

## مطالعه همدیدی الگوهای جوی حاکم بر روی تهران در روزهای با آلودگی بسیار شدید هوا

عباس رنجبر سعادت آبادی<sup>۱</sup>، زهرا قصابی<sup>۲</sup>

۱. استادیار سازمان هواشناسی کشور، دکتری هواشناسی، سازمان هواشناسی کشور

۲. دانشجوی دکتری هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه هواشناسی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۸۹/۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۲۲

### چکیده

آلودگی هوای کلان شهرها یکی از مشکلات اساسی زیست محیطی است. آمار ده ساله (۲۰۰۸-۱۹۹۹) شاخص استاندارد آلودگی هوای تهران نشان می دهد که بیش از ۸۹۱ روز کیفیت هوای شهر تهران در شرایط ناسالم و بسیار ناسالم قرار داشته است. هرچند که عوامل متعددی در ایجاد آلودگی هوا نقش دارند اما مهمترین عامل کنترل کننده توزیع و پراکنش آلودگی هوا، شرایط جوی حاکم هستند. در این مطالعه ویژگی های همدیدی سامانه های جوی که منجر به رخداد آلودگی های بسیار شدید طی ۱۰ ساله اخیر در شهر تهران گردیده، بررسی شده است. برای این منظور از داده های شاخص استاندارد آلودگی<sup>۱</sup> (PSI) هوای تهران و داده های تحلیل نهایی با تفکیک افقی یک درجه استفاده شد. در دوره مورد مطالعه فقط چهار مورد مشاهده شد که آلودگی هوای تهران از نظر غلظت گازها در شرایط بسیار ناسالم ( $PSI > 200$ ) قرار داشته است. نتایج نشان می دهد که الگوهای فشاری برای روزهای با آلودگی بسیار شدید در تهران هر چند در فصول مختلف روی داده است، اما شباهت هایی از نظر نوع سامانه و محل استقرار آنها دیده می شود. در همه موارد مطالعه شده، استقرار سامانه پرفشار بر روی زاگرس و جنوب البرز و کم فشار حرارتی در نواحی شمال البرز همراه با پراارتفاع سطوح میانی جو، شرایط باد آرام و کاهش بسیار شدید عمق لایه مرزی (حدود ۵۰-۲۰۰ متر) در تهران از ویژگی های مهم این سامانه ها می باشند. همچنین بی هنجاری های مثبت ارتفاعی تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکالی در روی زاگرس و نواحی جنوبی البرز که با تقویت سامانه پرفشار همراهی می شود و بی هنجاری های منفی ارتفاعی تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکالی در شمال البرز و روی دریای خزر شرایط مناسبی برای افزایش پتانسیل آلودگی هوای تهران فراهم می آورد.

**کلید واژه ها:** آلودگی شدید هوا، سامانه های جوی، شاخص استاندارد آلودگی، تهران.

## مقدمه

باد و بارش دو عنصر اصلی برای تغییر غلظت آلاینده‌ها در جو می‌باشند. اثر بارش به ویژه بر روی ذرات معلق بارز بوده و سبب باران بردگی و آب بردگی ذرات معلق می‌شود (لندز برگ، ۱۹۸۰). باد نیز سبب انتقال آلاینده ها (هم گازی و هم ذرات معلق) می‌شود.

طی دهه‌های اخیر افزایش جمعیت، رشد سریع صنعتی شدن و انتشار مقادیر بسیار زیاد گازها و دیگر آلاینده‌های جوی ناشی از کارخانجات و وسایل نقلیه سبب آلودگی هوای کلان شهرها از جمله تهران شده است. شرایط جوی پایدار گاهی سبب می‌شود که آلودگی هوای تهران به وضعیت خطرناک و بحرانی برسد که می‌تواند آسیب‌های جبران ناپذیری را به سلامت شهروندان و محیط زیست وارد کند. مطالعات زیادی در خصوص ارتباط بین غلظت آلاینده‌های هوا و سامانه‌های همدیدی انجام شده است. ماکرا و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۷) با بررسی رابطه میان الگوهای جوی بزرگ مقیاس و آلودگی هوا نشان دادند که افزایش غلظت آلاینده‌های هوا در پیکرلی<sup>۲</sup> در جنوب مجارستان، هم در تابستان و هم در زمستان در شرایط استقرار سامانه واپرخندی و پرارتفاع سطوح میانی جو رخ می‌دهد و کاهش آلاینده‌ها نه فقط هنگام استقرار چرخندهای دینامیکی، بلکه به هنگام استقرار پرارتفاع هم می‌تواند روی دهد.

مک گریگور و بیمزلیس<sup>۳</sup> (۱۹۹۵) ارتباط سامانه‌های همدیدی مختلف با آلودگی هوای بیرمنگام<sup>۴</sup> را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند در حالت بیشترین غلظت آلاینده‌ها، واپرخند بر روی منطقه مستقر می‌شود. مطالعات مشابه

زیادی در خصوص شناسایی ارتباط سامانه‌های جوی و پارامترهای هواشناختی با آلودگی هوا انجام شده است که از جمله این مطالعات می‌توان به دیویس و گی<sup>۵</sup> ۱۹۹۳، دیویس و کالکشین<sup>۶</sup> ۱۹۹۰، آدامپولوس<sup>۷</sup> و همکاران ۱۹۹۶، دیویس<sup>۸</sup> و همکاران ۱۹۹۲، از کورا<sup>۹</sup> و همکاران ۱۹۸۸، سایندوسی<sup>۱۰</sup> و همکاران ۲۰۰۳، اسکوت و دایب<sup>۱۱</sup> ۲۰۰۰، لام و چانگ<sup>۱۲</sup> ۱۹۹۸، اشاره نمود. رنجبر سعادت آبادی و محمدیان محمدی (۱۳۸۹) میانگین الگوهای همدیدی براساس رخداد غلظت های گاز CO<sup>۱۳</sup> در فصول تابستان و پاییز در تهران را مطالعه کردند. قسامی و همکاران (۱۳۸۶)، وضعیت همدیدی برخی شرایط حاد آلودگی هوای تهران از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۲ میلادی را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند زمانی که پرفشار منطقه ای (منطقه ایران)، از نوع سامانه های عرض های میانی در ناحیه حاکم باشد غلظت آلاینده ها افزایش یافته و گاهی اوقات ممکن است دو تا سه برابر، بیشتر از حد مجاز باشد. صفوی و علیجانی (۱۳۸۵) 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. علیجانی (۲۰۰۴) رابطه بین تغییرات فشار ایستگاه هواشناسی مهرآباد و بعضی از آلاینده‌های هوا در ایستگاه سنجش آلودگی هوا واقع در خیابان ویلا را بررسی کرده و نتیجه گرفته که بین روند تغییرات CO و فشار همبستگی مثبت وجود دارد و همچنین با استفاده از داده های NCEP<sup>۱۴</sup> الگوهای جوی روزهای آلوده را به شش تیپ هوایی طبقه بندی کرده و نتیجه گرفته که بیشتر تیپ‌ها در پاییز فراوان تر بودند و

<sup>۱</sup>. Makra

<sup>۳</sup>. McGregor and Bamzeli

<sup>۵</sup>. Davis and Gay

<sup>۷</sup>. Adamopoulos

<sup>۹</sup>. Ezcurra

<sup>۱۱</sup>. Scott and Diab

<sup>۱۳</sup>. Carbon Monoxide

<sup>۲</sup>. Peczely

<sup>۴</sup>. Birmingham

<sup>۶</sup>. Davis and Kalkstein

<sup>۸</sup>. Davis

<sup>۱۰</sup>. Sindosi

<sup>۱۲</sup>. Lam and Cheng

<sup>۱۴</sup>. National Center for Environmental Prediction

آلودگی هوا می‌تواند در پی داشته باشد، مطالعه همدیدی سامانه‌های جو بمنظور شناخت پتانسیل آلودگی هوای تهران حائز اهمیت است.

جدول شماره (۲) شاخص استاندارد آلودگی هوا و روزهایی که آلودگی بسیار شدید تهران رخ داده است را نشان می‌دهد. برای بررسی ویژگی‌های سامانه‌های جوی حاکم در این روزها، میدان‌های فشار سطح دریا، ارتفاع لایه مرزی، بی‌هنجاری‌های ارتفاع سطوح ۱۰۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکالی، ارتفاع ژئوپتانسیلی و باد ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین و ترازهای فشاری، ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰، ۲۵۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکالی بر اساس داده‌های تحلیل نهایی<sup>۲</sup> از چند روز قبل (حداقل سه روز قبل) از وقوع شرایط بسیار ناسالم مطالعه شده است. داده‌های تحلیل نهایی حاصل انجام داده‌گذاری<sup>۳</sup> با لحاظ کردن داده‌های دیدبانی شده ایستگاه‌های هواشناسی است.

پس از پیاده‌سازی داده‌ها و تغییر فرمت آن‌ها توسط نرم‌افزار گردز<sup>۴</sup> نقشه‌های هواشناسی سطوح استاندارد، فشار سطح دریا، میدان‌های باد، ارتفاع ژئوپتانسیل و ارتفاع لایه مرزی بررسی می‌شود. شایان ذکر است که با توجه به تشابه شکل‌ها و جلوگیری از حجم زیاد مقاله، فقط تعدادی از نقشه‌های ترازهای ۱۰۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکالی آورده شده است.

توالی‌های آلوده طولانی مدت توسط تیپ مداری و توالی کوتاه مدت توسط الگوی کم فشار خراسان تولید شده‌اند. هی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۶) مطالعه‌ای در خصوص دیدبانی و مدل‌سازی عمق لایه مرزی جو شهری و تکامل آن، با استفاده از داده‌های رادیوسوند و سنجش از دور انجام دادند. با توجه به اهمیت موضوع، در این مطالعه میدان‌های فشار، ژئوپتانسیل و باد سامانه‌های همدیدی حاکم بر روی منطقه از سه روز قبل از اینکه شرایط حاد آلودگی هوای تهران رخ دهد مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

در این مطالعه بر اساس داده‌های غلظت آلاینده‌های اصلی و شاخص استاندارد آلودگی (PSI) که توسط شرکت کنترل کیفیت هوای تهران دیدبانی و محاسبه شده، روزهای بسیار آلوده ( $PSI > 200$ ) تهران طی دهه اخیر (از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۸) مشخص می‌شود. جدول شماره (۱) کیفیت هوا را بر اساس مقدار PSI نشان می‌دهد.

آمار ده ساله (۲۰۰۸-۱۹۹۹) شاخص استاندارد آلودگی هوای تهران نشان می‌دهد که بیش از ۸۹۱ روز کیفیت هوای تهران در شرایط ناسالم و بسیار ناسالم قرار داشته است. با توجه به خسارات جانی و مالی فراوانی که

جدول شماره (۱) طبقه‌بندی کیفیت هوا بر اساس PSI

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

جدول شماره (۲) شدیدترین آلودگی گاز منو اکسید کربن (CO) هوای تهران از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۸

سال	دسامبر ۲۰۰۳			آگوست ۲۰۰۳			سپتامبر ۲۰۰۲			نوامبر ۲۰۰۱		
روز	۱۵	۱۶	۱۷	۱۰	۱۱	۱۲	۷	۸	۹	۴	۵	۳
PSI	۱۰۱	۱۰۶	۲۳۷	۱۴۵	۱۸۴	۱۹۸	۱۴۶	۱۷۵	۲۱۶	۲۲۱	۲۰۸	۱۴۹

<sup>۱</sup>. He  
<sup>۳</sup>. Data assimilation

<sup>۲</sup>. Final Analysis  
<sup>۴</sup>. GrADS

### یافته های تحقیق

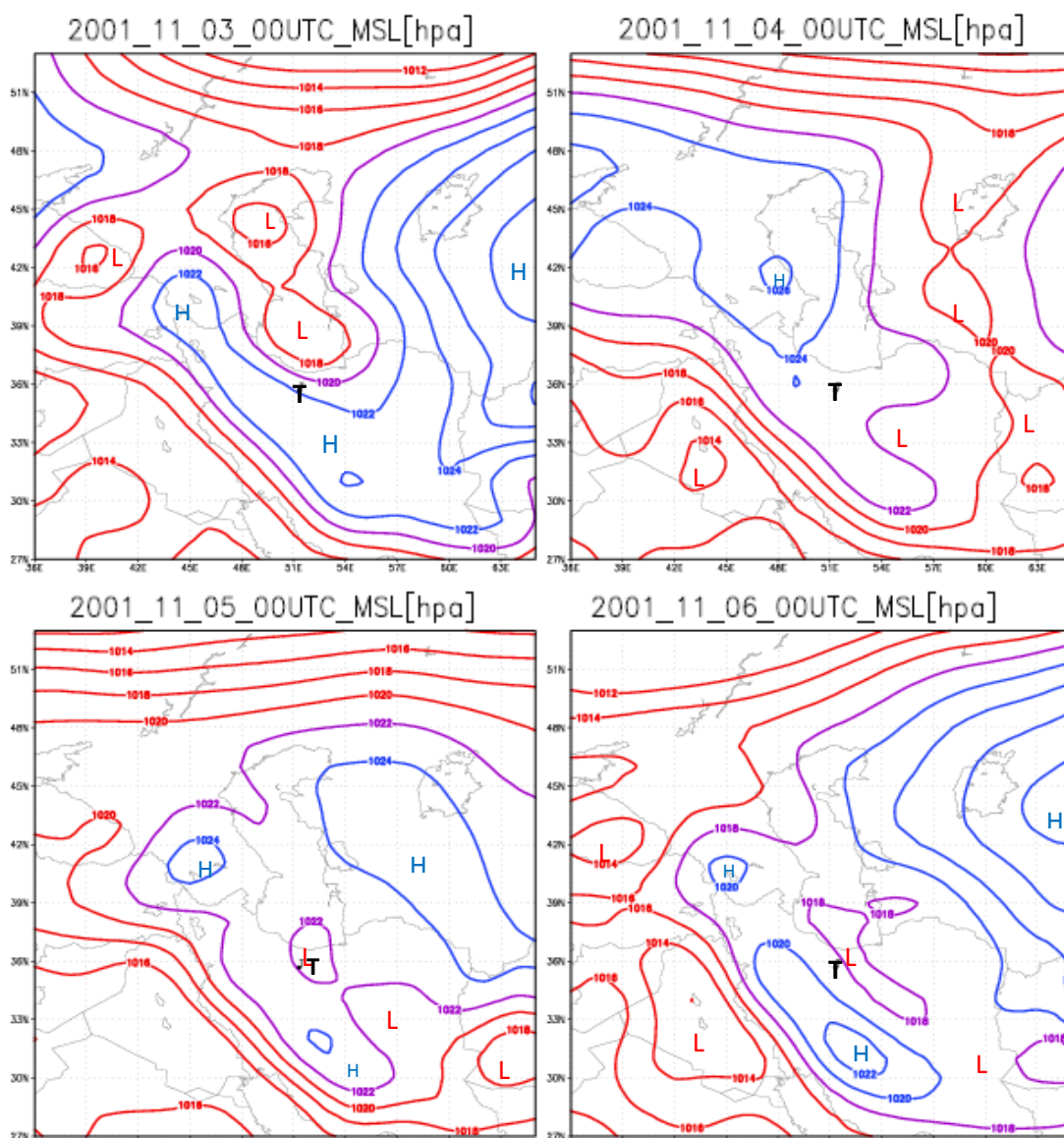
#### • میدان فشار

میدان فشار تراز دریا برای روزهای ذکر شده در جدول شماره (۲) در شکل های ۱ تا ۳ نشان داده شده است.

در همه این شکل ها مراکز و زبانه های فشار کم با حرف L و رنگ قرمز، مراکز و زبانه های فشار زیاد با حرف H و رنگ آبی و تهران با حرف T نشان داده شده اند. برای روز سوم نوامبر ۲۰۰۱ (شکل ۱) سامانه کم فشار بر روی

دریای خزر و سامانه پرفشار در اکثر نقاط کشور از جمله تهران مستقر است. کلان شهر تهران تحت تأثیر زبانه پرفشار بوده و گرادیان فشاری ضعیفی بر روی رشته کوه های البرز و زاگرس دیده می شود.

در روز بعد (۴ نوامبر ۲۰۰۱) سامانه کم فشار از روی خزر عبور نموده و سامانه پرفشار بر روی نواحی شمال کشور همراه با گرادیان فشاری بسیار کم قرار می گیرد. در دو روز بعد سامانه کم فشار بین دو سامانه پرفشار واقع

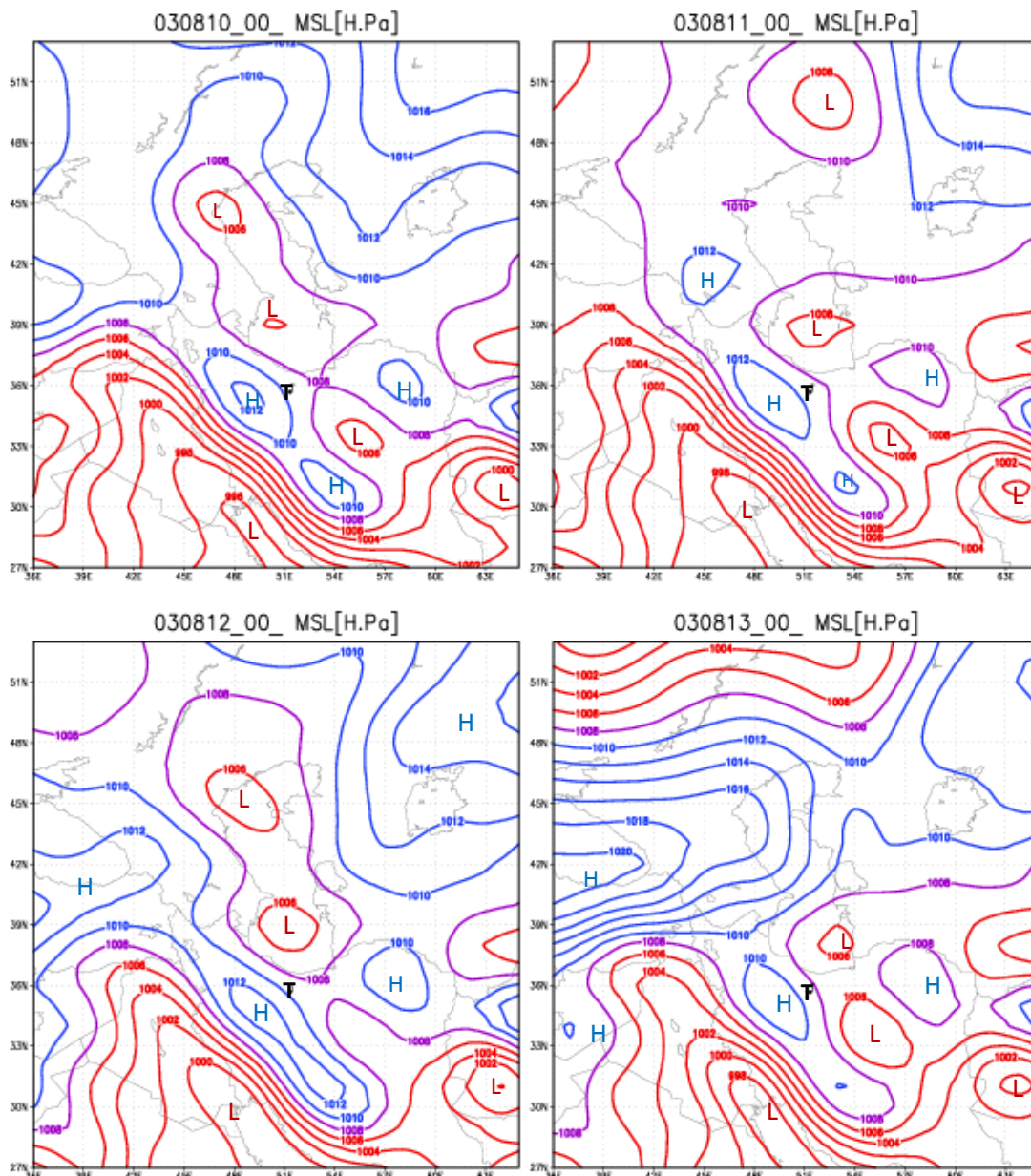


شکل (۱) میدان فشار سطح دریا به فواصل ۲hPa مربوط به سامانه های فشاری حاکم در روزهای با آلودگی شدید هوای تهران ۲۰۰۱/۱۱/۳ تا ۲۰۰۱/۱۱/۶

سمت ترکیه، ضمن ایجاد کمربند پرفشاری در عرض های میانی (حدود ۴۲ درجه عرض جغرافیایی شمالی) سامانه پرفشار در بخش های شمالی دریای خزر مستقر می گردد اما نواحی جنوبی دریای خزر همچنان تحت تأثیر سامانه کم فشار حرارتی قرار دارد. در نواحی شمال شرقی کشور طی این چهار روز سامانه

شده، بگونه ای که منطقه تهران بین دو سامانه پرفشار و کم فشار قرار گرفته است.

میدان فشاری مربوط به روزهای دهم تا سیزدهم آگوست ۲۰۰۳ بیانگر تقویت و گسترش سامانه کم فشار تا شمال دریای خزر و پرفشار بر روی رشته کوه زاگرس است (شکل ۲). با تقویت و گسترش سامانه پرفشار از



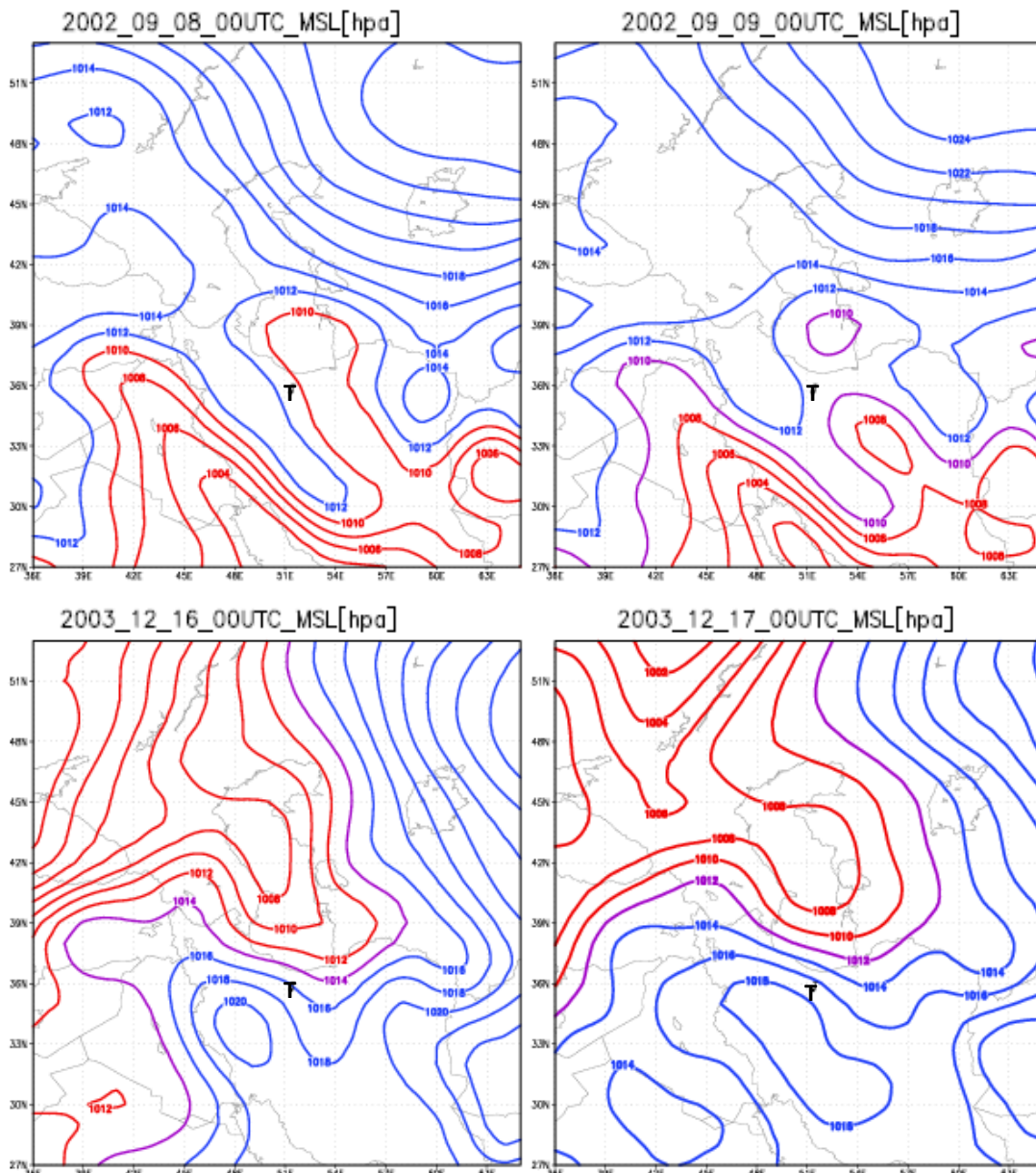
شکل (۲) میدان فشار سطح دریا به فواصل ۲hPa مربوط به سامانه های فشاری حاکم در ساعت 0000UTC روزهای با آلودگی شدید هوای تهران ۲۰۰۳/۰۸/۱۰ تا

۲۰۰۳/۰۸/۱۳



روزهای شانزدهم و هفدهم دسامبر ۲۰۰۳ سامانه پرفشار بر روی اکثر نقاط کشور از جمله جنوب رشته کوه البرز قرار گرفته و سامانه کم فشار گسترده‌ای نیز در روی دریای خزر و نواحی شمال غربی واقع شده است (شکل ۳). بررسی میدان های فشاری سامانه‌های جوی حاکم بر روی ایران در روزهای مورد نظر، که از سه روز قبل از وقوع

پرفشار مستقر می‌باشد (شکل ۲) و مانند حالت قبل (۵ و ۶ نوامبر ۲۰۰۱) سامانه کم فشار بین دو سامانه پرفشار قرار می‌گیرد. مورد مطالعه بعدی که مربوط به هشتم و نهم سپتامبر ۲۰۰۲ است (شکل ۳) مشابه حالت قبل سامانه کم فشار مستقر در منطقه بین دو سامانه پرفشار (روی رشته کوه زاگرس و شمال شرق کشور) قرار گرفته است. در



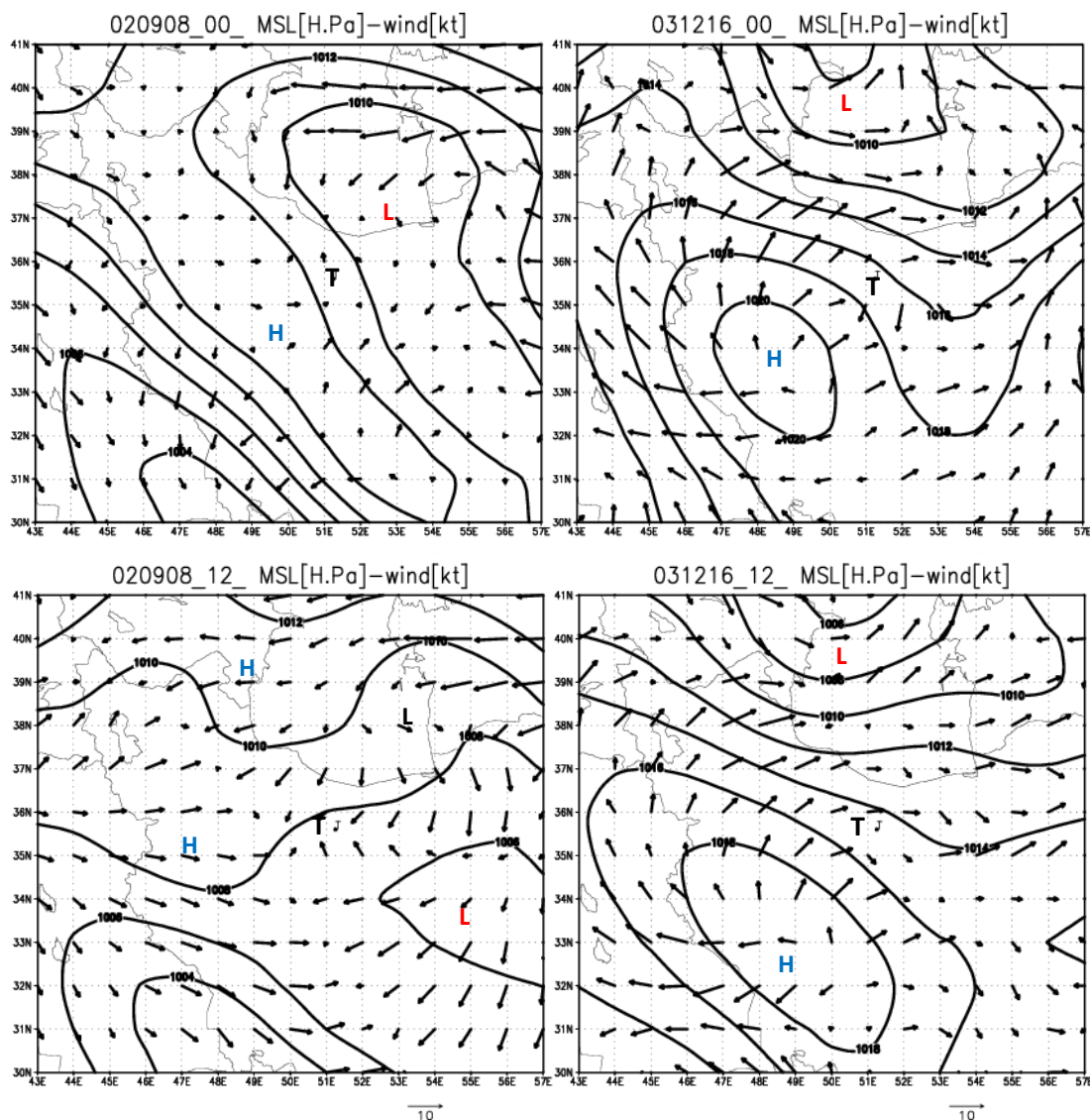
شکل (۳) میدان فشار سطح دریا در ساعت 0000UTC روزهای ۲۰۰۲/۹/۸، ۲۰۰۲/۹/۹، ۲۰۰۳/۱۲/۱۶ و ۲۰۰۳/۱۲/۱۷ مربوط به سامانه‌های فشاری حاکم در روزهای با

آلودگی شدید هوای تهران

مختلف متفاوت است.

معمولاً در روزهای رخداد آلودگی‌های شدید هوا در تهران، اغلب منطقه تهران در مرز زبانه پرفشار مستقر بر روی زاگرس و زبانه کم فشار واقع در جنوب شرق خزر و شرق تهران قرار می‌گیرد به نظر می‌رسد وجود دریای خزر به عنوان یک منبع گرم در شب هنگام و مناطق کوهستانی زاگرس و نواحی شمال شرق کشور و همچنین خشکی‌های جنوبی البرز به علت تابش شبانه و سردی هوا

شرایط حاد آلودگی هوای تهران انجام شده است نشان می‌دهند که شباهت هایی از نظر نوع سامانه و محل استقرار آن‌ها وجود دارد. از جمله این تشابه‌ها می‌توان به استقرار سامانه پرفشار بر روی زاگرس و نواحی جنوبی البرز، و سامانه پرفشار دیگری در بخش هایی از شمال شرق کشور و همچنین وجود زبانه کم فشار در نواحی جنوب شرق دریای خزر اشاره کرد. البته شدت و میزان گسترش هر یک از این سامانه‌ها و در زمان های



شکل (۴) میدان های باد ارتفاع ۱۰ متری و فشار سطح دریا در ساعت های ۰۰۰۰ و ۱۲۰۰ UTC روزهای ۲۰۰۲/۹/۸ و ۲۰۰۳/۱۲/۱۶ مربوط به سامانه‌های فشاری حاکم در

روزهای با آلودگی شدید هوای تهران

طرف آن، پشته ارتفاعی نیز فشرده شده است، بطوری که جریانات جنوب غربی در روی شمال غرب و جریانات شمالی و شمال شرقی در نواحی شمال شرقی کشور قرار می‌گیرد. برای این دو حالت گرادیان کنتوری بسیار ضعیفی بر روی منطقه تهران قرار دارد. در روز هشتم سپتامبر ۲۰۰۲ پشته ارتفاعی عمیقی از جنوب غرب کشور تا شمال غرب دریاچه آرال گسترش یافته است بطوری که محور پشته تقریباً از روی تهران عبور می‌کند. اما برای روز ۱۲ آگوست محور پشته ارتفاعی از غرب ایران تا شمال دریاچه آرال امتداد یافته و منطقه تهران در شرق این محور واقع شده است (شکل ۵).

در مورد بعدی (روز پنجم نوامبر ۲۰۰۱) پشته ارتفاعی از نواحی غربی کشور تا شرق دریای خزر گسترش یافته است. در روز هفدهم دسامبر ۲۰۰۳ محور پشته ارتفاعی از نواحی غربی کشور تا شمال دریای خزر امتداد یافته است (شکل ۵). بنا بر این برای دو مورد آخر منطقه تهران در شرق محور پشته ارتفاعی واقع شده است. همچنین گرادیان کنتوری برای روزهای آلودگی شدید که در فصل گرم رخ داده در مقایسه با حالت هایی که در فصل سرد رخ داده بسیار ضعیف تر است.

از چهار حالت آلودگی شدید رخ داده در تهران برای سه حالت از آنها، منطقه تهران در پایین دست محور پشته قرار گرفته است که به علت همگرایی جریانات سطوح فوقانی و اثر فرارفت تاوایی پتانسیلی، سبب فرونشینی هوا در منطقه می‌گردد (هولتون ۱۹۷۹).

نتایج حاصل از پروژه ای که برای پیش بینی کیفیت هوا توسط آژانس محیط زیست آمریکا انجام شده، نشان داد که شرایط مناسب برای ایجاد پایداری هوا که باعث افزایش غلظت آلاینده‌ها می‌گردد می‌تواند هم در نواحی

نقش مهمی در ایجاد و یا شکل‌گیری سامانه‌های فشاری داشته باشد.

در بخش های بعدی نشان داده خواهد شد که طی روزهای بسیار آلوده تهران در تراز میانی جو پشته ارتفاعی حاکم می‌شود بنا بر این کم فشار واقع در جنوب شرق دریای خزر ماهیت حرارتی داشته ولی پرفشار روی زاگرس و نواحی جنوبی البرز می‌تواند ترکیبی از ماهیت حرارتی و دینامیکی داشته باشد. استقرار سامانه پرفشار بر روی زاگرس و نواحی جنوبی البرز و کم فشار بر روی جنوب شرق خزر، سبب ایجاد نیروی گرادیان فشاری ضعیفی شده که جریانات ضعیف جنوبی و جنوب غربی سطح زمین را در پی خواهد داشت (شکل ۴).

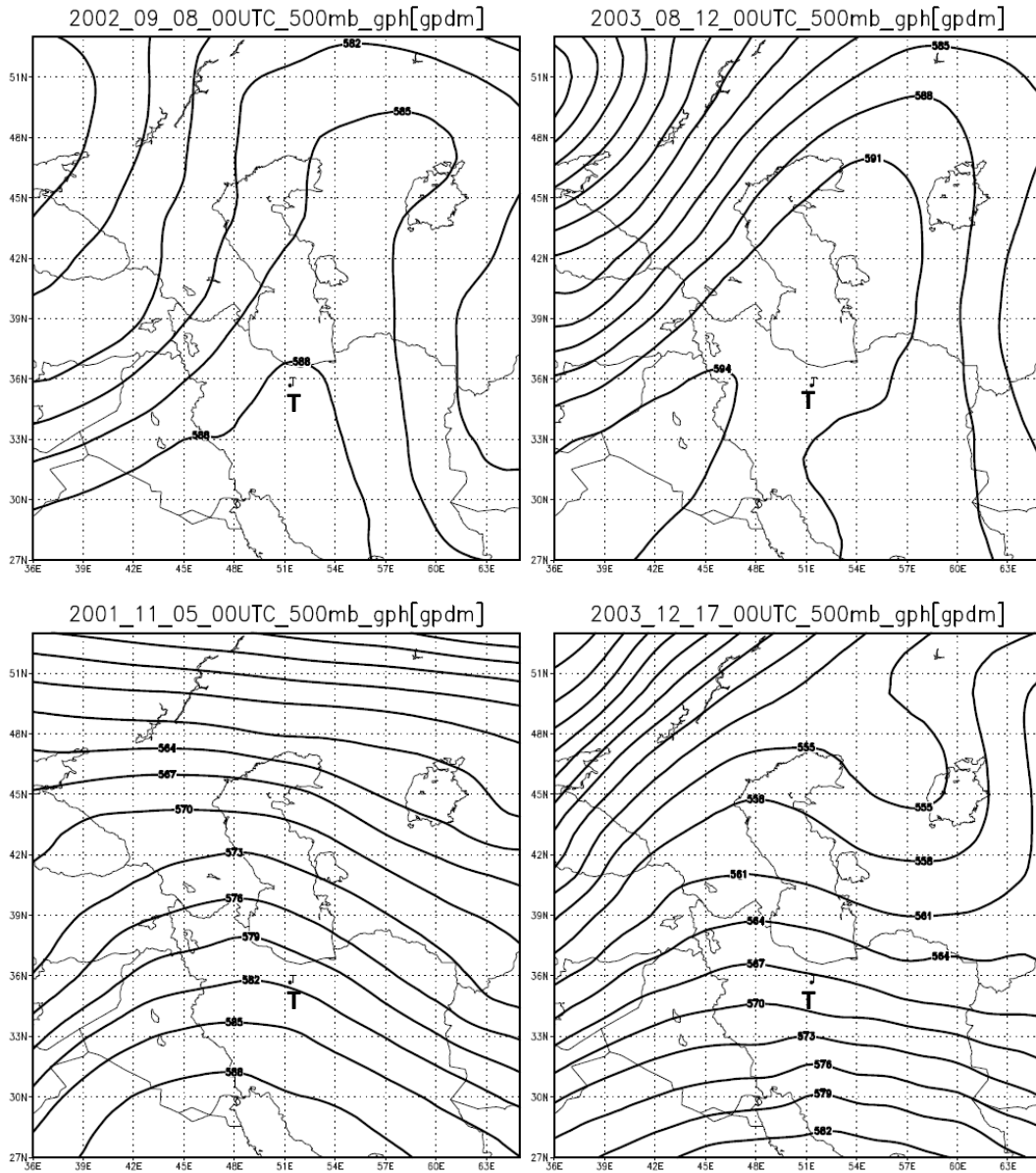
در این شرایط با توجه به توپوگرافی نواحی شمال و شرق تهران شرایط مساعدی برای انباشت آلاینده‌ها بر روی سطح شهر فراهم می‌شود. همچنین در صورت استقرار پرفشار در بخش های جنوبی و کم فشار در نواحی جنوب شرقی خزر می‌تواند شدت و برد جریانات حرارتی کوه به دشت شبانه را محدود سازد که در این صورت انتقال و پخش آلاینده‌ها در سطح کوچکتری انجام می‌شود و شرایط برای افزایش غلظت آن‌ها می‌تواند بهتر فراهم شود.

#### • میدان ژئوپتانسیل

در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی برای روزهای هشتم سپتامبر ۲۰۰۲ و دوازدهم آگوست ۲۰۰۳ با گسترش سامانه پرارتفاع جنب حاره‌ای بالاتر و ترکیب احتمالی آن با توده هوای گرم عرض های بالا سبب شده که پشته ارتفاعی تا شمال غرب دریاچه آرال امتداد یابد (شکل ۵).

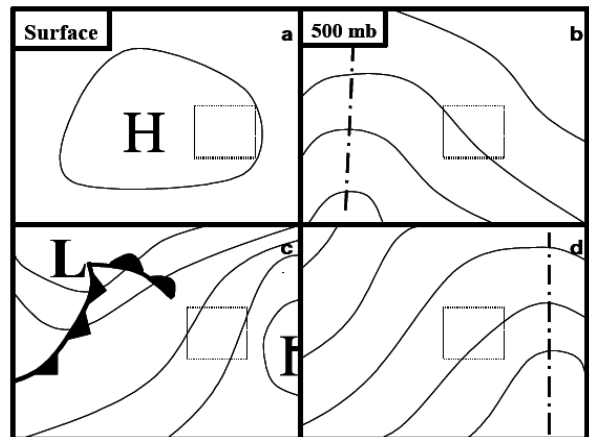
همچنین به موجب استقرار دو سامانه کم ارتفاع در دو





شکل (۵) میدان های ارتفاع ژئوپتانسیلی بر حسب دکامتر مربوط به ساعت 0000UTC روزهای با آلودگی شدید هوای تهران.

شکل (۶) نمونه ای از میدان های فشار سطح زمین و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی برای رخداد شرایط پایدار جوی و افزایش غلظت آلاینده ها. خط-نقطه چین محور پشته و مربع محل وقوع پایداری شدید هوا.



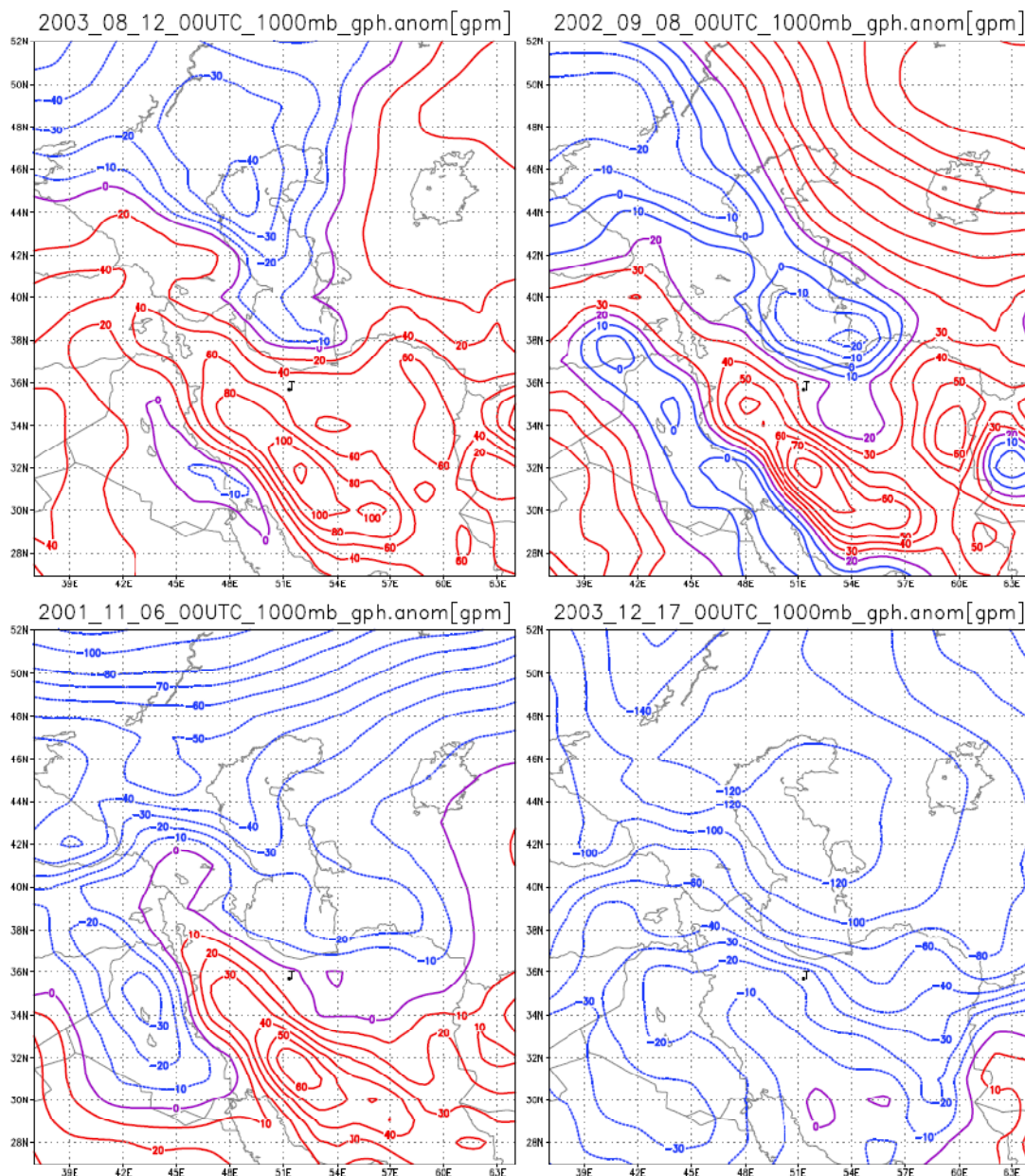
شدید هوای تهران می شوند اغلب از الگوی اول (a و b) شکل ۶) پیروی می کنند.

شرقی سامانه پر فشار سطح زمین همراه با شرق محور پشته ارتفاعی در تراز میانی جو باشد و هم در نواحی غربی سامانه پر فشار سطح زمین همراه با غرب محور پشته ارتفاعی در تراز میانی جو باشد (شکل ۶).

**• بی هنجاری های ارتفاع سطوح ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکالی**

البته این الگوها در نقاط مختلف یکسان نیستند اما بنظر می رسد سامانه های فشاری که منجر بوقوع پایداری های

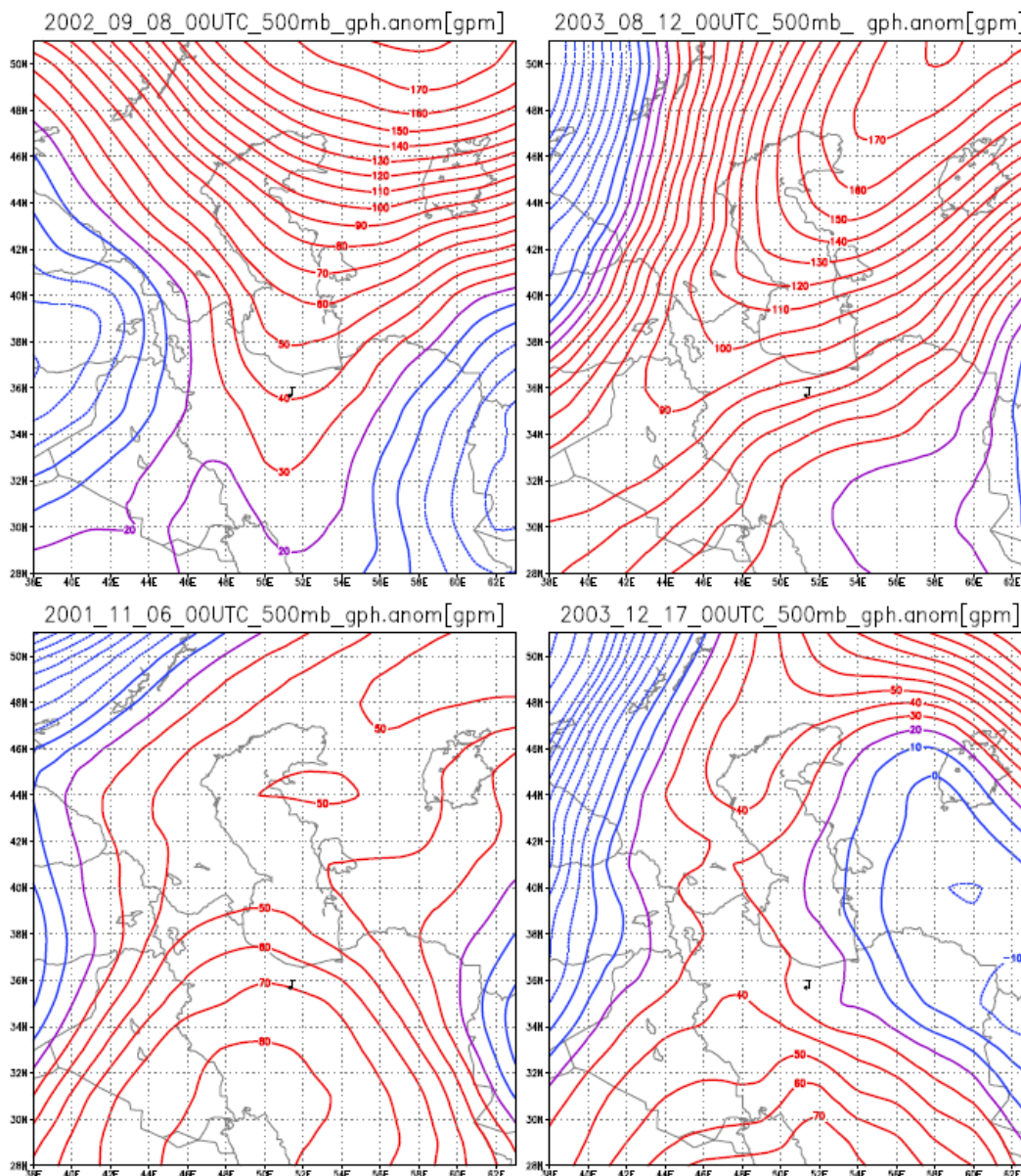
از بی هنجاری های ارتفاعی ترازهای ۵۰۰ و ۱۰۰۰



شکل (۷) بی هنجاری های ارتفاع تراز ۱۰۰۰hPa برای ساعت 0000UTC روزهای بسیار ناسالم تهران. مقادیر مثبت (خطوط قرمز) استقرار و یا تقویت پرفشار و مقادیر منفی (خطوط آبی) استقرار و یا تقویت کم فشار را نشان می دهند.

بی هنجاری‌های ارتفاع تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکالی برای حالت‌های موردی بسیار ناسالم هوای تهران (شکل ۷)، کاهش در شمال رشته کوه البرز (روی دریای خزر) و افزایش قابل ملاحظه در روی رشته کوه زاگرس و جنوب رشته کوه البرز را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در اغلب این حالت‌ها سامانه پرفشار در روی رشته کوه زاگرس و نواحی جنوبی رشته کوه البرز و کم‌فشار در شمال رشته

هکتوپاسکالی که مقدار انحراف از میانگین ارتفاعی همان تراز را نشان می‌دهد، به‌عنوان معیاری برای بررسی شدت تغییرات سامانه‌های فشاری می‌توان استفاده کرد. برای هر سطح فشار ثابت (که در اینجا تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکالی)، افزایش ارتفاع هر ناحیه بیان‌گر استقرار و یا تقویت پرفشار در آن ناحیه بوده و همچنین کاهش ارتفاع در منطقه بمنزله استقرار و یا تقویت کم‌فشار در آن منطقه است.



شکل (۸) بی هنجاری‌های ارتفاع تراز ۵۰۰hPa برای ساعت 0000UTC روزهای بسیار ناسالم تهران. مقادیر مثبت (خطوط قرمز) استقرار و یا تقویت پرفشار و مقادیر منفی (خطوط آبی) استقرار و یا تقویت کم‌فشار را نشان می‌دهند.

بررسی شده اند، فرآیندهای غالب سرمایش تابشی شبانه و فرارفت هوای گرم در سطوح بالاتر باشد که این مورد نیاز به بررسی بیشتری دارد.

#### • میدان باد

باد سطح زمین و ترازهای پایین جو مؤثرترین فاکتور هواشناختی است که سبب جابجایی آلاینده‌ها در هوا می‌شود. در محیط‌های شهری باد سطح زمین نقش اصلی را در انتقال و پخش آلودگی هوا و کاهش غلظت آلاینده‌ها دارد. بنا بر این کاهش غلظت آلاینده‌ها می‌تواند در اثر انتقال آنها به مناطق دیگر و یا پخش آنها در فضای بیشتر صورت گیرد. بررسی میدان باد می‌تواند از نظر بزرگ مقیاس (همدیدی)، منطقه‌ای، و محلی مورد بررسی قرار گیرد. موقعیت جغرافیایی خاص تهران به لحاظ وجود کوه‌های مرتفع در اطراف آن و در اثر تغییرات افقی دمای هوا، بادهای محلی نسبتاً ملایمی را ایجاد می‌کند. در طول روز این جریانات حرارتی از سمت دشت به کوه بوده و با توجه به کوه‌های مرتفعی که در شمال و شرق تهران قرار گرفته که در صورت نبود واداشت همدیدی مناسب، انتقال آلاینده‌ها از سطح شهر بخوبی انجام نمی‌شود. البته در صورت وجود لایه آمیخته با ارتفاع مناسب، شرایط برای پخش آلاینده‌ها در فضای بیشتری در راستای قائم فراهم می‌شود که پی آمد آن کاهش غلظت آنها در سطح زمین خواهد بود بنا بر این در شرایط باد کم و لایه آمیخته کم ارتفاع، رشته کوه‌های مرتفع واقع در شمال و شرق تهران از تخلیه هوای آلوده سطح شهر در طول روز جلوگیری می‌کنند. در شب نیز به علت تابش شبانه و پایداری هوا ضمن تشکیل لایه ای با وارونگی دما، ارتفاع لایه آمیخته نیز کاهش می‌یابد. با

کوه البرز (روی دریای خزر) تقویت می‌شود. در هوای سرد (بویژه در شب) به علت تابش شبانه و سردی هوا در روی خشکی شرایط برای ایجاد پرفشار حرارتی مناسب بوده که این حالت با توجه به پوشش برفی رشته کوه زاگرس و استقرار هوای سرد در فصل سرد بر روی آن تشدید می‌شود. بنابر این بی‌هنجاری‌های مثبت ارتفاعی تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکالی در روی زاگرس و نواحی جنوبی رشته کوه البرز که با ایجاد سامانه پرفشار همراهی می‌شود و بی‌هنجاری‌های منفی ارتفاعی تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکالی در شمال البرز و روی خزر شرایط مناسبی برای افزایش پتانسیل آلودگی هوای تهران فراهم می‌آورد.

بی‌هنجاری‌های ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی (شکل ۸) برای همه حالت‌ها افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به مقدار میانگین نشان می‌دهد. محور بیشترین افزایش‌ها از شمال شرق دریای خزر تا نواحی غربی کشور گسترده شده و در حقیقت استقرار و یا تقویت زیاد پراارتفاع در عرض‌های بالا و اکثر نقاط کشور را نشان می‌دهد. محور بیشینه بی‌هنجاری‌های مثبت ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی با محور پشته ارتفاعی این تراز (شکل ۸) هماهنگ است و معمولاً منطقه تهران در شرق محور پر ارتفاع قرار می‌گیرد (شکل ۸).

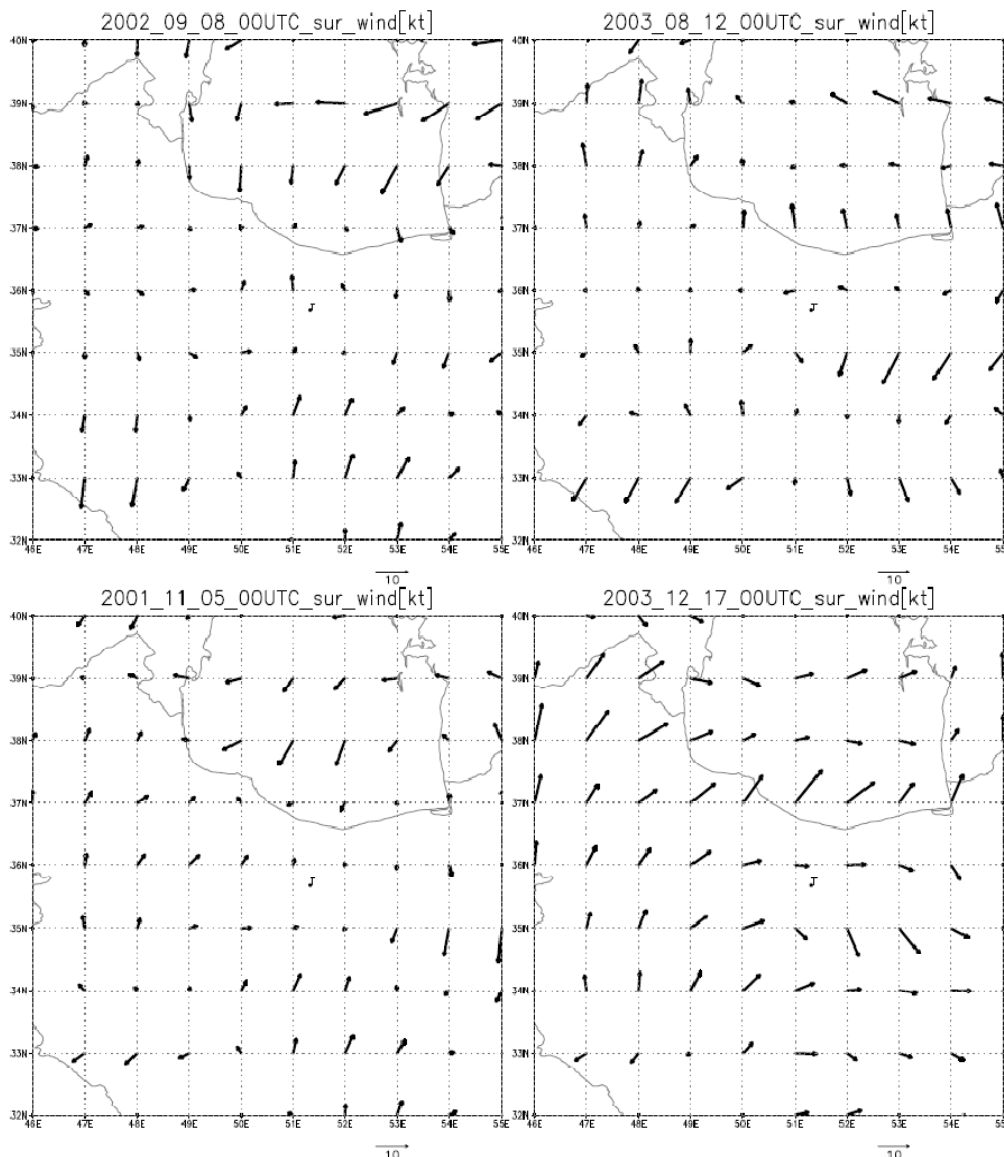
با توجه به موارد بالا و اینکه در حالت کلی سه فرآیند: ۱- سرمایش تابشی (که سبب ایجاد وارونگی‌های تابشی شبانه می‌گردد) ۲- فرارفت هوای سرد در لایه‌های پایین جو و ۳- فرارفت هوای گرم در سطوح بالا (که می‌تواند موجب افزایش ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی شود) بر روی زمین سرد، موجب پایداری شدید جو می‌شوند، بنا بر این به نظر می‌رسد برای حالت‌های که در این مطالعه



البرز می تواند شدت و برد جریانات کوه به دشت شبانه را محدود سازد.

از پرفشارهای مهمی که کشور را تحت تأثیر قرار می دهند، می توان به پرفشار فصلی سبیری و پرفشارهایی که با عبور از روی اروپا از سمت شمال غرب به کشور نفوذ کرده اشاره نمود (علیجانی ۲۰۰۴). در زمان استقرار سامانه های پرفشار که کاهش عمق لایه آمیخته را در پی دارد، بخش آلاینده ها در راستای قائم نیز کاهش می یابد و آلاینده ها تنها در یک لایه نازک هوا در

توجه به اینکه در صورت نبود واداشت همدیدی قوی (مانند فعالیت کم فشارهای دینامیکی) جریانات حرارتی شمالی (کوه به دشت) در روی تهران میتوانند غالب باشند و سبب پخش و انتقال آلاینده ها در فضای بیشتری شوند. در زمان آلودگی بسیار شدید هوای تهران، شرایط هوشناختی بگونه ای است که منجر به وجود بادهای کم سرعت (شکل ۹) و هوای پایدار در منطقه می شود و انتشار آلاینده ها مختل می گردد. همچنین استقرار سامانه پرفشار بر روی رشته کوه زاگرس و نواحی جنوبی رشته کوه



شکل (۹) میدان باد سطح زمین (ارتفاع ۱۰م) بر حسب kt در ساعت 0000UTC روزهای بسیار ناسالم تهران

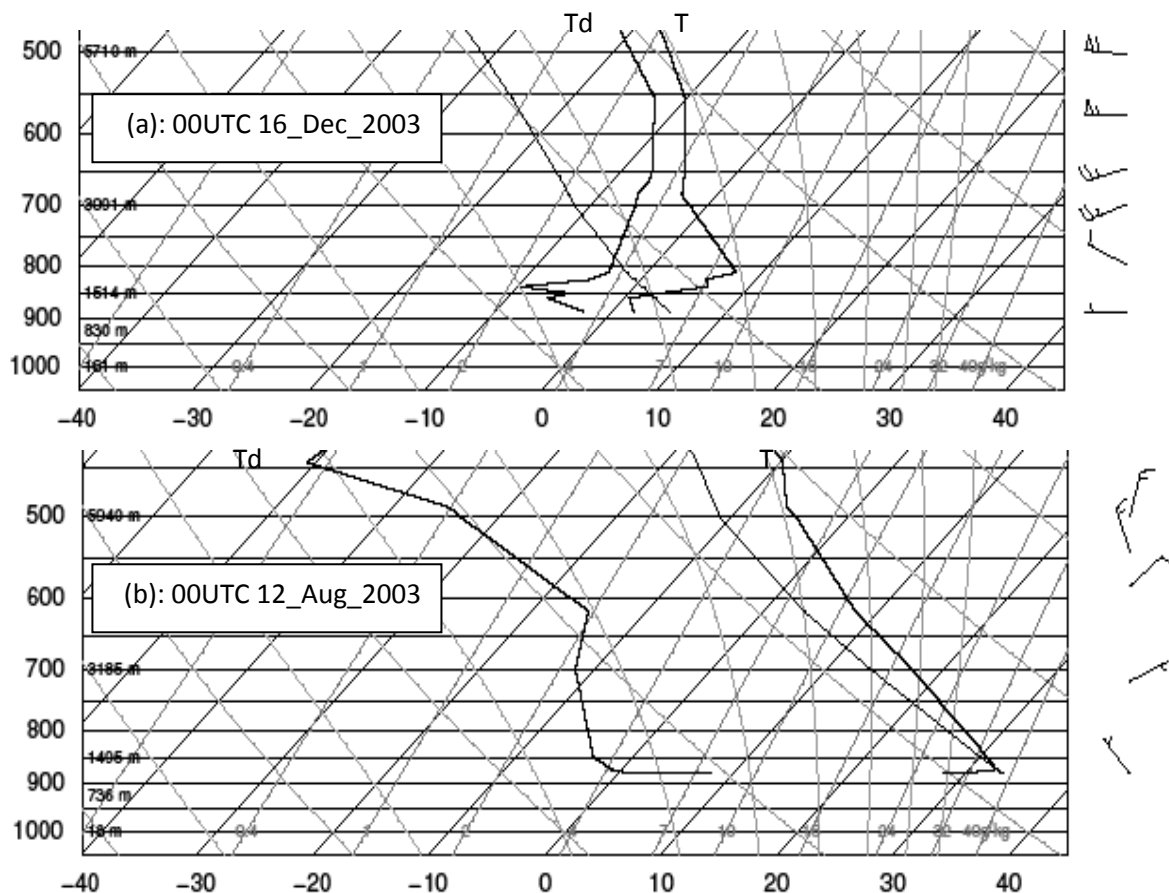


اقیانوس‌ها عمق لایه مرزی در نواحی پرفشار کمتر از نواحی کم‌فشار است (استال ۱۹۹۷). بنابراین در شرایط استقرار سامانه‌های پرفشار، عمق لایه مرزی کاهش می‌یابد. بطور کلی عمق لایه مرزی کمیتی است که امکان انتشار قائم آلاینده‌ها را فراهم می‌آورد که در تغییرات غلظت آلاینده‌ها در سطح زمین نقش مهمی دارد. برای پخش آلاینده‌ها در حجم بیشتری از فضا به ارتفاع لایه مرزی بزرگتر نیاز است. تعیین عمق لایه آمیخته برای پیش‌بینی کردن اختلاط قائم و انتقال آلودگی هوا بسیار مهم است. روش‌های متعددی برای تعیین ارتفاع لایه مرزی ارائه شده است (سوجی‌یاما و نستروم<sup>۱</sup> ۱۹۹۹) بستگی به چگونگی لحاظ نمودن اثرات حرارتی و تلاطمی ایجاد شده بوسیله سطح زمین دارد. در حالت‌های حاد آلودگی

نزدیکی سطح زمین انباشته می‌شوند. در شرایطی که سرعت باد سطح زمین هم کم باشد پخش افقی آلاینده‌ها نیز کاهش یافته و در صورت عدم کنترل منابع انتشار، غلظت آلاینده‌ها افزایش می‌یابد و آلودگی هوا می‌تواند به حالت بسیار ناسالم خود برسد.

### • بحث ارتفاع لایه مرزی

عمق لایه مرزی بر حسب زمان-مکان متغیر بوده و در محدوده‌ای بین چند صد متر تا چند کیلومتر تغییر می‌کند. میانگین گسترش این لایه در عرض‌های میانی کمتر از یک کیلومتر است (استال ۱۹۸۸). عمق لایه مرزی تابعی از پایداری و ناپایداری جو است و بستگی به سامانه‌های همدیدی حاکم بر منطقه دارد. در روی خشکی‌ها و

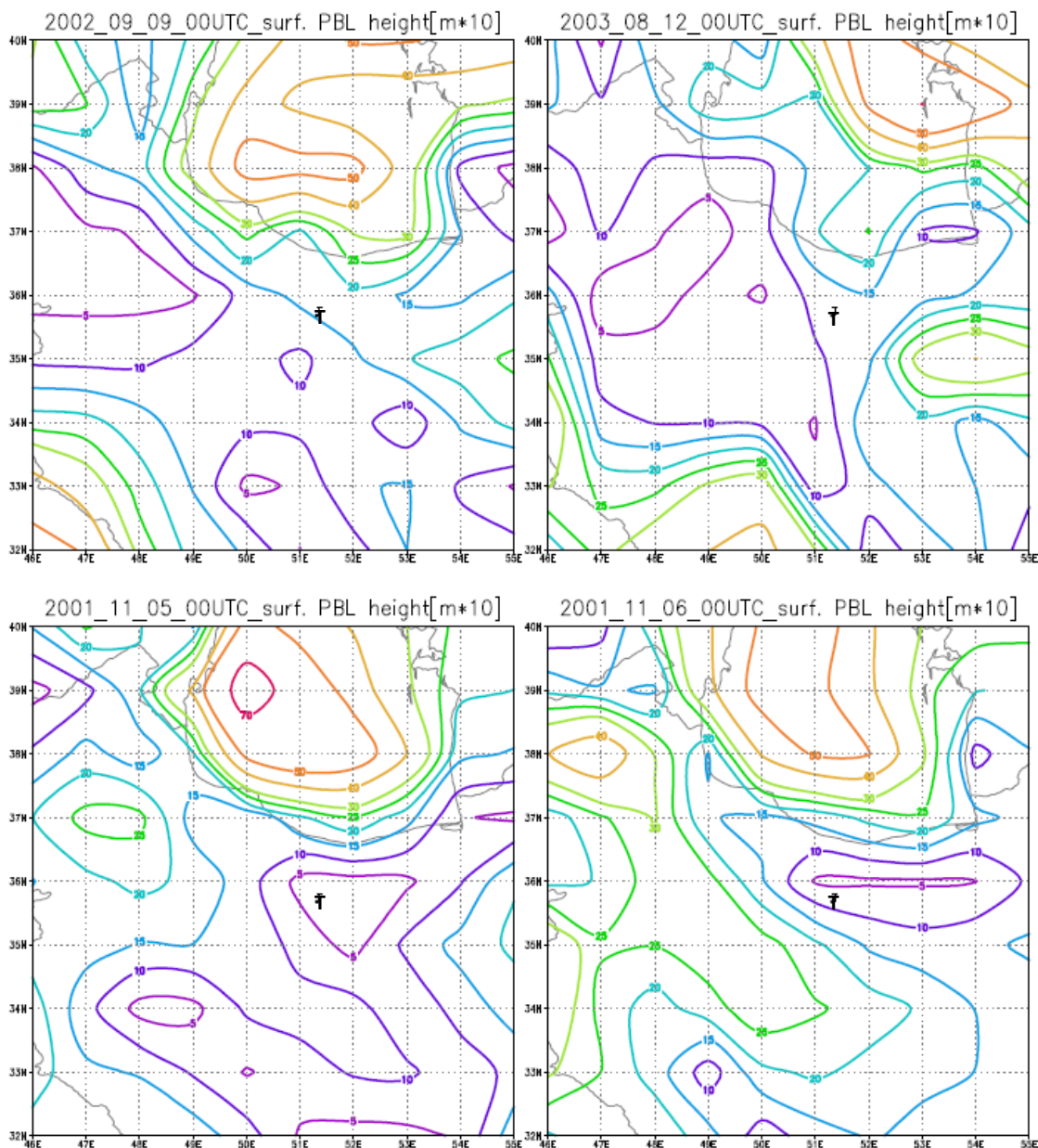


شکل (۱۰) نمودارهای ترمودینامیکی ساعت 00UTC ایستگاه مهرآباد تهران، منحنی سمت راست دما (T) و منحنی سمت چپ دمای نقطه شبنم (Td)

<sup>۱</sup>. Sugiyama and. Nasstrom

اینجا نیز ارتفاع لایه مرزی بر اساس آن به دست آمده است. لایه‌های پایدار با بادهای کم و سطح زمینی که سردتر از هوای روی آن است ایجاد می‌گردد و در یک شب صاف، آرام و با تلاطم بسیار ضعیف ممکن است ارتفاع لایه مرزی حدود ۲۰-۵۰۰m باشد (استال ۲۰۰۰). داده‌های استفاده شده برای ارتفاع لایه مرزی جو که بر اساس رابطه عدد ریچاردسون بدست آمده نشان می‌دهد

هوا تهران وارونگی صبحگاهی شدید بوده (برای مثال شکل ۱۰) و حتی در حالت‌های گرم ارتفاع وارونگی دما بسیار کم بوده و آلاینده‌ها در ارتفاع کمی از سطح انباشت می‌گردند. معمولاً عمق لایه آمیخته با استفاده از نمایه قائم دما و رطوبت بدست می‌آید (هی<sup>۱</sup> و همکاران ۲۰۰۶). اما عموماً بر اساس رابطه عدد ریچاردسون، ارتفاع لایه مرزی برای همه حالت‌های پایداری جو محاسبه می‌شود که در



شکل (۱۱) پربندهای ارتفاع لایه مرزی جو بر حسب متر (به فواصل ۵۰m) در ساعت 0000UTC روزهای بسیار ناسالم تهران

<sup>۱</sup>.He

همه حالت ها و افزایش قابل ملاحظه بی‌هنجاری‌های ارتفاع سطح ۱۰۰۰hPa (استقرار پرفشار) در نواحی رشته کوه زاگرس و جنوب رشته کوه البرز و کاهش بسیار زیاد آن بر روی دریای خزر (استقرار کم فشار) است. نتایج حاصل از مطالعه همدیدی سامانه‌های جوی در زمان رخداد شرایط حاد آلودگی هوا در تهران نشان داد که:

وقوع این شرایط بستگی شدیدی به استقرار پرفشار در جنوب رشته کوه البرز و روی رشته کوه زاگرس و کم‌فشار حرارتی بر روی دریای خزر بویژه نواحی جنوب شرقی آن دارد. به نظر می‌رسد نقش دریا و خشکی در ایجاد کم فشار حرارتی روی دریای خزر و پرفشار حرارتی در جنوب رشته کوه البرز بسیار مهم باشد. همچنین بدلیل استقرار هوای سرد بر روی زاگرس، پرفشار مستقر در این منطقه می‌تواند تقویت شود. موارد بررسی شده نشان می‌دهد که پتانسیل آلودگی هوای تهران در صورت استقرار پرفشار در نیمه جنوبی رشته کوه البرز و روی رشته کوه زاگرس، کم‌فشار در نواحی جنوب شرقی دریای خزر و پرفشار در نواحی شمال شرقی کشور بشدت افزایش می‌یابد. یکی از دلایل اصلی آن، می‌تواند ایجاد نیروی گرادیان فشار باشد که ضمن ایجاد جریانات ضعیف جنوب و جنوب‌غربی سطح زمین در منطقه تهران، به احتمال قوی شدت و برد بادهای شبانه کوه به دشت را نیز محدود می‌سازد که با توجه به وجود کوه‌ها که مانند سد در مقابل این جریان‌ها بوده و همچنین پایداری شدید جوی، آلاینده‌ها در یک لایه نازک سطحی بر روی شهر تهران، انباشته می‌شوند.

که در روز سوم نوامبر ۲۰۰۱، ارتفاع لایه مرزی در منطقه تهران به کمتر از ۲۰۰m رسیده و در دو روز بعدی نیز روند کاهش داشته است. بطوریکه در روز ۵ نوامبر به حدود ۵۰m می‌رسد (شکل ۱۱) که شرایط مناسبی جهت افزایش غلظت آلاینده فراهم می‌آورد. شایان ذکر است که با توجه به بحث از دیدگاه همدیدی، اثرات شهری و در نتیجه افزایش عمق لایه آمیخته در روی شهر تهران لحاظ نشده است.

### نتیجه گیری

سامانه‌های جوی نقش تعیین کننده‌ای در پتانسیل آلودگی هوا دارند. شاخص استاندارد آلودگی هوای تهران نشان می‌دهد که حالت های بسیار ناسالم آلودگی هوای تهران در فصول تابستان، پاییز و زمستان رخ داده است. هر چند که در فصول سرد و گرم ویژگی‌های همدیدی سامانه‌های جوی مستقر بر روی کشور متفاوت است، اما نتایج نشان می‌دهد که در روزهای بسیار ناسالم تهران شباهت‌های زیادی در نحوه تغییر کمیت‌های هواشناختی و الگوهای فشاری حاکم بر منطقه وجود دارد، که مهمترین آنها بشرح زیر است. کاهش سرعت باد در لایه‌های پایین جو (شکل ۱۰) و سطح زمین (شکل ۹) روی منطقه، وارونگی شدید دما و کاهش ارتفاع لایه آمیختگی به حدود ۵۰ تا ۲۰۰ متر بر روی منطقه مورد مطالعه، تقویت قابل ملاحظه پرارتفاع تراز میانی جو که اغلب محور آن از جنوب غرب ایران تا شمال شرق دریای خزر گسترده شده است و انطباق محور پر ارتفاع در سطح ۵۰۰hPa در

### سپاس گذاری

از شرکت کنترل کیفیت هوای شهرداری تهران جهت همکاری و در اختیار گذاشتن داده های مربوط به شاخص استاندارد آلودگی هوا و همچنین از مسئولین سازمان هواشناسی کشور و بویژه همکاران محترم اداره کل پیش‌بینی جهت راهنمایی و همکاری‌های لازم تشکر و قدردانی می‌شود.

- Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentrations.** Phys. Geogr., No. 11, pp.320-342.
8. Davies, T. D., P. M. Kelly, P. S. Low, C. Pierce, 1992b, **Face ozone oncentrations in Europe: links with the regional scale atmospheric circulation.** J. Geophys. Res., No. 97, pp. 9819-9832.
9. Davis, R. E. and D. A. Gay, 1993, **An assessment of air quality variations in the south-western United States using an upper air synoptic climatology.** Int. J. Climatol., Vol. 13, pp. 755 781.
10. He, Q.S., J.T. Mao, J.Y. Chen, Y.Y. Hu, 2006, **Observational and modeling studies of urban atmospheric boundary-layer height and its evolution mechanisms.** Atmospheric Environment Vol. 40, pp. 1064–1077.
11. Holton, J. R., 1979, **An Introduction to Dynamic Meteorology**, Academic Press, New York.
12. Kalkstein, L.S. and P. Corrigan, 1986, **A synoptic climatological approach for geographical analysis: assessment of sulphur dioxide concentrations.** Annals of Association of American Geographers, No. 76, pp. 381-395.
- منابع**
۱. رنجبر سعادت آبادی، ع.، ل. محمدیان محمدی، ۱۳۸۹، **مطالعه میانگین الگوهای همدیدی بر اساس رخداد غلظت های مختلف آلاینده CO در فصول تابستان و پاییز در تهران، پژوهش های جغرافیایی طبیعی، شماره ۷۲، صص ۱۱۱-۱۲۸.**
۲. صفوی، س. ی.، و ب.، علیجانی، ۱۳۸۵، **بررسی عوامل جغرافیایی در آلودگی هوای تهران، پژوهشهای جغرافیایی شماره ۵۸، صص ۹۹-۱۱۲.**
۳. قسامی، ط.، ع. ع. ع. ا. بیدختی، ع. ا. صداقت کردار و ف. صحرائیان، ۱۳۸۶، **بررسی شرایط همدیدی حاکم در چند دوره بحرانی آلودگی هوای شهر تهران، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست شماره ۳، صص ۲۲۹-۲۳۸.**
4. Alijani, B., 2004, **The relation between pressure and air pollution concentration in Tehran.** 30<sup>th</sup> international Geography Union, 16-20 August 2004, Glasgow, England.
5. Adamopoulos, A.D., H.D. KahPaezidis, and A.B. Sipsas, 1996, **Meteorological factors that influence CO concentration in the Athens basin.** Fresenius Environmental Bulletin, No. 5, pp. 351-356.
6. Ezcurra, A., H. Casado, J. P. Lacaux, C. Garcia, 1988, **Relationships between meteorological situations and acid rain in Spanish Basque country.** Atmos. Environ., No. 22, pp. 2779-2786.
7. Davis, R. E., and L. S. Kalkstein, 1990b,

- of Air and Waste Management Association, No. 50, pp.1831-1842.
18. Sindosi, O.A., B.D. Katsoulis, and A. Bartzokas, 2003, **An objective definition of air mass types affecting Athens, Greece; the corresponding atmospheric pressure patterns and air pollution levels.** Environmental Technology, No. 24, pp. 947-962.
19. Stull, R. B., 1988, **An introduction to boundary layer meteorology.** Kluwar Academic publisher, pp. 666.
20. Stull, R. B., 1997, **An introduction to boundary layer meteorology.** Kluwar Academic Publishers, London, pp. 667.
21. Stull, R. B., 2000, **Meteorology for Scientists and Engineers.** Publisher: Gray Garlson, Brooks/Cool, PP. 502.
22. Sugiyama, G. and J. S. Nasstrom, 1999, **Methods for determining the height of the atmospheric boundary layer.** Lawrence Livermore National Laboratory under Contract W-7405-Eng-48.
13. Lam, K. C. and S. Cheng, 1998, **A synoptic Climatological Approach to Forecast Concentrations of Sulfur Dioxide and Nitrogen Dioxide in Hong Kong.** Environmental Pollution, No. 101, pp.183-191.
14. Landsberg, H. E., 1980, **The urban climate,** Academic Press, pp. 288.
15. Makra, L., J. Mika, A. Bartzokas and Z. Sümeghy. 2007, **Relationship between the Peczely's large-scale weather types and air pollution levels in Szeged southern Hungary.** Fresenius Environmental Bulletin, Vol. 16, No. 6, pp. 660-673.
16. McGregor, G.R. and D. Bamzeli, 1995, **Synoptic typing and its application to the investigation of weather – air pollution relationships, Birmingham, United Kingdom.** Theoretical and Applied Climatology, Vol. 51, pp. 223-236.
17. Scott, G. M. and R. D. Diab, 2000, **Forecasting Air pollution Potential: A Synoptic Climatological Approach.** Journal