

بررسی الگوهای همدیدی بر اساس دوره‌های بحرانی آلودگی هوا در وارونگی دمایی شدید شهر تبریز

علی پناهی* - استادیار گروه جغرافیا، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۲/۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۰۴/۱۸

چکیده

آلودگی هوا از جنبه‌های مختلف دارای اهمیت است. این مطالعه، با توجه به شرایط حاد آلودگی هوای تبریز و با استفاده از تحلیل سینوپتیکی انجام پذیرفته است. هدف اصلی در این تحقیق بررسی ارتباط الگوهای سینوپتیکی سطح دریا و تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال با وارونگی دمایی و دوره‌های طولانی مدت آلودگی شهر تبریز در طی دوره آماری ۱۳۸۷ - ۱۳۹۲ است. در این زمینه، برای بررسی کیفیت آلودگی هوا، از شاخص استاندارد آلودگی هوا (PSI) و برای بررسی شدت و عمق وارونگی دمایی از نقشه‌های Skew-T استفاده شد. سپس، نقشه‌های سینوپتیکی این دوره‌ها تحلیل شد. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد هنگامی که سیستم پرفشاری به صورت مداوم در مقطع چندروزه در منطقه متمرکز می‌شود شدت وارونگی دما به اوج خود می‌رسد. همچنین، به طور کلی، عامل اصلی تقویت‌کننده وارونگی‌های دمای بسیار شدید و به تبع آن آلودگی‌های بلندمدت ناشی از تداوم سامانه قدرتمند سیبری هم‌زمان با پرفشار توسعه یافته در زاگرس همراه و نیز با تقویت پشته ارتفاعی تراز میانی جو است که شرایط لازم را برای افزایش پتانسیل آلودگی هوای تبریز فراهم می‌کند. علاوه بر این، وجود زبانه‌هایی از پرفشار اسکاندیناوی و همچنین ریزش هوای سرد مدیترانه، هرچند خیلی کم، از عوامل دیگر وارونگی دمایی و تشدید آلودگی در برخی از دوره‌های آلودگی است.

کلیدواژه‌ها: آلودگی هوا، الگوی سینوپتیکی، تبریز، سامانه پرفشار، وارونگی دما.

مقدمه

اقلیم‌شناسی همدید به دنبال یافتن روابط میان گردش‌های جوی با رویدادهای محیط سطحی است. اقلیم‌شناسی همدید نخست ساختارهای جوی (یعنی تیپ‌های همدید یا الگوهای نقشه‌ای) را طبقه‌بندی می‌کند؛ بدین ترتیب، وضع اقلیم‌شناختی گردش‌ها را به دست می‌آورد. سپس، به کمک روش‌های آماری رابطه میان این ساختارها را با محیط سطحی مشخص می‌کند (یارنال، ۱۳۸۵: ۱۳). هدف اصلی اقلیم‌شناسی همدید استناد و استدلال تغییرات شرایط محیطی سطح زمین از روی تغییرات الگوی فشار است تا بتواند رابطه بین تغییر الگوهای گردش اتمسفر، پدیده‌ها، و فرایندهای محیط زیست را شناسایی کند (یارنال، ۱۹۹۳: ۱۱؛ باری، ۱۹۹۷: ۱۱). آلودگی هوا، به منزله یک شرایط زیست‌محیطی، امروزه بحرانی اساسی در مناطق شهری است و پدیده وارونگی دما از عوامل تشدیدکننده و تأثیرگذار بر آن است. از یک سو،

* E- mail: panahi@iaut.ac.ir

آلودگی هوا در فضاهای شهری و میزان شدت و گستردگی مکانی متأثر از فعالیت‌های انسانی است و، از سوی دیگر، به نظام طبیعی حاکم بر منطقه، به‌ویژه ساختار فیزیوگرافی، و گردش منطقه‌ای و محلی جو وابسته است. بر همین اساس، ظهور روزهای بسیار آلوده همراه با شرایط آلودگی بحرانی از خصوصیات بارز کلان‌شهرهاست (صادقی و همکاران، ۱۳۹۳: ۲). شهر تبریز یکی از کلان‌شهرهایی است که معضل آلودگی هوا در آن مطرح است. وضعیت توپوگرافی (وجود کوه‌های عون بن علی)، جهت وزش بادهای غالب، و راه‌اندازی تأسیسات صنعتی و آلوده‌کننده در مسیر بادهای غالب از عوامل مؤثر در آلودگی شهر تبریز به‌شمار می‌رود. مسلماً آنچه در شدت آلودگی هوای شهر تبریز نقش اساسی دارد عملکرد فرایندهای جوی است که به صورت گسترده عمل می‌کنند؛ از عوامل مهم این پدیده وارونگی دماست. وضعیت جوی هر روز متأثر از شرایط سینوپتیکی حاکم برخی اوقات به گونه‌ای است که شرایطی پایدار و آرام را در جو حاکم می‌سازد؛ در نتیجه، به سبب تراکم عناصر آلاینده در لایه‌های زیرین و فقدان جریان‌های جوی یا ضعیف‌بودن آن‌ها شدت آلودگی افزایش می‌یابد. گاهی هم الگوهای سینوپتیکی حاکم به گونه‌ای است که جو را ناپایدار می‌سازد و به سبب شدت‌یافتن جریان‌های قائم و افقی عناصر آلاینده در داخل جو پخش می‌شود و غلظت آن کاهش می‌یابد (هدایت، ۱۳۸۵: ۶۶). پارامترهای آب‌وهوایی، از جمله پدیده وارونگی دما، در تشدید غلظت آلاینده‌های شهرهای صنعتی تأثیرگذار می‌گذارد و از عوامل مهم آلودگی هواست. در نتیجه، با توجه به اهمیت پایداری هوا در بروز مسائل جوی یادشده، مطالعه شرایط سینوپتیکی شهر تبریز در دوره‌های بحرانی آلودگی هوا و ارائه پیشنهادها و اقدامات پیشگیرانه از اهمیت بسیاری برخوردار است. تا کنون، در زمینه شرایط سینوپتیکی و ارتباط آن با آلودگی شهر تبریز مطالعاتی انجام پذیرفته است؛ از جمله بررسی آلودگی هوا و منابع آلاینده هوا در سطح شهر تبریز (نوروززاده، ۱۳۹۰)؛ بررسی تأثیر پرفشارها در وقوع اینورژن‌های بسیار شدید و تداوم آلودگی‌های شهر تبریز در سال ۲۰۰۸ (روشنی، ۱۳۹۰)؛ تعیین آلودگی هوای شهر تبریز با استفاده از شاخص PSI (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۱)؛ بررسی شرایط الگوی سینوپتیکی حاکم بر وضعیت‌های وارونگی دمای بسیار شدید شهر تبریز (جهان‌بخش اصل و روشنی، ۱۳۹۳). ولی درباره دوره‌های بلندمدت آلودگی‌های پایدار در اثر اینورژن‌های شدید شهر تبریز پژوهشی سینوپتیکی انجام نشده است. نمونه‌ای از مطالعاتی که در این زمینه در ایران و خارج از ایران انجام پذیرفته به شرح زیر است:

قسامی و همکاران (۱۳۸۶) به بررسی شرایط سینوپتیکی حاکم در چند دوره بحرانی آلودگی هوای شهر تهران از سال ۲۰۰۱ تا سال ۲۰۰۲ میلادی پرداختند. در این بررسی، درباره عمده‌ترین آلاینده‌های شهر تهران، شامل مونو اکسید کربن (CO) و دی اکسید نیتروژن (NO₂)، و تأثیر پدیده‌های هواشناسی از قبیل وارونگی دمایی همراه با شرایط سینوپتیکی بر کمیت و کیفیت آلاینده‌ها بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد زمانی که پرفشار منطقه‌ای (منطقه ایران) از نوع سامانه عرض‌های میانه است غلظت آلاینده‌ها افزایش می‌یابد و گاهی ممکن است تا دو یا سه برابر حد مجاز باشد.

حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی الگوهای همدید مؤثر بر آلودگی هوا در کلان‌شهر مشهد پرداختند. آنان به این نتیجه رسیدند که وجود ناوه در اطراف دریاچه آرال موجب ریزش هوای سرد به منطقه سیبری و شمال شرق ایران می‌شود و این شرایط در سطح زمین موجب قوی‌تر شدن پرفشار سیبری، ورود جریان‌های سرد و خشک از شمال شرق به منطقه مطالعاتی، و سرانجام افزایش آلودگی‌های شهری می‌شود. همچنین، در برخی از الگوها استقرار یک پرفشار در

غرب ایران و ورود جریان‌های شمال غربی در نیمه سرد سال به عنوان الگوهای فشار مؤثر در کاهش شدید دما و ایجاد پایداری هوا تراکم غلظت آلاینده‌ها را در سطح شهر مشهد به دنبال دارد. ذوالفقاری و همکاران (۱۳۹۳) جنبه‌های سینوپتیکی - دینامیکی آلودگی هوا در کرمانشاه را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که سه الگوی مشخص، شامل ادغام پُرفشارهای دینامیک اروپایی در دوره سرد سال با پُرفشار کوچک آسیایی و سیبری، استقرار فرود مدیترانه‌ای در سطوح بالای جوی، و تقویت سیستم کم‌فشار دینامیک در سطح زمین، از عوامل سینوپتیکی مؤثر بر آلودگی کرمانشاه هستند. کویلو و آندراده (۲۰۰۲) در تحقیقی، در برزیل، درباره ارتباط سیستم‌های هواشناسی با غلظت آلاینده ذرات معلق به این نتیجه رسیدند که غلظت آلاینده‌ها در درون سیستم سینوپتیک دارای فشار بالا، به‌ویژه سیستم سینوپتیک پُرفشار جنب حاره‌ای اطلس جنوبی، افزایش می‌یابد. در پژوهش انجام‌شده در آلمان نیز ارتباط تیپ‌های واچرخندی حوضه کارپاسین و جنوب آلمان با تشدید آلودگی هوای شهر سوخو و اثر جریان‌های مداری بر کاهش آلودگی‌ها تأیید شد (ماکرا و همکاران، ۲۰۰۶). با بررسی الگوهای کنترل‌کننده آلودگی هوا در ده شهر اصلی شمال چین معلوم شد در این منطقه بین آلودگی و سامانه‌های فشار رابطه قوی وجود دارد. همچنین، در منطقه مطالعاتی مورد اشاره، سامانه‌های واچرخندی در سطح زمین و شرایط دینامیکی عقب‌ناوه در سطوح بالای جوی عامل اصلی تراکم آلاینده‌ها شناخته شدند (چن و همکاران، ۲۰۰۸). علاوه بر این، ارتباط روزهای آلوده در یونان و شرایط همدیدی نشان داد که بیشتر دوره‌های آلودگی جوی در فصل زمستان رخ می‌دهد؛ به طوری که در شمال یونان بیشترین میزان آلودگی با حاکمیت یک واچرخند ارتباط داشته است (فلوکاس و همکاران، ۲۰۰۹). عوامل مؤثر بر تغییرات گرد و غبار آئروسول PM10 در دره کلانگ مالزی بررسی شد (جاننگ و همکاران، ۲۰۱۱) و این نتیجه حاصل شد که، علاوه بر عوامل محلی آب‌وهوایی، منشأ سینوپتیکی آلودگی شمال غرب اقیانوس آرام و دریای چین جنوبی و همچنین خلیج بنگال در تغییرات ذرات آلوده نقش اساسی داشته‌اند. بی و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر شرایط سینوپتیک بر آلودگی هوا در فصل زمستان را در حوضه گانزونگ^۱ چین با استفاده از شش مدل برای شش روز از سال ۲۰۱۳ بررسی کردند و تغییرات PM2.5 را به وارونگی دما، سطح پایین سرعت باد افقی، سرعت باد عمودی و همگرایی و وقوع شرایط نامطلوب سینوپتیکی در طول فصل زمستان مربوط دانستند.

در بیشتر مطالعاتی که در کشورهای خارجی در زمینه پدیده وارونگی دما و آلودگی هوا انجام گرفته به بررسی عوامل مؤثر در توسعه شدت وارونگی‌ها پرداخته شده است، همچنین به نقش سیستم‌های جوی بزرگ‌مقیاس و نوسان‌های بین‌قاره‌ای و اقیانوسی در تشدید یا تضعیف این پدیده اشاره‌هایی شده است. در ایران نیز، با توجه به نقش مهم سیستم‌های سینوپتیکی و جوی بزرگ‌مقیاس در پایداری هوا و به دنبال آن تشدید غلظت آلاینده‌ها، به‌ویژه در دوره‌های طولانی‌مدت آلودگی، بهتر آن است که مطالعات بیشتری انجام گیرد. به همین دلیل، هدف از تدوین این مطالعه پرداختن به علت سینوپتیکی آلودگی‌های شدید و دوره‌ای شهر تبریز است.

مواد و روش

داده‌های پژوهش حاضر مشتمل بر داده‌های روزانه آلودگی شهر تبریز (شامل CO و PM10) و مربوط به ایستگاه‌های میدان نماز (راسته کوچک)، راه آهن، حکیم نظامی، باغ شمال، و ایستگاه آب‌رسان طی یک دوره شش‌ساله (۱۳۸۷ - ۱۳۹۲) است. این داده‌ها از اداره کل حفاظت محیط زیست استان آذربایجان شرقی گردآوری شده است. از بین این داده‌ها چهار دوره آلودگی چندروزه - که بیشترین زمان آلودگی همراه با وارونگی دمایی هم بود - به وسیله نرم‌افزار EXCEL فیلترگذاری و انتخاب شد. سپس، وضعیت آلاینده‌ها از نظر سالم و ناسالم بودن در این تحقیق با استفاده از شاخص PSI بررسی شد (جدول‌های ۱ و ۲). در تحقیق حاضر محدوده ناسالم برای غلظت CO هشت‌ساعتی بیشتر از ۶ پی پی ام و همچنین محدوده ناسالم برای PM10 غلظت‌های بیشتر از ۱۲۰ میکروگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. دلایل تغییر محدوده سالم برای غلظت آلاینده‌های مزبور (با توجه به شاخص PSI) برای شهر تبریز عبارت است از:

- در شهر تبریز، موقعیت مکانی و وجود ساختمان‌های بلند در ایستگاه آب‌رسان موجب کانالیزه شدن باد می‌شود؛ این مسئله موجب شده تا همواره در طی دوره‌های مورد بررسی، با وجود ترافیک و تردد همیشگی وسایل نقلیه در این ایستگاه، میزان منو اکسید کربن 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 ندارد. همچنین، باید اذعان کرد آمار آلاینده‌های برخی ایستگاه‌ها در بعضی از ماه‌ها اصلاً ثبت نشده است. در نتیجه، برای از بین بردن تأثیر این مسائل در آمار روزانه آلاینده‌ها، محدوده سالم برای غلظت CO هشت‌ساعته به جای غلظت‌های تا ۹ppm تا ۶ppm در نظر گرفته شده است.
- در آلودگی هوای شهرها ذرات PM2.5 بیشتر از ذرات معلق ۱۰ میکرونی اهمیت دارند و در وضعیت ناسالم و هشدار قرار می‌گیرند. بنابراین، در بیشتر مواردی که غلظت PM2.5 در جو شهر در وضعیت بسیار ناسالم قرار دارد میزان PM10 در وضعیت سالم تا ناسالم قرار می‌گیرد. با توجه به این مطلب که در شهر تبریز برای ذرات معلق تا سال ۱۳۹۱ آمار ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرونی ثبت شده و فقط از سال ۱۳۹۲ به بعد آمار PM2.5 در دسترس است، برای اینکه آمار روزانه PM10 به درستی گویای وضعیت آلودگی جو شهر باشد، میزان ناسالم برای PM10 به جای ۱۵۰، ۱۲۰ میکروگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد.

جدول ۱. جدول شاخص آلودگی هوا

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

جدول ۲. رابطه بین غلظت آلاینده‌ها و PSI

PSI	correlation		
	CO(ppm)	PM ₁₀ (mcg/m ³)	PM _{2.5} (mcg/m ³)
	۸ ساعت	۲۴ ساعت	۲۴ ساعت
۰	۰	۰	۰
۵۰	۴٫۵	۷۵	۱۲
۱۰۰	۹	۱۵۰	۵۵
۲۰۰	۱۵	۳۷۵	۱۵۰
۳۰۰	۳۰	۶۲۵	۲۵۰
۴۰۰	۴۰	۸۷۵	۳۵۰
۵۰۰	۵۰	۱۰۰۰	۵۰۰

همچنین، در این مطالعه، به سبب تأثیر مستقیم وارونگی دمایی بر غلظت آلاینده‌ها، شدت و عمق وارونگی دمایی دوره‌های آلودگی تبریز با استفاده از نقشه‌های Skew-T، که از سایت NOAA^۱ اخذ شده، مشخص شد. داده‌های رادیوسوند تبریز در این بازه زمانی مربوط به ساعت صفر بامداد (به وقت گرینویچ) است. سپس، با توجه به اینکه هدف از این پژوهش شناسایی سیستم‌های سینوپتیک مؤثر بر آلودگی هوای شهر تبریز است، برای شناسایی الگوهای همدید تأثیرگذار بر مقدار آلاینده روزهای آلوده به ذرات معلق، نقشه‌های سینوپتیکی روزانه در تراز سطح زمین و ۵۰۰ هکتوپاسکالی روزهای آلوده از تارنمای مرکز ملی پیش‌بینی محیطی و مرکز ملی پژوهش‌های هواشناسی دریافت شد. سرانجام به بررسی الگوهای سینوپتیکی مؤثر بر دوره‌های بلندمدت و پایدار آلودگی در شهر تبریز پرداخته شد.

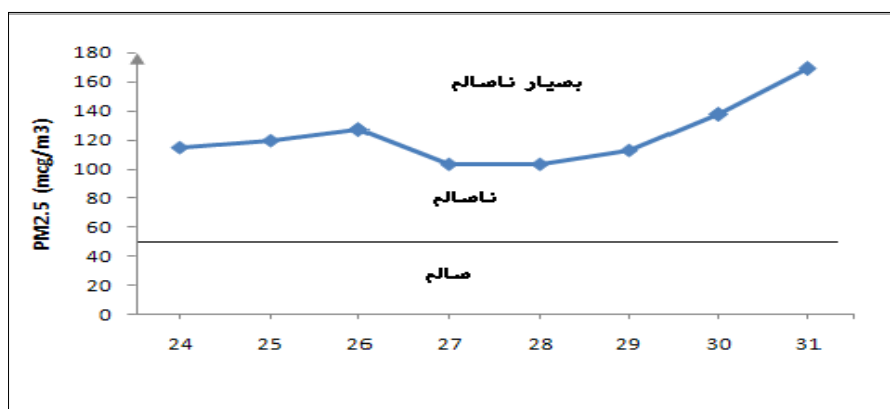
یافته‌های تحقیق

نیمه سرد سال دوره ناپایداری‌های جوی در ایران است، زیرا بادهای غربی و الگوهای فشار مربوط به آن‌ها اقلیم ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند (علیجانی و هوشیار، ۱۳۸۷: ۱۵). شرایط جوی بزرگ‌مقیاس همدیدی نقش کنترل‌کننده‌ای در شرایط محلی و منطقه‌ای دارد. مثلاً، به هنگام فعالیت سامانه‌های کم‌فشار دینامیکی، جریان‌ها و پدیده‌های محلی (مانند بادهای کوه به دشت و آلودگی هوا) حذف یا بسیار ضعیف می‌شود و در زمان استقرار سامانه‌های پرفشار شرایط مناسبی برای وقوع این پدیده‌ها مهیا می‌شود. شدت و دوره رخداد این پدیده‌ها به عوامل متعددی از جمله عوارض زمینی، شرایط جغرافیایی، و الگوهای همدیدی حاکم بستگی دارد (لندزبرگ، ۱۹۸۰: ۱۲). بنابراین، آلودگی هوا، از جمله غلظت آلاینده CO و PM₁₀، به شدت تحت تأثیر الگوهای فشاری بزرگ‌مقیاس قرار می‌گیرد. منطقه مورد مطالعه اغلب تحت تأثیر الگوهای همدیدی عرض‌های میانی قرار دارد. مهم‌ترین سامانه‌های حرارتی فصلی، که بخش‌های عظیمی از کشور

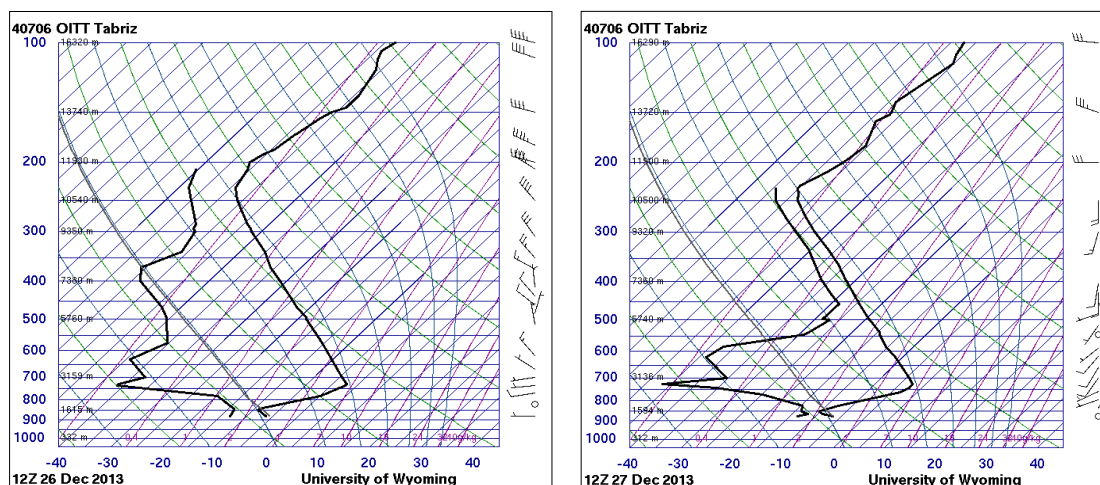
ایران را متأثر می‌سازد، عبارت است از: پُرفشار سیبری و کم‌فشار گرمایی تابستانه. در طی فصل سرد سال، پُرفشار سیبری تقویت می‌شود و به تناوب مناطق وسیعی از ایران از جمله تبریز را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در اکثر روزهای مورد بررسی و در فصل سرد سال به سبب کوتاه‌بودن طول روز و سرمای تابشی شبانه وارونگی دمایی، اعم از تشعشعی و فرونشینی، در فصول سرد سال اتفاق افتاده است. همچنین، ویژگی‌های محلی خود منطقه به‌ویژه فقدان بادهایی با سرعت زیاد در فصل‌های پاییز و زمستان برای کاهش شدت لایه وارونه و غلظت آلاینده‌ها زمینه را برای ایجاد آلودگی هوا فراهم کرده است. هنگامی که سیستم پُرفشاری به صورت مداوم در مقطع چندروزه در منطقه متمرکز شده، شدت وارونگی دما به اوج خود رسیده است. به دنبال آن، با ورود یک سیستم کم‌فشار وارونگی از بین می‌رود. به طور کلی، عامل اصلی تقویت‌کننده وارونگی‌های دمای بسیار شدید و به سبب آن آلودگی‌های بلندمدت ناشی از تداوم سیستم‌های پُرفشار بوده است. برای بررسی جزئیات این ارتباط، در این بخش به بررسی و تحلیل دوره‌های آلودگی طولانی‌مدت و اثرهای سینوپتیکی حاکم بر آن پرداخته می‌شود.

بررسی دوره هشت‌روزه آلودگی در دی‌ماه ۱۳۹۲ (از سوم تا دهم دی‌ماه)

دوره هشت‌روزه‌ای که در دی‌ماه ۱۳۹۲ به‌وقوع پیوست (از بیست‌وچهارم تا سی‌ویکم دسامبر ۲۰۱۳) دارای غلظت بالای $PM_{2.5}$ و وضعیت ناسالم و بحرانی در جو شهر است (شکل ۱). $PM_{2.5}$ در آلودگی هوای شهرها اهمیت ویژه‌ای دارد و به‌مراتب خطرناک‌تر از PM_{10} برای سلامتی انسان‌هاست. در این روزهای آلوده، غلظت SO_2 هم نسبت به سایر روزها فزونی یافته، ولی هنوز در شرایط هشدار قرار نگرفته است. متأسفانه، با وجود مقادیر بالای منو اکسید کربن و تأثیر آن در ناسالم‌بودن وضعیت هوا، برای آلاینده CO کلاً در سال ۱۳۹۲ در سازمان محیط زیست داده‌ای ثبت نشده است. در این دوره، به همراه غلظت بالای آلاینده‌ها، وارونگی دمایی نیز با شدت زیاد، با توجه به نقشه‌های $Skew-T$ ، در اتمسفر وجود دارد (شکل ۲). خمیدگی زیاد منحنی دما به سمت راست در نمودارهای اسکویوتی بیست‌وششم و بیست‌وهفتم دسامبر نشان‌دهنده شدت زیاد وارونگی دمایی است. همچنین، فاصله زیاد منحنی دمای با منحنی نقطه انجماد نمایانگر رطوبت کم در سطوح میانی جو و تشدید شرایط پایداری در لایه وارونگی است.



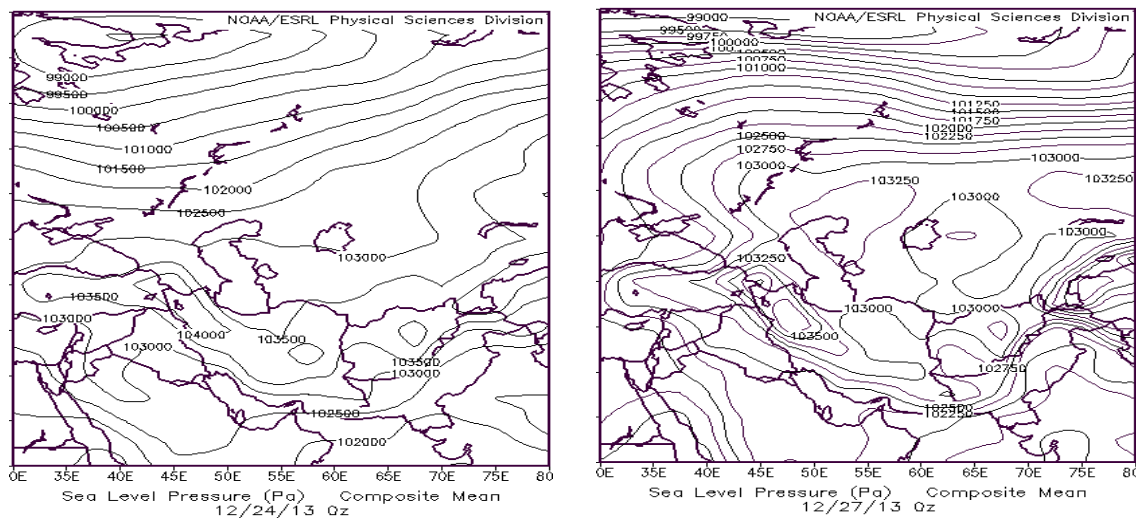
شکل ۱. نمودار غلظت $PM_{2.5}$ در روزهای آلوده از سوم تا دهم دی‌ماه ۱۳۹۲



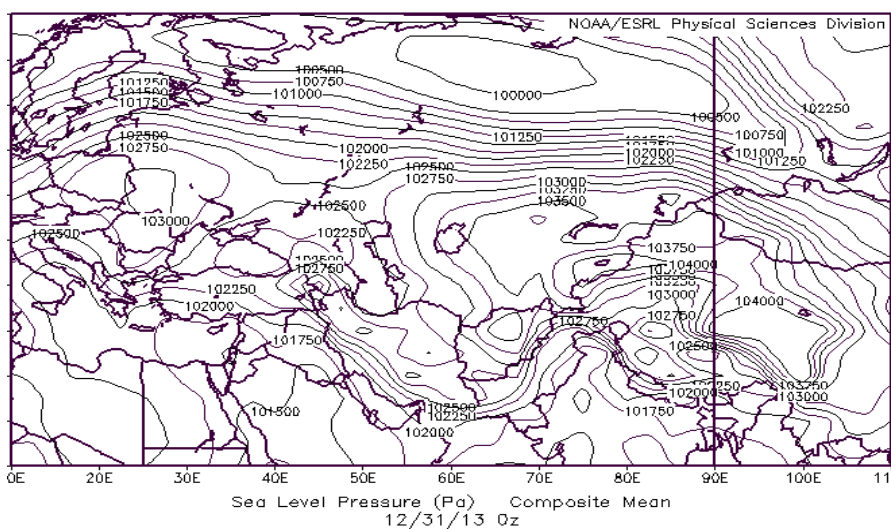
شکل ۲. چارت اسکيوتهی بیست‌وششم و بیست‌وهفتم دسامبر

تحلیل شرایط همدیدی سطح زمین

در بیست‌وچهارم دسامبر تحت تأثیر زبانهٔ پُرفشار اسکاندیناوی، که در روزهای قبل‌تر وارد منطقه شده است، سلول پُرفشاری با فشار مرکزی ۱۰۴۰ هکتوپاسکال در امتداد رشته‌کوه‌های زاگرس شکل گرفته است (شکل ۳). این سامانهٔ پُرفشار به سبب سرمای تابشی شبانه و تأثیرگذاری سامانهٔ پُرفشار اسکاندیناوی تشکیل شده است. همچنین، زبانه‌های پُرفشار سیبری، هرچند به صورت جزئی، در تشدید شرایط فشار در منطقه مؤثر بوده است. اما، باید خاطر نشان کرد که این سامانه، از نظر ماهیت، نه پُرفشار اسکاندیناوی و نه سیبری به‌شمار می‌رود، بلکه پُرفشاری مختص شمال غرب ایران است. در این روزهایی که سلول پُرفشار در سطح زمین مستقر است، فرونشست در هوا، به سبب حاکمیت پُرافتخار در ۵۰۰ هکتوپاسکال، موجب توسعه و تشدید پُرفشار در سطح زمین و عامل پایداری هوا و صاف‌بودن آسمان شده است و چون مرکز این سامانه روی منطقه قرار دارد، باعث تشکیل لایهٔ وارونگی قوی در جو شهر تبریز شده است. از روز بیست‌وچهارم دسامبر سامانهٔ مستقر بر منطقه تشدید شده و در بیست‌وششم دسامبر همراه با افزایش غلظت آلاینده‌ها فشار مرکزی سامانه به ۱۰۴۵ هکتوپاسکال رسیده است. اما، از بیست‌وهفتم دسامبر از شدت فشار کاسته شده و به ۱۰۳۷/۵ هکتوپاسکال رسیده است (شکل ۳) و سرانجام در سی‌ام دسامبر به ۱۰۳۰ هکتوپاسکال تنزل یافته است. در روزهای انتهایی دوره، به همراه تضعیف سامانه و کاهش فشار، سامانهٔ پُرفشار جدیدی دوباره از اسکاندیناوی در حال پیشروی به سمت شمال غرب است و در سی‌ویکم دسامبر زبانه‌های این سامانه در نزدیکی منطقه قرار گرفته است (شکل ۴).



شکل ۳. نقشه هم‌فشار سطح زمین در بیست‌وچهارم و بیست‌وهفتم دسامبر ۲۰۱۳

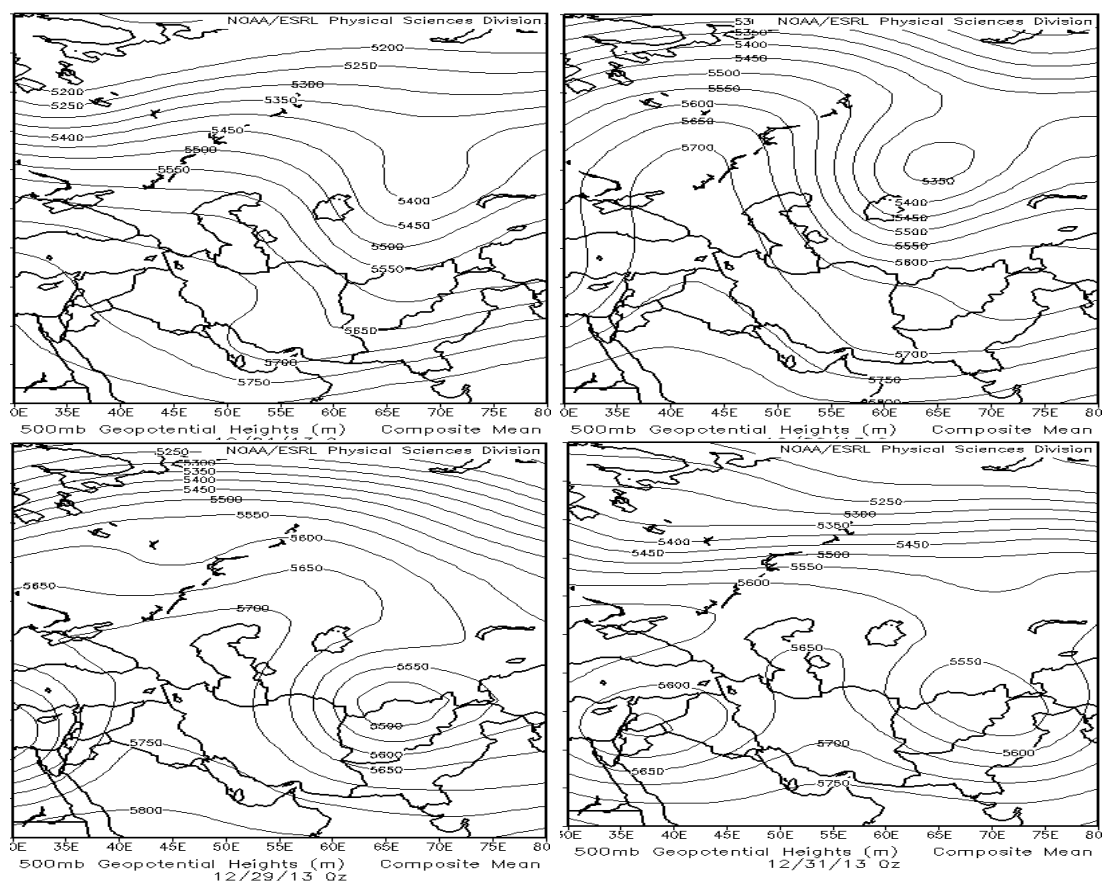


شکل ۴. نقشه هم‌فشار سطح زمین در سی‌ویکم دسامبر ۲۰۱۳

تحلیل شرایط همدیدی سطح تراز میانی جو (۵۰۰ هکتوپاسکال)

در سطوح تراز میانی جو حاکمیت پُراارتفاع و پشته در همهٔ روزها، به جز روز انتهایی دوره، موجبات تشدید شرایط فشار و پایداری جو در سطح زمین را به وجود آورده است؛ این مسئله باعث تشدید لایهٔ وارونگی و افزایش غلظت آلاینده‌ها شده است. در بیست‌وچهارم دسامبر یک سامانهٔ پُراارتفاع با ۵۷۰۰ متر ارتفاع بر منطقه حاکم شده (شکل ۵) و در بیست‌وهفتم دسامبر مماس شدن سامانهٔ پشته بر محور شمال غرب باعث تشدید لایهٔ پایدار و وارونه شده است. از این روز به بعد تا روز سی‌ام سیستم پشته به صورت بلاکینگ امگا با ۵۷۰۰ متر ارتفاع به کار خود ادامه داده و باعث تشدید پایداری در

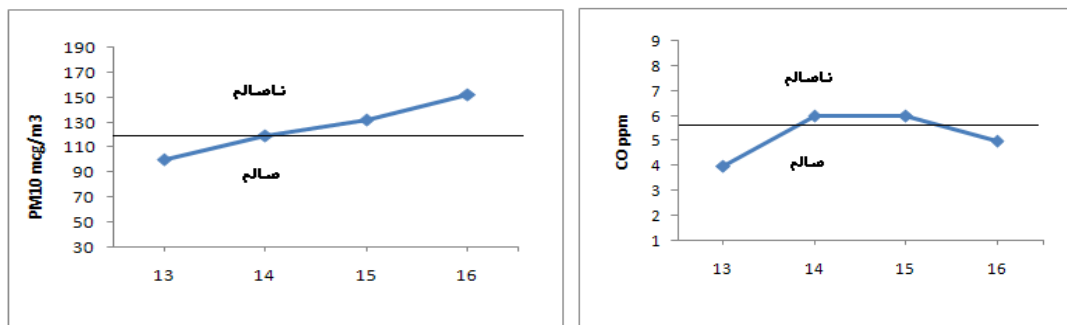
لایه وارونگی دمایی شده است؛ به صورتی که در این دوره غلظت PM2.5 همواره از شرایط سالم برای جو شهر فراتر رفته است و در شرایط بسیار ناسالمی قرار دارد. سرانجام، در روز انتهایی دوره، پُراتفاع از منطقه عقب‌نشینی کرده و یک سیستم کم‌ارتفاع و ناوه وارد منطقه شده است (شکل ۵).



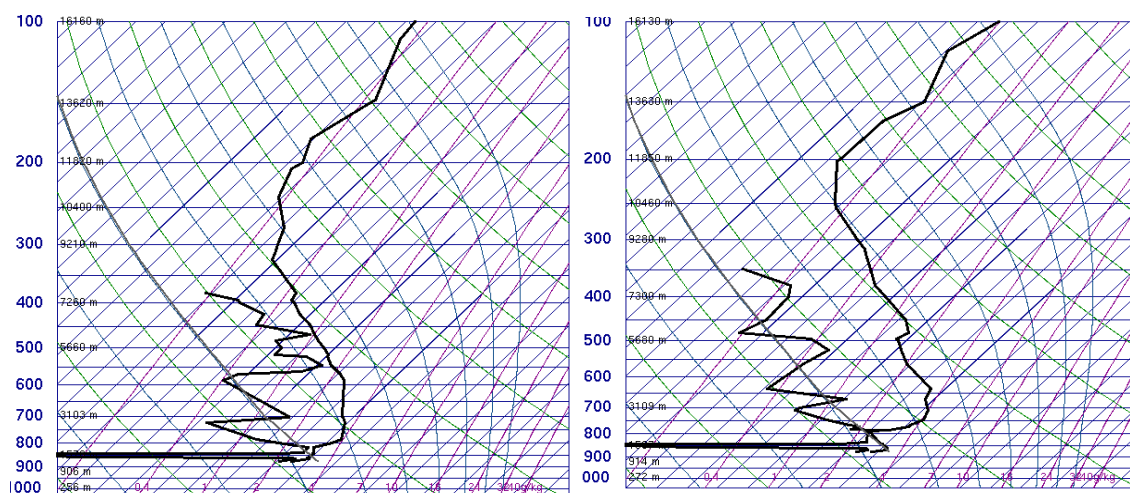
شکل ۵. نقشه‌های هم‌ارتفاع در ۵۰۰ هکتوپاسکال در روزهای بیست‌وچهارم، بیست‌وششم، بیست‌ونهم، و سی‌ویکم دسامبر ۲۰۱۳

بررسی دوره چهارروزه آلودگی در آذرماه ۱۳۹۰ (از بیست‌ودوم تا بیست‌وپنجم آذر)

دوره چهارروزه‌ای که در آذر سال ۱۳۹۰ (سیزدهم تا شانزدهم دسامبر ۲۰۱۱) به وقوع پیوست دارای غلظت بالای آلاینده‌های PM10 و CO و وضعیت ناسالم از لحاظ کیفیت هوا برای شهر تبریز است. طی این دوره، در روزهای پانزدهم و شانزدهم دسامبر غلظت PM10 و CO، به‌ویژه ذرات معلق، در وضعیت هشدار قرار گرفته و غلظت ذرات معلق تا ۱۵۳ میکروگرم بر متر مکعب و میزان منو اکسید کربن هم تا ۶ پی‌ام افزایش یافته است (شکل ۶). غلظت دی اکسید گوگرد هم در شانزدهم دسامبر به بیشترین حد خود در این چهار روز، یعنی به مقدار ۴۸ ppb، رسیده است.



شکل ۶. نمودار غلظت PM₁₀ و CO در روزهای آلوده از بیست و دوم تا بیست و پنجم آذر ۱۳۹۰



شکل ۷. چارت اسکیتیوی سیزدهم و چهاردهم دسامبر ۲۰۱۱

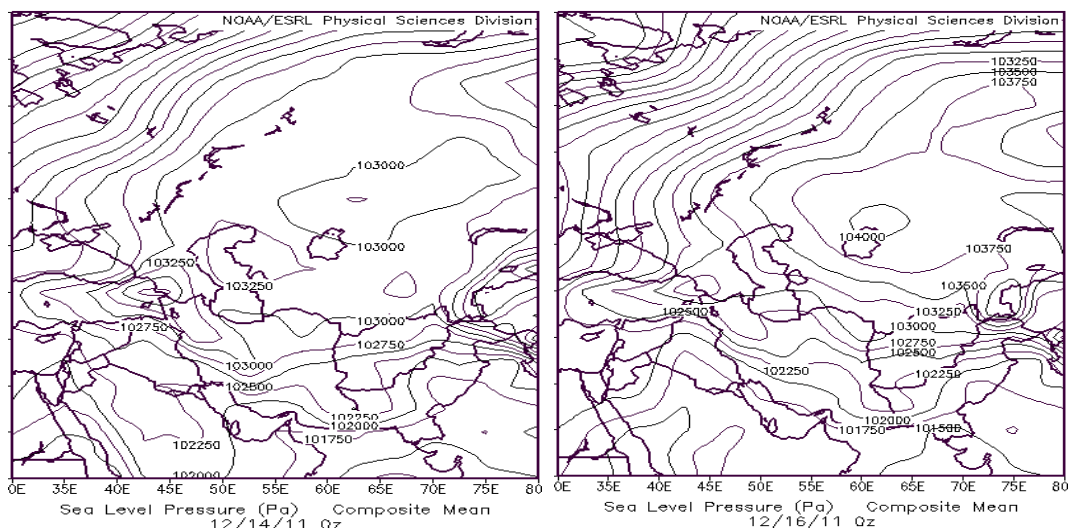
با توجه به داده‌های رادیوسوند، در هر چهار روز این دوره، وارونگی تابشی در نزدیک به سطح زمین و وارونگی فرونشینی در سطوح فوقانی‌تر وجود دارد (شکل ۷). در این دوره هر چه بر شدت وارونگی دمایی افزوده می‌شود، غلظت آلاینده‌ها هم بیشتر می‌شود. در روزهای پانزدهم و شانزدهم دسامبر میزان شدت وارونگی بسیار زیاد است؛ در طی این چهار روز به میزان ۷ تا ۷/۶ درجه سانتی‌گراد است.

در این دوره عمق لایه وارونه بین ۷۵ تا ۲۵۷ متر است. در طی این چهار روز همبستگی مشخصی بین عمق وارونگی دمایی و غلظت آلاینده‌ها مشاهده نمی‌شود و شدت لایه وارونه تأثیر بیشتر و بهتری در روند آلودگی هوا گذاشته است.

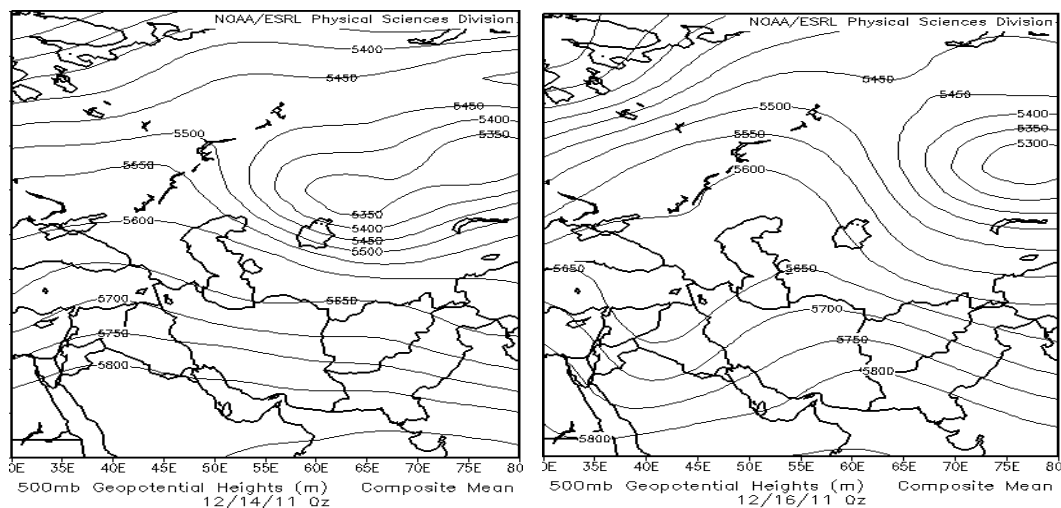
تحلیل شرایط همدید سطح زمین سلول پرفشاری با فشار مرکزی ۱۰۳۵ هکتوپاسکال با اثرپذیری از سامانه پرفشار سبیری در شمال غرب ایران در سیزدهم دسامبر بسته شده و منطقه را هم تحت تأثیر قرار داده است. این سلول پرفشار در شانزدهم دسامبر از بین رفته و فقط سلول ضعیفی از آن در شمال غرب قرار گرفته است و در منطقه فقط زبان‌های ضعیفی از سامانه سبیری حاکمیت دارد (شکل ۸).

تحلیل شرایط همدیدی سطح تراز میانی جو (۵۰۰ هکتوپاسکال)

در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکالی جو (تراز میانی جو) در همهٔ روزها، به‌جز روز پایانی، سیستم پشته و پُراتفعا با ۵۶۵۰ متر ارتفاع حاکمیت دارد و در شانزدهم دسامبر ناوه و کم‌ارتفاع در منطقه مستقر و باعث کاهش شرایط پایداری جو و فشار در منطقه شده است (شکل ۸).



شکل ۸. نقشه‌های هم‌فشار سطح زمین در روزهای چهاردهم و شانزدهم دسامبر ۲۰۱۱



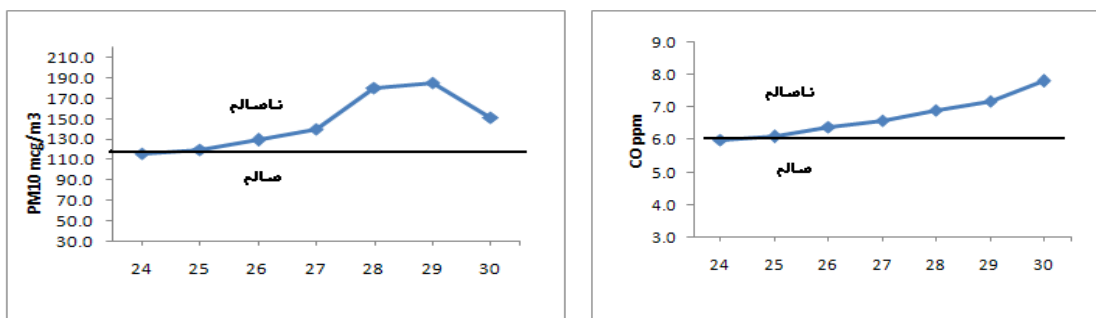
شکل ۹. نقشه‌های هم‌ارتفاع در ۵۰۰ هکتوپاسکال در روزهای چهاردهم و شانزدهم دسامبر ۲۰۱۱

بررسی دورهٔ هفت‌روزهٔ آلودگی در دی‌ماه ۱۳۸۹ (از سوم تا نهم دی)

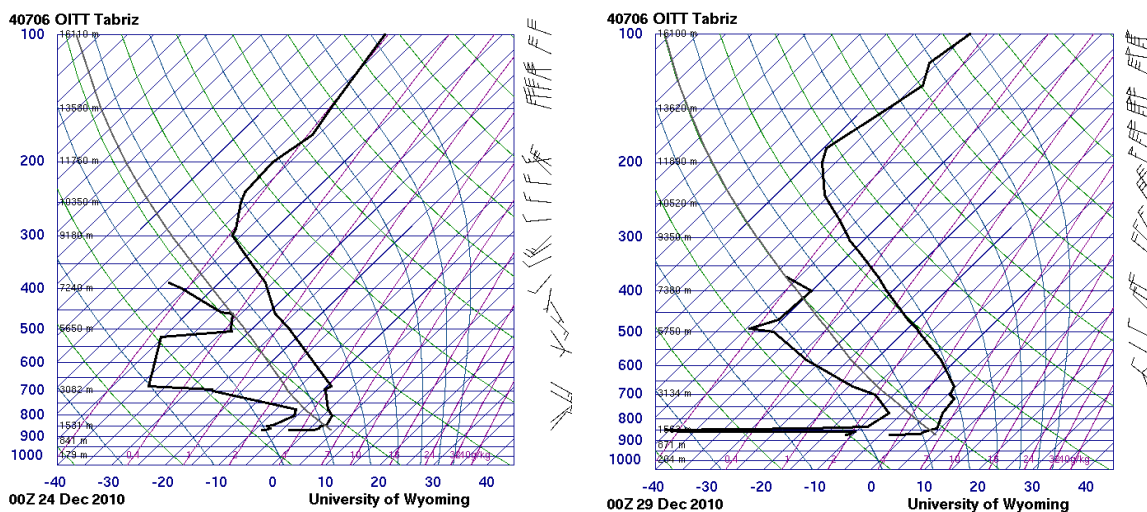
در دی‌ماه ۱۳۸۹ یک دوره آلودگی هوا همراه وارونگی دمایی و پایداری در جو تبریز رخ داد؛ این دوره به مدت هفت روز از سوم تا نهم دی‌ماه (بیست‌و‌چهارم تا سی‌ام دسامبر ۲۰۱۰) به طول انجامید. در مدت این هفت روز همراه با استقرار پُرفشارها در سطوح مختلف و وجود لایهٔ وارونگی قوی میزان آلودگی جو هم بسیار افزایش یافته است؛ به طوری که

غلظت PM10 در همه روزها، به جز یک روز، در وضعیت ناسالم و بیشتر از ۱۲۰ میکروگرم بر متر مکعب است. از نظر آلاینده CO هم، همه روزها در وضعیت ناسالم قرار گرفته است (شکل ۱۰). در این دوره بیشترین غلظت آلاینده‌ها در بیست‌ونهم دسامبر به همراه افزایش شدت لایه وارونه (به میزان ۷٫۵ درجه) است؛ میزان ذرات معلق در این روز به غلظت ۱۸۶ میکروگرم و منو اکسید کربن و دی اکسید گوگرد هم به غلظت ۷٫۲ ppm و ۴۶ ppb رسیده‌اند.

در همه روزهای این دوره وارونگی تابشی در نزدیک سطح زمین و وارونگی فرونشینی در سطوح فوقانی‌تر وجود دارد. از بیست‌وچهارم تا بیست‌وششم دسامبر وارونگی تشعشی شدت زیادی ندارد. ولی از روز بیست‌وهفتم تا سیام دسامبر این وارونگی به بیشترین حد خود در این دوره رسیده است؛ به‌ویژه در بیست‌ونهم دسامبر به همراه افزایش شدت لایه وارونه به میزان ۷٫۵ درجه سانتی‌گراد غلظت آلاینده‌ها هم به بالاترین میزان خود در این دوره رسیده است. همان‌طور که از نمودار اسکیتوی این روز پیداست (شکل ۱۱)، فاصله بسیار زیاد منحنی درجه حرارت و نقطه انجماد حاکی از شدت زیاد وارونگی تشعشی است.



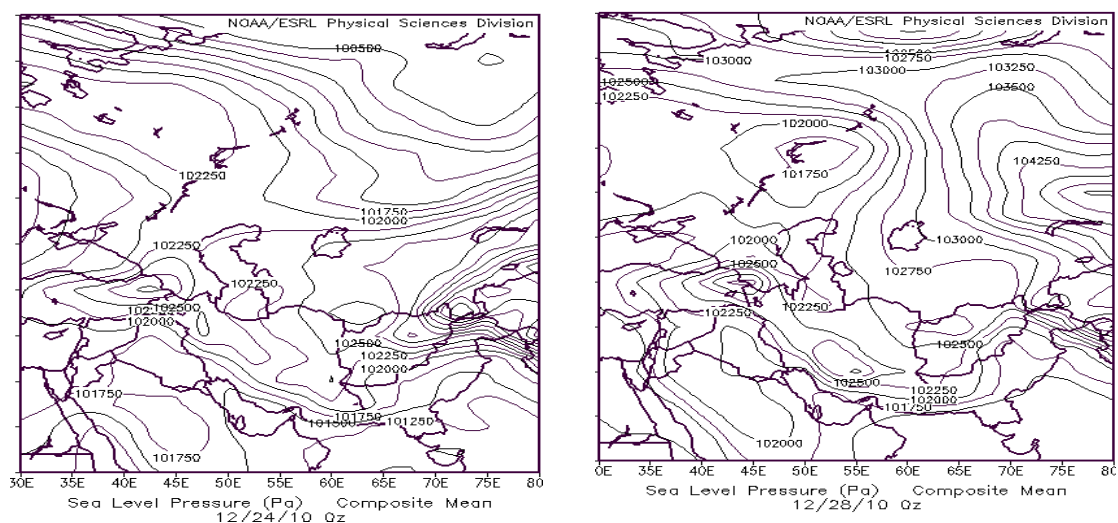
شکل ۱۰. نمودار غلظت PM₁₀ و CO در روزهای آلوده از سوم تا نهم دی‌ماه ۱۳۸۹



شکل ۱۱. نمودار اسکیتوی بیست‌وچهارم دسامبر با وارونگی تشعشی ضعیف و بیست‌ونهم دسامبر با وارونگی تشعشی قوی

تحلیل شرایط همدیدی سطح زمین

در بیست و چهارم دسامبر سلول پرفشاری با فشار مرکزی ۱۰۲۵ هکتوپاسکال در منطقه شکل گرفته است. سلول پرفشار شکل گرفته در بیست و هشتم دسامبر با ورود زبانه‌های پرفشار سیبری به فشار مرکزی ۱۰۲۸ هکتوپاسکال رسیده است. سامانه مزبور در بیست و هشتم دسامبر در امتداد رشته کوه‌های زاگرس تقویت می‌شود و به فشار مرکزی ۱۰۳۰ هکتوپاسکال می‌رسد؛ هسته این پرفشار قوی در شمال غرب و در منطقه مستقر است؛ این در حالی است که یک کم‌فشار از سمت شمال غرب و مدیترانه در حال پیشروی به سمت منطقه است (شکل ۱۲).

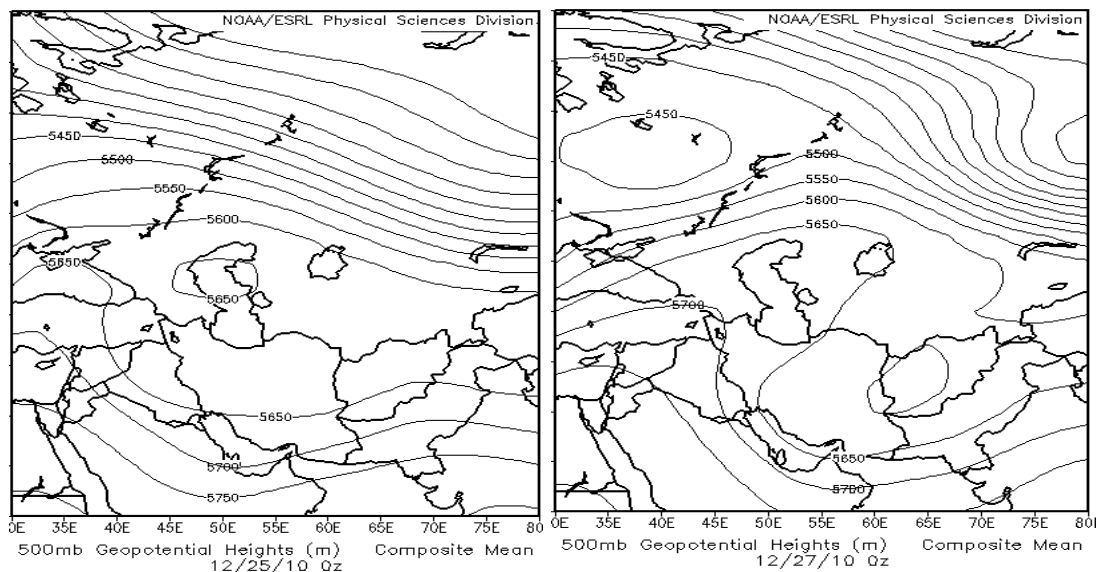


شکل ۱۲. نقشه هم‌فشار سطح زمین در روزهای بیست و چهارم و بیست و هشتم دسامبر ۲۰۱۰

سرانجام، در سیام دسامبر با ورود زبانه‌های سامانه کم‌فشار به منطقه میزان فشار تا رقم ۱۰۲۵ هکتوپاسکال افت کرده است و در راستای کاهش فشار غلظت آلاینده‌ها، به‌ویژه ذرات معلق و دی‌اکسید گوگرد، کاهش یافته است.

تحلیل شرایط همدیدی سطح تراز میانی جو (۵۰۰ هکتوپاسکال)

از آغاز دوره تا بیست و پنجم دسامبر در تراز میانی جو پدیده خاصی وجود ندارد، ولی یک مرکز پُراتفاح در سمت شمال و یک سیستم پشته از سمت غرب در نزدیکی منطقه قرار گرفته است. از بیست و هفتم دسامبر سامانه پُراتفاح با ۵۷۰۰ متر ارتفاع به همراه پشته عمیق ترشده در تراز میانی جو مستقر شده و باعث افزایش فرونشینی و شدت لایه وارونه شده است. دلیل عمیق ترشدن سامانه کاهش طول موج و بزرگ ترشدن دامنه نوسان پشته است. در روز پایانی دوره، به همراه کاهش فشار در سطح زمین، در ۵۰۰ هکتوپاسکالی هم سیستم پُراتفاح و پشته از منطقه مورد نظر عقب‌نشینی کرده است.

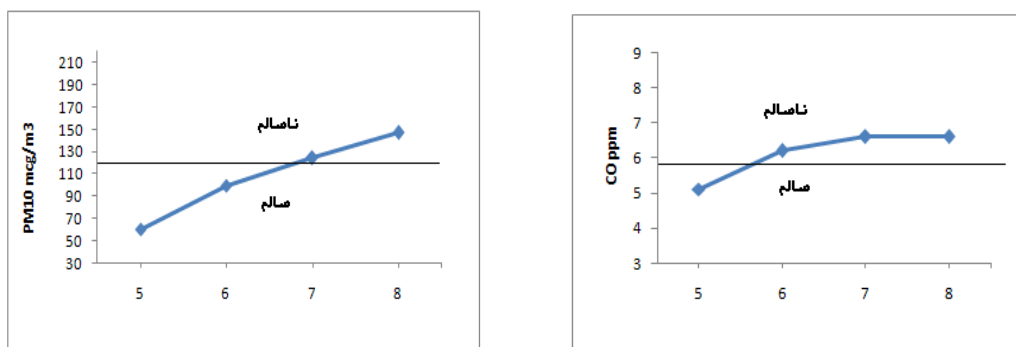


شکل ۱۳. نقشه‌های هم‌ارتفاع در ۵۰۰ هکتوپاسکال در روزهای بیست‌وپنجم و بیست‌وهفتم دسامبر ۲۰۱۰

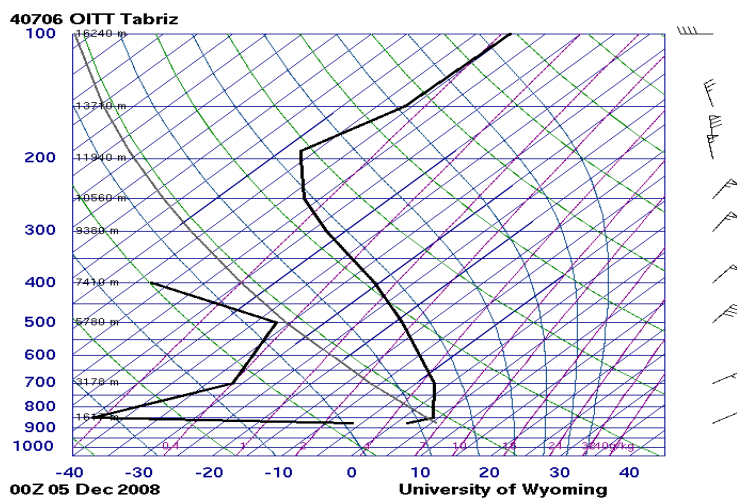
بررسی دوره چهارروزه آلودگی در آذرماه ۱۳۸۷ (از پانزدهم تا هجدهم آذر)

دوره چهارروزه‌ای که در آذرماه ۱۳۸۷ (پنجم تا هشتم دسامبر ۲۰۰۸) به‌وقوع پیوست دارای غلظت بالا و ناسالم آلاینده‌های PM₁₀ و CO است (شکل ۱۴). در همه دوره، به‌جز یک روز، غلظت منو اکسید کربن بیشتر از ۶ ppm است و میزان ذرات معلق در روزهای هفتم و هشتم دسامبر در شرایط ناسالم و بالاتر از ۱۲۰ mcg/m³ قرار دارد؛ این در حالی است که در روز ششم دسامبر هم غلظت این آلاینده به شرایط ناسالم نزدیک است. بیشترین غلظت آلاینده‌ها در این دوره به همراه اوج‌گیری شدت لایه وارونگی اتفاق افتاده است.

در این دوره، وارونگی تابشی قوی در نزدیک سطح زمین مستقر بوده است (شکل ۱۵). محدوده شدت وارونگی در طی این چهار روز بین ۴ تا ۵/۳ درجه سانتی‌گراد است.



شکل ۱۴. نمودار غلظت PM₁₀ و CO در روزهای آلوده از پنجم تا هشتم دسامبر ۲۰۰۸

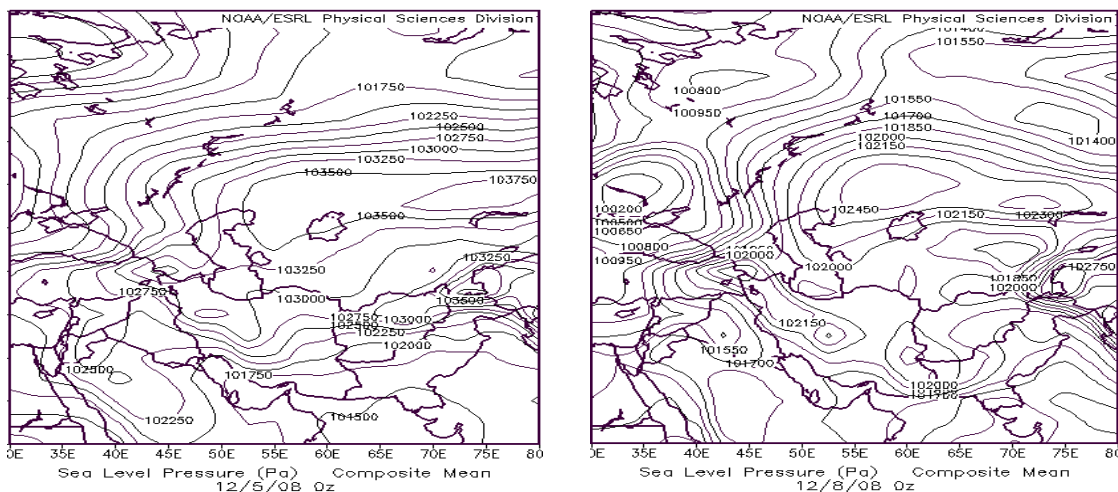


شکل ۱۵. چارت پنجم دسامبر ۲۰۱۱

محدوده عمق وارونگی در این دوره بین ۶۴ تا ۱۷۲ متر قرار دارد. عمق وارونگی تأثیر اندکی در غلظت آلاینده‌ها گذاشته است، ولی در روز ششم دسامبر، با وجود شدت وارونگی زیاد و تشدید شرایط فشار، افزایش عمق وارونگی دمایی (به میزان ۱۷۲ متر) و کاهش قدرت لایه وارونه باعث بحرانی شدن غلظت آلاینده‌ها در این روز شده است.

تحلیل شرایط همدید سطح زمین

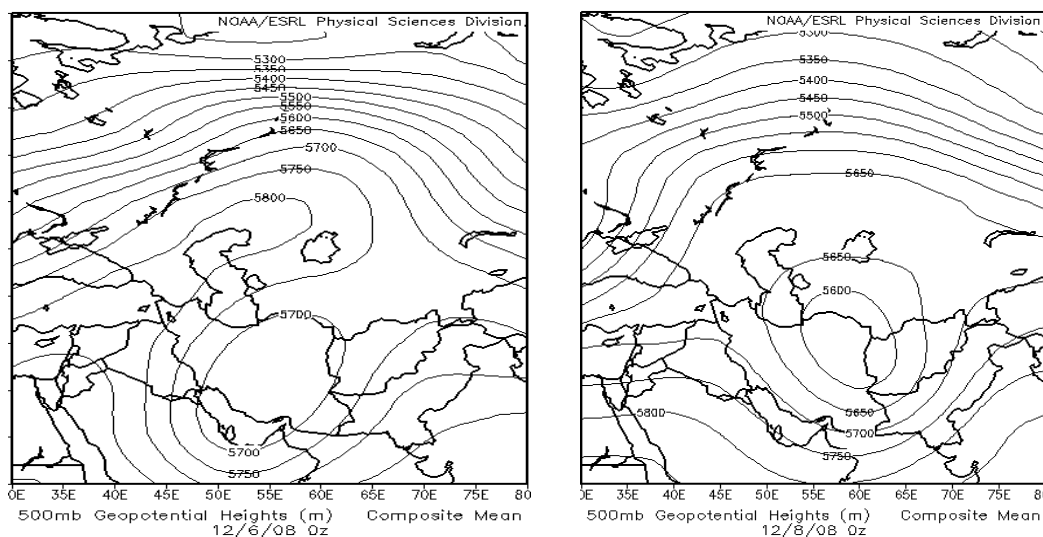
تحت تأثیر زبانه‌های سامانه قدرتمند سیبری سلول پرفشاری با فشار مرکزی ۱۰۳۲ هکتوپاسکال در روز آغازین دوره در منطقه شکل گرفته است (شکل ۱۶). در روز بعدی شرایط فشار تشدید شده و سلول پرفشار مستقر بر شمال غرب گسترش یافته است. در روز هفتم دسامبر فشار نسبت به روز قبل کاهش یافته، ولی سلول پرفشار حاکم بر منطقه همچنان در امتداد رشته کوه‌های زاگرس گسترش یافته است. سرانجام، در روز پایانی، با نزدیک شدن یک مرکز کم‌فشار از سمت شمال غرب کشور به منطقه، از شدت سامانه پرفشار کاسته شده و از منطقه عقب‌نشینی کرده است (شکل ۱۶).



شکل ۱۶. نقشه‌های هم‌فشار سطح زمین در روزهای پنجم و هشتم دسامبر ۲۰۰۸

تحلیل شرایط همدیدی سطح تراز میانی جو (۵۰۰ هکتوپاسکال)

در تراز میانی جو وجود پُرارتفاع و پشته با ۵۸۰۰ متر ارتفاع شرایط فشار سطح زمین را تشدید کرده و باعث تشکیل لایه وارونگی و بالارفتن غلظت آلاینده‌ها در این دوره شده است. در روزهای ششم و هفتم دسامبر سامانه در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکالی با کاهش طول موج و بزرگ‌تر شدن دامنه نوسان پشته موجب تشدید فرونشینی هوا و پایداری جو شده است. در روز هشتم دسامبر پُرارتفاع ضعیفی در منطقه مستقر است، که مرکز کم‌ارتفاع نزدیک‌شده از سمت شرق هم باعث عقب‌نشینی پُرارتفاع در این سطح و کاهش فشار در سطح زمین شده است (شکل ۱۷).



شکل ۱۷. نقشه‌های هم‌ارتفاع در سطح تراز میانی جو در روزهای ششم و هشتم دسامبر ۲۰۰۸

نتیجه‌گیری

مطالعه سامانه‌های سینوپتیکی به شناخت مکانیسم رخداد پدیده‌های آب‌وهوایی و پیش‌بینی این پدیده‌ها کمک شایانی می‌کند. در پژوهش حاضر به بررسی ارتباط الگوهای سینوپتیکی و دوره‌های آلودگی شدید هوای شهر تبریز پرداخته شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد غلظت آلاینده‌ها در بیشتر روزها از شدت لایه وارونه متأثر بوده است؛ به نحوی که وقتی شدت وارونگی دمایی به بیش از پنج درجه سانتی‌گراد رسیده، تأثیر بیشتری در افزایش غلظت آلاینده‌ها در همه دوره‌های مورد بررسی داشته است. البته، در روزهایی هم که شدت وارونگی دمایی بیشتر بوده، اما غلظت آلاینده‌ها کمتر شده، به سبب تأثیر عناصر اقلیمی، از جمله باد، در منطقه بوده است. در همه دوره‌ها، پایداری جو و لایه وارونگی از شدت زیادی برخوردار است و در بیشتر روزهای مورد بررسی و در فصل سرد سال، به سبب کوتاه‌بودن طول روز و وجود سرمای تابشی شبانه، وارونگی دمایی، اعم از تشعشعی و فرونشینی در فصول سرد سال، اتفاق افتاده است. همچنین، ویژگی‌های محلی خود منطقه به‌ویژه نبود بادهایی با سرعت زیاد در فصل‌های پاییز و زمستان برای کاهش شدت لایه وارونگی و غلظت آلاینده‌ها زمینه را برای ایجاد آلودگی هوا فراهم کرده است. در طی دوره‌های مورد بررسی، بیشترین آلودگی مربوط است به ذرات معلق تا ۱۸۶ میکروگرم بر متر مکعب در بیست‌ونهم دسامبر ۲۰۱۰ و میزان منو اکسیدکربن هم ۶٫۵ پی پی ام در یازدهم نوامبر ۲۰۱۰ بوده است.

با بررسی داده‌های رادیوسوند، مشخص شد ارتباطی قوی میان عملکرد لایه‌های وارونگی ضعیف و قوی با سیستم‌های کم‌فشار و پرفشار وجود دارد؛ به طوری که لایه وارونگی شدید همواره با سیستم‌های پرفشار همراه بوده است. بررسی نمونه‌ها نشان داد، با نفوذ سیستم‌های پرفشار در منطقه، لایه وارونگی نیز شروع می‌کند به شکل‌گیری. و زمانی لایه‌های وارونگی به اوج شدت خود می‌رسند که چند روزی از ورود پرفشارها گذشته باشد. البته، هنگامی که پرفشارها در هر دو تراز سطح زمین و تراز میانی وجود داشتند پرفشار عمیقی ایجاد کرده و موجب تداوم آن در منطقه شده‌اند. در واقع، شکل‌گیری لایه‌های وارونگی به صورت دوره‌ای و با ورود سیستم‌های پرفشار کنترل می‌شود. در بررسی الگوهای سینوپتیکی نمونه‌ها مشخص شد همه روزهای همراه با آلودگی طولانی مدت حاصل برهم‌کنش شرایط محلی با گردش جو در مقیاس منطقه‌ای است؛ به عبارتی، شهر تبریز هنگامی روزهای بسیار آلوده را تجربه خواهد کرد که گردش منطقه‌ای جو شرایط مناسب را برای افزایش غلظت آلاینده‌ها فراهم کند.

یافته‌ها بیانگر آن است که پرفشار سیبری نقش برجسته‌ای در بروز آلودگی‌های جدی شهر تبریز داشته و سامانه گردشی یادشده در بیش از نیمی از روزهای مورد بررسی سبب پیدایش غلظت بالای آلودگی در شهر تبریز شده است. هرچند سامانه همدیدی یادشده، به دلیل استقرار هوای سرد بر روی زاگرس و با ترکیب پرفشار توسعه‌یافته در امتداد رشته‌کوه‌های زاگرس، پرفشار قوی را ایجاد کرده، این سامانه هنگامی قدرتمندتر بوده که در تراز میانی جو در همه دوره‌ها حاکمیت پُراارتفاع در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال به همراه سیستم پشته و مماس بودن محور پشته بر منطقه وجود داشته و موجب توسعه و تشدید پرفشار در سطح زمین و عامل پایداری هوا و صاف بودن آسمان شده است. همچنین، باعث تشکیل لایه وارونگی قوی و افزایش غلظت ذرات معلق در جو شهر تبریز شده است. علاوه بر این، زبانه‌هایی از پرفشار اسکاندیناوی و ریزش هوای سرد مدیترانه هرچند خیلی کم موجب وارونگی دمایی و تشدید آلودگی در برخی از دوره‌های آلودگی شده است. همچنین، در بیشتر اوقات بعد از اوج آلودگی با نفوذ کم‌فشار از سمت شمال غرب و مدیترانه باعث افت فشار و سرانجام کاهش غلظت آلاینده‌ها شده است. در مقایسه با یگانه پژوهش انجام‌یافته در این زمینه برای محدوده مورد مطالعه توسط جهان‌بخش و روشنی (۱۳۹۳) - که مهم‌ترین عامل وارونگی را سه سامانه پرفشار سیبری، پرفشار شبه‌جزیره عربستان، و ریزش هوای سرد مدیترانه بیان کرده‌اند - این تحقیق نشان داد، علاوه بر دو سامانه پرفشار سیبری و ریزش هوای سرد مدیترانه، هم‌زمانی پرفشار سیبری با پرفشار زاگرس و همچنین زبانه‌هایی از پرفشار اسکاندیناوی از دیگر عوامل اصلی تقویت و تشدید دوره‌های طولانی مدت آلودگی شهر تبریز است.

قدردانی

این مطالعه از طرح تحقیقاتی که با بودجه پژوهشی و حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز به انجام رسیده استخراج شده است؛ به سبب این حمایت تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- جهان‌بخش اصل، س. و روشنی، ر. (۱۳۹۳). بررسی شرایط آلودگی سینوپتیکی حاکم بر وضعیت‌های وارونگی دمای بسیار شدید شهر تبریز، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۸(۴۸): ۸۱ - ۹۶.
- حسین‌زاده، س.ر.؛ دوستان، ر. و حقیقت ضیابری، س.م. (۱۳۹۲). بررسی الگوهای همدید مؤثر بر آلودگی هوا در کلان‌شهر مشهد، *مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*، ۱۱(۲۱): ۸۱ - ۱۰۱.
- ذوالفقاری، ح.؛ صحرایی، ج.؛ شاقبادی، ف. و جلیلیان، آ. (۱۳۹۳). تحلیلی بر جنبه‌های سینوپتیکی - دینامیکی آلودگی هوا در کرمانشاه، *مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۹: ۷۵ - ۹۶.
- روشنی، ر. (۱۳۹۰). بررسی تأثیر پرفشارها در وقوع اینورژن‌های بسیار شدید و تداوم آلودگی‌های شهر تبریز در سال ۲۰۰۸، *همایش ملی تغییر اقلیم و تأثیر آن بر کشاورزی و محیط زیست*، ارومیه، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی.
- صادقی، س.؛ مفیدی، ع.؛ جهانشیری، م. و دوستان، ر. (۱۳۹۳). نقش الگوهای گردش مقیاس منطقه‌ای جو بر وقوع روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد، *مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۳(۱۰): ۱ - ۳۵.
- عابدینی، ی.؛ نوروززاده، ف. و صدایی، ی. (۱۳۹۱). تعیین آلودگی هوای شهر تبریز با استفاده از شاخص PSI، *اولین همایش ملی حفاظت و برنامه‌ریزی محیط زیست*، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان.
- علیجانی، ب. و هوشیار، م. (۱۳۷۸). شناسایی الگوهای سینوپتیکی سرمایه‌های شدید شمال غرب ایران، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۶۵: ۱ - ۱۶.
- قسامی، ط.؛ بیدختی، ع.؛ صداقت‌کردار، ع. و صحراییان، ف. (۱۳۸۶). بررسی شرایط همدیدی حاکم در چند دوره بحرانی آلودگی هوای شهر تهران، *مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۹(۳): ۲۲۹ - ۲۳۸.
- نوروززاده، ف. (۱۳۹۱). بررسی آلودگی هوا و منابع آلاینده هوا در سطح شهر تبریز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه زنجان.
- هدایت، پ. (۱۳۸۱). بررسی سینوپتیکی سیستم‌های اقلیمی مؤثر بر آلودگی هوای شهر تهران و بیماری‌های قلبی و ریوی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.
- یارنال، ب. (۱۳۸۵). *اقلیم‌شناسی همدید و کاربرد آن در مطالعات محیطی*، ترجمه سید ابوالفضل مسعودیان، اصفهان: دانشگاه اصفهان.
- Alijani, B. and Hushyar, M. (1999). Identifying synoptic patterns of severe colds in North West of Iran, *Physical Geography Research*, 65:1-16.
- Abedini, Y.; Norozzadeh, F. and Sadaie, Y. (2013). Determination of air pollution in the city of Tabriz using SPI index, *First National Conference on Environmental Protection and Planning*, Islamic Azad University Hamedan Branch.
- Barry, R. (1997). Synoptic Climatology, in J.E Oliver and R.W. Fairbridge (eds), *The Encyclopedia of Climatology*, New York: Van Nostrand Reinhold Book.
- Bei, N.; Li, G.; Huang, R.; Cao, J.; Meng, N.; Feng, T.; Liu, S.; Zhang, T.; Zhang, Q. and Molina, L.T. (2016). Typical synoptic situations and their impacts on the wintertime air pollution in the Guanzhong basin, China, *Journal Atmospheric Chemistry and Physics*, NO.0:1-34.
- Ccoyllo, S.O.R. and Andrade, M.F. (2002). The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in São Paulo, Brazil, *Environmental Pollution*, 116(2): 257-263.
- Chen, Z.C.; SY, L.; Guo, J.; Wang, X. and Chen, W. (2008). Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China, *Atmospheric Environment*, 42: 6078-6087.
- Flocas, H.; Kelessis, A.; Helmis, C.; Petrakakis, M.; Zoumakis, M. and Pappas, K. (2009). Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area, *Theor Appl Climatol*, 95: 265-277.
- Gasami, T.; Bidokhti, A.A.; Sedagat Kerdar, A. and Sahrayiyan, F. (2007). Investigating prevailing Synoptic

- conditions in several critical periods of air pollution in Tehran, *Journal of Environmental Research*, 9(3): 229-238.
- Hedayat, P. (2002). A synoptic survey on climatic systems affecting air pollution in Tehran and heart and lung diseases, MS Thesis, Department of Earth Sciences, University of Martyr Beheshti.
- HosseinZadeh, S.; Dostan, R.; Hagigat Ziyabari, S.M. and Hagigat Ziyabari, S.M. (2013). Investigating the synoptic patterns affecting air pollution in the metropolis of Mashhad, *Journal of Geography and Regional Development*, year 11th, 21: 81-101.
- Jahanbakhsh Asl, S. and Roshani, R. (2015). Investigating the synoptic patterns of very severe temperature inversion conditions in Tabriz, *Journal of Geography and planning*, 18(48): 81-96.
- Juneng, L.; Talib Latif, M. and Tangang, F. (2011). Factors influencing the variations of PM10 aerosol dust in Klang Valley, Malaysia during the summer, *Atmospheric Environment*, 45: 4370-4378.
- Landsberg, H.E. (1980). *The Urban Climate*, Academic Press, PP. 288.
- Makra, L.; Mika, J.; Bartzokas, A.; Be'czi, R.; Borsos, E. and Su'meghy, Z. (2006). An objective classification system of air mass types for Szeged, Hungary, with special interest in air pollution levels, *Meteorol Atmos Phys*, 92: 115-137.
- Norozzadeh, F. (2011). Investigating the pollution and Source of air pollution in Tabriz, Master's thesis, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Zanjan.
- Roshani, R. (2011). Investigating the effect of pressure on the occurrence of severe inversions and continuity of pollution in the city of Tabriz (2008), *The National Conference on climate change and its impact on agriculture and the environment*, Urmia, West Azerbaijan Province Research Center for Agriculture and Natural Resources
- Sadegi, R.; Mofidi, A.; Jahanshiri, M. and Dostan, R. (2014). Investigating the role of regional scale atmospheric circulation patterns on heavily polluted days in the city of Mashhad, *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 3(10): 1-35.
- Yarnal, B. (2006). Synoptic climatology and its application in *Environmental studies*, translation: SA Masoodian, 1st publication, Isfahan, Isfahan University.
- Yarnal, B. (1993). *Synoptic Climatology in Enviromental Analysis*, London, A Primer Belhaven Press.
- Zulfaqari, H.; Sahraii, J.; Shaqbady, F. and Jalileans, A. (2014). Investigating the Synoptic - dynamics aspects of air pollution in Kermanshah, *Journal of Geography and Environmental hazards*, 9: 75-96.