/۲۲۶ <sup>ns</sup>	-۰/۴۷۸ <sup>**</sup>	-۰/۳۸۳ <sup>**</sup>	-۰/۲۹۶ <sup>**</sup>	-۰/۳۳۱ <sup>*</sup>	-۰/۲۳۵ <sup>ns</sup>	۰/۰۷۴ <sup>ns</sup>	-۰/۳۰۹ <sup>ns</sup>
تعداد	۷۴	۱۳۳	۱۲۶	۲۲۵	۱۰۴	۲۷	۳۹	۲۰
ثابت وایازی	۸/۲۵	۱۰/۰۸	۹/۶۸	۸/۷۱	۷/۵	۸/۴۱	۵/۰۹	۹/۶۵
ضریب وایازی	-۰/۳۸	-۰/۹	-۰/۷۳	-۰/۲۶	-۰/۲۲	-۰/۲۹	۰/۰۸	-۰/۷۱
ضریب تعیین	۰/۰۵۱	۰/۲۲۹	۰/۱۴۷	۰/۰۸۸	۰/۱۱۰	۰/۰۵۵	۰/۰۰۶	۰/۰۹۵

\* معنادار در سطح ۵ درصد، \*\* معنادار در سطح ۱ درصد، ns: Non-significant (بی‌معنا)

### بخش همدید: نمونه شماره ۱، آلودگی روز ۱۱ مهر ۱۳۸۱

نقشه سطح زمین شکل ۲(الف)، در ۱۱ مهر ۱۳۸۱، وجود یک پرفشار با مقدار ۱۰۳۰ هکتوپاسکال را روی منطقه سیبری نشان می‌دهد. همچنین با توجه به این نقشه، پرفشاری بر روی اروپای مرکزی و جنوبی و بر روی دریای مدیترانه مشاهده می‌شود. زبانه‌های پرفشار حاکم بر منطقه سیبری به قسمت‌های شرق کشور و زبانه پرفشار حاکم بر اروپا به قسمت‌های شمال غرب و غرب کشور در امتداد رشته‌کوه زاگرس، گسترش یافته است؛ به طوری که زبانه ۱۰۱۵ هکتوپاسکالی مربوط به این دو پرفشار و به ویژه پرفشار سیبری روی منطقه تحقیق (شهر تهران) گسترش یافته است. در این الگو زبانه پرفشارهای حاکم سبب ایجاد شرایط پایدار در منطقه شده است. از طرف دیگر، با توجه به بردارهای باد، روی منطقه تهران، جهت باد جنوب غربی است و باد، کم‌سرعت است. از این رو سرعت باد کم، قدرت پالایندگی آلودگی را ندارد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نقشه تراز ۵۰۰ ژئوپتانسیل متر شکل ۲(ب)، روی جنوب مصر و لیبی، یک مرکز پرارتفاع با مقدار ۵۷۷۵ هکتوپاسکال بسته شده است. زبانه‌های این پرارتفاع به صورت پشته‌هایی از روی عراق به سمت شمال ایران گسترش یافته است، به طوری که روی این الگو، استقرار یک پشته روی ایران کاملاً توجیه‌پذیر است. محور پشته مذکور از روی منطقه تحقیق و شهر تهران عبور کرده و گرادیان کنتوری روی منطقه نیز ضعیف است و جریان آنتی‌سیکلونی هوا و جریان باد جنوب غربی ضعیف، سبب نزول و فرونشینی هوا در منطقه شده است؛ بنابراین شرایط برای ایجاد روزهای آلوده مهیا شده است.

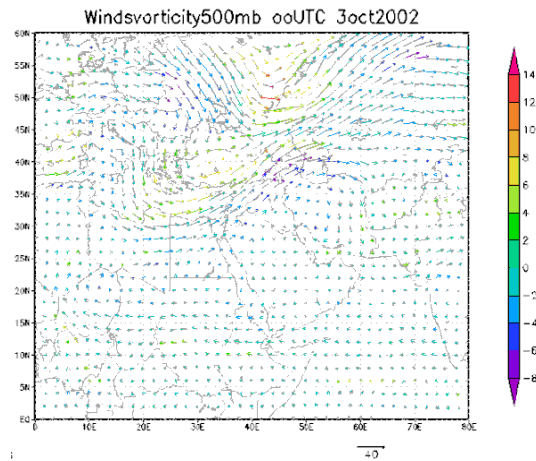


شکل ۲. نقشه سطح زمین با بردارهای باد و دما (الف)، نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل با بردارهای باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (ب)

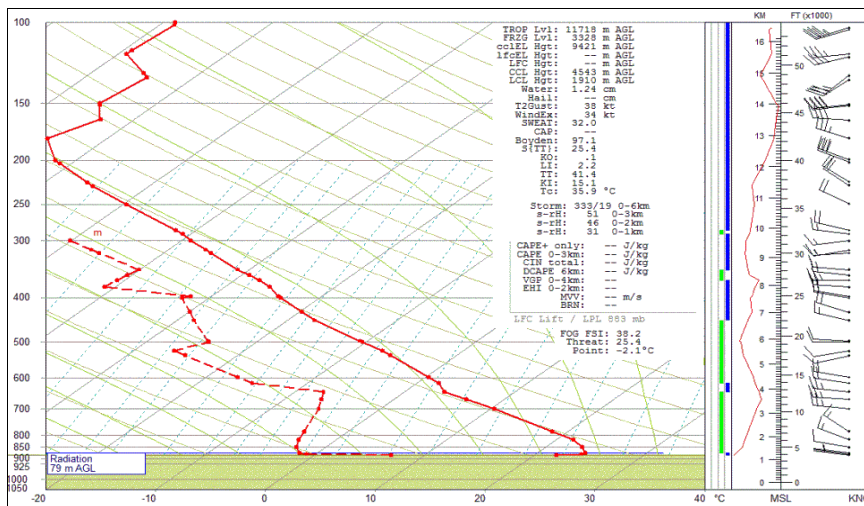
با ردیابی شرایط باد سطحی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی، همگرایی هوا و چرخش آنتی‌سیکلونی هوا گویای حاکمیت سامانه حرارتی-دینامیکی و تشدید آلودگی هوا در منطقه است. در مراجعه به نقشه تاوایی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی، شرایط حاکم بر منطقه و فرارفت تاوایی منفی بر منطقه، نشان از سکون و پایداری هواست که خود سبب ریزش هوای پایدار می‌شود (شکل ۲ ج). با توجه به اینکه از نتایج حاکمیت شرایط پرفشاری در یک منطقه، رخداد وارونگی دمایی است، در مراجعه به نمودار ترمودینامیکی SKEW-T، پدیده وارونگی حرارتی در ارتفاع ۸۰ متری سطح زمین مشاهده می‌شود. این ارتفاع کم لایه وارونگی سبب شده که آلاینده‌ها در محیط زندگی مردم جمع شوند. در لایه وارونگی، دما بیشتر از لایه پایین‌تر است و در نتیجه نمی‌گذارد هوای سردتر زیرین صعود کند و در نهایت مواد آلوده در زیر آن متراکم می‌شوند [۷]. همچنین براساس این نمودار در نزدیک سطح زمین سرعت باد، کم است، به طوری که در ارتفاع ۱۱۹۱ متری (سطح ۸۸۳ هکتوپاسکالی)، سرعت باد تنها ۲ متر بر ثانیه است. نکته مهم دیگر این است که در ارتفاع ۵۸۷۰ متری (سطح میانی جو) نیز باد سرعت چندانی ندارد. سرعت باد در این سطح، ۱۰ نات (۵ متر بر ثانیه است) که نشان‌دهنده پایداری جو در تروپوسفر میانی است. پس می‌توان نتیجه گرفت که در لایه بین سطح ایستگاه تا ۵۸۷۰ متری، جو آرام و پایداری حاکم است. از این رو سرعت کم باد سطحی و سطوح بالایی، امکان جابه‌جایی آلاینده‌های خروجی از منابع آلاینده را محدود کرده است، به همین دلیل مقادیر آلودگی زیاد بوده است. از طرف دیگر، از فاصله بین دو منحنی دمای هوا و دمای نقطه



شب‌نم نیز می‌توان پایداری در منطقه مورد نظر را که سبب تشدید آلودگی و وارونگی و کاهش سرعت باد شده است مشاهده کرد. بررسی شاخص‌های ناپایداری جوی نیز همگی حاکی از استقرار شرایط پایداری محیطی در ایستگاه همدید مهرآباد هستند. برای مثال براساس شاخص سوئت (SWEAT) که ۳۲ است احتمال رخداد هیچ‌گونه ناپایداری وجود ندارد (شکل ۲ د).



ج



د

شکل ۲. نقشهٔ وزش تاوایی (ج)، نمودار اسکیتوتی ایستگاه مهرآباد تهران ساعت ۴ صبح (د)

## نتایج

نتایج نشان داد که همبستگی قوی‌ای (با سطح معناداری ۱ درصد) بین آلاینده مونواکسید کربن با سرعت باد در کل جهات وجود دارد. با تفکیک جهات به ۱۶ جهت اصلی، بیشترین همبستگی معکوس (سطح معناداری ۱ درصد) بین سرعت باد ایستگاه مهرآباد در جهات جغرافیایی NW، W، SW، S، SSE، E، SSW و WSW با غلظت آلاینده مونواکسید کربن ایستگاه آزادی در دوره آماری مورد مطالعه وجود دارد. با افزایش سرعت باد در هر یک از این سمت‌ها، غلظت آلاینده کاهش یافته است و برعکس. پس از این جهات، بیشترین همبستگی معکوس بین سرعت باد در سمت SE، N و WNW با آلاینده مورد نظر (با سطح معناداری ۵ درصد) وجود دارد که جهت تغییرات آن نیز غیر مستقیم بوده است. نتیجه دیگر نشان داد که جهت تغییرات سمت‌های باد NE و ENE مستقیم است که از نتایج بحث‌برانگیز این تحقیق بود که در دو جهت یادشده با افزایش سرعت باد، آلاینده مونواکسید کربن نیز افزایش می‌یابد و برعکس که به نظر می‌رسد به دلیل موقعیت ایستگاه کنترل کیفیت هوا در غرب شهر تهران است. بررسی نقش گردش منطقه‌ای جو در بوز روزهای بسیار آلوده در شهر تهران نشان داد که روزهای آلوده تقریباً از الگوی جوی مشابهی تبعیت داشتند. استقرار سامانه‌های پرفشاری، سبب پایداری و کاهش عمق لایه آمیخته می‌شود و پخش آلاینده‌ها را در راستای قائم محدود می‌کند. از طرفی نیز، سرعت باد سطحی آرام و کم است و بنابراین پخش افقی آلاینده‌ها را نیز محدود کرده است. مشخص شد هنگامی که سامانه پرفشار حرارتی حاکم بر منطقه در نقشه سطح زمین، بر پراارتفاع دینامیکی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال منطبق است، این انطباق، پایداری و فرونشینی هوا را از تراز بالا تا پایین جو تقویت و تشدید می‌کند. همچنین مشخص شد که غلظت آلودگی هوا در زمانی که وارونگی تابشی زیر ارتفاع ۱۰۰ متر از سطح زمین اتفاق می‌افتد، شدید و مخاطره‌آفرین می‌شود. به واسطه حاکمیت شرایط پرفشاری و وجود ناهمواری‌ها و اصطکاک، سرعت باد سطحی کم است و با افزایش ارتفاع نیز سرعت چندانی وجود ندارد.

## منابع

- [۱]. بازگیر، سعید؛ قدیری معصوم، مجتبی؛ شمسی پور، علی‌اکبر؛ سیدی سرنجیانه، شیوا (۱۳۹۴). تحلیل رابطه آلودگی هوای تهران با ترافیک و شرایط جو برای کاهش مخاطرات، دانش مخاطرات. دوره ۲، شماره ۱: ۳۵-۴۹.

- [۲]. ثقفی، محمدعلی؛ علی اکبری بیدختی، عباسعلی (۱۳۹۳). بررسی تغییرات شبانه‌روزی و فصلی باد و دمای هوا و آلاینده‌های CO و PM10 در لایه سطحی جو شهر تهران. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره ۱، شماره ۱: ۳۴-۱۷.
- [۳]. رضایی، ایوب؛ رضایی، محمدرضا؛ صیادی، محمدحسین (۱۳۹۲). بررسی کمی و کیفی آلودگی هوا و ارتباط آن با عوامل اقلیمی شهر بیرجند در سال ۱۳۹۱، گزارش کوتاه سلامت جامعه، دوره هفتم، شماره ۴: ۶۵-۶۲.
- [۴]. رنجبر سعادت‌آبادی، عباس و قصابی، زهرا، (۱۳۹۰). مطالعه همدیدی الگوهای جوی حاکم بر روی تهران در روزهای با آلودگی بسیار شدید هوا، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، سال دوم، شماره‌های ۵ و ۶: ۵۶-۳۹.
- [۵]. رنجبر سعادت‌آبادی، عباس؛ محمدیان محمدی، لیلا (۱۳۸۹). مطالعه میانگین الگوهای همدیدی بر اساس رخداد غلظت‌های مختلف آلاینده CO در فصول تابستان و پاییز در تهران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۲: ۱۲۷-۱۱۱.
- [۶]. شرعی‌پور، زهرا (۱۳۸۸). بررسی تغییرات فصلی و روزانه آلاینده‌های هوا و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی، مجله فیزیک زمین و فضا دوره ۳۵، شماره ۲: ۱۱۹-۱۳۷.
- [۷]. صفوی، یحیی؛ علیجانی، بهلول (۱۳۸۵). بررسی عوامل جغرافیایی در آلودگی هوای تهران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۵۸: ۱۱۲-۹۹.
- [۸]. غیاث‌الدین، منصور (۱۳۸۵). آلودگی-هوا، منابع، اثرات و کنترل، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران: ۳۳۰-۳۲۹.
- [۹]. کرمانی، آذر؛ مفاخری، امید؛ دوستی فرد، الهام؛ کهریزی، فرانک (۱۳۹۳). آلودگی هوای شهر تهران با تأکید بر ساعت‌های تراکم آلاینده در شبانه‌روز، اولین کنفرانس ملی الکترونیکی توسعه پایدار در علوم جغرافیا و برنامه‌ریزی، معماری و شهرسازی، تهران، مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار.
- [10]. Aliakbari Bidokhti, A.; Shareipoor, Z. (2009). Meteorological conditions top atmospheric and acutesituation air pollution (case study: Tehran, Journal of Environmental studies, 35 (52):1-14.
- [11]. Alijani, B. (2004). The Relation between Pressure and Air Pollution Concentration in Tehran, 30th International Geography Union, Glasgow, England.
- [12]. Bahaattin Celik, M.; Kavy, I. (2007). Relation Between Meteorological factors and pollutants concentrations in karabuk city, Journal of Science, 20: 87-95.

- 
- [13]. Demirci, E.; Cuhadaroglu, B.(1996). Statical analysis of wind circulation and air pollution in urban Trabzon, *Energy and Buildings*, 31(2000): 49-53. DOI:10.1016/S0378-7788(99)00002-X
- [14]. Givi, A.; Sabetghadam, S. 2006. Study of sensitivity of the meso-scale model MM5 schemas using MRF and Eta-Mellor-yamada for estimate the depth of the urban mixed layer, *Conference on Numerical Weather Prediction*.
- [15]. Hosseinzade, S. R. (2004). Environmental crises in the metropolises of Iran. *Sustainable city III*, England, 79:179-187. DOI:10.2495/SC040191
- [16]. Khedairia, Soufiane.; Tarek Khadir, Mohamed.(2012). Impact of clustered meteorological parameters on air pollutants concentrations in the region of Annaba, Algeria, (113):89–101.
- [17]. Wu, Ye.; Nelson, Peter F.(2014). Using Computer Modelling to Simulate Atmospheric Movement and Potential Risk of Pollutants from Post-combustion Carbon Capture Projects. *Energy Procedia* . 12th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies,GHGT-12. (63): 976–985. DOI:10.1016/j.egypro.2014.11.106