Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی

سال هجدهم، شماره‌ی ۶۲
تابستان ۱۳۹۷، صفحات ۷۶-۶۳

علی پناهی[۱]

بررسی ارتباط بین آلاینده های شاخص کیفیت هوا و پارامترهای هواشناسی در اینورژهای شدید شهر تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹٤/۱۰/۲٦ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰٤/۰۹

چکیده

آلودگی هوای شهر تبریز یکی از معضلات اساسی این شهر است. از جمله عوامل طبیعی مؤثر در آلودگی هوا، می‌توان به پدیده وارونگی دما به‌عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در محیط‌های شهری نام برد به همین جهت هدف تحقیق حاضر بررسی رابطه معنی‌داری بین غلظت آلاینده‌های ذرات معلق (PM10)، منواکسید کربن و دی کسید گوگرد با پارامترهای هواشناسی مانند دید افقی، فشار، رطوبت نسبی، دما، سرعت باد، حداکثر سرعت باد، شاخص KI، ارتفاع رأس لایه وارونگی دمایی، عمق وارونگی دمایی و شدت وارونگی دمایی در شهر تبریز می‌باشد. برای این مهم، یک دوره ۵ ساله، از سال (۱۳۸۷ تا ۱۳۹۲) در نظر گرفته شد و شرایط آلودگی شهر تبریز در روزهای وقوع اینورژن با استفاده از نقشه‌های اسکیوتی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی ارتباط بین غلظت آلاینده‌ها با مشخصات لایه وارونگی دما و پارامترهای اقلیمی و پایداری جو از همبستگی پیرسون و برای مشخص کردن متغیرهایی که نقش بیش‌تری در افزایش یا کاهش غلظت آلاینده‌ها داشته‌اند از رگرسیون خطی چند متغیره گام‌به‌گام استفاده شده است بر اساس نتایج به دست آمده مقدار PM10 با شدت وارونگی و فشار، CO با شدت وارونگی، میزان فشار و رطوبت نسبی، SO2 با شدت وارونگی و میزان دما، دارای همبستگی معنادار می‌باشند. نتایج حاصل از رگرسیون چند متغیره گام‌به‌گام نیز نشان داد که، شدت وارونگی دمایی تنها متغیری که با هر سه آلاینده‌ی مزبور دارای همبستگی مثبت

۱- گروه جغرافیا، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. E-mail: Panahi@iaut.ac.ir

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

می‌باشد، که این مسئله حاکی از تاثیر شدت لایه وارونه بر روند آلودگی هوا و تشدید غلظت آلاینده‌ها می‌باشد. همچنین رطوبت نسبی و دما بعد از شدت وارونگی دمایی موثرترین عنصر بر روند آلاینده‌های CO و SO2 بوده است. در نتیجه متغیرهای شدت وارونگی، دما، رطوبت نسبی و میزان فشار بیش‌ترین تاثیر را بر غلظت آلاینده‌ها داشته‌اند.

کلید واژه‌ها: آلودگی، وارونگی دمایی، پارامترهای هواشناسی، همبستگی، رگرسیون خطی چند متغیره، تبریز.

مقدمه

از مسائل مهم در بررسی آب‌وهوا که تاثیر زیادی در سلامتی موجودات زنده یک منطقه دارد، مسئله آلودگی هواست. از مهم‌ترین موضوعاتی که امروزه در ارتباط با اقلیم مطرح است بحث مربوط به توسعه شهرنشینی و آلودگی هوای شهری و متعاقب آن آب‌وهوای شهری می‌باشد (Shokouie, 2006: 9). در شهرها آلاینده‌های متعددی تولید می‌شود کـه مجموع آن‌ها مه دود شهری را تشکیل می‌دهند. عمده‌ترین آلاینده‌های تشکیل‌دهنده مـه دود شهری عبارتند از: منواکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد، ازون و غبار. در تشکیل مه دود عناصرآب و هوایی مثل تابش، دما، رطوبت، پایداری جو، وارونگی دما، سمت و سرعت باد موثرند. اگر هوا پایدار بوده و ارتفاع لایه وارونگی دما پائین باشد آلاینده‌ها متراکم شده و غلظت آلودگی بالا می‌رود. اگر جو ناپایدار باشد و باد بوزد، مواد زاید از جو شهری خارج شده و پس از صعود به سمت لایه‌ای بالاتر با هوای آن لایه‌ها مخلوط شده و رقیق می‌گردند (Botkin and Keller, 2000: 49) گسترش شهرنشینی و توسعه شهرها به همراه افـزایش شتابان جمعیت و توسعه فعالیت‌های صنعتی با مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی به‌شدت آلودگی‌ها را افزایش داده است که عواقب آن در درجه اول به‌صورت امراض و بیماری‌های تنفسی، تشدید بیماری‌های قلبی‌وریوی، متوجه ساکنان شهرها می‌شود و در مرحله بعد، به‌عنوان عاملی در تشدید تغییرات اقلیمی، نوسانات اقلیمی و تاثیرات زیست‌محیطی حاصل از آن‌ها، نقش ایفا می‌نماید (Chappelka, 2007: 86).

شهر تبریز نیز از جمله شهرهای بزرگ ایران می‌باشد که تحت تاثیر این معضل محیطی قرار دارد چرا که افزایش روز افزون مواد آلاینده و شرایط خاص توپوگرافیکی شهر تبریز بر شدت آلاینده‌ها می‌افزاید. در این تحقیق برای بررسی بیش‌تر، نمونه‌ای از مطالعاتی که تاکنون در خارج و داخل کشور صورت گرفته‌اند، به شرح زیر بیان می‌شود:
Lam &Cheng (1998) طبقه‌بندی سینوپتیک و کاربرد آن را در تعیین تاثیرات اقلیمی بر روی غلظت دی‌اکسید سولفور و اکسید نیتروژن را در شهر هنگ‌کنگ انجام دادند. Huei Lin & Yang Chen (2002) در تحقیقی تحت عنوان استفاده از شاخص استاندارد مواد آلاینده به‌عنوان شاخص کیفیت هوا در تایوان، کشور تایوان را به شمالی، مرکزی،شرقی و جنوبی تقسیم و مقدار PSI این مناطق را برای یک سال تعیین کردند. در تحقیقی که Karar & Gupta (2006) انجام

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

دادند نشان دادند که مقدار متوسط غلظت آلاینده PM 10 به علت افزایش رطوبت هوا در تابستان کاهش می‌یابد و مقدار آن در زمستان بیش‌تر است.

Janhall et (2006) به بررسی افزایش هواویزهای شهر نوردیک در طول دوره‌های وقوع وارونگی دما در فصل زمستان پرداختند. آن‌ها با بررسی اطلاعات به‌دست آمده از ابزار سنجش لیدار، به این نتیجه رسیدند که وارونگی‌های دما یکی از علت‌های اصلی تصویب قانون آستانه کیفیت هوا برای اکثر آلوده‌کننده‌های اصلی شهر است. در این تحقیق غلظت و تمرکز ذرات آلوده‌کننده در طول روزهای فصل زمستان همراه با وارونگی دما و بدون وارونگی مقایسه شده‌اند. آن‌ها دریافتند که وارونگی دما در صبح زمستان، همراه با غلظت بالای ذرات آلوده‌کننده مربوط به ترافیک است. این ذرات ریز شامل CO ، NO و NO2 می‌باشند. تحلیل آلودگی هوا در اطراف ایستگاه‌های مرکزی شهر لندن، تحقیق دیگری است که توسط Alessandro et al (2010) صورت گرفته است. در این مقاله نیز ارتباط و همبستگی آلودگی و مقدار آلاینده‌ها را با وارونگی دمایی برای نقاط مختلف شهر لندن و برای روزهای پرتردد و زمان تعطیلات مورد بررسی قرار دادند. Barmpadimos et al (2011) اندازه‌گیری ذرات PM-10 و ارتباط آن با متغیرهای اقلیمی را مورد بررسی قرار داده و بیان می‌کنند که اکثر متغیرهای مهم موثر بر غلظت PM-10 در زمستان، پاییز و بهار وابسته به بارش و وزش باد بوده و حتی روند تغییرات را در روزهای مختلف سال را مورد تحلیل قرار داده‌اند.Blaschke & Feizizadeh (2013) به بررسی جزیره حرارتی شهر تبریز و ارتباط آن با کاربری زمین و آلودگی هوا پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که مراکز حرارتی بالا با مناطق مسکونی و مناطق صنعتی در ارتباط بوده هر چند در مرکز شهر واقع نشده‌اند. همچنین نتایج نشان داد که همبستگی بالایی بین UHIS و تحلیل حجمی آلودگی هوا وجود دارد به‌طوری که در این مواقع مقدار PM اندازه‌گیری شده خیلی زیاد می‌باشد.

Wu et al (2014) به بررسی ارتباط اینورژن و آلودگی هوا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لیدار[۲] برای منطقه جیانلین از شهر نانجینگ پرداخته‌اند و برای آلودگی ۲۳ و ۲٤ دسامبر (۲۰۱۲) و ارتباط آن را با عناصر اقلیمی دما، رطوبت، جهت باد و سرعت، و فشار هوا با اینورژن مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که وارونگی فرارفت موجب این آلودگی شدید شده است.

Zahedi et al (1999) در مقاله‌ای به بررسی تأثیرات عوامل اقلیمی، از جمله اثر لایه وارونگی دما بر روی هسته آلوده شرق شهر تبریز پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در طی فصل سرد سال، که هوای سرد و پایدار در منطقه حاکم است و همچنین زمانی که لایه وارونگی دما در ارتفاع نسبتاً پائینی (معمولاً بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر) قرار دارد، هسته آلوده شروع به رشد می‌کند و پائین بودن ارتفاع لایه وارونگی دما در شرق تبریز نسبت به غرب آن باعث تقویت و افزایش هسته آلوده می‌شود Safavi & Alijani (2006) عوامل مؤثر در آلودگی هوای تهران را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که عوامل جغرافیایی و همچنین استقرار سامانه‌های پرفشار در فصل زمستان نقش مهمی در آلودگی هوای تهران دارند). Alijani & Najafinik (2009) به بررسی الگوهای سینوپتیکی اینورژن در مشهد با استفاده از

2- lidar

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

تحلیل عاملی پرداخته و الگوهای مختلف را مورد بررسی قرار داده و همچنین در این تحلیل به بررسی الگوهای تأثیرگذار پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که بیش‌ترین وارونگی‌ها در فصل زمستان اتفاق می‌افتد و دارای قدرت و دوام بیش‌تری می‌باشد. Jahanbakhshasl & Roshani (2013) به بررسی وضعیت و شدت وارونگی‌های سطح پایین‌شهر تبریز طی دوره (۲۰۰٤ تا ۲۰۰۸) پرداخته و بیان داشته‌اند که میانگین تعداد روزهای توأم با پدیده وارونگی دما در تبریز ۱۹۱ روز می‌باشد که ۸۷ درصد آن مربوط به وارونگی دمای تابشی و ۱۳ درصد دیگر، مربوط به وارونگی دمای فرونشینی می‌باشد. در کل ۲٤ مورد وارونگی دمای شدید در این دوره مشاهده شد که ۱۷ مورد آن در فصل زمستان به‌خصوص در ماه ژانویه و ۷ مورد دیگر آن در فصل پاییز اتفاق افتاده‌اند و اکثر وارونگی‌های بسیار شدیدی که در فصل زمستان اتفاق افتاده‌اند، از نوع تابشی می‌باشند. Keykhsrowi & Lashkari (2014) در مقاله‌ای با عنوان تحلیل رابطه بین ضخامت و ارتفاع وارونگی و شدت آلودگی هوا در شهر تهران به این نتیجه رسیده‌اند که زمانی که ارتفاع اینورژن به سطح زمین نزدیک شده است، برشدت آلودگی هوا (شاخص کیفیت هوای ایستگاه‌ها) افزوده شده و این مساله در اینورژن‌های انتقالی به‌طور چشم‌گیری بر شدت آلودگی هوا افزوده است. در اینورژن‌های با منشأ دینامیکی، شرایط اقلیمی حاکم به‌گونه‌ای بوده است که پایداری عمیقی در لایه‌های نزدیک سطح زمین ایجاد نموده است.

به طور کلی، نتیجه مطالعات نشان می‌دهد که در منابع خارجی در دهه‌های اخیر، تحقیقات خوبی در زمینه تغییر اقلیم و تأثیر آن بر روی سلامتی انسان صورت گرفته است. در حالی که در کشور ما مطالعات پایه‌ای در این زمینه صورت نگرفته و اطلاعات اندک در این زمینه هم تنها با استناد به تجربیات حاصله بوده است. به همین علت در مقاله حاضر، سعی شده است با استناد به آمار و ارقام مربوط به رادیوسوند به تأثیرگذاری و تأثیرپذیری پدیده وارونگی دما و شدت و کثرت و تداوم آن از عوامل و عناصر آب‌وهوایی گوناگون به خصوص در فصول سرد سال که آلودگی شدت می‌یابد، پرداخته شود.

مواد و روش‌ها

دوره‌های آماری مورد بررسی در این تحقیق با توجه به قرارگیری وارونگی‌های دمایی شدید و غلظت‌های بالای آلاینده‌ها در ماه‌های سرد سال، از فصول سرد سال‌های (۱۳۹۲-۱۳۸۷) می‌باشند. در این تحقیق از چهار گروه داده، استفاده شده است که شامل :

۱. آمار روزانه پارامترهای هواشناسی نظیر دید افقی، رطوبت نسبی، دما، فشار (سطح دریاهای آزاد)، سرعت و حداکثر باد به همراه کلیه پدیده‌ی هواشناسی، که از سازمان هواشناسی استان آذربایجان‌شرقی اخذ شده است.

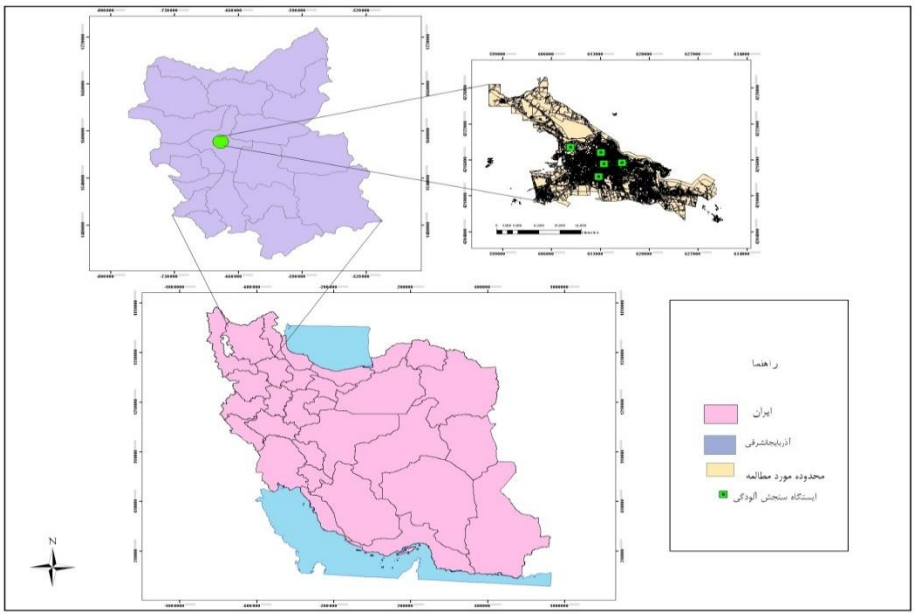
۲. آمار روزانه آلاینده‌های جوی شامل CO، SO2 PM10 و PM2.5، که از اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان آذربایجان‌شرقی گردآوری شده‌اند. آمار روزانه آلاینده‌های شهر تبریز مربوط به میانگین داده‌های ایستگاه‌های میدان نماز (راسته کوچه)، راه آهن، حکیم نظامی، باغ شمال و ایستگاه آبرسان می‌باشند (شکل ۱). داده‌های ثبت شده برای

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

غلظت ذرات معلق از سال‌های (۱۳۸۷تا ۱۳۹۱) مربوط به ذرات کم‌تر از ۱۰ میکرونی می‌باشد (PM10) ولی از سال (۱۳۹۲) به بعد غلظت ذرات کم‌تر از ۲/۵ میکرون (PM2.5) به جای ذرات ۱۰ میکرون ثبت شده است.

۳. نمودارهای Skew-T، داده‌های رادیوسوند تبریز شامل شاخص پایداری جو (KI) و داده‌های اقلیمی ثبت شده رادیوسوند در ارتفاعات مختلف، که این اطلاعات از سایت دانشگاه وایومینگ اخذ شده است.

٤. نقشه‌های هم فشار به‌دست آمده از سایت NCEP/NCAR، در سطح زمین و ترازهای مختلف.



شکل ۱: موقعیت محدوده و ایستگاه‌های سنجش آلودگی

وضعیت آلاینده‌ها از نظر سالم و ناسالم بودن در این تحقیق با استفاده از شاخص PSI مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۱ و ۲). در تحقیق حاضر محدوده ناسالم برای غلظت CO هشت ساعته، غلظت‌های بیش‌تر از ٦ پی پی ام و همچنین محدوده‌ی ناسالم برای PM_{10} غلظت‌های بیش‌تر از ۱۲۰ میکروگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. (شکل ۲) دلایل تغییر محدوده سالم برای غلظت آلاینده‌های مزبور (با توجه به شاخص PSI) برای شهر تبریز را در علت‌های زیر می‌توان یافت:

– در شهر تبریز موقعیت مکانی و وجود ساختمان‌های بلند در ایستگاه آبرسان موجب کانالیزه شدن باد در آن می‌شود و این مسئله موجب شده تا همواره در طول دوره‌های مورد بررسی با وجود ترافیک و تردد همیشگی وسایل نقلیه در این ایستگاه، میزان منواکسیدکربن بسیار کم‌تر به ثبت برسد. در نتیجه میزان کم CO ثبت شده در ایستگاه آبرسان باعث پایین آمدن میانگین روزانه این آلاینده می‌شود، که با وضعیت آلوده شهر تبریز در روزهای آلوده همخوانی پیدا نمی‌کند. همچنین باید اذعان کرد آمار آلاینده‌های برخی ایستگاه‌ها، در بعضی از ماه‌ها اصلاً ثبت نشده است. در نتیجه برای از بین بردن تاثیرات این مسائل در آمار روزانه آلاینده‌ها، محدوده سالم برای غلظت CO هشت ساعته، به جای غلظت‌های تا ppm ۹، تا ppm ٦ در نظر گرفته شده است.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

– در آلودگی هوای شهرها ذرات $PM_{2.5}$ بیش‌تر از ذرات معلق ۱۰ میکرونی اهمیت دارند و در وضعیت ناسالم و هشدار قرار می‌گیرند. بنابراین در اکثر مواردی که غلظت $PM_{2.5}$ در جو شهر در وضعیت بسیار ناسالم قرار دارد، میزان PM_{10} در وضعیت سالم تا ناسالم قرار می‌گیرد. با توجه به این مطلب که در شهر تبریز برای ذرات معلق تا سال ۹۱ آمار ذرات معلق کم‌تر از ۱۰ میکرونی ثبت شده و فقط از سال (۱۳۹۲) به بعد آمار $PM_{2.5}$ در دسترس می‌باشد در نتیجه برای این‌که آمار روزانه PM_{10} به درستی گویای وضعیت آلودگی جو شهر باشد میزان ناسالم برای PM_{10} به‌جای ۱۵۰، ۱۲۰ میکروگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. علاوه بر دلایل ذکر شده سازمان COMEAP که به اثرات بهداشتی آلاینده‌های هوا می‌پردازد بر اساس شاخص AQI رتبه‌بندی جدیدی را برای کیفیت هوا در رابطه با پنج گروه از آلاینده‌ها بدون در نظر گرفتن منواکسیدکربن تدوین کرده است (جدول ۳). طبق این شاخص برای PM_{10} بالاتر از ۸۳ میکروگرم آلودگی زیاد و بیش‌تر از ۱۰۱ میکروگرم آلودگی بسیار زیاد و وضعیت بسیار ناسالم و خطرناک معرفی شده است. بنابراین با لحاظ قرار دادن همه‌ی مطالب عنوان شده، میزانی که شاخص PSI برای شرایط سالم منواکسیدکربن و ذرات معلق ۱۰ میکرونی مشخص کرده است، برای شهر تبریز پایین‌تر در نظر گرفته شده تا به درستی گویای وضعیت سالم و ناسالم جو شهر تبریز باشد.

جدول ۱- شاخص آلودگی هوا

PSI	۰–۵۰	۵۰–۱۰۰	۱۰۰–۲۰۰	۲۰۰–۳۰۰	> ۳۰۰
وضعیت	پاک	سالم	ناسالم	بسیار ناسالم	خطرناک

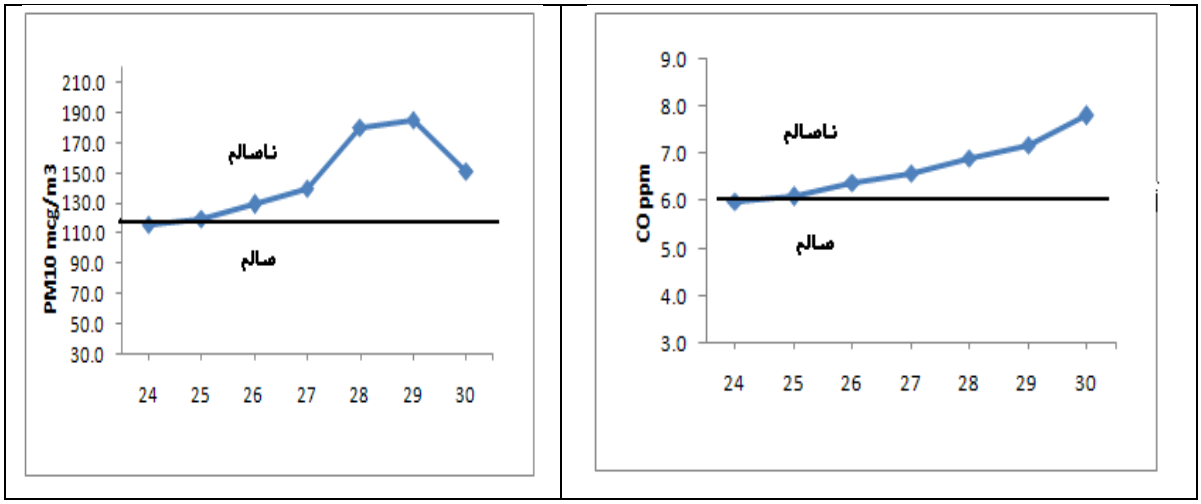
جدول ۲- رابطه بین غلظت آلاینده‌ها و PSI

PSI	**Concenteration**					
	CO (ppm)	O3 (ppb)	NO_2 (ppb)	SO_2 (ppb)	PM_{10} (mcg/m3)	$PM_{2.5}$ (mcg/m3)
	۸ ساعت	۱ساعت	۱ساعت	۲٤ ساعت	۲٤ ساعت	۲٤ ساعت
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵۰	٤/۵	٦۰	۱۵۰	۳۰	۷۵	۱۲
۱۰۰	۹	۱۲۰	۳۰۰	۱٤۰	۱۵۰	۵۵
۲۰۰	۱۵	۲۰۰	٦۰۰	۳۰۰	۳۷۵	۱۵۰
۳۰۰	۳۰	٤۰۰	۱۲۰۰	٦۰۰	٦۲۵	۲۵۰
٤۰۰	٤۰	۵۰۰	۱٦۰۰	۸۰۰	۸۷۵	۳۵۰
۵۰۰	۵۰	٦۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

جدول ۳- رتبه‌بندی پنج گروه از آلاینده‌ها طبق شاخص AQI توسط سازمان COMEAP[3]

آلودگی هوا	ارزش شاخص	O_3 (mcg/m^3)	NO_2 (mcg/m^3)	SO_2 (mcg/m^3)	$PM_{2.5}$ (mcg/m^3)	PM_{10} (mcg/m^3)
کم	۱	۰-۳۳	۰-۶۷	۰-۸۸	۰-۱۱	۰-۱۶
	۲	۳۴-۶۶	۶۸-۱۳۴	۸۹-۱۷۷	۱۲-۲۳	۱۷-۳۳
	۳	۶۷-۱۰۰	۱۳۵-۲۰۰	۱۷۸-۲۶۶	۲۴-۳۵	۳۴-۵۰
متوسط	٤	۱۰۱-۱۲۰	۲۰۱-۲۶۷	۲۶۷-۳۵٤	۳۶-٤۱	۵۱-۵۸
	۵	۱۲۱-۱٤۰	۲۶۸-۳۳٤	۳۵۵-٤٤۳	٤۲-٤۷	۵۹-۶۶
	۶	۱٤۱-۱۶۰	۳۳۵-٤۰۰	٤٤٤-۵۳۲	٤۸-۵۳	۶۷-۷۵
زیاد	۷	۱۶۱-۱۸۷	٤۰۱-٤۶۷	۵۳۳-۷۱۰	۵٤-۵۸	۷۶-۸۳
	۸	۱۸۸-۲۱۳	٤۶۸-۵۳٤	۷۱۱-۸۸۷	۵۹-۶٤	۸٤-۹۱
	۹	۲۱٤-۲٤۰	۵۳۵-۶۰۰	۸۸۸-۱۰۶٤	۶۵-۷۰	۹۲-۱۰۰
بسیار زیاد	۱۰	≤ ۲٤۱	≤ ۶۰۱	≤ ۱۰۶۵	≤ ۷۱	≤ ۱۰۱



شکل ۲: نمونه ای از بررسی مقدار PM10 و CO در روزهای آلوده از ۳ تا ۹ دی ۱۳۸۹

پس از انتخاب روزهای آلوده، روزهای انتخابی از نظر وجود وارونگی دمایی، با استفاده از داده‌های رادیوسوند و نمودار ترمودینامیکی (Skew-T) مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین از داده‌های اقلیمی ثبت شده رادیوسوند در ارتفاعات مختلف شدت و عمق وارونگی دمایی و ارتفاع رأس لایه وارونه استخراج شده است. شدت و عمق وارونگی دمایی مورد استفاده در این تحقیق به‌ترتیب از اختلاف دمایی (به درجه سانتی‌گراد) و اختلاف ارتفاعی لایه وارونه (به متر) به‌دست می‌آیند. برای بررسی بیش‌تر و بهتر وارونگی دمایی، پایداری جو نیز مورد بررسی قرار گرفته است و

3- COMEAP. "Review of the UK Air Quality Index". COMEAP website

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

برای این منظور از شاخص پایداری جو، KI[4] استفاده شده است این شاخص مستخرج از داده‌های رادیوسوند می‌باشد که ویژگی‌های این شاخص در زیر ذکر شده است:

شاخص KI: این شاخص که بر اساس تغییرات قائم دما، محتوای رطوبت لایه‌های زیرین و توسعه عمودی لایه مرطوب استوار است.

$$KI= (T+Td)\ 850-(T-Td)\ 700-T_{500}$$ رابطه (۱)

در رابطه‌ی فوق T500، T700، T850 به‌ترتیب دما در ترازهای ۵۰۰،۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال و Td850 وTd700 دمای نقطه شبنم ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال برحسب درجه سلسیوس می‌باشند. اگر رقم محاسبه شده برای شاخص K کم‌تر از ۱۵+ باشد، نشان دهنده‌ی پایداری اتمسفر می‌باشد.

جدول ٤- رابطه‌ی بین شاخص KI و پایداری جو

وضعیت پایداری جو	شاخص KI
نسبتاً پایدار	۰ تا ۱۵
پایدار	۲۰- تا ۱-
بسیار پایدار	٤۱- تا ۲۱-
شدیدا پایدار	≤ ٤۲-

نمونه‌ای از داده‌های رادیوسوند در (شکل ۳) آورده شده است. ستون عمودی داده‌های رادیوسوند به‌ترتیب از سمت چپ شامل داده‌های مربوط به ۱. فشار (هکتوپاسکال)، ۲. ارتفاع به متر، ۳. درجه حرارت به (سانتی‌گراد)، که در روزهای دارای وارونگی دمایی ابتدا دما نسبت به ارتفاع افزایش می‌یابد و سپس به منفی می‌رسد و با اطلاعات مربوط به دما می‌توان اطلاعات افت آدیاباتیک خشک و اشباع را استخراج کرد. ٤. دمای نقطه شبنم (درجه سانتی‌گراد)، ۵. رطوبت نسبی به در صد، ٦. نسبت اختلاط ۷. جهت وزش باد به درجه، ۸. سرعت باد (نات).

4- k Index

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

40706 OITT Tabriz Observation at 12Z 25 Dec 201

PRES hPA	HGHT m	TEMP c	DWPT c	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THAT K	THTE K	THTV K
1000.0	342									
880.0	1361	-5.9	-12.9	58	1.62	280	4	277.2	281.9	277.5
868.0	1467	-6.9	-13.9	57	1.51	211	3	277.2	281.7	277.5
850.0	1627	-8.5	-13.4	68	1.61	105	1	277.2	281.9	277.5
848.0	1645	-8.5	-13.5	67	1.60	112	1	277.4	282.1	277.7
840.0	1720	-7.8	-14.0	61	1.54	140	2	278.9	283.5	279.2
828.0	1833	-6.7	-14.9	52	1.46	85	2	281.2	285.6	281.5
804.0	2064	-4.5	-16.6	38	1.31	300	9	286.0	290.0	286.2
769.0	2414	-1.1	-19.1	24	1.10	291	5	293.2	296.8	293.4
748.0	2634	-1.9	-20.5	23	1.00	285	3	294.7	297.9	294.9
734.0	2785	-2.5	-21.5	22	0.94	304	6	295.6	298.7	295.8
705.0	3104	-3.4	-22.4	21	0.91	345	12	298.1	301.2	298.3
700.0	3160	-3.5	-22.5	21	0.90	340	12	298.6	301.6	298.7
687.0	3308	-4.5	-25.5	18	0.70	333	11	299.1	301.4	299.2
653.0	3701	-7.3	-28.0	17	0.59	315	10	300.3	302.3	300.4
634.0	3930	-8.9	-29.4	17	0.53	330	12	300.9	302.8	301.1
593.0	4449	-12.6	-32.7	17	0.42	315	13	302.5	303.9	302.5
588.0	4514	-13.1	-33.1	17	0.40	317	14	302.7	304.1	302.7
557.0	4924	-16.0	-41.4	9	0.18	330	17	302.9	304.6	304.0
548.0	5047	-16.9	-43.9	8	0.14	325	15	304.3	304.8	304.3
540.0	5157	-17.6	-44.8	7	0.13	355	17	304.7	305.2	304.8

شکل ۳: نمونه‌ای از داده‌های رادیوسوند

بعد از جمع‌آوری و بررسی سه گروه داده‌ای، شامل گروه‌های داده‌ای اخذ شده از اطلاعات رادیوسوند، داده‌های اقلیمی و داده‌های مربوط به آلاینده‌ها، دوره‌های مطالعاتی با در نظر گرفتن سه مشخصه از بین فصول سرد سال‌های (۱۳۸۷ تا ۱۳۹۲) انتخاب شده‌اند. این سه مشخصه در زیر آورده شده‌اند:

– مشخصه‌ی اول شامل روزهایی که دارای کد پدیده هواشناسی ۰۵ و یا ۱۰ بوده و هم دارای دید افقی پایینی باشند.

– دوم، روزها دارای وارونگی دمایی شدید و دارای پایداری اتمسفر از نظر مقادیر مربوط به شاخص KI باشند.

– سوم، دارای غلظت بالای هر سه و یا یک مورد از آلاینده‌های منواکسیدکربن، دی کسید گوگرد و ذرات معلق در روزهای مورد بررسی باشند. در انتها برای روزهای گردآوری شده بر اساس هر سه مشخصه مزبور، پایگاه داده‌ای در نرم‌افزار Excel تهیه شده است که این داده‌های جمع آوری شده شامل پنج دوره‌ی مطالعاتی و ۳۰ روز می‌باشند.

در این تحقیق برای بررسی ارتباط بین غلظت آلاینده‌ها با مشخصات لایه وارونگی دما و پارامترهای اقلیمی و پایداری جو از همبستگی پیرسون استفاده شده است. ضریب همبستگی پیرسون ارتباط بین دو یا چند متغیر را نشان می‌دهد و همچنین میزان تاثیرگذاری یک متغیر بر متغیر دیگر را مورد آزمون قرار می‌دهد. در اینجا با استفاده از این روش به بررسی همبستگی بین غلظت آلاینده‌های PM_{10}، SO_2 و CO با عمق و شدت وارونگی دمایی، ارتفاع رأس لایه وارونگی دما، شاخص پایداری جو (شاخص KI) و پارامترهای اقلیمی (دید افقی، رطوبت نسبی، دما، فشار، سرعت

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

باد و حداکثر سرعت باد) پرداخته شده است. نتایج همه‌ی این همبستگی‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد محاسبه شده است، که در این حالت سطح معناداری ضریب همبستگی کم‌تر از ۰/۰۵ می باشد. در بخش تحلیل‌های آماری، به علت کم بودن آمار مربوط به آلاینده‌ی PM2.5 (فقط در سال ۱۳۹۲) استفاده نشده است. همچنین برای مشخص کردن متغیرهایی که نقش بیش‌تری در افزایش یا کاهش غلظت آلاینده‌ها داشته‌اند از رگرسیون خطی چند متغیره گام‌به‌گام استفاده شده است. در این روش متغیرهای مستقل از مهم‌ترین متغیر تا کم‌اهمیت‌ترین، به‌صورت مرحله‌ای وارد مدل می‌شوند و در پایان عملیات، هر متغیری که سطح معنی‌داری کم‌تری از سطح تعیین شده داشته باشد، وارد معادله نمی‌شود. در این مدل ابتدا آلاینده‌های PM10، CO و SO2 به‌عنوان متغیر وابسته و هر کدام در مدل رگرسیون جداگانه‌ای وارد معادله شده‌اند. سپس تمامی متغیرهای مستقل، شامل عمق و شدت وارونگی و ارتفاع رأس لایه وارونگی دمایی، شاخص‌های پایداری KI، رطوبت نسبی، فشار، دما، سرعت باد و حداکثر سرعت باد به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده (x) به مدل اضافه می‌گردند. نتایج نهایی رگرسیون گام‌به‌گام همگی در سطح اطمینان ۹۵ درصد محاسبه شده‌اند.

یافته‌ها و بحث

بررسی همبستگی پیرسون ذرات معلق با سایر متغیرها نشان می‌دهد که این آلاینده با شدت وارونگی دمایی و میزان فشار دارای همبستگی معنی‌دار می‌باشد. شدت لایه وارونه با همبستگی۰/۵۷و میزان فشار با ضریب همبستگی ۰/۲۰- نشان‌دهنده‌ی افزایش غلظت آلاینده در روزهای انتهایی دوره‌ها، همراه با کاهش فشار و افزایش شدت لایه وارونگی می‌باشد (جدول ۵).

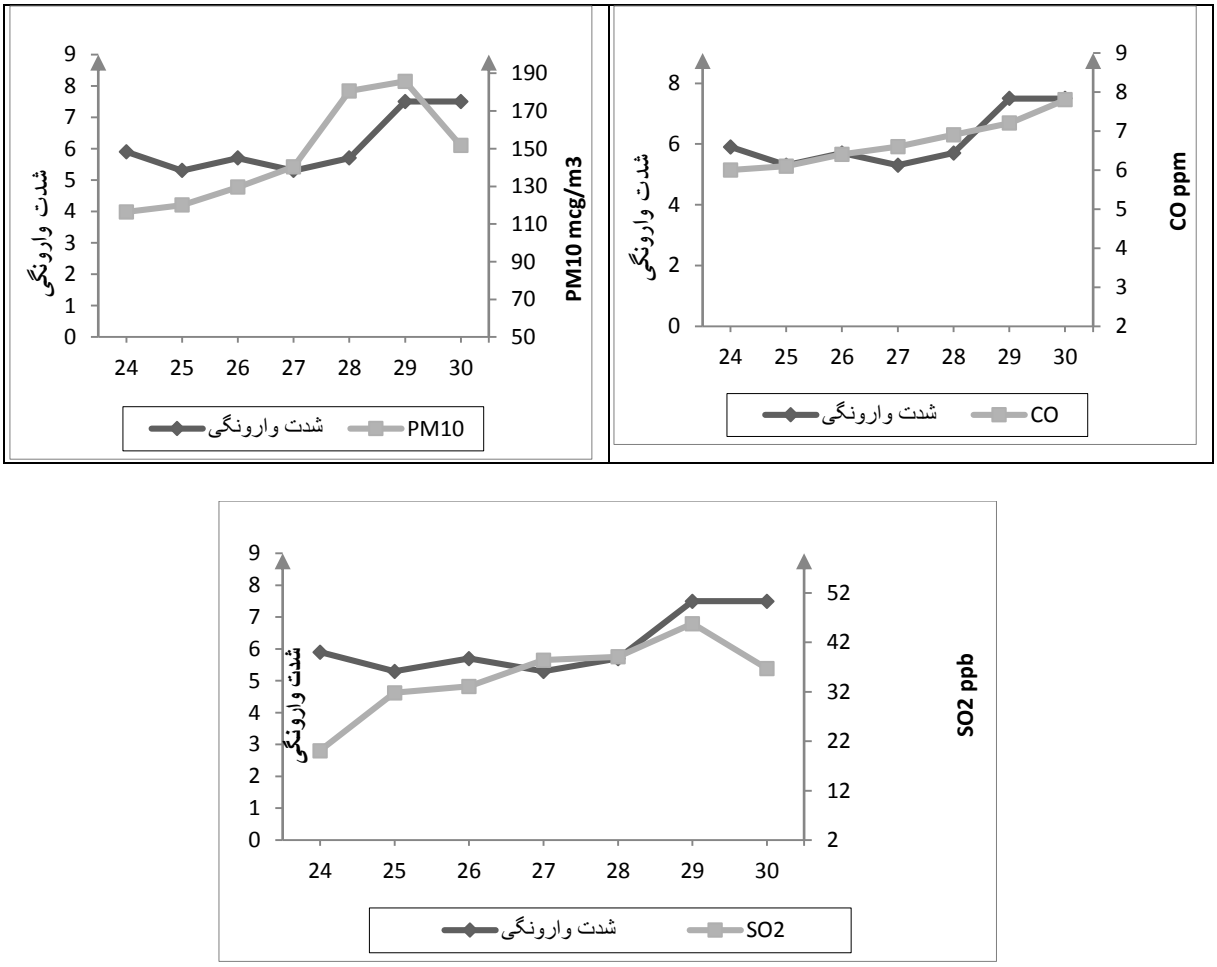
جدول ۵- ضریب همبستگی پیرسون PM_{10} ، CO و SO_2 با پارامترهای اقلیمی و ارتفاع رأس لایه، عمق و شدت وارونگی دمایی و شاخص پایداری KI

متغیرها	PM_{10}		CO		SO_2	
	ضریب همبستگی	سطح معناداری	ضریب همبستگی	سطح معناداری	ضریب همبستگی	سطح معناداری
دید افقی m	-۰/۲۷	۰/۲۱	۰/۲٤	۰/۲٦	-۰/۵۸	۰/۰۰٤
فشار (هکتوپاسکال)	-۰/۲۰	۰/۳۲	-۰/٤۲	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۷۳
رطوبت نسبی (درصد)	-۰/۰٦	۰/۷۸	-۰/٦۱	۰/۰۰۲	۰/۲٦	۰/۲٤
دما (درجه سانتی گراد)	-۰/۰۲	۰/۹۱	۰/۳۸	۰/۰۸	-۰/٤۱	۰/۰۵
سرعت باد (m/s)	۰/۱٦	۰/٤۷	۰/۲٦	۰/۲۳	۰/۰٤	۰/۸٤
حداکثر سرعت باد (m/s)	۰/۱٤	۰/۵۱	۰/۲٦	۰/۲٤	-۰/۰۳	۰/۸۷
شاخص KI	۰/۱۸	۰/٤۲	۰/۰٦	۰/۷۸	-۰/۰۳	۰/۸۷
ارتفاع رأس لایه وارونگی دمایی(m)	۰/۱۹	۰/۳۷	۰/۰۳	۰/۸۹	۰/۳٦	۰/۰۸
عمق وارونگی دمایی (m)	۰/۱۲	۰/۵۷	۰/۲۷	۰/۲۱	۰/۱۷	۰/٤۳
شدت وارونگی دمایی (درجه سانتی‌گراد)	۰/۵۸	۰/۰۰٤	۰/۷۱	۰/۰۰۰	۰/٤٦	۰/۰۲

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

منواکسیدکربن بیش‌ترین همبستگی را با شدت وارونگی و رطوبت نسبی به میزان ۰/٦۷ و ۰/۵۹- دارا می‌باشد. همبستگی معکوس۰/٤۲ CO با فشار، تحت تاثیر افزایش غلظت این آلاینده در روزهای پایانی دوره بوده است، همچنین این آلاینده با سایر متغییرها دارای ارتباط معنی‌دار نمی‌باشد (جدول ٦). نتایج حاصل از بررسی‌ها مشخص کرد، اکثراً افزایش غلظت CO در روزهای پایانی دوره‌های مطالعاتی، با افزایش شدت لایه وارونه، کاهش نسبی میزان فشار و رطوبت نسبی همراه بوده است.

میزان دی کسید گوگرد در سال‌های مورد مطالعه هیچ‌گاه به شرایط ناسالم نزدیک نگردیده، ولی با این وجود غلظت SO_2 در روزهای همراه با وارونگی دمایی و غلظت بالای سایر آلاینده‌ها، افزایش یافته و در بالاترین میزان خود در طی دوره‌های مطالعاتی به ٤۸ ppb رسیده است. از لحاظ همبستگی پیرسون، این آلاینده با شدت لایه وارونگی، میزان دما و دید افقی دارای همبستگی معنی‌دار می‌باشد (جدول ٦). همچنین همبستگی SO_2 به میزان ۰/٤٦ با شدت لایه وارونه و همبستگی معکوس ۰/٤۱ با دما، حاکی از اوج‌گیری غلظت این آلاینده در روزهایی با وارونگی دمایی قوی و دماهای پایین می‌باشد.



شکل ٤: نمونه از بررسی غلظت آلاینده‌ها با توجه به‌شدت وارونگی

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

همچنین مدل نهایی رگرسیون گام‌به‌گام نیز مشخص کرد که شدت وارونگی دمایی با ضریب تعیین ۰/۳۳، بیش‌ترین ارتباط و تاثیرگذاری را بر غلظت PM_{10} داشته است (جدول ٦). این نتایج به‌دست آمده تایید کننده‌ی افزایش غلظت ذرات معلق در روزهایی با وارونگی دمایی شدید می‌باشد.

جدول ٦- مقدار ضرایب مدل رگرسیون گام به گام در رابطه با PM_{10}، CO و SO_2

متغیر		مقدار ضرایب	سطح معنی‌داری	(R)	(R^2) ضریب تعیین	(R^2) تعدیل شده
PM_{10}	شدت وارونگی دمایی	۰/۵۸	۰/۰۰۲	۰/۵۸	۰/۳۳	۰/۳۰
CO	شدت وارونگی	۰/۷۱	۰/۰۰۰	۰/۷۱	۰/۵۱	۰/٤۸
	رطوبت نسبی	-۰/٦۱	۰/۰۰۱	۰/۷۷	۰/٦۰	۰/۵٦
SO_2	شدت وارونگی	۰/٤٦	۰/۰۱	۰/٤٦	۰/۲۱	۰/۱۸
	دما	-۰/٤۱	۰/۰۲	۰/۷٤	۰/۵۵	۰/۵۱

در مدل نهایی رگرسیون گام‌به‌گام منواکسیدکربن، از بین ۹ متغییر مستقل تنها شدت وارونگی دمایی و رطوبت نسبی حضور یافتند. همبستگی معکوس ۰/٦۱ این آلاینده با رطوبت نسبی حاکی از افزایش غلظت CO در روزهایی با رطوبت نسبی پایین می‌باشد. همچنین نتایج حاصله نشان داد که شدت وارونگی دمایی بیش‌ترین تاثیر و ارتباط را به میزان ۰/۷۱، با افزایش میزان منواکسیدکربن داشته است (جدول ٦). در معادله رگرسیون، در مدل اول شدت وارونگی دمایی حضور داشته است، ولی در مدل دوم با اضافه شدن رطوبت نسبی به مدل، ضریب تعیین افزایش یافته و به ۰/٦۰ رسیده است. پس در نتیجه متغیرهای شدت لایه وارونه و رطوبت نسبی مجموعاً با ضریب تعیین ۰/٦۰ قادر به برآورد میزان منواکسیدکربن می‌باشند. بنابراین در رگرسیون چند متغیره گام‌به‌گام CO، ارتباط معنی‌داری بین شدت وارونگی و رطوبت نسبی وجود دارد.

نتایج به‌دست آمده از مدل رگرسیون گام‌به‌گام برای دی‌اکسیدگوگرد مشخص کرد که متغیرهای شدت وارونگی دمایی و دما امتیاز لازم را برای ماندن در مدل نهایی با ضریب تعیین ۰/۵۵، را به‌دست آورده‌اند (جدول ٦) که نشان دهنده روزهایی با غلظت زیاد SO2 ، به همراه دمای اندک و لایه وارونگی قوی در جومی باشد.

نتیجه‌گیری

از جمله عوامل طبیعی مؤثر در آلودگی هوا، می‌توان به پدیده وارونگی دما به‌عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در محیط‌های شهری نام برد. به دلیل اهمیت این موضوع در شهر تبریز، ارتباط وارونگی‌های دمای این شهر از سال (۱۳۸۷) تا (۱۳۹۲) در مقیاس روزانه با استفاده از داده‌های رادیوسوند و نمودار ترمودینامیکی (Skew-T) با پارامترهای هواشناسی مورد بررسی قرار گرفت وضعیت آلاینده‌ها از نظر سالم و ناسالم بودن در این تحقیق با استفاده از شاخص PSI مورد بررسی قرار گرفت وجهت بررسی ارتباط بین آلاینده‌های هوا و پارامترهای هواشناسی از همبستگی پیرسون

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

و همچنین برای مشخص کردن متغیرهایی که نقش بیش‌تری در افزایش یا کاهش غلظت آلاینده‌ها داشته‌اند از رگرسیون خطی چند متغیره گام‌به‌گام استفاده شد و نتایج نشان داد که در رابطه با ضریب همبستگی پیرسون، PM10 با شدت وارونگی و فشار، CO با شدت وارونگی، میزان فشار و رطوبت نسبی، SO2 با شدت وارونگی و میزان دما، دارای همبستگی معنادار می‌باشند و همچنین نتایج نشان داد که با افزایش سرعت باد مقدار آلاینده‌ها تا حدودی کم‌تر شده و همبستگی کم‌تری بین آن‌ها دیده شده است. نتایج حاصل از رگرسیون چند متغیره گام‌به‌گام نیز مشخص کرد که، شدت وارونگی دمایی تنها متغیری است که با هر سه آلاینده‌ی مزبور دارای همبستگی مثبت می‌باشد، که این مسئله حاکی از تاثیر شدت لایه وارونه بر روند آلودگی هوا و تشدید غلظت آلاینده‌ها می‌باشد، که در تحقیقی که توسط Jahanbakhshasl &Roshani (2013) انجام گرفته اختلاف دمای پایه و رأس لایه وارونگی را در تشدید وارونگی‌ها مستقیم و معنی‌دار دانسته‌اند. همچنین رطوبت نسبی و دما بعد از شدت وارونگی دمایی موثرترین عنصر بر روند آلاینده‌های CO و SO2 بوده است. در نتیجه متغیرهای شدت وارونگی، دما، رطوبت نسبی و میزان فشار بیش‌ترین تاثیر را بر غلظت آلاینده‌ها داشته‌اند. با توجه به مطالب گفته شده پیشنهاد می‌شود که با بررسی و شناسایی سیستم‌های سینوپتیکی منجر به ایجاد پدیده وارونگی دما و پایداری جوی شهر تبریز، توسط متخصصان امر، وارونگی‌های دمایی شدید و بسیار شدید قبل از وقوع آن‌ها پیش‌بینی شوند.

این مقاله از طرح تحقیقاتی که با بودجه پژوهشی و حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز به انجام رسیده است، استخراج شده است که نهایت تشکر و قدردانی به‌خاطر این حمایت به عمل می‌آید.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 12:56 IRDT on Tuesday September 8th 2026

References

- Alessandro Bigi, A., Roy, M., Harrison, B., (2010), "Analysis of the air pollution climate at a central urban background site", ***Atmospheric Environment***, 44: 2004-2012.
- Alijani B., Najafi Nik, Z., (2009), "Assessment of synoptical pattern of inversion in Mashhad using factor", ***Journal Of Geography and Regional Development Reseach***, 12: 1-11. [In Persian].
- Barmpadimos, I., Hueglin, C., Keller, J., Henne, S., Prév, A. S. H., (2011), "Influence of meteorology on PM10 trends and variability in Switzerland from 1991 to 2008", ***Atmos. Chem. Phys***, 11: 1813-1835.
- Botkin, D., Keller, A., (2000), "***environmental problems: erosion of the ozone layer, global warming and air pollution***", Translation yones Karimpour, West Azarbaijan, Research Publications. [In Persian].
- Chappelka, H., Pan, S., (2007), "Influence of ozone pollution and climate variability on net primary productivity and carbon storage in China's grassland ecosystems from 1961 to 2000", ***Environmental Pollution***, 149: 85-94
- Janhall, S., Olofson, K., Frans, G., Adersson, Patrik, U., Pettersson, Jan B. C., Hallquis, M., (2006), "Evolution of urban aerosol during winter temperature episods", ***Atmospheric Enviroment***, 40: 5355-5366.
- Feizizadeh, B., Blaschke, T., (2013), "Examining urban heat island relations to land use and air pollution: multiple endmember spectral mixture analysis for thermal remote sensing", ***IEEE Jornal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing***, 6: 1-8
- Huei Lin, N., Yang Chen, J., (2002), "Use of pollution standard index as the indicator of air quality in Taiwan", cloud and aerosol lab dept, atmospheric sciences, National Central University Chung-Li, Taiwan.
- Jahanbakhshasl, S., Roshani, R., (2013), "The study of condition and the intensity of lower level temperature inversion in Tabriz of 2004-2008", ***Geographical Research***, 4: 45-54
- Lam, K. C., Cheng,ch, Sh., (1998), "A synoptic climatological approach to forecast concentrations of sulfur dioxde and nitrogen oxides in Hong Kong", ***Environmental pollution***, 101: 183-191.
- Karar, K., Gupta, A. K., (2006), "Seasonal variations and chemical characterization of ambient PM10 at residential and industrial sites of an urban region of Kolkata (Calcutta), India", ***Atmospheric Research***, 81: 36-53.
- Keykhsrowi, Gh., Lashkari, H., (2014), "Analysis of the relationship between the thickness and height of the inversion and the severity of air pollution in Tehran", ***Journal of Geography and Planning***, 49: 231-257. [In Persian].
- Shokouie, H., (2006), "***Urban Environment***", Publications of the Institute of Social and Human Research, Tabriz. [In Persian].
- Safavi, S. y., Alijani, B., (2006), "Investigation of geographical factors in tehran air pollution", ***Journal of Geographic Research***, 58: 99-112. [In Persian].
- Wu, W., Zha, Y., Zhang, J., Gao, J., He, J., (2014), "A temperature inversion-induced air pollution process as analyzed from Mie LiDAR data", ***Science of the total environment***, 479-480: 102-108.
- Zahedi, M., Zolfaghari, H., Torabi, S., (1999), "Investigating the effects of climatic factors on the formation of contaminated nuclei in northwest of Tabriz, Proceedings of the 2nd Regional Climate Change Conference, 13 and 14 November, National Meteorological Organization, pg: 242-247. [In Persian].