

تحلیل آماری - توصیفی ارتباط پارامترهای جوی با آلودگی هوای شهر تبریز

علی محمدخورشیددوست (khorshiddoust@gmail.com)

استاد گروه آب‌وهواشناسی دانشگاه تبریز

غلام‌حسن محمدی*

دکتری آب‌وهواشناسی، کارشناس هواشناسی، سازمان هواشناسی، اداره کل هواشناسی آذربایجان شرقی

فریبا عقلمند (1244fariba@gmail.com)

کارشناس ارشد آب‌وهواشناسی، دانشگاه تبریز

عاطفه حسینی صدر (Sadr85@yahoo.com)

مربی گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۶/۲۳ - تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۷/۲۳)

چکیده

آلودگی هوا یکی از چالش‌های زیست‌محیطی امروز در بیشتر شهرهای بزرگ است. با توجه به اهمیت شرایط جوی در وقوع آلودگی هوا، این تحقیق با هدف بررسی ارتباط آلودگی‌های شهری تبریز با شرایط جوی انجام گرفت. در ابتدا با بررسی تغییرات غلظت ذرات معلق PM_{10} ، مونواکسید کربن (CO) و دی‌اکسید گوگرد (SO_2) در شهر تبریز در فصول سرد سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۲، ۳۲ دوره آلودگی هوا شامل ۱۲۴ روز، شناسایی شد. برای تشکیل پایگاه داده، ۱۲ متغیر مؤثر آب‌وهوایی در روزهای مذکور جمع‌آوری و ارتباط آنها با تغییرات غلظت آلاینده‌ها از طریق تحلیل توصیفی، اجرای آماره‌های همبستگی پیرسون و رگرسیون گام‌به‌گام بررسی شد. تحلیل توصیفی مقادیر شاخص‌های پایداری نشان داد که شاخص KI در ۱۲ درصد و شاخص TII در ۱۷ درصد روزها حالتی بین نسبتاً ناپایدار تا نسبتاً پایدار داشت و در بقیه موارد پایداری کامل حاکم بود. دید افقی بین ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ متر و دمای هوا بین $۱۲/۶-۲۱/۷$ درجه سانتی‌گراد بود. دما در ۳۷ درصد روزها زیر صفر بود. فشار سطح دریا در ۹۱ درصد روزها بیشتر از ۱۰۱۵ هکتوپاسکال و بیشینه سرعت باد روزانه در ۶۴ درصد روزها کمتر از ۵ متر بر ثانیه بود. بررسی مشخصات کمی لایه وارونگی دمایی حاکی است شدت وارونگی دمایی با میانگین $۴/۸۹$ درجه سانتی‌گراد گویای وارونگی دمایی تقریباً شدید است. عمق وارونگی دمایی بین ۹ تا ۱۷۶۹ متر و ارتفاع رأس آن به‌طور میانگین ۴۵۴ متر از سطح ایستگاه بود که حاکی از تشکیل وارونگی‌ها در ارتفاع کم در روزهای آلوده است. براساس نتایج همبستگی پیرسون، پارامترهای بیشینه سرعت باد، میانگین سرعت باد و فشار هوا بیشترین همبستگی را با تغییرات غلظت ذرات معلق PM_{10} دارند. همچنین ارتباط معناداری بین غلظت PM_{10} با هر سه شاخص پایداری وجود داشت و همچنین این آلاینده بیشترین ضریب همبستگی را با شدت وارونگی و ارتفاع رأس لایه وارونه به‌ترتیب با $۰/۲۶$ و $۰/۲۰$ ایجاد کرد. مونواکسید کربن با پارامترهای اقلیمی سطح زمین به غیر از باد همبستگی معناداری دارد. در این زمینه، بیشترین همبستگی با پارامترهای دما و رطوبت نسبی به‌ترتیب با ضرایب $۰/۶۴$ و $۰/۵۷$ ایجاد شد. غلظت دی‌اکسید گوگرد در سال‌های تحقیق هیچ‌گاه به شرایط ناسالم نرسید، اما تغییرات بیشترین همبستگی را با دما و بیشینه سرعت باد به‌صورت معکوس و با فشار سطح دریا به‌صورت مستقیم ایجاد کرد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، پارامترهای جوی، شاخص‌های پایداری، شهر تبریز، همبستگی پیرسون.

مقدمه

آلودگی هوا، هر گونه تغییر در ترکیبات ایده‌آل است که سبب تغییر در کیفیت آن می‌شود. آلاینده‌های جوی عناصری هستند که در شرایط و مقادیر معین سبب آسیب‌دیدگی انسان، حیوان، نبات و حیات میکروبی می‌شوند [۱۲]. آلودگی هوا از مشکلاتی است که بیشتر شهرهای بزرگ از جمله تبریز با آن مواجه‌اند. مهم‌ترین عوامل مؤثر در آلودگی شهر تبریز تا دهه هشتاد، صنایع بزرگ مستقر در غرب و جنوب غرب این شهر معرفی شده‌اند [۶]. اما براساس نتایج تحقیقات اخیر، مهم‌ترین و بیشترین منبع آلودگی هوای شهر تبریز، وسایط نقلیه موتوری است [۱۰]. با توجه به آثار آلودگی هوا بر آب، خاک، هوا، اقلیم، موجودات زنده و از جمله سلامت انسان، مطالعه شرایط به‌وجودآورنده و تشدیدکننده آلودگی هوا الزامی است. هوای شهر تبریز به دلیل کمبود تهویه طبیعی هوا و پایداری اتمسفر در دوره سرد سال همواره با وارونگی دما مواجه است [۷] که اغلب سبب آلودگی هوا می‌شود. به همین دلیل، این تحقیق با هدف بررسی ارتباط پارامترهای جوی با آلودگی هوا در شهر تبریز انجام گرفت. مطالعات داخلی و خارجی متعددی در خصوص تأثیر پارامترهای جوی بر آلودگی هوا انجام گرفته است. بورن [۱۷] در تحقیق خود به مدل‌سازی وارونگی دمای سطحی در آلاسکا پرداخت و مشخص کرد که وارونگی دمایی موجب تشدید پایداری هوا و به دام افتادن آلاینده‌ها می‌شود. همچنین عمق لایه وارونه چنانچه سریع‌تر از درجه حرارت کاهش یابد، سبب افزایش قدرت وارونگی می‌شود. چن و همکاران [۱۹] در بررسی کیفیت هوای شمال چین، فشار هوا را دارای همبستگی معنادار با غلظت آلاینده‌ها دانستند و استقرار پرفشارها را عامل اصلی افزایش غلظت آلاینده‌ها در پاییز و زمستان معرفی کردند.

بنابر نتایج تحقیق یاکوبلیس و همکاران [۲۴] در کالیفرنیا فراوانی وقوع وارونگی دمایی با غلظت آلاینده‌هایی نظیر ازن و سولفات در ارتباط است و همبستگی بیش از ۹۹ درصدی دارد. یاسمین [۲۶] در تحلیل لایه وارونگی و آثار زیست‌محیطی آن بر شهر کراچی با استفاده از داده‌های رادیوسوند پی برد که افزایش ارتفاع لایه وارونگی در این شهر سبب تولید گردوغبارهای قوی در وضعیت وارونگی دما می‌شود.

اشرفی و هشیاری‌پور [۱۴] در بررسی ارتباط بین الگوی پایداری جو و غلظت مونو اکسید کربن در شهر تهران، به این نتیجه رسیدند که پایداری‌های شبانه فصل پاییز بیشترین خطر آلودگی را به‌وجود می‌آورند. باچهولز و همکاران [۱۶] در شمال غرب اروپا دریافتند که رژیم‌های گردش سیکلونی از رژیم‌های آنتی‌سیکلونی در افزایش کیفیت هوا مؤثرتر بوده و روزهای دارای

پدیده بارش نسبت به روزهای با حاکمیت توده هوای خشک در کاهش PM_{10} و بهبود کیفیت هوا اثرگذارترند. دارند و حلبیان [۲۰] با استفاده از شاخص آلودگی PSI و متوسط روزانه فشار سطح دریا به طبقه‌بندی سینوپتیکی الگوهای گردشی تأثیرگذار در آلودگی هوای تهران پرداختند و نشان دادند که آلودگی هوا ارتباط نزدیکی با الگوهای سینوپتیکی دارد. پاتراکی و همکاران [۲۴] در بررسی کیفیت هوای شهر آتن، بخش عمده آلودگی این شهر را مربوط به انتشار آلاینده $PM_{2.5}$ دانستند و آلودگی‌های مربوط به PM_{10} را که تنها بخش کوچکی از آلودگی شهر را شامل می‌شود مربوط به منابع فرامنطقه‌ای (سوریه) ذکر کردند. وانق و همکاران [۲۵] و فیدس و همکاران [۲۱]، افزایش پایداری اتمسفر در فصل زمستان را دارای بیشترین تأثیر در افزایش غلظت آلاینده‌ها دانستند. همچنین فیدس و همکاران پی بردند که وزش بادهایی با سرعت کم در فصل زمستان، با افزایش غلظت PM_{10} مرتبط است. فورتلی و همکاران [۲۲] در بررسی الگوهای سینوپتیکی مؤثر بر آلودگی هوای شهر ناپل ایتالیا با توجه به غلظت PM_{10} ، استقرار پرفشار در سطح ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال را دارای بیشترین تأثیر در افزایش غلظت آلاینده‌ها معرفی کردند و نیز کاهش سرعت باد و نبود بارش در چندین روز متوالی را در افزایش غلظت PM_{10} مؤثر دانستند. بی و همکاران [۱۵] کاهش سرعت باد را از مهم‌ترین عوامل تراکم آلودگی هوا معرفی کردند. چاکرابورتی و همکاران [۱۸] با توجه به شاخص‌های پایداری جو TT ، KI و LI شاخص جدیدی بر اساس مشخصات دما و رطوبتی بسته هوای صعودی برای سطوح ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکالی، برای بررسی پایداری جو طراحی کردند که دارای همبستگی قوی با آلاینده‌ها و ذرات جامد است.

در ایران بیدختی و بنی‌هاشم [۲] با بررسی لایه مرزی نزدیک به سطح زمین دریافتند که غلظت آلاینده‌ها در زمستان، با شرایط هواشناختی یکسان، به‌طور معمول بیشتر از روزهای تابستان است. زاهدی و همکاران [۶] در بررسی تأثیرات عوامل اقلیمی در تشکیل هسته هوای آلوده شمال غرب ایران عوامل توپوگرافی، موقعیت جغرافیایی، لایه اینورژن، پایداری هوا، جریان هوا، جهت و سرعت باد و همچنین استقرار نامناسب کارخانه‌ها را در تشکیل هسته‌ها مؤثر دانستند. بررسی‌های دلجو [۵] نشان داد که گاز مونواکسیدکربن دارای ضریب همبستگی منفی با سمت و سرعت باد است و غلظت آن، با شدت وارونگی رابطه مستقیم دارد.

عابدینی [۹] پایداری جو را دارای بیشترین تأثیر در افزایش آلودگی هوا معرفی کرد. شرعی‌پور [۸] به بررسی تغییرات فصلی و روزانه آلاینده‌های هوا و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی با استفاده از داده‌های هواشناسی تهیه‌شده در طی دوره زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷ پرداخت و دریافت که تغییرات فصلی آلاینده‌های CO ، NO_2 و PM_{10} دارای دو بیشینه در

فصول زمستان و تابستان است. از پژوهش‌های دیگر می‌توان به تحقیق قنبری و عزیزی [۱۱] در شبیه‌سازی عددی رفتار آلودگی هوای تهران براساس الگوی باد؛ تحقیق بیدختی [۳] در بررسی شرایط هواشناختی جو بالا و وضعیت حاد آلودگی هوای شهر تهران؛ بررسی بابازاده و محمدی [۱] در بررسی روند آلاینده‌های فتوشیمیایی در شهر تهران؛ تحقیق یآوری و سلیقه [۱۳] در زمینه بررسی سطوح وارونگی در آلودگی هوای شهر تهران؛ و پژوهش جهانبخش اصل و روشنی [۴] درباره بررسی وارونگی دمایی شدید شهر تبریز اشاره کرد.

بررسی تحقیقات مشخص کرد که پژوهش جامعی در زمینه ارتباط و همبستگی بین پارامترهای جوی با آلودگی هوا در شهر تبریز انجام نگرفته است. در این تحقیق تلاش شد با گردآوری داده‌های مربوط مواردی از روزهای آلوده اتفاق افتاده در فصول سرد شهر تبریز بررسی شود.

مواد و روش‌ها

شهر تبریز، مرکز استان آذربایجان شرقی است که با ۱۳۶۰ متر ارتفاع از سطح دریای آزاد و مساحت تقریبی ۲۳۷/۴۵ کیلومتر مربع در موقعیت جغرافیایی $38^{\circ} 07'$ تا $46^{\circ} 27'$ طول شرقی و $38^{\circ} 01'$ تا $38^{\circ} 08'$ عرض شمالی واقع شده است.

دوره‌های آماری این تحقیق، سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۹۲ در طی دوره سرد سال بود. در این تحقیق از سه نوع داده استفاده شد: الف) داده‌های روزانه و ساعتی پارامترهای هواشناسی نظیر دید افقی، رطوبت نسبی، دما، فشار (سطح دریاهای آزاد)، میانگین و بیشینه سرعت باد که از اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی اخذ شد؛ ب) آمار روزانه و ساعتی آلاینده‌های جوی شامل CO ، SO_2 ، PM_{10} و $PM_{2.5}$ که از اداره کل حفاظت محیط زیست استان آذربایجان شرقی گردآوری شد. این داده‌ها مربوط به میانگین داده‌های ایستگاه‌های میدان نماز (راسته کوچه)، راه آهن، حکیم نظامی، باغ شمال و ایستگاه آبرسان است. داده‌های ثبت شده برای غلظت ذرات معلق از سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱ مربوط به ذرات کمتر از ۱۰ میکرون است، ولی از سال ۱۳۹۲ به بعد غلظت ذرات کمتر از ۲/۵ میکرون ($PM_{2.5}$) به جای ذرات ۱۰ میکرون ثبت شده است؛ ج) داده‌های مشاهداتی جو بالا (مستخرج از رادیوسوند) شامل شاخص‌های پایداری جو (SI ، KI ، TTI)، و اطلاعات مربوط به خصوصیات لایه وارونگی دما (شدت وارونگی دمایی، عمق لایه وارونه و ارتفاع رأس لایه وارونگی دما) که از وبگاه دانشگاه ایومینگ اخذ شد. شاخص SI بر اساس ویژگی‌های دمایی ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال محاسبه می‌شود و معرف ناپایداری در لایه پایینی جو است و برحسب درجه سلسیوس بیان می‌شود (رابطه ۱).

شاخص KI در ترازهای ۸۵۰،۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال براساس تغییرات قائم دما، محتوای رطوبت لایه‌های زیرین و توسعه عمودی لایه مرطوب، پایداری جو را نشان می‌دهد (رابطه ۲). شاخص TTI با استفاده از ویژگی‌های ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، پایداری ایستایی تراز میانی و رطوبت تراز زیرین را نشان می‌دهد (رابطه ۳).

$$SI = T_{500} - T \quad (1)$$

$$KI = (T + T_d)_{850} - (T - T_d)_{700} - T_{500} \quad (2)$$

$$TTI = (T + T_d)_{850} - 2T_{500} \quad (3)$$

بعد از جمع‌آوری داده‌های خام اولیه، دوره‌های مطالعاتی با در نظر گرفتن دو مشخصه زیر از بین فصول سرد سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۲ انتخاب شد: اول اینکه دست‌کم یکی از آلاینده‌های CO، PM₁₀، SO₂ در روز تحت بررسی دارای غلظت زیادی باشد. دوم روزهایی که دارای کد پدیده هواشناسی ۰۵ یا ۱۰ بوده و دارای دید افقی کمی باشند. در انتها برای روزهای شناسایی شده پایگاه داده‌ای تهیه شد که شامل ۳۲ دوره آلودگی هوا و دربرگیرنده ۱۲۴ روز بودند. داده‌های روزانه جمع‌آوری شده ماتریسی در ابعاد ۱۶ در ۱۲۴ ساخته شد که در محیط نرم‌افزارهای آماری برای تحلیل‌های آماری و ترسیم نمودار وارد شدند. سپس برای بررسی ارتباط پارامترهای جوی با غلظت آلاینده‌های جوی از آماره‌های توصیفی، همبستگی پیرسون و رگرسیون گام‌به‌گام استفاده شد. در این روش متغیرهای مستقل از مهم‌ترین متغیر تا کم‌اهمیت‌ترین به صورت مرحله‌ای وارد مدل می‌شوند و در پایان عملیات، هر متغیری که معناداری کمتری از سطح تعیین شده داشته باشد، وارد معادله نمی‌شود. در این مدل ابتدا متغیر وابسته (آلاینده‌های PM₁₀، CO و SO₂) به عنوان متغیر پاسخ (Y) وارد مدل شد و سپس همه متغیرهای مستقل شامل شاخص‌های پایداری جو، عمق، شدت و ارتفاع رأس لایه وارونگی دمایی، دید افقی، رطوبت نسبی، فشار هوا، دما، سرعت باد و بیشینه سرعت باد به عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده (X) به مدل اضافه شدند.

بحث و نتایج

در این تحقیق در ابتدا به تحلیل توصیفی داده‌های جمع‌آوری شده پرداخته شد که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. بررسی مقادیر شاخص پایداری SI نشان داد که در ۳۰ درصد روزهای منتخب رقم این شاخص بیشتر از ۱۷+ بود و در شرایط بسیار پایدار قرار گرفت. کمترین مقدار

این شاخص پایداری ۱ شرایط نسبتاً ناپایدار تا خنثی در جو را نشان می‌دهد که فقط در ۱/۶ درصد روزها مشاهده شد و در بقیه روزها شرایط پایداری حاکم بود. رقم‌های منفی بزرگ‌تر در شاخص‌های KI و TTI نشان‌دهنده بحرانی شدن وضعیت پایداری در جو است. در مورد شاخص KI در ۱۲ درصد موارد و در شاخص TTI فقط در ۱۷ درصد روزها حالتی بین نسبتاً ناپایدار تا نسبتاً پایدار (تقریباً شرایط خنثی) مشاهده شد و در باقی روزها شرایط پایداری کامل در جو حکم‌فرما بود. همچنین میانگین شاخص KI ۱۶/۷- و شاخص TTI، ۱۷ محاسبه شد که نشان‌دهنده پایداری جو در بیشتر روزهاست.

تغییرات میزان دید افقی در ۳۲ دوره مطالعاتی بین ۶۰۰ تا ۱۰۰۰۰ متر در نوسان بود؛ در ۳۷ درصد روزها، دید افقی به کمتر از ۵۰۰۰ متر و در ۶۳ درصد روزها هم، به بیشتر از ۵۰۰۰ متر رسید. در طول دوره‌های تحت بررسی، متوسط میانگین رطوبت نسبی ۵۳/۱ درصد بود که حاکی از درصد تقریباً زیاد این عنصر اقلیمی است. رطوبت نسبی کمتر از ۵۰ درصد در ۴۵ درصد روزها حاکمیت داشت که این مقادیر کمتر در رطوبت نسبی، اغلب در نیمه‌های اول فصل پاییز و در ماه‌های مهر و آبان به وقوع پیوست. این در حالی است که ۵۵ درصد روزها رطوبت نسبی بیشتر از ۵۰ درصد دارند. کمترین و بیشترین دمای ثبت‌شده به ترتیب ۱۲/۶- و ۲۱/۷ درجه سانتی‌گراد است و ۳۷ درصد روزها دارای دمای زیر صفر بودند. میانگین ۳/۳ درجه سانتی‌گرادی دما نشان‌دهنده دمای به نسبت کم در طول روزهای آلوده است. مقادیر فشار سطح دریا (SLP) در طول سال‌های آماری بین ۱۰۰۸ تا ۱۰۳۶ هکتوپاسکال است که در ۹۱ درصد روزها، فشار بیشتر از ۱۰۱۵ هکتوپاسکال بود. میانگین ۱۰۳۲ هکتوپاسکالی تصدیق‌کننده فشار زیاد است.

بیشترین و کمترین سرعت باد، ۵/۷ و ۰/۸ متر بر ثانیه به ترتیب مربوط به ماه‌های مهر و دی بود که این روند برای بیشینه سرعت باد هم بین ۱۵ تا ۲ متر بر ثانیه محاسبه شد. سرعت باد کمتر از ۳ متر بر ثانیه، در ۸۹ درصد از روزها مشاهده شد و در ۶۴ درصد روزها حداکثر سرعت باد کمتر از ۵ متر بر ثانیه بود که چنین شرایطی گویای نبود تهویه توسط جریان‌های جوی است.

۱. میزان مقاومت یک توده هوا در مقابل حرکات صعودی را درجه پایداری توده هوا می‌نامند. رابطه بین افت آهنگ قائم دما و افت آهنگ بی‌دررو (فراپندی که در آن تبادل حرارتی با محیط صورت نمی‌گیرد) در داخل توده هوا مهم‌ترین تأثیر را در پایداری و ناپایداری توده هوا دارد. برای مطالعه پایداری و ناپایداری جو از یک رشته شاخص استفاده می‌شود که به آنها شاخص‌های پایداری (ناپایداری) جو می‌گویند.

جدول ۱. آمارهای توصیفی داده‌های جمع‌آوری شده برای روزهای آلودگی هوا در شهر تبریز

داده‌ها	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	میانگین
شاخص SI	۲/۲۵	۲۵	۱۴/۶
شاخص KI	-۷۲	۳۹	-۱۶/۷
شاخص TTI	-۱۹	۵۳/۶	۱۷
دید افقی m	۶۰۰	۱۰۰۰۰	۵۲۲۰
رطوبت نسبی (درصد)	۲۸	۸۳/۵	۵۳/۱
دما (درجه سانتی‌گراد)	-۱۲/۶	۲۱/۷	۳/۳
فشار (هکتوپاسکال)	۱۰۰۸	۱۰۳۶	۱۰۳۲
سرعت باد (m/s)	۰/۸	۵/۷	۲/۵
حداکثر سرعت باد (m/s)	۲	۱۵	۴/۷
PM ₁₀ (mcg/m ³)	۷/۸	۳۸۶	۱۱۵/۴
CO(ppm)	۲/۵	۱۲	۶/۴
SO ₂ (ppb)	۰/۱	۵۲/۸	۱۹/۲
شدت وارونگی دمایی (°C)	۰/۲	۳۱/۲	۴/۸۹
عمق وارونگی دمایی (m)	۹	۱۷۶۹	۲۳۸/۳
ارتفاع رأس لایه وارونگی دمایی (m)	۲۰	۴۲۸۹	۴۵۳/۹

غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون، بین ۷/۸ تا ۳۸۶ میکروگرم بر متر مکعب بود؛ در ۶۳ درصد روزها غلظت آنها به بیش از ۱۰۰ میکروگرم رسید و فقط در ۴/۸ درصد روزها، PM₁₀ به کمتر از ۵۰ میکروگرم بر متر مکعب کاهش یافت. مقدار میانگین محاسبه‌شده (۱۱۵/۴ میلی‌گرم بر متر مکعب) حاکی از نبود شرایط سالم در بیشتر روزهاست. در روزهای منتخب، غلظت مونواکسید کربن بین ۲/۵ تا ۱۲ ppm بود؛ در ۷۳ درصد روزها میزان این آلاینده بیشتر از ۶ ppm و تنها در ۲۷ درصد روزها کمتر از این میزان بود. با توجه به میانگین ۶/۴ ppm، میزان مونواکسید کربن در بیشتر روزها در شرایط ناسالم قرار گرفت. دی‌اکسید گوگرد آلاینده‌ای است که غلظت آن همراه با افزایش دیگر آلاینده‌ها افزایش یا کاهش یافت، ولی غلظت آن در هیچ موردی به شرایط ناسالم نزدیک نشد و در بیشترین مقدار به ۵۲/۸ ppb رسید.

بررسی مشخصات کمی لایه وارونگی دمایی نشان داد که شدت وارونگی دمایی در طی دوره‌های تحت بررسی با میانگین ۴/۸۹ درجه، گویای وقوع وارونگی دمایی تقریباً شدید است. همچنین عمق وارونگی دمایی بین ۹ تا ۱۷۶۹ متر در روزهای منتخب محاسبه شد. ارتفاع

رأس لایه وارونگی دمایی با میانگین ۴۵۴ متر ارتفاع از سطح ایستگاه حاکی از تشکیل وارونگی‌ها در ارتفاع کم در روزهای آلوده است.

در این بخش از تحقیق به منظور تحلیل ارتباط بین غلظت آلاینده‌های PM_{10} ، SO_2 و CO با شاخص‌های پایداری جو و پارامترهای اقلیمی در شهر تبریز به تحلیل نتایج همبستگی پیرسون پرداخته شد. همان‌طور که در جدول ۲ نمایش داده شده است، در بین پارامترهای اقلیمی بیشینه سرعت باد، میانگین سرعت باد و فشار بیشترین همبستگی را با ذرات معلق PM_{10} ایجاد کردند و با رطوبت نسبی و دما ارتباط معناداری نداشتند. ضریب همبستگی حداکثر سرعت باد با ذرات معلق به میزان ۰/۴۶- به این معناست که هر قدر سرعت وزش بیشینه سرعت باد بیشتر باشد، غلظت ذرات معلق (کوچک‌تر از ۱۰ میکرون) تا حد زیادی کاهش می‌یابد و برعکس. همچنین باید یادآور شد که همبستگی ۰/۲۲- با فشار سطح دریا نشان می‌دهد روزهایی که میزان PM_{10} افزایش می‌یابد، مقدار فشار از میزانی که برای میانگین سال‌های آماری محاسبه شده است (۱۰۳۲ هکتوپاسکال) کمتر بوده است.

در این تحقیق ارتباط معناداری بین غلظت PM_{10} با هر سه شاخص پایداری در سطح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد محاسبه شد. با این تفاوت که ارتباط بین غلظت PM_{10} با شاخص SI به صورت معکوس (ضریب همبستگی منفی) و با شاخص‌های TTI و KI به صورت مستقیم بوده است. این شرایط به این دلیل است که مقادیر شاخص‌های TTI و KI با میل به سمت رقم‌های منفی کوچک‌تر و مقادیر شاخص SI به سمت رقم‌های مثبت بزرگ‌تر، نشان‌دهنده تشدید پایداری جو هستند. نکته مهم این است که با توجه به مقادیر شاخص‌های مذکور در زمان وقوع بیشترین غلظت آلاینده‌ها در شهر تبریز، مشخص شد که هر قدر شاخص‌های TTI و KI به سمت رقم‌های مثبت و شاخص SI به سمت رقم‌های منفی (خارج شدن از حالت بحرانی پایداری اتمسفر) نزدیک‌تر می‌شوند، غلظت‌های زیاد PM_{10} اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر غلظت‌های زیاد PM_{10} در زمان‌های پایداری غیربحرانی به وقوع می‌پیوندد (جدول ۲).

از بین خصوصیات لایه وارونگی دمایی استخراج شده، غلظت PM_{10} بیشترین ضریب همبستگی را به میزان ۰/۲۶ با شدت وارونگی و همچنین با ارتفاع رأس لایه وارونه همبستگی معکوس معنادار ایجاد کرد، اما با عمق لایه وارونگی دمایی، ارتباط معناداری محاسبه نشد. این آمارها گویای این مطلب مهم هستند که هرچه شدت وارونگی زیاد و در ارتفاع کمتری تشکیل شود، سبب افزایش غلظت PM_{10} می‌شود.

جدول ۲. نتایج آماره ضریب همبستگی پیرسون بین آلاینده‌های جوی با پارامترهای اقلیمی، شاخص‌های پایداری جو و لایه وارونگی دمایی در شهر تبریز

متغیرها	PM ₁₀		CO		SO ₂	
	ضریب همبستگی	معناداری	ضریب همبستگی	معناداری	ضریب همبستگی	معناداری
دید افقی m	-۰/۳۰	۰/۰۰۱	۰/۲۶	۰/۰۰۰	-۰/۲۹	۰/۰۰۲
فشار (hpa)	-۰/۲۲	۰/۰۰۲	-۰/۳۹	۰/۰۰۰	۰/۴۱	۰/۰۰۰
رطوبت نسبی (/)	-۰/۰۸	۰/۳۸	-۰/۵۷	۰/۰۰۰	۰/۲۶	۰/۰۰۶
دما (°C)	۰/۰۵	۰/۵۵	۰/۶۴	۰/۰۰۰	-۰/۴۴	۰/۰۰۰
سرعت باد (m/s)	۰/۳۷	۰/۰۰۰	-۰/۰۶	۰/۵۳	-۰/۱۵	۰/۱۲
بیشینه سرعت باد (mps)	-۰/۴۶	۰/۰۰۰	-۰/۰۵	۰/۵۷	-۰/۳۳	۰/۰۰۱
شاخص SI	-۰/۲۴	۰/۰۰۲	-۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۳۰	۰/۰۰۰
شاخص KI	۰/۲۵	۰/۰۰۳	۰/۱۹	۰/۰۵	-۰/۲۸	۰/۰۴
شاخص TTI	۰/۱۹	۰/۰۰۵	-۰/۰۷	۰/۴۳	-۰/۱۷	۰/۰۰۷
ارتفاع رأس لایه وارونگی دمایی (m)	-۰/۲۰	۰/۰۰۳	-۰/۲۰	۰/۰۰۳	۰/۱۶	۰/۰۰۸
عمق وارونگی دمایی (m)	-۰/۱۲	۰/۱۹	-۰/۰۹	۰/۳۶	۰/۱۲	۰/۲۰
شدت وارونگی دمایی (°C)	۰/۲۶	۰/۰۰۷	۰/۲۳	۰/۰۱۶	۰/۲۲	۰/۰۰۱

آلاینده مونواکسیدکربن (CO) در شهر تبریز با همه پارامترهای اقلیمی سطح زمین به جز باد همبستگی معناداری دارد. در این میان بیشترین همبستگی با پارامترهای دما و رطوبت نسبی به ترتیب با ضرایب ۰/۶۴ و -۰/۵۷ دیده می‌شود و در رتبه‌های بعدی، فشار سطح دریا و دید افقی قرار دارد. نکته شایان توجه، همبستگی مستقیم مونواکسید کربن با دید افقی (با ضریب ۰/۲۶) است (جدول ۲). به عبارت دیگر این آلاینده گازی بی‌رنگ، نه تنها هیچ تأثیری در کاهش دید افقی ندارد، بلکه براساس داده‌های جمع‌آوری شده، با افزایش غلظت مونواکسید کربن، میدان دید افقی افزایش می‌یابد. مونواکسید کربن با شاخص‌های SI و TTI دارای ارتباط معناداری نیست، ولی با شاخص KI با ضریب همبستگی ۰/۱۹ ارتباط مستقیمی دارد؛ از این رو زمانی که شاخص KI از حالت بحرانی خارج می‌شود، انتظار می‌رود افزایش مونواکسید کربن اتفاق بیفتد. به طور کلی، همبستگی‌های معنادار آلاینده مونواکسید کربن با فشار هوا و دمای

سطح زمین و شاخص KI ناشی از دو عامل است: الف) غلظت‌های بیشتر از ۹ ppm این آلاینده در نیمه اول فصل پاییز و در روزهایی با هوای گرم و شرایط پایداری ضعیف و آستانه‌های فشاری پایین؛ ب) افزایش این آلاینده در روزهای پایانی برخی از دوره‌های مطالعاتی با کاهش فشار هوا و کاهش شرایط پایداری جو (به‌خصوص در شاخص KI) و تضعیف سامانه‌های پرفشار مستقر در منطقه. غلظت مونواکسید کربن با دو پارامتر مربوط به خصوصیات کمی لایه وارونگی دما (یعنی شدت وارونگی دمایی و ارتفاع رأس لایه وارونگی دما) همبستگی معنادار در سطح اطمینان ۹۵ درصد ایجاد کرد که همانند غلظت PM_{10} این آلاینده نیز بیشترین ضریب همبستگی را با شدت وارونگی دما داشت. عمق وارونگی هم ارتباط معناداری با این آلاینده ندارد. در این مورد نیز با تشدید وارونگی و کاهش ارتفاع رأس لایه وارونگی دما، غلظت CO افزایش می‌یابد.

غلظت دی‌اکسید گوگرد در سال‌های تحقیق هیچ‌گاه به شرایط ناسالم نزدیک نشد، ولی غلظت این آلاینده در روزهای همراه با پایداری جو و وارونگی دمایی افزایش یافت و در بیشترین حد خود در دوره‌های مطالعاتی به ۵۳ ppb رسید. براساس جدول ۲ غلظت SO_2 بیشترین همبستگی را با دما و بیشینه سرعت باد به‌صورت معکوس و با فشار سطح دریا به‌صورت مستقیم دارد که نشان می‌دهد غلظت‌های زیاد این آلاینده در روزهایی با بیشینه سرعت باد و دمای هوای کم و فشار زیاد همراه است. ضریب همبستگی ۰/۴۱ این آلاینده با فشار هوا نشأت گرفته از این موضوع است که بیشترین غلظت آن در روزهایی که سامانه‌های پرفشار مستقر در منطقه به اوج فعالیت خود می‌رسند، روی می‌دهد. ضرایب همبستگی محاسبه‌شده بین غلظت دی‌اکسید گوگرد با شاخص‌های SI و KI به ترتیب ۰/۳۰ و ۰/۲۸- بود و مقادیر آن با شاخص TTI ارتباط معناداری نشان نداد. دی‌اکسید گوگرد تنها آلاینده‌ای است که بیشترین غلظت‌های آن فقط در پایدارترین روزها به وقوع پیوست. پارامتر شدت وارونگی با ضریب همبستگی ۰/۲۲، حکایت از افزایش غلظت SO_2 به تبع افزایش شدت لایه وارونه است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده حاکی از معنادار نبودن ارتباط بین عمق وارونگی و ارتفاع رأس لایه وارونگی با این آلاینده است.

- تحلیل نتایج رگرسیون چندمتغیره گام‌به‌گام

با تحلیل رگرسیون گام‌به‌گام آلاینده‌ها با همه متغیرهای مورد بررسی، مؤثرترین متغیرهای تأثیرگذار بر غلظت آلاینده‌ها به ترتیب مشخص می‌شود. نتیجه اجرای رگرسیون گام‌به‌گام برای آلاینده PM_{10} ، از بین پارامترهای جوی تحت مطالعه به ترتیب سه متغیر بیشینه سرعت باد،

شدت وارونگی دمایی و شاخص KI را به عنوان مؤثرترین عوامل تعیین کننده در رابطه با غلظت این آلاینده در شهر تبریز مشخص کرد (جدول ۳). این آلاینده بیشترین ضریب همبستگی را با بیشینه سرعت باد دارد و شدت وارونگی به عنوان یکی از مهم ترین مشخصات وارونگی دمایی، در رتبه دوم این مدل قرار گرفته است. شاخص KI به عنوان سومین متغیر مستقل در مدل رگرسیون انتخاب شد.

در خروجی نهایی رگرسیون گام به گام آلاینده CO، از بین ۱۲ متغیر مستقل، فقط دما و شدت وارونگی دمایی در مدل نهایی باقی ماندند و به عنوان مؤثرترین پارامترهای جوی در تغییرات غلظت آلاینده CO مشخص شدند (جدول ۴). ضریب همبستگی ۰/۶۴ این آلاینده با دما به این دلیل است که اغلب غلظت های بسیار بحرانی (بیشتر از ۹ ppm) این آلاینده در ماه های مهر و آبان روی می دهد که میانگین دمای روزانه در این ماه ها عمدتاً گرم تر از ماه های سرد سال است که هوای آلوده در شهر تبریز شکل می گیرد.

جدول ۳. خروجی آماره رگرسیون گام به گام بین غلظت PM_{10} با متغیرهای جوی

متغیرهای منتخب	ضریب همبستگی	معناداری	ضریب تعیین (R^2)
حداکثر سرعت باد	۰/۴۶	۰/۰۰۰	۰/۲۱
شدت وارونگی دمایی	۰/۲۶	۰/۰۰۳	۰/۳۴
شاخص KI	۰/۲۸	۰/۰۰۲	۰/۳۸

جدول ۴. خروجی آماره رگرسیون گام به گام بین غلظت مونواکسید کربن (CO) با متغیرهای جوی

متغیرهای منتخب	ضریب همبستگی	معنی داری	ضریب تعیین (R^2)
دما	۰/۶۴	۰/۰۰۰	۰/۴۲
شدت وارونگی دمایی	۰/۲۳	۰/۰۰۸	۰/۴۶

نتایج به دست آمده از مدل رگرسیون گام به گام برای دی اکسید گوگرد مشخص کرد که متغیرهای دما، بیشینه سرعت باد روزانه و شدت وارونگی دمایی امتیاز لازم را برای ماندن در مدل نهایی به دست آورده اند (جدول ۵). با توجه به نتیجه حاصل با استفاده از میانگین دما، حداکثر سرعت باد و شدت وارونگی دمایی، غلظت SO_2 را با دقت خوبی تخمین زد.

جدول ۵. خروجی آماره رگرسیون گام به گام بین غلظت دی اکسید گوگرد (SO_2) با متغیرهای جوی

متغیرهای منتخب	ضریب همبستگی	معناداری	ضریب تعیین (R^2)
دما	-۰/۴۴	۰/۰۰۰	۰/۱۹
بیشینه سرعت باد	-۰/۳۳	۰/۰۰۰	۰/۲۶
شدت وارونگی	۰/۲۲	۰/۰۱	۰/۳۱

نتیجه گیری

نتایج بررسی‌ها و تحلیل توصیفی و آماری نشان داد که بین عناصر اقلیمی PM_{10} با بیشینه سرعت باد، میانگین سرعت باد و فشار هوا، مونواکسید کربن با دمای هوا و رطوبت نسبی و در نهایت، دی اکسید گوگرد با دما، فشار هوا و بیشینه سرعت باد، بیشترین همبستگی را داشته‌اند، از این رو از بین پارامترهای اقلیمی بیشینه سرعت باد، دما و فشار هوا همبستگی بیشتری با آلاینده‌ها دارند. غلظت ذرات معلق از بین شاخص‌های پایداری جو به ترتیب با شاخص‌های SI، KI، و TTI دارای همبستگی معنادار است. مونواکسید کربن هم از بین شاخص‌های پایداری مورد مطالعه فقط با وضعیت‌های غیربحرانی شاخص KI و آلاینده SO_2 با شاخص‌های SI و KI دارای همبستگی معنادار است. شدت وارونگی دما با هر سه آلاینده مزبور دارای همبستگی مثبت است که نشان دهنده تشدید آلاینده‌ها در وارونگی‌های دمایی شدید است. بررسی‌ها نشان داد غلظت زیاد آلاینده‌های PM_{10} و SO_2 تأثیر زیادی بر کاهش میزان دید افقی در روزهای آلوده شهر تبریز داشته است. همچنین دما مؤثرترین عنصر بر روند ایجاد آلاینده‌های مونواکسید کربن (ارتباط مستقیم و به صورت افزایش دما) و دی اکسید گوگرد (ارتباط معکوس به صورت کاهش دما) است. سرعت باد و حداکثر سرعت باد هم بیشترین تأثیر را بر روند پخش و تراکم غلظت ذرات معلق دارند. از مجموع همه متغیرهای مورد بررسی شدت وارونگی دمایی، شاخص KI (شرایط پایداری جو) و میزان فشار، از عواملی اند که ارتباط بیشتری با نوسان‌های غلظت هر سه آلاینده دارند.

منابع

- [۱]. بابازاده، مینا؛ و محمدی، حسین (۱۳۸۹). «بررسی روند آلاینده‌ها و جو در تشکیل مه‌دود فتوشیمیایی در شهر تهران»، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۱۵، ش ۳۱، ص ۱۲۹-۱۰۹.

- [۲]. بیدختی، علی اکبر؛ و بنی هاشم، تاج الدین (۱۳۷۵). «لایه آمیخته شهری و آلودگی هوا»، محیط‌شناسی، ش ۲۰، ص ۶۰-۵۲.
- [۳]. بیدختی، علی اکبر (۱۳۸۸). «شرایط هواسناختی جو بالا و وضعیت حاد آلودگی هوا (مطالعه موردی: شهر تهران)»، محیط‌شناسی، سال سی و پنجم، ش ۵۲، ص ۱۴-۱.
- [۴]. جهانبخش اصل، سعید؛ و روشنی، رقیه (۱۳۹۳). «بررسی شرایط الگوی سینوپتیکی حاکم بر وضعیت‌های وارونگی دمای بسیار شدید شهر تبریز»، نشریه علمی- پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۱۸، ش ۴۸، ص ۹۶-۸۱.
- [۵]. دلجو، امیر هوشنگ (۱۳۸۷). مطالعه و بررسی وارونگی دما و ناپایداری بر روی آلودگی هوای شهر تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران.
- [۶]. زاهدی، مجید؛ ذوالفقاری، حسن؛ و ترابی، سیما (۱۳۷۸). بررسی تأثیرات عوامل اقلیمی در تشکیل هسته هوای آلوده شمال غرب، دومین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم - سازمان هواشناسی کشور.
- [۷]. سلطانی، مجید؛ و امیدفر، محمد (۱۳۹۰). «بررسی تأثیر وارونگی دما (اینورژن) در افزایش آلودگی هوای کلانشهرها (مطالعه موردی شهر تبریز)»، مرکز تحقیقات هواشناسی کاربردی استان آذربایجان شرقی، تبریز.
- [۸]. شرعی پور، زهرا (۱۳۸۷). «بررسی تغییرات فصلی و روزانه آلاینده‌های هوا و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی»، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۵، ش ۲، ص ۱۳۷-۱۱۹.
- [۹]. عابدینی، علی (۱۳۷۸). اثر پایداری شدید بر تمرکز آلودگی هوای شهرهای دره‌ای (تهران)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس دانشکده منابع طبیعی.
- [۱۰]. عباسی، مریم (۱۳۹۱). نقش آلاینده‌های هوا در تغییر فرم و رژیم بارشی فصل زمستان شهر تبریز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز.
- [۱۱]. قنبری، حسین علی؛ و عزیزی، قاسم. (۱۳۸۸). «شبیه‌سازی عددی رفتار آلودگی هوای تهران بر اساس الگوی باد»، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ش ۶۸، ص ۳۲-۱۵.
- [۱۲]. کاویانی، محمدرضا (۱۳۸۷). میکروکلیماتولوژی، تهران: سمت.
- [۱۳]. یاور، حسین؛ و سلیقه، محمد (۱۳۹۰). «سطوح وارونگی در آلودگی‌های شهر تهران»، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، جلد ۱۷، ش ۲۰، ص ۱۰۵-۹۰.
- [14]. Ashraf, Kh. and Hoshyaripour, Gh. A., (2010), A model to determine atmospheric stability and its correlation with CO concentration, International Journal of Civil and Environmental Engineering 2:2, pp 83-8.

- [15]. Bei, N., Zhao, L., Xiao, B., Meng, N., feng, T., (2017), "Impacts of local circulation on the wintertime air pollute Guanzhong Basin, China" *Science of the Total Environment*, 592, pp 373–390.
- [16]. Buchholz, S., Junk, j., Krein, A., Heinemann, G. and Hoffmann, L., (2010), Air pollution characteristics associated with mesoscale atmospheric patterns in northwest continental Europe, *Atmospheric Environment* vol44, pp 5183-5190.
- [17] Bourne, S. M., (2008), A climate perspective of observed and modeled surface-based temperature inversions in Alaska, a Thesis master of science University of Alaska Fairbanks.
- [18]. Chakraborty, R., Saha, U., Singh, A K., Maitra, A., (2017), Association of atmospheric pollution and instability indices: A detailed investigation over an Indian urban metropolis, *Atmospheric Research*, S0169-8095 (19)30703-7.
- [19]. Chen, Z,H., Cheng, S,Y., Li, J,B., Guo,X,R., Wang, W,H., Chen,D,S., (2008), Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China, *Atmospheric Environment* 42, PP 6078-6087.
- [20]. Darand, M. and Halabian, A. H., (2013), Classification synoptic circulation patterns impacting on air Pollution in Tehran, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 3(5), pp 140- 146.
- [21]. Fiddes, S.L., Pezza, A.B., Mitchell, T.A., Kozyniak, k., Mills., (2016), Synoptic weather evolution and climate drivers associated with winter air pollution in New Zealand, *Atmospheric Pollution Research*, pp 1-8.
- [22]. Fortelli, A., Scafetta, N., Mazzarella, A., (2016), Influence of synoptic and local atmospheric patterns on PM₁₀ air pollution levels: A model application to Naples (Italy), *Atmospheric Environment*, S1352-2310(16)30643-4.
- [23]. Iacobellis, S. F., Norris, J. R., Kanamitsu, M., Tyree, M., and Daniel, R., (2009), Climate variability and california low-level temperature inversion, California Climate Change Center, Scripps Institution of Oceanography.
- [24]. Pateraki, St., Assimakopoulos V D., Maggos, Th., Fameli, K M., Kotroni, V., Vasilakos, Ch., (2013), Particulate matter pollution over a Mediterranean urban area, *Science of the Total Environment* 463-464, 508-524.
- [25]. Wang, F., Chambers, Sd., Zhang, Z., Wiliams, A G., Deng, X., Zhang, H., Lonati, G., Crawford, J., Griffiths, A D., Ianniello, A., Allegrini, I., (2016), Quantifying stability influences on air pollution in Lanzhou, China, using a radon-based "stability monitor": Seasonality and extreme events, *Atmospheric Environment* 145, pp 376-391.
- [26]. Yasmeen, Z., (2010), Inversion layer and its environmental impact over karachi, *Pakistan Journal of Meteorology Pakistan*, Vol. 7, Issue 14, pp 53-62.
- [27]. <http://weather.uwyo.edu>.