



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی

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

علی پناهی^۱

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۰۹

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 دی‌کسید 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 اسکیتوی 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

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 که مجموع آن‌ها مه دود شهری را تشکیل می‌دهند. عمده‌ترین آلاینده‌های تشکیل دهنده مه دود شهری عبارتند از: منواکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد، ازن و غبار. در تشکیل مه دود عناصر آب 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 افزایش شتابان جمعیت و توسعه فعالیت‌های صنعتی با مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی به شدت آلودگی‌ها را افزایش داده است که عواقب آن در درجه اول به صورت امراض و بیماری‌های تنفسی، تشدید بیماری‌های قلبی و ریوی، متوجه ساکنان شهرها می‌شود و در مرحله بعد، به عنوان 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 به عنوان 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

دادند نشان دادند که مقدار متوسط غلظت آلاینده PM 10 به علت افزایش رطوبت هوا در تابستان کاهش می یابد و مقدار آن در زمستان بیش تر است.

(Janhall et al (2006) به بررسی افزایش هواویزهای شهر نوردیک در طول دوره های وقوع وارونگی دما در فصل زمستان پرداختند. آن ها با بررسی اطلاعات به دست آمده از ابزار سنجش لیدار، به این نتیجه رسیدند که وارونگی های دما یکی از علت های اصلی تصویب قانون آستانه کیفیت هوا برای اکثر آلوده کننده های اصلی شهر است. در این تحقیق غلظت و تمرکز ذرات آلوده کننده در طول روزهای فصل زمستان همراه با وارونگی دما و بدون وارونگی مقایسه شده اند. آن ها دریافتند که وارونگی دما در صبح زمستان، همراه با غلظت بالای ذرات آلوده کننده مربوط به ترافیک است. این ذرات ریز شامل CO، NO و NO₂ می باشند. تحلیل آلودگی هوا در اطراف ایستگاه های 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 آلاینده ها را با وارونگی دمایی برای نقاط مختلف شهر لندن و برای روزهای پرتردد و زمان تعطیلات مورد بررسی قرار دادند. (Barmpadimos et al (2011) اندازه گیری ذرات PM-10 و ارتباط آن با متغیرهای اقلیمی را مورد بررسی قرار داده و بیان می کنند 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 داده اند. Blaschke & Feizizadeh (2013) به بررسی جزیره حرارتی شهر تبریز و ارتباط آن با کاربری زمین و آلودگی هوا پرداخته و به این نتیجه رسیده اند که مراکز حرارتی بالا با مناطق مسکونی و مناطق صنعتی در ارتباط بوده هر چند در مرکز شهر واقع نشده اند. همچنین نتایج نشان داد که همبستگی بالایی بین UHIS و تحلیل حجمی آلودگی هوا وجود دارد به طوری که در این مواقع مقدار PM اندازه گیری شده خیلی زیاد می باشد.

(Wu et al (2014) به بررسی ارتباط اینورژن و آلودگی هوا با استفاده از تصاویر ماهواره ای لیدار^۲ برای منطقه جیانلین از شهر نانجینگ پرداخته اند و برای آلودگی ۲۳ و ۲۴ 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 رسیده اند که وارونگی فرارفت موجب این آلودگی شدید شده است.

(Zahedi et al (1999) در مقاله ای 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 می کند و پائین بودن ارتفاع لایه وارونگی دما در شرق تبریز نسبت به غرب آن باعث تقویت و افزایش هسته آلوده می شود (Safavi & Alijani (2006) عوامل مؤثر در آلودگی هوای تهران را بررسی کردند. آن ها نتیجه گرفتند که عوامل جغرافیایی و همچنین استقرار سامانه های پرفشار در فصل زمستان نقش مهمی در آلودگی هوای تهران دارند). (Alijani & Najafinik (2009) به بررسی الگوهای سینوپتیکی اینورژن در مشهد با استفاده از

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 (۲۰۰۴ 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 ۲۴ 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، بر شدت 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 به‌خصوص در فصول سرد سال که آلودگی شدت می‌یابد، پرداخته شود.

مواد و روش‌ها

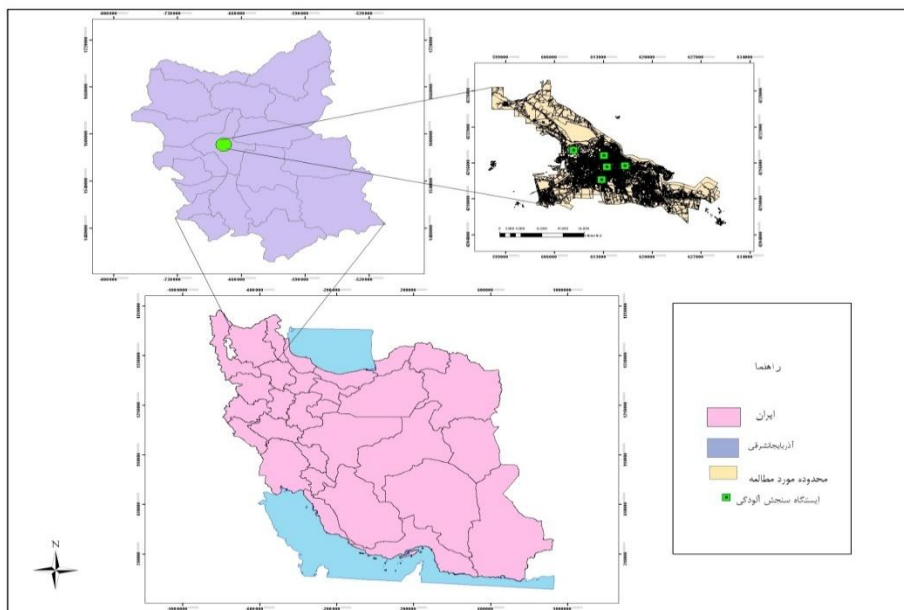
دوره‌های آماری مورد بررسی در این تحقیق با توجه به قرارگیری وارونگی‌های دمایی شدید و غلظت‌های بالای آلاینده‌ها در ماه‌های سرد سال، از فصول سرد سال‌های (۱۳۸۷-۱۳۹۲) می‌باشند. در این تحقیق از چهار گروه داده، استفاده شده است که شامل:

۱. آمار روزانه پارامترهای هواشناسی نظیر دید افقی، رطوبت نسبی، دما، فشار (سطح دریاهای آزاد)، سرعت و حداکثر باد به همراه کلیه پدیده‌های هواشناسی، که از سازمان هواشناسی استان آذربایجان شرقی اخذ شده است.
۲. آمار روزانه آلاینده‌های جوی شامل CO، SO₂، PM₁₀ و PM_{2.5}، که از اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان آذربایجان شرقی 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

غلظت ذرات معلق از سال‌های (۱۳۸۷ تا 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 ایومینگ اخذ شده است.

۴. نقشه‌های هم فشار به دست 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 ۶ پی پی ام و همچنین محدوده ناسالم برای PM10 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 ۹ ppm، تا ۶ ppm در نظر گرفته شده است.

- در آلودگی هوای شهرها ذرات $PM_{2.5}$ بیش‌تر از ذرات معلق 10 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 10 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 150 ، 120 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 83 میکروگرم آلودگی زیاد و بیش‌تر از 101 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 10 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

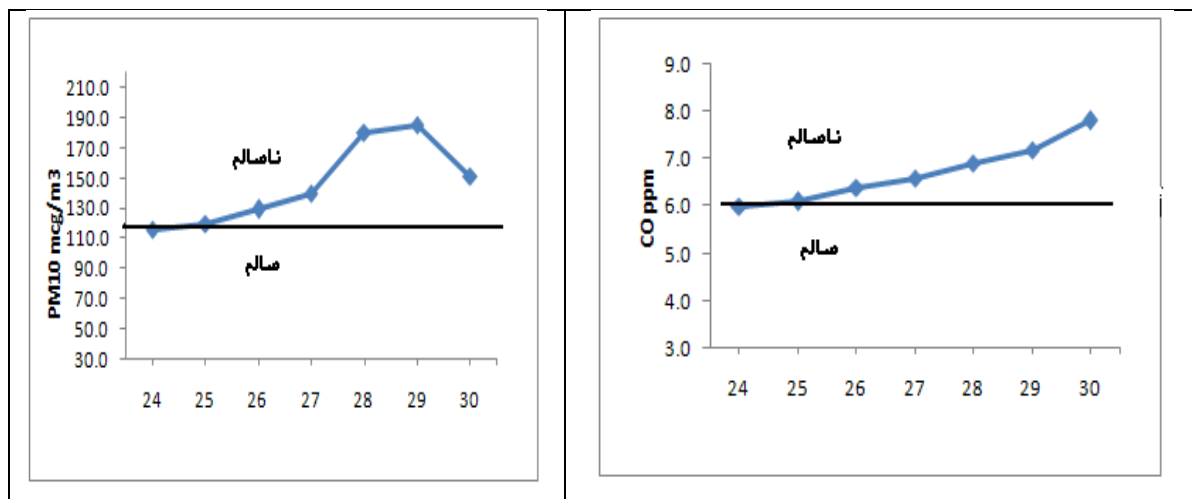
PSI	۰-۵۰	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۲۰۰-۳۰۰	> ۳۰۰
وضعیت	پاک	سالم	ناسالم	بسیار ناسالم	خطرناک

جدول ۲- رابطه بین غلظت آلاینده‌ها و PSI

PSI	Concentration					
	CO (ppm)	O3 (ppb)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)	PM ₁₀ (mcg/m ³)	PM _{2.5} (mcg/m ³)
	۸ ساعت	۱ ساعت	۱ ساعت	۲۴ ساعت	۲۴ ساعت	۲۴ ساعت
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵۰	۴/۵	۶۰	۱۵۰	۳۰	۷۵	۱۲
۱۰۰	۹	۱۲۰	۳۰۰	۱۴۰	۱۵۰	۵۵
۲۰۰	۱۵	۲۰۰	۶۰۰	۳۰۰	۳۷۵	۱۵۰
۳۰۰	۳۰	۴۰۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۶۲۵	۲۵۰
۴۰۰	۴۰	۵۰۰	۱۶۰۰	۸۰۰	۸۷۵	۳۵۰
۵۰۰	۵۰	۶۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰

جدول ۳- رتبه بندی پنج گروه از آلاینده ها طبق شاخص AQI توسط سازمان COMEAP^۳

PM ₁₀ (mcg/m ³)	PM _{2.5} (mcg/m ³)	SO ₂ (mcg/m ³)	NO ₂ (mcg/m ³)	O ₃ (mcg/m ³)	ارزش شاخص	آلودگی هوا
۱۶-۰	۱۱-۰	۸۸-۰	۶۷-۰	۳۳-۰	۱	کم
۳۳-۱۷	۲۳-۱۲	۱۷۷-۸۹	۱۳۴-۶۸	۶۶-۳۴	۲	
۵۰-۳۴	۳۵-۲۴	۲۶۶-۱۷۸	۲۰۰-۱۳۵	۱۰۰-۶۷	۳	
۵۸-۵۱	۴۱-۳۶	۳۵۴-۲۶۷	۲۶۷-۲۰۱	۱۲۰-۱۰۱	۴	متوسط
۶۶-۵۹	۴۷-۴۲	۴۴۳-۳۵۵	۳۳۴-۲۶۸	۱۴۰-۱۲۱	۵	
۷۵-۶۷	۵۳-۴۸	۵۳۲-۴۴۴	۴۰۰-۳۳۵	۱۶۰-۱۴۱	۶	
۸۳-۷۶	۵۸-۵۴	۷۱۰-۵۳۳	۴۶۷-۴۰۱	۱۸۷-۱۶۱	۷	زیاد
۹۱-۸۴	۶۴-۵۹	۸۸۷-۷۱۱	۵۳۴-۴۶۸	۲۱۳-۱۸۸	۸	
۱۰۰-۹۲	۷۰-۶۵	۱۰۶۴-۸۸۸	۶۰۰-۵۳۵	۲۴۰-۲۱۴	۹	
۱۰۱ ≤	۷۱ ≤	۱۰۶۵ ≤	۶۰۱ ≤	۲۴۱ ≤	۱۰	بسیار زیاد



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 داده های رادیوسوند و نمودار ترمودینامیکی (Skew-T) مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین از داده های 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 به ترتیب از اختلاف دمایی (به درجه سانتی گراد) و اختلاف ارتفاعی لایه وارونه (به متر) به دست می آیند. برای بررسی بیش تر و بهتر وارونگی دمایی، پایداری جو نیز مورد بررسی قرار گرفته است و

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

برای این منظور از شاخص پایداری جو، KI 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.

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

در رابطه‌ی فوق T_{500} ، T_{700} ، T_{850} به ترتیب دما در ترازهای ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال و Td_{700} و Td_{850} دمای نقطه شبنم ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال بر حسب درجه سلسیوس می‌باشند. اگر رقم محاسبه شده برای شاخص K کم‌تر از +۱۵ باشد، نشان دهنده‌ی پایداری اتمسفر می‌باشد.

جدول ۴- رابطه‌ی بین شاخص KI و پایداری جو

شاخص KI	وضعیت پایداری جو
۰ تا ۱۵	نسبتاً پایدار
-۲۰ تا -۱	پایدار
-۴۱ تا -۲۱	بسیار پایدار
≤ -۴۲	شدیدا پایدار

نمونه‌ای از داده‌های رادیوسوند در (شکل ۳) آورده شده است. ستون عمودی داده‌های رادیوسوند به ترتیب 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. ۴. دمای نقطه شبنم (درجه سانتی‌گراد)، ۵. رطوبت نسبی به درصد، ۶. نسبت اختلاط ۷. جهت وزش باد به درجه، ۸. سرعت باد (نات).

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 جمع‌آوری 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

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 می‌باشد. 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 پیش‌بینی‌کننده (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 همبستگی ۰/۵۷ و 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).

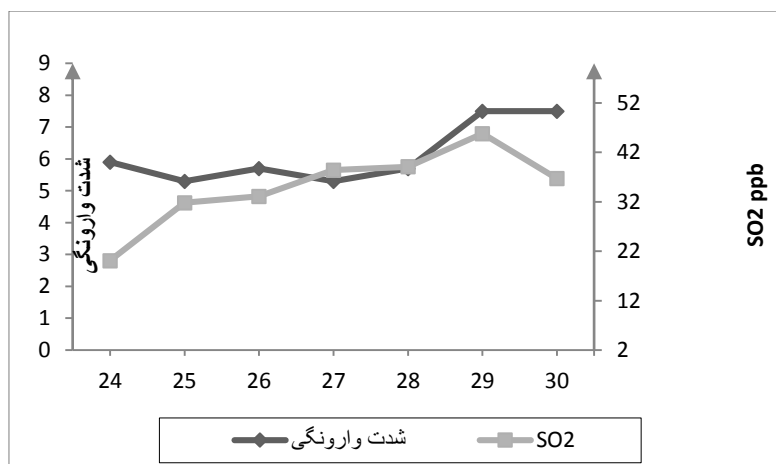
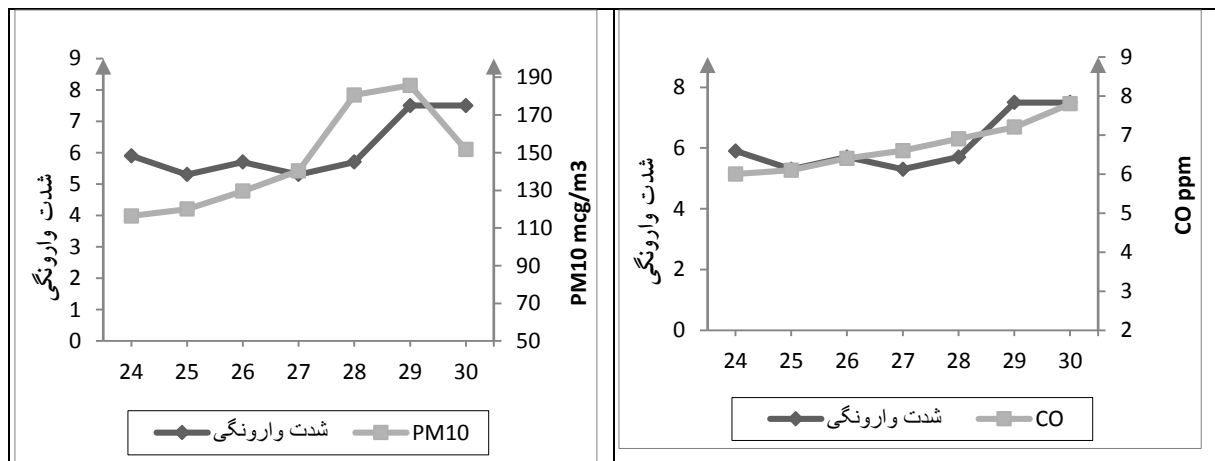
جدول ۵- ضریب همبستگی پیرسون SO₂، CO، PM₁₀ با پارامترهای اقلیمی و ارتفاع رأس لایه، عمق و شدت وارونگی دمایی و شاخص

پایداری KI

SO ₂		CO		PM ₁₀		متغیرها
سطح معناداری	ضریب همبستگی	سطح معناداری	ضریب همبستگی	سطح معناداری	ضریب همبستگی	
۰/۰۰۴	-۰/۵۸	۰/۲۶	۰/۲۴	۰/۲۱	-۰/۲۷	دید افقی m
۰/۷۳	۰/۰۷	۰/۰۳	-۰/۴۲	۰/۳۲	-۰/۲۰	فشار (هکتوپاسکال)
۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۰۰۲	-۰/۶۱	۰/۷۸	-۰/۰۶	رطوبت نسبی (درصد)
۰/۰۵	-۰/۴۱	۰/۰۸	۰/۳۸	۰/۹۱	-۰/۰۲	دما (درجه سانتی‌گراد)
۰/۸۴	۰/۰۴	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۴۷	۰/۱۶	سرعت باد (m/s)
۰/۸۷	-۰/۰۳	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۵۱	۰/۱۴	حداکثر سرعت باد (m/s)
۰/۸۷	-۰/۰۳	۰/۷۸	۰/۰۶	۰/۴۲	۰/۱۸	شاخص KI
۰/۰۸	۰/۳۶	۰/۸۹	۰/۰۳	۰/۳۷	۰/۱۹	ارتفاع رأس لایه وارونگی دمایی (m)
۰/۴۳	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۵۷	۰/۱۲	عمق وارونگی دمایی (m)
۰/۰۲	۰/۴۶	۰/۰۰۰	۰/۷۱	۰/۰۰۴	۰/۵۸	شدت وارونگی دمایی (درجه سانتی‌گراد)

منواکسیدکربن بیشترین همبستگی را با شدت وارونگی و رطوبت نسبی به میزان ۰/۶۷ و ۰/۵۹- دارا می باشد. همبستگی معکوس ۰/۴۲ CO با فشار، تحت تاثیر افزایش غلظت این آلاینده در روزهای پایانی دوره بوده است، همچنین این آلاینده با سایر متغیرها دارای ارتباط معنی دار نمی باشد (جدول ۶). نتایج حاصل از بررسی ها مشخص کرد، اکثراً افزایش غلظت CO در روزهای پایانی دوره های مطالعاتی، با افزایش شدت لایه وارونه، کاهش نسبی میزان فشار و رطوبت نسبی همراه بوده است.

میزان دی کسید گوگرد در سال های مورد مطالعه هیچ گاه به شرایط ناسالم نزدیک نگردیده، ولی با این وجود غلظت SO₂ در روزهای همراه با وارونگی دمایی و غلظت بالای سایر آلاینده ها، افزایش یافته و در بالاترین میزان خود در طی دوره های مطالعاتی به ۴۸ ppb رسیده است. از لحاظ همبستگی پیرسون، این آلاینده با شدت لایه وارونگی، میزان دما و دید افقی دارای همبستگی معنی دار می باشد (جدول ۶). همچنین همبستگی SO₂ به میزان ۰/۴۶ با شدت لایه وارونه و همبستگی معکوس ۰/۴۱ با دما، حاکی از اوج گیری غلظت این آلاینده در روزهایی با وارونگی دمایی قوی و دماهای پایین می باشد.



شکل ۴: نمونه از بررسی غلظت آلاینده ها با توجه به شدت وارونگی

همچنین مدل نهایی رگرسیون گام به گام نیز مشخص کرد که شدت وارونگی دمایی با ضریب تعیین ۰/۳۳، بیشترین ارتباط و تاثیرگذاری را بر غلظت PM_{10} داشته است (جدول ۶). این نتایج به دست آمده تایید کننده افزایش غلظت ذرات معلق در روزهایی با وارونگی دمایی شدید می باشد.

جدول ۶- مقدار ضرایب مدل رگرسیون گام به گام در رابطه با PM_{10} ، CO و SO_2

متغیر		مقدار ضرایب	سطح معنی داری	(R)	(R^2) ضریب تعیین	(R^2) تعدیل شده
PM_{10}	شدت وارونگی دمایی	۰/۵۸	۰/۰۰۲	۰/۵۸	۰/۳۳	۰/۳۰
	شدت وارونگی	۰/۷۱	۰/۰۰۰	۰/۷۱	۰/۵۱	۰/۴۸
CO	رطوبت نسبی	-۰/۶۱	۰/۰۰۱	۰/۷۷	۰/۶۰	۰/۵۶
	شدت وارونگی	۰/۴۶	۰/۰۱	۰/۴۶	۰/۲۱	۰/۱۸
SO_2	دما	-۰/۴۱	۰/۰۲	۰/۷۴	۰/۵۵	۰/۵۱

در مدل نهایی رگرسیون گام به گام منواکسیدکربن، از بین ۹ متغیر مستقل تنها شدت وارونگی دمایی و رطوبت نسبی حضور یافتند. همبستگی معکوس ۰/۶۱ این آلاینده با رطوبت نسبی حاکی از افزایش غلظت CO در روزهایی با رطوبت نسبی پایین می باشد. 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 ۶). 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 ۰/۶۰ رسیده است. پس در نتیجه متغیرهای شدت لایه وارونه و رطوبت نسبی مجموعاً با ضریب تعیین ۰/۶۰ قادر به برآورد میزان منواکسیدکربن می باشند. بنابراین در رگرسیون چند متغیره گام به گام CO ، ارتباط معنی داری بین شدت وارونگی و رطوبت نسبی وجود دارد.

نتایج به دست آمده از مدل رگرسیون گام به گام برای دی اکسید گوگرد مشخص کرد که متغیرهای شدت وارونگی دمایی و دما امتیاز لازم را برای ماندن در مدل نهایی با ضریب تعیین ۰/۵۵، را به دست آورده اند (جدول ۶) که نشان دهنده روزهایی با غلظت زیاد SO_2 ، به همراه دمای اندک و لایه وارونگی قوی در جومی باشد.

نتیجه گیری

از جمله عوامل طبیعی مؤثر در آلودگی هوا، می توان به پدیده وارونگی دما به عنوان مهم ترین عامل تأثیرگذار در محیط های شهری نام برد. به دلیل اهمیت این موضوع در شهر تبریز، ارتباط وارونگی های دمای این شهر از سال (۱۳۸۷) تا (۱۳۹۲) در مقیاس روزانه با استفاده از داده های رادیوسوند و نمودار ترمودینامیکی (Skew-T) با پارامترهای هواشناسی مورد بررسی قرار گرفت وضعیت آلاینده ها از نظر سالم و ناسالم بودن در این تحقیق با استفاده از شاخص PSI مورد بررسی قرار گرفت و جهت بررسی ارتباط بین آلاینده های هوا و پارامترهای هواشناسی از همبستگی پیرسون

و همچنین برای مشخص کردن متغیرهایی که نقش بیش تری 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، PM_{10} با شدت وارونگی و فشار، CO با شدت وارونگی، میزان فشار و رطوبت نسبی، SO_2 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 دمایی 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 SO_2 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.

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 dioxide 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].