

بررسی شاخص کیفیت هوای شهر اصفهان و تحلیل همدیدی و ترمودینامیکی روزهای بحرانی سال ۱۳۹۵

لیلا امینی*، مجید بیجندی^۱، اعظم باقری^۲، پریسا ابونصر^۳

۱- رییس مرکز تحقیقات اداره کل هواشناسی اصفهان

۲- مدیرکل اداره کل هواشناسی اصفهان

۳ و ۴- کارشناسان مرکز تحقیقات هواشناسی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۱/۲۵)

چکیده

پدیده آلودگی هوا در چند ساله اخیر بعد از خشک شدن زاینده رود، دومین معضل زیست محیطی شهر اصفهان شد که حاصل افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی، توسعه حمل و نقل، افزایش فعالیت‌های صنعتی و مصرف سوخت بوده است. بررسی وضعیت کیفیت هوا در ایستگاه هواشناسی اصفهان در سال ۱۳۹۵ نشان دهنده آن است که ۳۲ روز هوای پاک (۹ درصد)، ۲۴۳ روز هوای سالم (۶۶ درصد)، ۶۲ روز ناسالم برای گروه‌های حساس جامعه (۱۷ درصد) و ۲۹ روز ناسالم برای عموم افراد جامعه (۸ درصد) بوده است. با مقایسه شاخص آلاینده‌های مختلف در این سال مشخص شد که ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون با قرار گرفتن در وضعیت نامطلوب به مدت ۸۵ روز، آلاینده اصلی این ایستگاه است. در طی سال ۹۵ بالاترین مقدار شاخص کیفیت هوا در ۲۵ آبان بوده که شاخص به ۱۷۶ رسید، آلاینده مسئول در این روز PM2.5 بود که میانگین غلظت ۲۴ ساعته آن به ۱۰۳ میکروگرم بوده است. پاک‌ترین روز سال ۹۵، یکم و دوم آذر ماه با شاخص ۲۹ در هر دو روز بود. در ۸۶ درصد (۳۱۶ روز) از سال ۹۵، آلاینده ذرات معلق با قطر کوچکتر از ۲/۵ میکرون آلاینده شاخص شهر بوده است. ۸ درصد (۲۹ روز) از روزهای سال، آلاینده مسئول، از سطح زمین و آلاینده دی اکسید نیتروژن در ۶ درصد (۲۲ روز) از سال ۹۵ به عنوان آلاینده مسئول بوده است. بیشترین روزهای آلوده به ترتیب در ماه‌های دی (۲۰ روز)، آبان (۱۵ روز) و آذر (۱۳ روز) رخ داده است. بررسی غلظت بیشینه آلاینده‌های جوی چون ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون (PM2.5)، دی اکسید گوگرد (SO2)، دی اکسید نیتروژن (NO2) و منو اکسیدکربن (CO) نشان می‌دهد که در آبان ۱۳۹۵ غلظت آلاینده‌های جوی نسبت به سایر ماه‌های سال بیشتر بوده است به طوری که در یک دوره زمانی ۹ روزه از ۱۹ تا ۲۷ آبان بیشترین مقدار شاخص کیفیت هوا را نشان داده است. در این مقاله بر روی این دوره زمانی بررسی‌های آماری-ترمودینامیکی و همدیدی صورت گرفت. نتایج این پژوهش حاکی است که سکون نسبی هوا و فرونشینی در لایه‌های میانی جو به سبب حاکمیت سامانه‌های پر ارتفاع، کاهش دما و افزایش فشار هوا بر روی سطح زمین، رسیدن شاخص‌های ترمودینامیکی به مرز پایداری و عبور از آن، وقوع وارونگی تابشی و ماندگاری آن در چند روز متوالی بویژه در فصول سرد سال با توجه به موقعیت توپوگرافی شهر اصفهان و مراکز صنعتی، به افزایش پتانسیل انباشت مواد آلاینده و بالا رفتن شاخص کیفیت هوا کمک می‌کند.

کلمات کلیدی: آلودگی هوای شهر اصفهان - آلاینده‌های سطح زمین - وارونگی دما - اسکویوتی - ترمودینامیکی و همدیدی

مقدمه

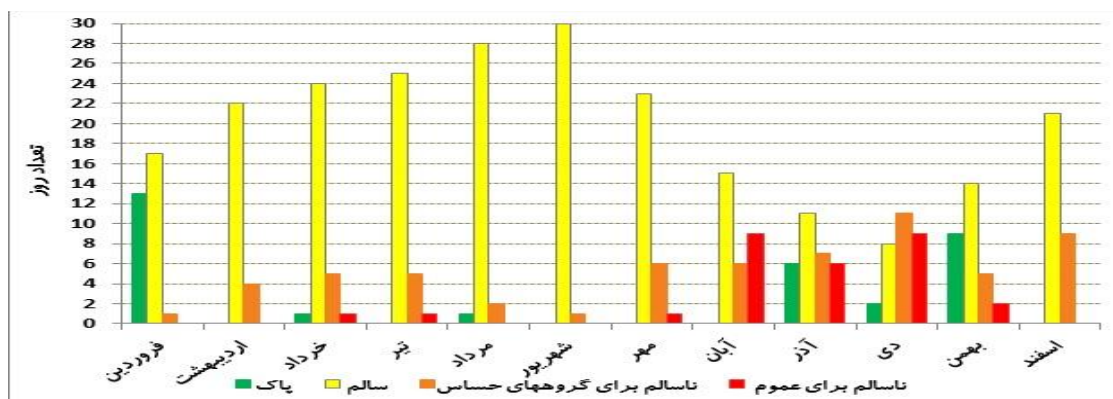
ترمودینامیکی وضعیت جوی تحلیل شده و دلایل افزایش آلاینده‌ها در شهر اصفهان بررسی شد.

در ایستگاه سنجش آلودگی هوای اداره کل هواشناسی اصفهان (مجموعه اداری غدیر) غلظت آلاینده‌های اصلی هوا شامل منواکسیدکربن (CO)، ازن (O3)، اکسیدهای ازت (NO_x، NO₂، NO) ، دی اکسید گوگرد (SO₂)، ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون (PM_{2.5})، به صورت پیوسته اندازه‌گیری می‌شود. در این مقاله با استفاده از داده‌های سال ۱۳۹۵ تغییرات ماهانه، فصلی و سالانه آلاینده‌ها بررسی و بطور آماری ارتباط پارامترهای هواشناسی با مقادیر غلظت آلاینده‌ها تحلیل شد. سپس در دوره زمانی ۹ روزه بحرانی آلودگی هوا از روز ۱۹ تا ۲۷ آبان، شرایط همدیدی-

بررسی کیفیت هوای اصفهان در سال ۱۳۹۵ بر حسب غلظت آلاینده‌ها

در سال ۱۳۹۵ تعداد روز آلوده ۹۱ روز، پاک ۳۲ روز و سالم ۲۴۳ روز بوده است. بر اساس شکل زیر بیشترین تعداد روزهای آلوده به ترتیب در ماه‌های دی (۲۰ روز)، آبان (۱۵ روز) و آذر (۱۳ روز) رخ داده است. ماه فروردین به دلیل وجود ۱۳ روز پاک و ۱۷ روز سالم و تنها یک روز ناسالم برای گروه‌های حساس، مطلوب‌ترین کیفیت هوا را نسبت به

سایر ماه‌های سال داشته است. بیشترین تعداد روز آلوده به ترتیب در فصل زمستان با ۳۶ روز و پاییز با ۳۵ روز رخ داده است. کمترین تعداد روز آلوده در فصل تابستان با ۹ روز هوای ناسالم بوده است.



شکل ۱- نمودار شاکس کیفیت هوا در ماه‌های مختلف در ایستگاه هواشناسی اصفهان در سال ۱۳۹۵

کیفیت هوای ناسالم در روزهای سرد سال بوده است. در مجموع در سال ۱۳۹۵، ۷۵ درصد روزها وضعیت مطلوب و ۲۵ درصد روزها در وضعیت نامطلوب بوده‌اند. بالاترین مقدار شاخص کیفیت هوا در سال ۱۳۹۵، مربوط به بیست و پنجم آبان با عدد ۱۷۶ و پاک‌ترین روزها، اول و دوم آذر ماه با شاخص ۲۹ بوده است. آلاینده مسئول در ۳۱۵ روز از سال ۱۳۹۵ ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون، در ۲۹ روز ازن سطح زمین و ۲۲ روز دی اکسید نیتروژن بوده است.

در سال ۱۳۹۵ حدود ۲۵ درصد از روزها، کیفیت هوا نامطلوب بوده است. با افزایش شاخص‌ها، کیفیت هوا کاهش یافته و در نیمه دوم سال آلوده‌تر از نیمه اول بوده است. در نیمه گرم سال یعنی در فصول بهار و تابستان، وقوع پدیده گرد و خاک، عامل افزایش روزهای آلوده و فراتر از حد مجاز بوده است. با شروع فصل سرما، تعداد روزهای با کیفیت هوای ناسالم افزایش یافته به طوری که در ماه‌های آبان، آذر و دی، این روزها توالی یافت. استقرار جو پایدار و وقوع وارونگی دما عمده‌ترین عامل افزایش تعداد روزهای با

جدول ۱- تقویم کیفیت هوا از نظر شاخص AQI در سال ۱۳۹۵

	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
پاک	۱۳	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۶	۲	۹	۰
سالم	۱۷	۲۷	۲۴	۲۵	۲۸	۳۰	۲۳	۱۵	۱۱	۸	۱۴	۲۱
ناسالم برای گروه‌های حساس	۱	۴	۵	۵	۲	۱	۶	۶	۷	۱۱	۵	۹
ناسالم برای عموم	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۹	۶	۹	۲	۰

بررسی همبندی- ترمودینامیکی وضعیت آلودگی هوا در روزهای بحرانی سال ۱۳۹۵:

تحلیل آماری انجام شده بر روی شاخص کیفیت هوا بیانگر افزایش ناگهانی این شاخص و قرار گرفتن در محدوده ناسالم برای عموم (شاخص کیفیت هوا بین ۱۵۰ تا ۲۰۰) از ۱۹ آبان و تداوم و تشدید این وضعیت تا ۲۷ آبان می‌باشد. در

این ۹ روز متوالی کیفیت هوا در وضعیت ناسالم برای عموم و مقدار شاخص بین ۱۵۵ تا ۱۷۶ در نوسان بوده است. نکته مهم افزایش ناگهانی آن از عدد ۷۴ در روز هجدهم به ۱۵۵ در روز نوزدهم بوده است.

جدول ۲- تقویم کیفیت هوا از نظر شاخص AQI در آبان ماه سال ۱۳۹۵

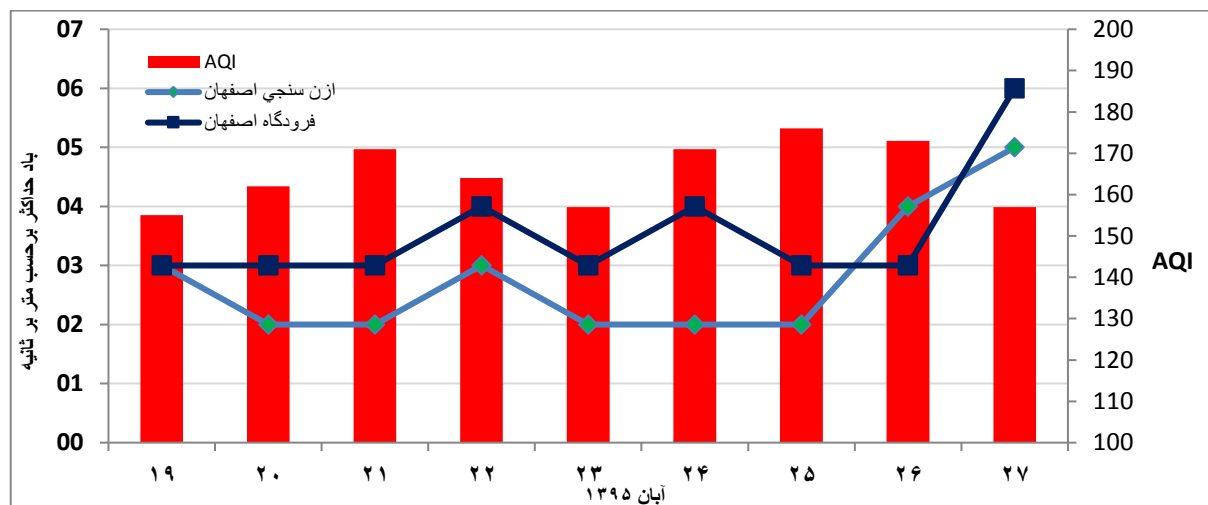
شنبه	یکشنبه	دوشنبه	سه شنبه	چهارشنبه	پنجشنبه	جمعه
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱
۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸
۲۹	۳۰					

آبان



سطح شهر براساس (اطلاعات ایستگاه ازنسنجی و فرودگاه اصفهان) تا روز بیست و ششم، دو تا سه متر بر ثانیه بوده است.

بررسی سرعت باد طی این مدت ۹ روزه نشان می‌دهد که هوا در اکثر ساعات در سکون نسبی و بیشینه سرعت باد در



شکل ۲- نمودار مقایسه‌ای بیشینه سرعت باد با شاخص کیفیت هوا در روزهای بحرانی ۱۶ تا ۲۷ آبان ۱۳۹۵

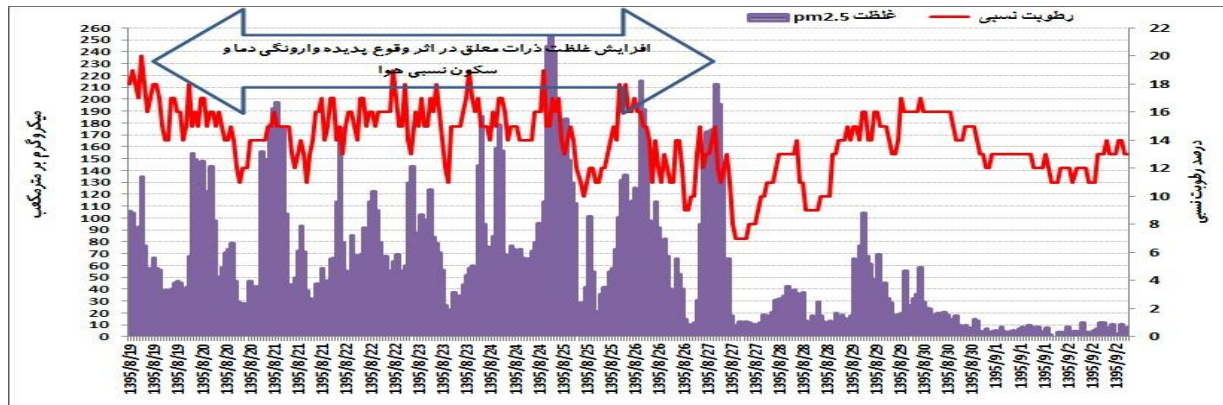
و ازنسنجی اصفهان در ساعات اولیه روز باد آرام یا کمتر از ۱ متر بر ثانیه گزارش شده است.

شکل (۳) نمودار وضعیت رطوبت نسبی با غلظت آلاینده $pm_{2.5}$ در روزهای بحرانی و پاک نشان می‌دهد که میزان آن از ۶ تا ۲۰ درصد در نوسان بوده است. طبق این نمودار ارتباط منظمی بین افزایش رطوبت و شاخص‌ها وجود ندارد، هر چند

در روز ۲۷ آبان سرعت باد تا حدود ۵ متر بر ثانیه افزایش یافت. با توجه به انباشت آلاینده‌ها طی چند روز متوالی و وزش باد ملایم، امکان پالایش یا تهویه جو فراهم نشد. همچنین بر اساس اطلاعات ایستگاه سنجش آلودگی هوای اداره کل هواشناسی اصفهان و اطلاعات ایستگاه‌های فرودگاه

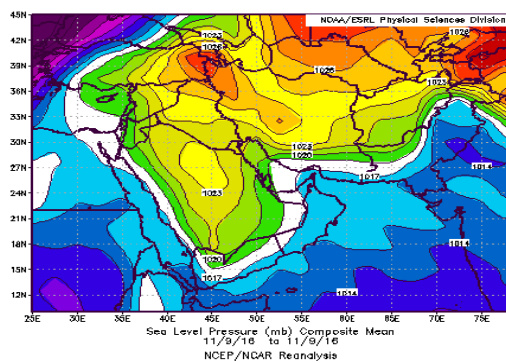
کشور با مرکزیت ۱۰۳۵ میلی‌بار شکل گرفته که زبانه ۱۰۲۰ میلی‌بار آن نیمه شمالی کشور را تا مرکز (استان اصفهان را بطور کامل) در بر گرفت که با ریزش هوای سرد در لایه‌های زیرین جو همراه بود.

در ساعات بعد از ظهر ابرناکی سبب کاهش دریافت انرژی از خورشید شده که پیامد آن کاهش ارتفاع لایه آمیخته و افزایش غلظت آلاینده‌ها در جو شده است. بررسی نقشه همدیدی سطح زمین در روز ۱۹ آبان‌ماه نشان می‌دهد که سامانه پرفشار حرارتی بر روی کشورهای واقع در شمال شرق

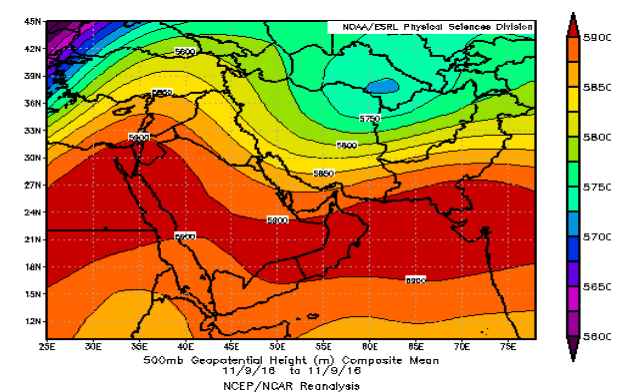


شکل ۳- نمودار وضعیت رطوبت نسبی با غلظت آلاینده pm2.5 در روزهای بحرانی و پاک

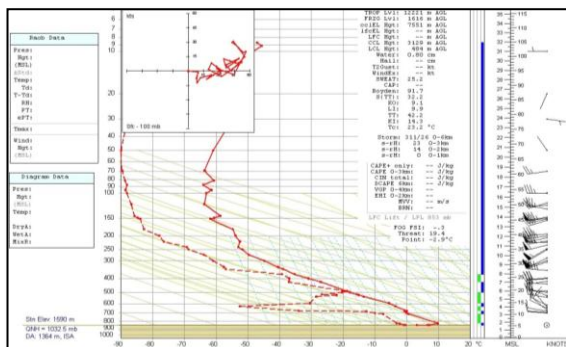
بررسی نقشه‌های سطوح فوقانی جو شامل ۸۵۰-۷۰۰-۵۰۰-۳۰۰-۲۰۰ هکتوپاسکالی مبین حضور و حاکمیت سامانه پرفشار بر روی خاورمیانه و جنوب غرب ایران می‌باشد که بر روی لایه میانی جو ۵۰۰ هکتوپاسکال) با مرکز ۵۹۰ ژئوپتانسیل دکامتر بسته شده است. استان اصفهان بین خط ناهه کم ارتفاع در ساعات اولیه روز و خط پشته سامانه پرفشار مذکور واقع شده است. گسترش قائم این پرفشار تا ۲۰۰ هکتوپاسکال و بالاتر شاخص پایداری این سامانه و ماندگاری آن بر روی منطقه است. با توجه به نقشه سطح زمین و لایه‌های فوقانی جو، شرایط وقوع وارونگی تابشی و پایداری هوا مهیا است. به دلیل افزایش فراوانی رخداد وارونگی دما در فصل پاییز و ورود سامانه‌های پرفشار حرارتی از عرض‌های شمالی و ریزش هوای سرد در لایه‌های زیرین و تغییر الگوهای جوی سطح زمین و سطوح فوقانی جو نسبت به تابستان و کاهش تدریجی دمای سطح زمین و وضعیت توپوگرافی شهر اصفهان بویژه در مرکز و مناطق صنعتی و دارا بودن شرایط لازم جهت انباشت مواد آلاینده، بالارفتن ناگهانی شاخص کیفیت هوا نسبت به روز قبل قابل توجه است.



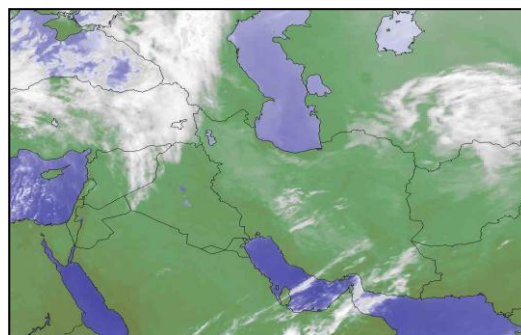
شکل ۵- نقشه سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال روز ۱۹ آبان ۱۳۹۵ ساعت ۱۲۰۰ گرینویچ



شکل ۴- نقشه سطح زمین روز ۱۹ آبان ۱۳۹۵ ساعت ۱۲۰۰ گرینویچ



شکل ۷- نمودار skew-t اصفهان روز ۱۹ آبان ۱۳۹۵ در ساعت ۰۰۰۰ گرینویچ



شکل ۶- تصویر ماهواره روز ۱۹ آبان ۱۳۹۵ در ساعت ۰۰۰ گرینویچ

همدیدی بر روی نقشه‌ها و افزایش آلاینده‌ها طبق آمار در این روز هم‌خوانی دارد. کلیه شاخص‌های ترمودینامیکی از قبیل KI, LI و TT معرف پایداری جو هستند. با توجه به جدول راهنمای زیر در مورد شاخص ki می‌توان گفت که طی این دوره بحرانی هیچ روزی شاخص‌ها در حد ناپایداری نبوده‌اند.

بررسی تصاویر دریافتی از ماهواره طی این دوره نشان می‌دهد که وضعیت آسمان استان در حد کمی ابری بوده و هوای به نسبت گرم ترازهای بالا و تقویت پایداری جو، باعث افزایش پتانسیل انباشت مواد آلاینده بر روی سطح زمین شده است. نمودار ترمودینامیکی روز نوزدهم آبان‌ماه بیانگر تشکیل وارونگی بر روی سطح زمین است که کاملاً با شرایط

K INDEX		LIFTED INDEX		TOTAL TOTALS	
۱۵-۲۵	Small convective potential	Positive number	Stable	<۴۴	Convection not likely
۲۶-۳۹	Moderate convective potential	۰ to -۴	Marginal instability	۴۴-۵۰	Likely thunderstorms
۴۰+	High conve	-۴ to -۷	Large instability	۵۱-۵۲	Isolated severe storms
		-۸ or less	Extreme instability	۵۳-۵۶	Widely scattered severe
				>۵۶	Scattered severe storms

شکل ۸- جداول مربوط به شاخص‌های ترمودینامیکی KI- LI- TT

الگوهای همدیدی نشان می‌دهد که سامانه پرفشار حرارتی تقویت شده و خط هم‌فشار ۱۰۲۴ میلی‌باری از روی اصفهان می‌گذرد. پایداری هوا، شرایط ترمودینامیکی و همدیدی و بالا بودن شاخص کیفیت هوا نسبت به حالت نرمال از روز قبل، انباشت مواد آلاینده و افزایش قابل توجه شاخص کیفیت هوا در روز بیستم و یکم به همراه داشته بطوری که در روز بیستم و یکم شاخص به ۱۷۰ رسیده است. در روز بیست و دوم نمودار ترمودینامیکی کاملاً مشابه روز قبل بوده ولی بر روی الگوی همدیدی سطح زمین و سطوح

در این روز $KI=14.3$ بود که ورود به پایداری را نشان می‌دهد، این روند همچنان طی روزهای بعد با شدت بیشتر ادامه داشت. همچنین شاخص $LI=9.9$ است که طبق جدول زیر نمایشگر شرایط پایدار می‌باشد. در این روز $TT=42.2$ است که طبق جدول در شرایط پایداری می‌باشد.

روزهای ۲۰ تا ۲۴ آبان ماه

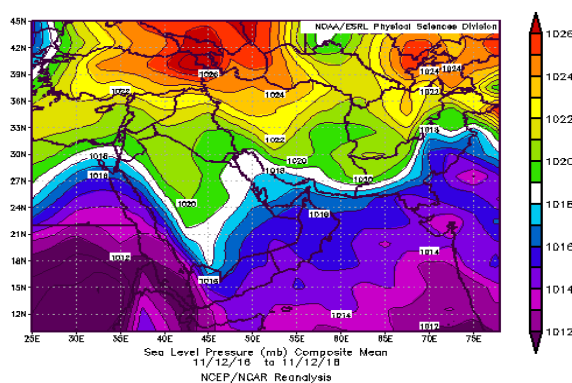
در این روزها نمودار ترمودینامیکی مشابه روز نوزدهم است و مبین وجود وارونگی تابشی در سطح زمین می‌باشد.

نقشه همدیدی سطح زمین در روز ۲۵ آبان ماه نشان می‌دهد که سامانه پر فشار حاکم از روزهای قبل با مرکز ۱۰۲۰ میلی‌باری بسته شده و نسبت به روز قبل تا حدودی ضعیف شده است. بر روی استان اصفهان ایزوبار ۱۰۲۰ میلی‌باری حاکم شده و نسبت به روز قبل منطقه وسیع‌تری را پوشش داده است. همچنین بررسی سرعت وزش باد حاکی از سکون نسبی هوا در منطقه در اکثر ساعات روز می‌باشد. با توجه به گسترش منطقه پهنه داخل خط هم‌فشار ۱۰۲۰ میلی‌باری در این روز نسبت به روز قبل و ماندگاری شرایط پایدار (به جز برخی ساعات محدود) افزایش شاخص کیفیت هوا از ۱۷۱ به ۱۷۶ منطقی می‌باشد. بررسی گرته تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در این روز نشان می‌دهد که سامانه پر ارتفاع همچنان مشابه روز قبل با مرکز ۵۹۲ ژئوپتانسیل دکامتر بر روی جنوب غرب کشور بسته شده و پشته آن نسبت به روز قبل قوی‌تر شده است. استان اصفهان بطور کامل تحت حاکمیت این سامانه و به تبع آن درگیر پایداری شدید ناشی از آن است.

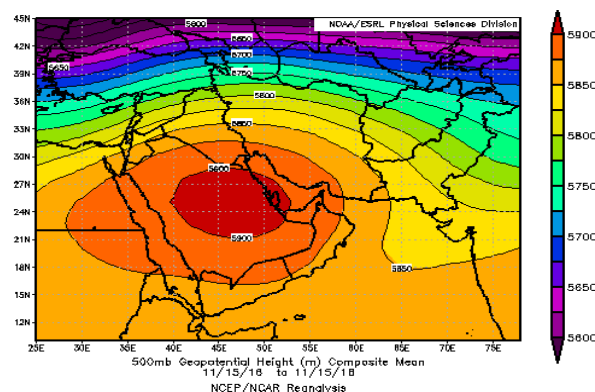
فوقانی تغییراتی مشاهده می‌شود. ارتفاع لایه میانی جو نسبت به روزهای قبل کاهش داشته و محور پشته نسبت به روز قبل از استان عبور کرده است. همچنین الگوی سطح زمین نسبت به روزهای قبل با کاهش جزئی فشار روبرو بوده که این تغییرات در لایه‌های جو باعث کاهش شاخص کیفیت هوا از ۱۷۲ به ۱۶۴ و ایجاد ناپایداری جزئی در جو در ساعات بعد از ظهر شد. در روز بیست و سوم بر روی سطح زمین سامانه کم فشار ضعیف شده و سامانه پرفشار دیگری با مرکز ۱۰۲۵ میلی‌باری جایگزین آن شد و خط هم‌فشار ۱۰۲۰ میلی‌باری استان اصفهان را در بر گرفته است. مقدار تغییر فشار نسبت به روز قبل در این منطقه جزئی است. این تغییر سریع در جو و فشار منطقه مبین تبادل انرژی پتانسیل و جنبشی بر روی منطقه بوده که باعث ایجاد جریان بر روی منطقه شده است. با توجه به اینکه لازمه کاهش چگالی آلاینده‌ها جریان هوا و ناپایداری است، کاهش آن در این روز منطقی می‌باشد.

بیست و پنجم آبان ماه (آلوده‌ترین روز سال)

با توجه به اینکه روز بیست و پنجم آبان ماه، حادثه‌ترین وضعیت آلودگی را داشته، علل آن بررسی می‌شود. بررسی



شکل ۱۰- نقشه سطح زمین روز ۲۵ آبان ۱۳۹۵ ساعت ۱۲۰۰ گرینویچ

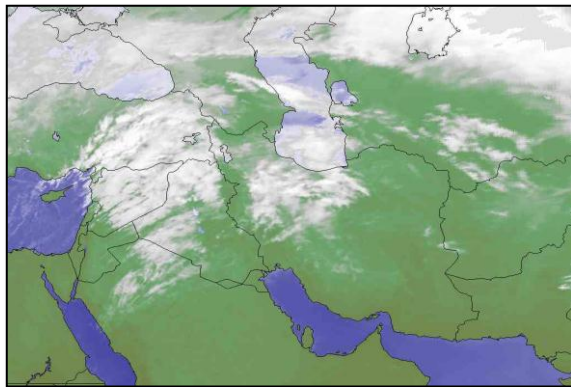


شکل ۹- نقشه سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال روز ۲۵ آبان ۱۳۹۵ ساعت ۱۲۰۰ گرینویچ

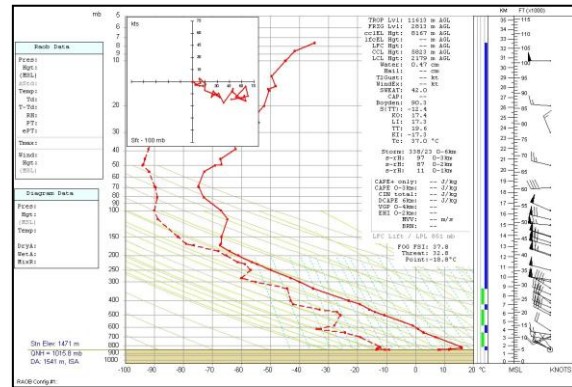
افزایش شاخص آلودگی به ۱۷۶ شده است. پوشش ابر موجود در تصاویر ماهواره‌ای این روز با توجه به اینکه با جبهه گرم همراه بوده، خود به تقویت پایداری و انباشت مواد آلاینده کمک می‌کند. همچنین نمودار اسکیتوتی این روز

شرایط ترمودینامیکی این روز نشان می‌دهد که همچنان وارونگی تابشی زمین پایه در منطقه وجود دارد و با توجه به عدم وزش باد موثر، تداوم ازدیاد شاخص‌های KI-SI, TT طی چند روز متوالی نسبت به نرمال و بالابودن شاخص آلودگی هوا در روزهای قبل، باعث انباشت آلاینده‌ها و

نشان دهنده وارونگی جبهه گرم در لایه میانی است که به تقویت پایداری و انباشت مواد آلاینده کمک می‌کند.



شکل ۱۲- تصویر ماهواره روز ۲۵ آبان ۱۳۹۵ در ساعت ۰۰:۰۰ گرینویچ



شکل ۱۱- نمودار skew-t مرکز ازنسنجی اصفهان روز ۲۵ آبان ۱۳۹۵ در ساعت ۰۰ گرینویچ

ها، آلاینده مسئول در این روز PM2.5 بود که میانگین غلظت ۲۴ ساعته آن ۱۰۳ میکروگرم و بیشینه مقدار آن در این روز به ۲۵۴ میکروگرم بر مترمکعب رسید.

با توجه به آمار مربوط به ایستگاه سنجش کیفیت هوا در اداره کل هواشناسی اصفهان، در سال ۹۵ آلوده‌ترین روز ۲۵ آبان بوده که شاخص کیفیت هوا به ۱۷۶ رسید، طبق بررسی-

جدول ۲- بررسی مقادیر پارامترها در روز ۲۵ آبان ۱۳۹۵

سرعت باد (متر بر ثانیه)	رطوبت نسبی (درصد)	PM2.5 (میکروگرم بر مترمکعب)	
۲	۱۷	۲۵۴	بیشینه
۰	۱۰	۱۵	کمینه
آرام	۱۳/۳	۹۵/۷	میانگین

۲- نتایج این تحلیل حاکی است که سکون نسبی هوا و افزایش ارتفاع لایه‌های فوقانی جو به سبب حاکمیت سامانه‌های پرارتفاع، کاهش دما و افزایش فشار بر روی سطح زمین، رسیدن شاخص‌های ترمودینامیکی به مرز پایداری و عبور از آن، وقوع وارونگی دما و مهم‌تر از همه ماندگاری این شرایط پایدار طی چند روز متوالی بویژه در فصول سرد سال با توجه به موقعیت توپوگرافی شهر اصفهان و مراکز صنعتی، به افزایش پتانسیل پایداری و انباشت مواد آلاینده و بالا رفتن شاخص کیفیت هوا کمک می‌کند.

نتایج

۱- بررسی غلظت بیشینه آلاینده‌هایی چون ذرات معلق موجود در هوا با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون (PM2.5)، دی اکسید گوگرد (SO2)، دی اکسید نیتروژن (NO2) و منواکسید کربن (CO) نشان می‌دهد که در آبان ماه ۱۳۹۵ بیشترین مقدار غلظت آلاینده‌های جوی را داشته است. پایداری جو عامل استمرار آلودگی هوا و ناسالم بودن کیفیت هوا در دوره زمانی ۹ روزه از ۱۹ تا ۲۷ آبان، در شهر اصفهان است.

منابع

گزارش سالانه کیفیت هوای شهر اصفهان، مرکز تحقیقات اداره کل هواشناسی استان اصفهان.