

بررسی اثرهای نوسان اطلس شمالی بر شرایط هواشناختی کیفیت هوای شهر تهران در دوره ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷

الهام مومن زاده^۱، فرهنگ احمدی گیوی^{۲*} و سمانه ثابت قدم^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۳)

چکیده

در مقاله حاضر، اثرهای احتمالی نوسان اطلس شمالی (NAO) بر کیفیت هوای شهر تهران بررسی شده است. به این منظور، ابتدا با استفاده از شاخص روزانه NAO و شاخص کیفیت هوای مربوط به دوره‌های با هوای آلوده و سالم از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۶، تأخیر زمانی تأثیر این دورپیوند در هر دوره به‌دست آمده است. سپس برای بررسی موردی شرایط هم‌دیدگی و دینامیکی، داده‌های روزانه ERA-interim مربوط به ECMWF در بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۷ به‌کار رفته است.

بررسی ارتباط بین شاخص روزانه NAO و شاخص کیفیت هوای شهر تهران با محاسبه ضریب همبستگی بیانگر آن است که در دوره‌های هوای آلوده، به‌طور نسبی فاز مثبت NAO و در دوره‌های هوای سالم فاز منفی غالب است. نتایج بررسی‌های موردی در شرایطی که بیشترین همبستگی بین شاخص کیفیت هوای تهران و شاخص روزانه NAO وجود دارد، نشان می‌دهد در مواردی که فاز NAO مثبت است، با انحراف جریان‌های جوی به سمت شمال اروپا، فرارفت هوای گرم و مرطوب به این منطقه رخ می‌دهد، حال آنکه خاورمیانه شرایط سرد و خشک همراه با حرکت‌های نزولی دارد که می‌تواند باعث وارونگی دما و انباشت آلاینده‌ها در این منطقه شود. از سوی دیگر، زمانی که فاز NAO منفی است، مداری و قوی‌تر شدن جریان‌ها که با انتقال رطوبت و دمای کمتر از اقیانوس اطلس به سمت شرق همراه است، به بهبود کیفیت هوا کمک می‌کند.

از دیگر نتایج پژوهش حاضر این است که مکان استقرار کم‌فشار ایسلند و پرفشار آرزور روی اقیانوس اطلس، جهت محور آنها و مشارکت با پدیده‌های دیگر به‌خصوص پرفشار سیبری، تأثیر مستقیم بر مسیر جریان‌های جوی، ایجاد پشته‌ها و ناوه‌ها و همچنین مکان قرارگیری جت‌های جنب‌حاره‌ای و جنب‌قطبی دارند و به‌صورت غیرمستقیم بر کیفیت هوا اثر می‌گذارند.

واژه‌های کلیدی: نوسان اطلس شمالی، شاخص کیفیت هوا، تأخیر زمانی، ضریب همبستگی، منطقه تهران

۱ مقدمه

افزایش آلودگی هوا در مناطق شهری یکی از تبعات رشد شهرنشینی، افزایش جمعیت، استفاده بیش از حد از منابع سوخت‌های فسیلی و به کارنگرفتن فناوری‌های سازگار با محیط زیست است. عوامل متعدد دیگر از جمله توپوگرافی منطقه، ساختار دمایی و گردش‌های جوی، در پدید آمدن آلودگی هوا دخالت دارند (گزارش کیفیت هوای تهران، ۱۳۹۷). آلودگی هوای شهرهای بزرگ تا حد زیادی به مقدار و نوع گسیل آلاینده‌ها وابسته است، اما چگونگی توزیع آلودگی و میزان انباشت یا تهویه بر اثر حرکات جوی هم نقش بسزایی در آن ایفا می‌کند. توزیع، انباشت و تهویه آلودگی هوا به ساختار جو در مقیاس محلی بستگی دارد که این خود به شدت متأثر از جریانات و گردش‌های جوی در مقیاس‌های بزرگ است (حافظی و همکاران، ۲۰۱۷). پژوهشگران در بررسی ارتباط بین گردش‌های جوی و آلودگی هوای شهری بر این باورند که گردش جو در مقیاس همدیدی از عوامل اصلی تعیین‌کننده میزان تغییرات و وردایی روزانه آلاینده‌های هوای شهری به‌شمار می‌آید (کومری و یارنال، ۱۹۹۲). علی‌رغم مؤثر بودن عوامل محلی و منطقه‌ای در وضعیت آلودگی هوا و تغییرات آن، این عوامل نسبت به تغییرپذیری در مقیاس همدیدی واکنش نشان می‌دهند (راگسدل و همکاران، ۲۰۱۳). از جمله این تغییرپذیری‌های کم‌بسامد می‌توان به نوسان اطلس شمالی (North Atlantic Oscillation, NAO) اشاره کرد که علاوه بر تأثیر بر مناطق اطراف خود، به‌طور غیرمستقیم مناطق بسیار دورتر را نیز متأثر می‌کند و از این رو می‌توان بخشی از بی‌هنجاری‌های بارش، دما و برخی از پارامترهای هواشناسی مناطق تأثیرپذیر را براساس تغییرات این پدیده توجیه کرد (مارشال و همکاران، ۲۰۰۱).

پدیده NAO از مهم‌ترین نوسانات در نیمکره شمالی و معیاری برای تعیین شدت بادهای غربی است که

از روی اقیانوس اطلس در کمربند عرضی ۴۰ تا ۶۰ درجه شمالی می‌وزند. این پدیده یک الگوی دوقطبی است که جابه‌جایی و تغییر شدت کم‌فشار ایسلند و پرفشار آزرورز را نشان می‌دهد (هارل، ۱۹۹۶). این الگو دو فاز دارد که در فاز مثبت، کم‌فشار ایسلند در شمال اقیانوس اطلس و پرفشار آزرورز در منطقه جنب‌حاره این اقیانوس قوی‌تر از میانگین بلندمدت است و افزایش گرادیان فشار بین این دو سامانه سبب تشدید بادهای غربی می‌شود؛ در نتیجه، جت جنب‌قطبی تقویت و به سمت قطب جابه‌جا می‌شود. فاز مثبت همراه با انحراف نصف‌النهاری مسیر توفان روی شمال اروپا است. در فاز منفی NAO، کم‌فشار ایسلند و پرفشار آزرورز ضعیف‌تر از میانگین بلندمدت است و با کاهش گرادیان فشار، تضعیف جریان‌های غربی روی اقیانوس اطلس مشاهده می‌شود که در نتیجه آن، جت جنب‌قطبی نیز تضعیف و به عرض‌های پایین‌تر جابه‌جا می‌شود. در این فاز، مسیر توفان مداری است و از جنوب اروپا و دریای مدیترانه می‌گذرد (هارل، ۱۹۹۵ و ۱۹۹۶). برای بررسی کمی و کیفی آثار متفاوت پدیده NAO، شاخصی به نام شاخص NAO تعریف می‌شود که بر مبنای اختلاف فشار سطحی استاندارد شده بین ایستگاه‌های مشخص محاسبه می‌شود (راجرز، ۱۹۸۴؛ هارل، ۱۹۹۵؛ جونز و همکاران، ۱۹۹۷؛ اسلنسکی و یو، ۲۰۰۱).

در مطالعات متعددی اثرهای NAO بر تغییر غلظت آلاینده‌های جوی بررسی شده است. برای مثال، هارل (۱۹۹۵) با بررسی تأثیر NAO بر توزیع مکانی شدت بارش، مشاهده کرد که در فاز مثبت NAO در بیشتر مناطق جنوبی و مرکزی اروپا، منطقه مدیترانه و بخش‌هایی از خاورمیانه، وضعیت خشک‌تر از حد میانگین رخ می‌دهد، در حالی که در ایسلند و اسکاندیناوی بارش بیشتر از نرمال می‌شود. با توجه به اینکه بارش نقش بسزایی در حذف آلاینده‌ها و ذرات معلق موجود در جو دارد؛ بنابراین NAO به‌طور غیرمستقیم بر توزیع و انباشت آلاینده‌ها تأثیر

میان‌حاره‌ای (ITCZ) همراه با وجود بندال واقع بر اطلس شمالی از مشخصه‌های بارز این دوره آلوده بوده است. براساس نتایج مطالعات پیشین، شناخت ارتباط بین پدیده‌های بزرگ‌مقیاس و شرایط جوی با کیفیت هوای شهری مانند تهران و چگونگی این تأثیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این‌رو، در این مقاله اثرهای احتمالی دورپیوند NAO بر آلودگی هوای منطقه شهری تهران در یک دوره ده ساله از ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ بررسی می‌شود. برای رسیدن به این هدف، ارتباط شاخص کیفیت هوای تهران با شاخص روزانه NAO بررسی شد تا مشخص شود (الف) چه مدت طول می‌کشد تا فازهای NAO بر منطقه تأثیر بگذارند، (ب) در دوره‌های طولانی همراه با آلودگی هوا یا هوای سالم، به‌طور نسبی کدام فاز این پدیده غالب است و (ج) تأثیر این دورپیوند بر پارامترهای هواشناختی چگونه و با چه سازوکاری است.

۲ داده‌ها و روش کار

برای مطالعه تأثیر NAO بر کیفیت هوای شهر تهران، ابتدا شاخص کیفیت هوا از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ برای دو فصل پاییز و زمستان بررسی شد تا دوره‌هایی شناسایی شوند که شاخص کیفیت هوا بیش از ۱۰۰ (هوای ناسالم) و کمتر از ۱۰۰ (هوای سالم) است و زمان استمرار طولانی دارند. این دوره‌ها به‌ترتیب دوره‌های با هوای آلوده و با هوای سالم نامیده می‌شوند. در بررسی تغییرات NAO از شاخص روزانه آن استفاده شد که در وبگاه سازمان ملی اقیانوسی و جوی (NOAA) در دسترس است. در ادامه، تأخیر زمانی تأثیر NAO برای تمامی دوره‌های با هوای آلوده و سالم موجود در بازه مورد مطالعه به‌دست آمد. برای این کار، همبستگی بین شاخص کیفیت هوای تهران در روزهای دوره‌های آلوده و سالم (تا آخرین روز بیشینه شاخص کیفیت هوا) و شاخص روزانه NAO با در نظر گرفتن تأخیرهای زمانی مختلف محاسبه شد. سپس تأخیری که

می‌گذارد. خوخلوف و رومانوا (۲۰۱۱) اثرهای ناشی از NAO بر غلظت ازون کلی روی اروپا را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که امواج القایی NAO به انتقال موجی ازون کمک می‌کنند و غلظت آن را تغییر می‌دهند. جیرز و همکاران (۲۰۱۳) نیز تأثیر NAO بر غلظت هواویزهای اروپا را با استفاده از فرایندهای جوی محلی (مانند بارش، باد و ابرناکی) بررسی و دریافتند که NAO مثبت، غلظت هواویزهای سطح زمین را در نواحی جنوبی مدیترانه در طول فصل زمستان افزایش می‌دهد. بیسر و همکاران (۲۰۱۶) سیر تکاملی انتقال آلودگی ناشی از نوسان اطلس شمالی را در یک سناریوی تغییر اقلیم جهانی در قرن بیست‌ویکم بررسی کردند که براساس نتایج، در پایان قرن، جنوب غرب مدیترانه و شمال آفریقا در طول فازهای مثبت NOA غلظت آلاینده بیشتری نسبت به گذشته خواهند داشت، درحالی‌که بخش وسیعی از شمال اروپا در طول فاز مثبت NAO دارای غلظت آلاینده کمتری خواهد بود.

در ایران نیز مطالعاتی درباره تأثیر پدیده‌ها و جریان‌ات بزرگ‌مقیاس بر آلودگی هوا انجام شده است. برای مثال، علی‌اکبری بیدختی و شرعی‌پور (۱۳۸۸) با بررسی شرایط هواشناختی جو بالا و وضعیت حاد آلودگی هوا در شهر تهران دریافتند که در روزهای حاد آلودگی هوا در فصول سرد، محور جت جنب‌حاره‌ای، شمال‌غربی-جنوب‌شرقی و نزدیک به حالت نصف‌النهاری است. در دوره‌های کمینه آلودگی، محور این جت تقریباً مداری است یا نواهای روی ایران مستقر است و سرعت‌های قوی مداری در کاهش آلودگی منطقه‌ای مؤثر هستند. حافظی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از شاخص‌های دوشاخه‌شدگی جت و شکست موج راسبی در بررسی دوره حاد آلودگی هوای تهران در آذرماه ۱۳۸۹ نشان دادند که وجود مقدار میانگین منفی شاخص NAO و جابه‌جایی استواسوی منطقه همگرایی

مختلف است، بدیهی است تأخیر زمانی محاسبه شده مربوط به دوره‌های هوای آلوده و سالم نیز یکسان نباشند، اما به‌طور میانگین، تأخیر زمانی دوره‌های آلوده سیزده روز و دوره‌های سالم حدود ده روز است. با بررسی نمونه‌های فراوان می‌توان میانگین تأخیر زمانی قابل‌اعتمادتری به‌دست آورد.

همان‌طور که در جدول ۱-الف مشاهده می‌شود، در دوره‌های آلوده برای تأخیر زمانی که بیشترین همبستگی وجود دارد، به‌غیر از دوره ۱، شاخص NAO اغلب مثبت است؛ حال آنکه در دوره‌های سالم تفاوت درخور توجهی بین رخداد فازهای مثبت و منفی NAO وجود ندارد. باین‌حال، براساس جدول ۱-ب می‌توان گفت غیر از دوره‌های ۱، ۳ و ۵، در بقیه دوره‌ها، به‌طور نسبی فاز منفی NAO بیشتر رخ داده است. شایان ذکر

بیشترین مقدار همبستگی (مثبت یا منفی) را داشت، به‌عنوان تأخیر زمانی تأثیر NAO بر کیفیت هوای آن دوره انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که به‌طور کلی این همبستگی برای دوره‌های ب و ا استمرار طولانی معنادار است. به نظر می‌رسد این موضوع به علت این است که دوره‌های آلوده و سالم که زمان استمرار کوتاه‌تری دارند، بیشتر تحت تأثیر عوامل محلی و جریانات و گردش جوی در مقیاس محلی هستند. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به دوره‌های با هوای آلوده و سالم در ده سال مورد مطالعه که همبستگی معنادار (مثبت یا منفی) با شاخص روزانه NAO دارند، خلاصه شده است. با توجه به اینکه هر دوره در شرایط زمانی گوناگونی اتفاق افتاده و عوامل تأثیرگذار محلی، منطقه‌ای و بزرگ‌مقیاس جوی در آن دوره

جدول ۱. اطلاعات مربوط به دوره‌های (الف) آلوده (ب) سالم با همبستگی (مثبت یا منفی) با شاخص روزانه NAO. علامت منفی روزها نشان‌دهنده تعداد روز قبل از بیشینه آلودگی هوا در شهر تهران است. علامت‌های یک ستاره و دو ستاره در مقادیر همبستگی نیز به‌ترتیب بیانگر معناداری در سطح اعتماد ۹۵٪ و ۹۹٪ هستند.

شماره دوره	تاریخ	تأخیر با بیشترین همبستگی	مقدار همبستگی	تعداد روز با شاخص مثبت NAO	تعداد روز با شاخص منفی NAO
دوره‌های هوای آلوده (الف)					
۱	۲۰۱۰/۱۱/۲۱ - ۲۰۱۱/۱/۲	-۲۰	۰/۶۲۵ ^{**}	۴۰	۱
۲	۲۰۱۳/۱۲/۲۱ - ۲۰۱۴/۱/۱۴	-۱۶	-۰/۶۰۶ ^{**}	۲	۲۱
۳	۲۰۱۲/۱۲/۲۴ - ۲۰۱۳/۱/۱۰	-۵	۰/۵۸۶ [*]	۶	۱۰
۴	۲۰۱۱/۱۱/۳۰ - ۲۰۱۲/۱/۳	-۱۹	-۰/۳۵۹ [*]	۴	۲۷
۵	۲۰۱۱/۹/۵ - ۲۰۱۱/۱۰/۷	-۵	-۰/۵۵۸ [*]	۶	۲۱
دوره‌های هوای سالم (ب)					
۱	۲۰۰۷/۱۱/۱۷ - ۲۰۰۸/۱/۱۶	-۷	۰/۴۴۱ ^{**}	۲۲	۳۶
۲	۲۰۱۰/۱/۵ - ۲۰۱۰/۲/۲۲	-۱۰	-۰/۵۵۴ ^{**}	۴۳	۴
۳	۲۰۰۸/۱۲/۲۷ - ۲۰۰۹/۲/۲۲	-۱۳	-۰/۵۱۵ ^{**}	۲۴	۳۳
۴	۲۰۰۹/۱۱/۷ - ۲۰۱۰/۱/۳	-۱۸	-۰/۴۵۳ ^{**}	۳۸	۱۸
۵	۲۰۱۶/۱۰/۱ - ۲۰۱۶/۱۰/۲۷	-۴	۰/۶۳۶ ^{**}	۵	۲۱
۶	۲۰۱۰/۱۰/۳ - ۲۰۱۰/۱۱/۴	-۱۵	۰/۵۵۷ ^{**}	۱۶	۱۵
۷	۲۰۱۵/۹/۲ - ۲۰۱۵/۹/۲۲	-۸	-۰/۵۱۶ [*]	۱۸	۰
۸	۲۰۰۹/۹/۲۳ - ۲۰۰۹/۱۱/۴	-۴	-۰/۳۹۷ [*]	۲۷	۱۲

کمیت‌ها محاسبه شده است؛ به‌طور مثال، اگر تأخیر زمانی به‌دست آمده برای یک دوره A- باشد، این میانگین به‌گونه‌ای تعیین شده است که روز A- از روز شروع دوره در میانه این ده روز باشد. این میانگین به این علت محاسبه شده است تا مشخص شود با در نظر گرفتن تأخیر زمانی، وضعیت جوی میانگین پیش از شروع آلودگی هوا چگونه بوده است که موجب بروز آلودگی هوا حدود A روز بعد شده است (برای رعایت اختصار، شکل‌های مربوط به میانگین ۱۰ روزه آورده نشده است و تنها به توضیح نکات مهم آنها اکتفا می‌شود). در ادامه، میانگین بی‌هنجاری کمیت‌ها به‌دست آمده است، به‌گونه‌ای که تمام طول دوره را با در نظر گرفتن تأخیر زمانی مربوط به هر دوره پوشش می‌دهد. این میانگین از روز A- نسبت به شروع دوره تا روز A- نسبت به پایان دوره (بازه زمانی که NAO بیشترین تأثیرگذاری را دارد) محاسبه شده است که برای اختصار نقشه‌های مربوط به فشار سطح زمین، ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز میانی جو و میدان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در اینجا ارائه می‌شود.

۳-۱ دوره‌های هوای آلوده

در دوره شماره ۱ از دوره‌های هوای آلوده، برخلاف بقیه دوره‌ها، فاز منفی NAO کاملاً غالب بوده است. شکل ۱ میانگین بی‌هنجاری‌های فشار سطح زمین، ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و میدان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در دوره آلوده ۱ را نسبت به میانگین بلندمدت زمستانی نشان می‌دهد. در بررسی نقشه مربوط به بی‌هنجاری فشار سطح زمین در بازه زمانی پیش از شروع دوره آلوده، الگوی ضعیف فاز منفی NAO روی اقیانوس اطلس حاکم است (شکل ارائه نشده است). همچنین پرفشار سبیری نسبت به میانگین بلندمدت خود ضعیف‌تر است و در شمال آسیا، بی‌هنجاری منفی فشار وجود دارد. در شکل ۱-الف که دربرگیرنده دوره آلوده است،

است با توجه به اینکه سال‌های مورد مطالعه در این پژوهش به‌علت نبود داده‌های شاخص کیفیت هوا طولانی نیستند، نمی‌توان الگوی ثابت و قابل استناد آماری ارائه کرد، اما می‌توان نتیجه گرفت طی ده سال مورد مطالعه، در بیشتر دوره‌های آلوده‌ای که با شاخص NAO همبستگی معنادار دارند، فاز مثبت و در دوره‌های سالم، فاز منفی NAO رخ داده است.

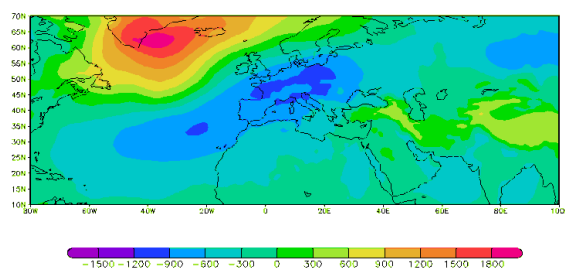
به‌دلیل نبود همبستگی کامل بین دوره‌های هوای آلوده و سالم شهر تهران با فازهای مختلف NAO، در ادامه، تمامی دوره‌های موجود در جدول ۱ به‌ترتیب بررسی می‌شوند تا چگونگی تأثیر NAO بر شرایط هواشناختی هریک از این دوره‌ها مشخص شود. با این کار و براساس نتایج بررسی همدیدی و دینامیکی انجام شده می‌توان نتیجه‌گیری کلی از اثر NAO بر شرایط هواشناختی کیفیت هوای شهر تهران به‌دست آورد. برای انجام این قسمت از پژوهش، از داده‌های روزانه ERA-interim مربوط به پایگاه داده مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا (ECMWF) با تفکیک افقی $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ در راستاهای طول و عرض جغرافیایی در بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۷ استفاده شده است تا با محاسبه میانگین بلندمدت، بی‌هنجاری برخی کمیت‌های هواشناختی در دوره‌های مورد بررسی تعیین شود. این کمیت‌ها شامل مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد در ترازهای ۲۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، دما و رطوبت ویژه تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و فشار سطح زمین هستند.

۳ مطالعه همدیدی و دینامیکی موارد انتخابی

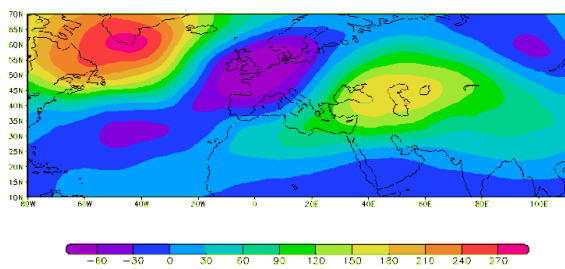
در این بخش براساس نقشه‌های بی‌هنجاری کمیت‌های معرفی شده در بخش ۲، بررسی همدیدی و دینامیکی دوره‌های آلوده و سالم موجود در جدول ۱ انجام شده است. برای این بررسی ابتدا میانگین بی‌هنجاری ده روزه

پیش از شروع دوره آلوده (شکل ارائه نشده است)، نواری با بی‌هنجاری مثبت از شمال غرب اقیانوس اطلس و شرق کانادا تا آسیای میانه کشیده شده است. همچنین بی‌هنجاری منفی ارتفاع ژئوپتانسیلی در شمال آسیا مشاهده می‌شود که زبانه‌های آن تا شمال شرق اطلس گسترش دارد. با توجه به شکل ۱-ب مربوط به دوره آلوده، این بی‌هنجاری منفی ارتفاع ژئوپتانسیلی به سمت جنوب غرب کشیده و تقویت شده است. بی‌هنجاری مثبت ارتفاع ژئوپتانسیلی در شرق اروپا، غرب آسیا و آسیای میانه نیز محدودتر شده و به صورت یک بندال امگاشکل درآمده

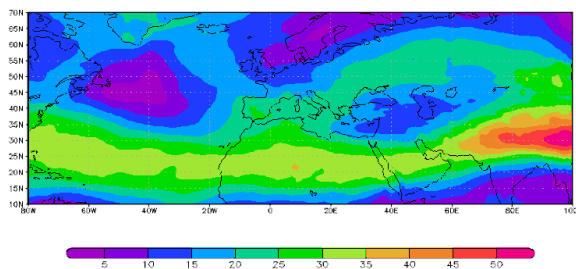
بی‌هنجاری‌های روی اقیانوس اطلس نسبت به بازه زمانی قبل از شروع دوره قوی‌تر شده‌اند و این الگو نشان‌دهنده آشکار فاز منفی NAO است. در دوره آلوده، میزان بی‌هنجاری منفی فشار در منطقه سیبری نیز کاهش یافته و در نتیجه، پرفشار سیبری تقویت شده است. محور پرفشار سیبری در راستای شمال شرق-جنوب غرب، منجر به گسترش زبانه آن تا شمال شرق اروپا شده است به طوری که به زبانه پرفشار آرزوز می‌پیوندد؛ در نتیجه، انتظار می‌رود این ادغام مانع نفوذ جریانات غربی به سمت شرق شود. در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال



(الف)



(ب)



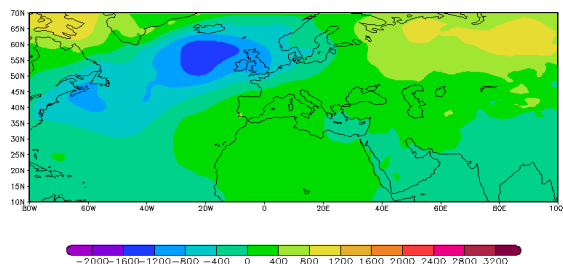
(ج)

شکل ۱. میانگین بی‌هنجاری‌های (الف) فشار سطح زمین (برحسب پاسکال)، (ب) ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (برحسب ژئوپتانسیل متر) و (ج) میدان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال (برحسب متر بر ثانیه) برای دوره آلوده ۱ نسبت به میانگین بلندمدت زمستانی. رنگ‌های گرم، بی‌هنجاری مثبت و رنگ‌های سرد بی‌هنجاری منفی را نشان می‌دهند.

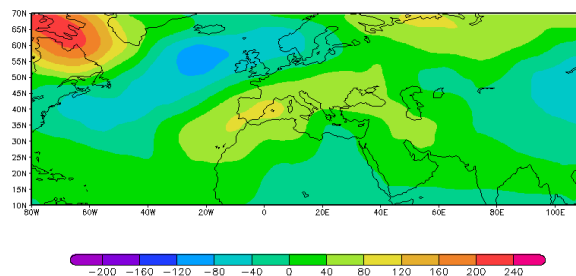
دوشاخه شدن جت در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال می‌شود که یک شاخه جت از جنوب منطقه ایران و شاخه دیگر آن به‌طور ضعیف‌تر از بالای منطقه عبور می‌کند. در نیمه شمالی ایران، به‌ویژه سواحل جنوبی دریای خزر و شمال‌غرب ایران، سرعت باد در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در شکل ۱-ج نسبت به بازه زمانی پیش از دوره آلوده حدود 20 m/s کمتر شده است. این تضعیف باد باعث افزایش فشار در سطح زمین و نزول هوا می‌شود. با در نظر گرفتن مطالب فوق می‌توان گفت این دوره از آلودگی هوا نتیجه مشارکت دو سامانه بزرگ و قوی پرفشار سبیری و پرفشار آزرورز است که با پیوستن زبان‌های آنها به یکدیگر، اثرشان تقویت شده و مانع نفوذ جریانات به سمت شرق شده‌اند. در نتیجه، طی این بازه زمانی، ایران داخل جوی با سرعت‌های بسیار کم قرار داشته که به مدت طولانی روی این منطقه مستقر بوده است به‌گونه‌ای که طولانی‌ترین دوره آلودگی هوا طی حداقل ده سال اخیر رخ داده است. در دوره شماره ۳ از دوره‌های هوای آلوده (جدول ۱) نیز مشابه دوره شماره ۱، در اثر انحراف محور کم‌فشار ایسلند و متعاقب آن محور پرفشار آزرورز به سمت شمال‌شرق و پیوستن زبان‌های پرفشار آزرورز به زبان‌های پرفشار سبیری، مسیر عبور جریانات غربی مسدود و منطقه ایران همچنان شاهد بی‌هنجاری مثبت فشار است. به‌طور کلی، در دوره‌های هوای آلوده شماره ۳، ۴ و ۵ (جدول ۱)، سطح اعتماد ضریب همبستگی معناداری کمتری دارد و همچنین در دوره شماره ۳ اختلاف تعداد روزهایی که شرایط فازهای منفی و مثبت NAO حاکم است، نسبت به دو دوره دیگر کاهش نشان می‌دهد. در بازه زمانی پیش از شروع دوره ۳، پرفشار سبیری نسبت به میانگین بلندمدت خود قوی‌تر است و زبان‌های آن تا روی ایران ادامه یافته و این منطقه شاهد بی‌هنجاری مثبت و ضعیف فشار است (شکل ارائه نشده است). در شکل ۲-الف مربوط به بازه‌ی

که مرکز آن روی شرق اروپا و دریای خزر متمرکز است. براساس شکل ۱-ب، منطقه ایران به‌خصوص شمال آن داخل یک پشته قوی ارتفاعی قرار گرفته است. با توجه به اینکه بندال‌ها مدت زمان به‌نسبت زیادی (حدود یک تا دو هفته) در یک منطقه استقرار دارند، این پدیده سبب مسدود شدن یا انحراف جریان‌های جوی شده و در اثر آن هوای راکد و شرایط بد کیفیت هوا برای مدت طولانی در این منطقه ماندگار می‌شود. در بررسی بی‌هنجاری‌های دما و میدان باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل آورده نشده است)، انحراف نصف‌النهاری جریان‌ها از روی اقیانوس اطلس به سمت شمال‌غرب اروپا بر اثر وجود بندال امگا مشاهده می‌شود. این جریان‌های نصف‌النهاری، هوای گرم و مرطوب اقیانوسی را به سمت شمال‌غرب اروپا منتقل می‌کنند. وجود بی‌هنجاری مثبت دما روی شمال‌غرب آسیا که هسته آن در غرب دریای خزر واقع است، از دلایل ایجاد پشته در این منطقه است که مانع نفوذ جریانات از طرف اقیانوس اطلس به این منطقه می‌شود.

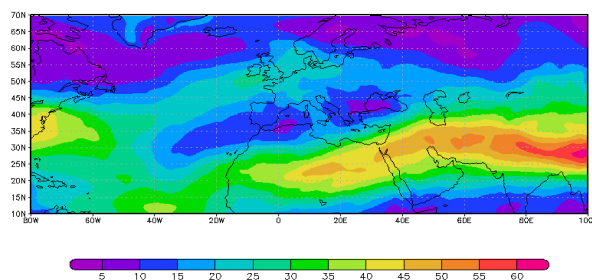
در نقشه بی‌هنجاری میدان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در بازه زمانی پیش از شروع دوره (شکل آورده نشده است)، هسته جت جنب‌حاره بر فراز آسیای میانه واقع است و نیمه شمالی ایران در بخش شمالی ورودی این جت قرار دارد. جت جنب‌قطبی نیز در عرض‌های بالاتر از جت جنب‌حاره‌ای و در شرق کانادا و اقیانوس اطلس واقع است. در دوره هوای آلوده (شکل ۱-ج)، هسته جت جنب‌حاره‌ای تقویت شده و مطابق آنچه در فاز منفی NAO رخ می‌دهد، جت جنب‌قطبی و جنب‌حاره‌ای به هم پیوسته‌اند. در این زمان، شمال و شمال‌غرب ایران در بخش شمالی ورودی هسته جت جنب‌حاره‌ای قرار گرفته و حرکت‌های نزولی انتظار می‌رود (هولتون، ۲۰۰۴). وجود بی‌هنجاری مثبت فشار در سطح زمین و پشته قوی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال موجب



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲. مانند شکل ۱ ولی برای دوره هوای آلوده ۳.

ارتفاعی در بازه زمانی دوره هوای آلوده گسترش یافته و به نواحی بای‌هنجاری مثبت ارتفاع در شمال غرب آسیا و منطقه ایران پیوسته است و کاملاً مسیر عبور جریان‌های غربی را مسدود کرده است (شکل ۲-ب). گسترش پشته ارتفاعی موجب تقویت بی‌هنجاری مثبت ارتفاع در نواحی غربی و مرکزی ایران و همچنین سواحل جنوبی دریای خزر نسبت به بازه زمانی گذشته شده است. در نقشه میانگین بی‌هنجاری میدان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال پیش از شروع دوره هوای آلوده، انتظار

زمانی دوره هوای آلوده، مانند پیش از شروع دوره، شرایط فاز مثبت ولی ضعیف‌تر NAO حاکم است. از آنجایی که تعداد روزهای استقرار شرایط فازهای منفی و مثبت NAO نزدیک به هم هستند، وجود این الگو دور از ذهن نیست.

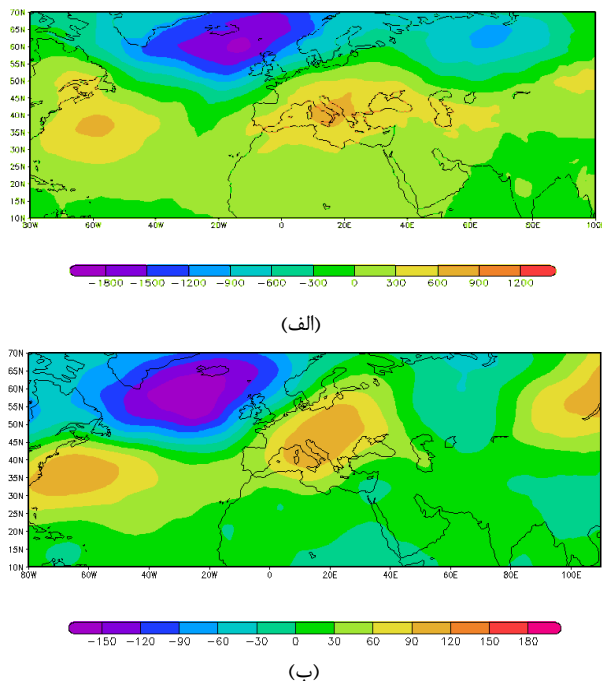
مشابه الگوی فشاری، در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پیش از شروع دوره هوای آلوده، یک ناحیه بای‌هنجاری مثبت ارتفاع در شمال غرب قاره آفریقا قرار دارد (شکل ارائه نشده است). این پشته

مدیترانه واقع است که ایران و سواحل جنوبی دریای خزر را پوشش می‌دهد و در نتیجه نشست هوا، جلوگیری از پخش آلاینده‌ها و سکون آنها در این مناطق انتظار می‌رود. در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پیش از شروع دوره آلوده، یک ناحیه با بی‌هنجاری مثبت ارتفاع ژئوپتانسیلی در عرض‌های میانی اقیانوس اطلس دیده می‌شود که زبانه‌های هسته پرارتفاع واقع در شرق اقیانوس اطلس به عرض‌های پایین‌تر و شرق کشیده شده و از روی ایران گذر کرده است (شکل ارائه نشده است). از سوی دیگر، یک ناحیه بی‌هنجاری منفی ارتفاع ژئوپتانسیلی در عرض‌های ۵۰ تا ۷۰ درجه شمالی در شمال شرق اقیانوس اطلس، شمال غرب آسیا و کشور روسیه وجود دارد که این ناوه عمیق باعث نفوذ جریانات از عرض‌های بالاتر به نیمه شمالی ایران می‌شود. براساس شکل ۳-ب مربوط به بازه زمانی دوره آلوده، بندال موجود در عرض‌های میانی اقیانوس کمی به سمت شرق پیشروی کرده است و هسته پرارتفاع واقع در غرب اروپا نیز در حین انتقال به شرق، ضعیف‌تر شده و محور آن به سمت شمال شرق منحرف شده است. این بی‌هنجاری مثبت که موجب راندن بی‌هنجاری کم‌ارتفاع واقع در شمال غرب آسیا به عرض‌های شمالی‌تر شده است، روی اروپا و دریای مدیترانه مستقر است و مانند سدّی با منحرف کردن جریانات غربی به سمت عرض‌های بالاتر، مانع نفوذ آنها به سمت شرق می‌شود.

مطابق نقشه بی‌هنجاری میدان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال، در دوره هوای آلوده شماره ۲ نیز مانند دوره شماره ۳، پیش از شروع دوره، محور هسته جت جنب‌قطبی مستقر در شمال شرق اطلس به دلیل وجود پشته ارتفاعی واقع در شرق اقیانوس اطلس و جنوب غرب اروپا، متمایل به سمت جت جنب‌حاره‌ای است که به این ترتیب می‌تواند موجب تقویت این جت شود. در این بازه زمانی، جت جنب‌حاره در عرض‌های ۱۰ تا ۳۵ درجه

می‌رود انحراف محور یکی از هسته‌های جت جنب‌قطبی به سمت جت جنب‌حاره‌ای موجب تقویت جت جنب‌حاره‌ای شود (شکل آورده نشده است). اما در شکل ۲-ج مربوط به دوره هوای آلوده، به دلیل گسترش پشته ارتفاعی روی جنوب اروپا، محور هسته جت جنب‌قطبی که نسبت به بازه زمانی قبل ضعیف‌تر نیز شده است، به سمت شمال شرق متمایل و از جت جنب‌حاره‌ای جدا شده است. همچنین در این بازه زمانی، سواحل جنوبی دریای خزر با وجود اینکه نسبت به بازه زمانی قبل، سرعت‌های بیشتری در این تراز دارند، در شمال ورودی هسته جت واقع بر شرق ایران قرار دارند. به بیان دیگر، در این دوره نیز پیوستن پرفشار آزرز به زبانه‌های پرفشار سبیری و گسترش بندال واقع در شمال غرب آفریقا، که محورش به سمت شمال شرق است، باعث انحراف جریان‌ها به سمت شمال غرب اروپا شده‌اند.

در دوره شماره ۲ از دوره‌های هوای آلوده (جدول ۱)، بیشترین همبستگی با شاخص مثبت NAO نسبت به دیگر دوره‌های متناظر وجود دارد که در آنها نیز شرایط فاز مثبت NAO غالب بوده است. در بازه زمانی پیش از دوره آلوده، الگوی ضعیف فاز منفی NAO روی اقیانوس اطلس دیده می‌شود (شکل ارائه نشده است). همچنین یک ناحیه با بی‌هنجاری منفی فشار روی شمال غرب آسیا و روسیه واقع است که زبانه‌های آن روی منطقه ایران نیز گسترش دارد و نشان‌دهنده این است که پرفشار سبیری نسبت به میانگین بلندمدت خود ضعیف‌تر است و در این نواحی به‌طور میانگین حرکت‌های صعودی انتظار می‌رود. در بازه زمانی مربوط به دوره آلوده (شکل ۳-الف)، الگوی فاز مثبت NAO روی اقیانوس اطلس دیده می‌شود. به علاوه، یک کمربند از بی‌هنجاری مثبت فشار، نواحی حاره‌ای و جنب‌حاره‌ای را دربرگرفته است. این بی‌هنجاری از اقیانوس اطلس شروع و تا آسیای میانه پیش رفته است و هسته آن روی جنوب اروپا و شمال دریای



شکل ۳. میانگین بی‌هنجاری‌های (الف) فشار سطح زمین (برحسب پاسکال) و (ب) ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (برحسب ژئوپتانسیل‌متر) برای دوره آلوده ۲ نسبت به میانگین بلندمدت زمستانی. رنگ‌های گرم، بی‌هنجاری مثبت و رنگ‌های سرد بی‌هنجاری منفی را نشان می‌دهند.

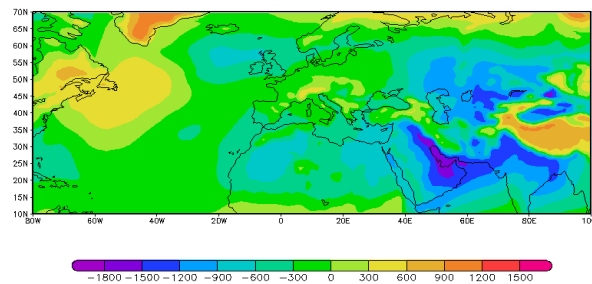
بی‌هنجاری مثبت فشار در منطقه ایران، بی‌هنجاری منفی رطوبت ویژه و دما در این دوره (شکل آورده نشده است)، سبب ایجاد یک ناحیه سرد و خشک همراه با حرکت‌های نزولی شده است که می‌تواند باعث وارونگی دما و انباشت آلاینده‌ها در این منطقه باشد.

دوره شماره ۴ از دوره‌های هوای آلوده (جدول ۱) کمترین ضریب همبستگی را با شاخص NAO دارد. الگوهای میانگین بی‌هنجاری کمیت‌های مورد نظر مربوط به این دوره شباهت بسیار زیادی به الگوهای دوره هوای آلوده شماره ۲ دارد (شکل‌ها آورده نشده است). در این دوره نیز مانند دوره شماره ۲، در بازه زمانی استقرار هوای آلوده، فاز مثبت NAO روی اقیانوس اطلس دیده می‌شود و نواری از بی‌هنجاری مثبت فشار و ارتفاع ژئوپتانسیلی در عرض‌های جنب‌حاره و میانی گسترده است که مانع جریان‌های غربی می‌شود و آنها را وادار به عبور از شمال

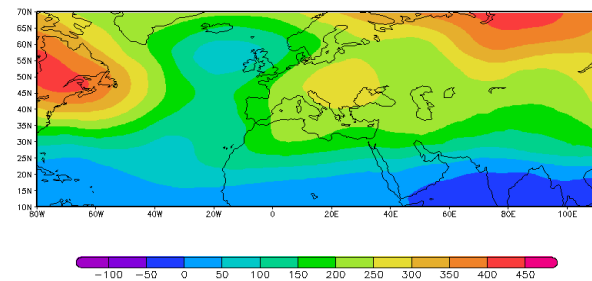
شمالی از اقیانوس اطلس تا آسیای میانه گسترش داشته است و سواحل شمالی و شمال‌شرق ایران نیز در لبه‌های خروجی شمال هسته جت جنوب‌غرب آسیا واقع شده‌اند. در بازه زمانی دوره هوای آلوده نیز مانند دوره شماره ۳، جت جنب‌قطبی از جت جنب‌حاره جدا شده است و راستای جنوب‌غربی-شمال‌شرقی دارد. از سوی دیگر، هسته‌های جت جنب‌حاره کمی ضعیف‌تر شده‌اند و نسبت به بازه زمانی پیش از دوره آلوده، جابه‌جایی اندکی به سمت شرق دارند (شکل ارائه نشده است). بنابراین، با تضعیف جت جنب‌حاره و جدا شدن جت جنب‌قطبی از آن، شرایط بروز آلودگی هوا در سواحل جنوبی دریای خزر فراهم شده است. به‌طور کلی، در این دوره نیز مشابه دوره‌های ۱ و ۳، انحراف به سمت شمال‌شرق محور هسته پراارتفاع واقع در غرب اروپا موجب انحراف جریانات غربی به سمت عرض‌های بالاتر شده است. همچنین وجود

در بررسی دوره ۵ از دوره‌های هوای آلوده، مشاهده می‌شود قبل از شروع دوره، به‌طور میانگین الگوی فاز منفی NAO روی اقیانوس اطلس مستقر است (شکل الف)، همچنان الگوی فاز منفی NAO اما به‌صورت ضعیف‌تر حاکم است. شایان ذکر است مطابق جدول ۱، با در نظر گرفتن تأخیر زمانی، تعداد روزهایی که فاز مثبت NAO وجود داشته، بیشتر از روزهای فاز منفی است، ولی مقادیر شاخص‌های NAO در این بازه زمانی نشان‌دهنده

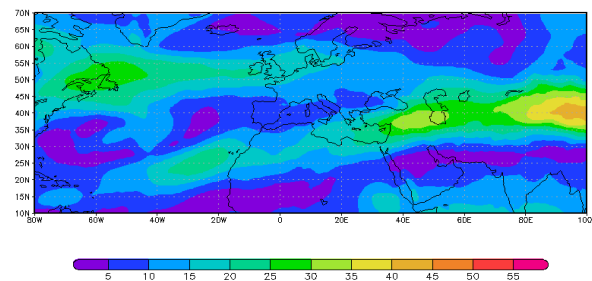
این مناطق به سمت شمال و شمال‌غرب اروپا می‌کند. پیش از شروع این دوره نیز جت جنب‌قطبی تا حدی جت جنب‌حاره‌ای را تقویت می‌کند و سواحل جنوبی دریای خزر در شمال ورودی هسته جت جنب‌حاره‌ای قرار دارد. در بازه زمانی هوای آلوده، مانند دوره‌های ۲ و ۳، جت جنب‌قطبی از جت جنب‌حاره‌ای جدا شده است و سواحل جنوبی دریای خزر، نسبت به بازه زمانی قبل، سرعت‌های کمتری در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال دارند و انتظار می‌رود تهویه کمتری در این مناطق صورت گیرد.



(الف)



(ب)



(ج)

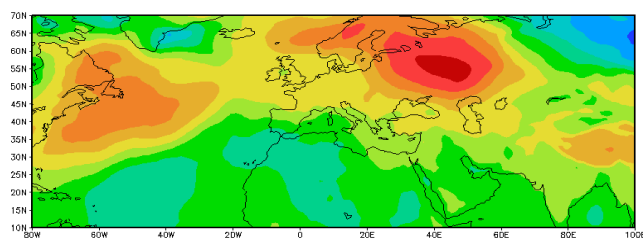
شکل ۴. مانند شکل ۱ ولی برای دوره هوای آلوده ۵.

نقشه میانگین بی‌هنجاری میدان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال، با توجه به اینکه این دوره هوای آلوده در فصل پاییز اتفاق افتاده است، جت جنب‌حاره نسبت به دیگر دوره‌ها که در فصل زمستان رخ داده‌اند، در عرض‌های بالاتری قرار دارد. در دوره هوای آلوده (شکل ۴-ج)، سواحل جنوبی دریای خزر در بخش جنوبی خروجی یکی از هسته‌های این جت واقع شده است که در نتیجه آن، حرکات نزولی در این سواحل انتظار می‌رود.

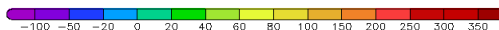
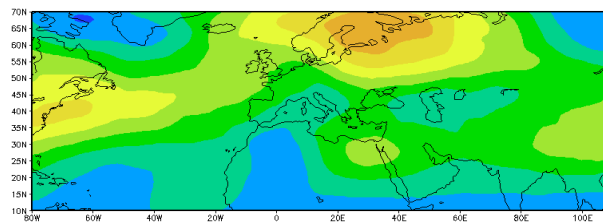
۲-۳ دوره‌های هوای سالم

در دوره‌های ۱، ۳ و ۵ از دوره‌های هوای سالم (جدول ۱)، الگوی فاز مثبت NAO بیشتر حاکم بوده است. در بازه زمانی پیش از شروع دوره هوای سالم ۱، الگوی فشار سطح بیانگر فاز منفی NAO است و پرفشار سبیری نسبت به میانگین بلندمدت خود قوی‌تر است (بدون شکل). در ایران، به‌غیر از نوار غربی کشور، در بقیه مناطق بی‌هنجاری

آن است که اغلب این مقادیر مثبت، کوچک‌تر از ۰/۵ و نزدیک به صفر است؛ در نتیجه، مشاهده الگوی ضعیف فاز منفی NAO به‌طور میانگین در این بازه زمانی غیرمنطقی نیست. در این دوره، برخلاف معمول، هسته پرفشار آزرورز در عرض‌های میانی و شمال شرق اقیانوس اطلس واقع شده است. در نقشه میانگین بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پیش از شروع دوره هوای آلوده، یک بندال امگا مشاهده می‌شود که هسته پراارتفاع آن در شمال غرب آسیا است و منطقه ایران در لبه خارجی این مرکز پراارتفاع قرار دارد (شکل آورده نشده است). مطابق شکل ۴-ب مربوط به دوره هوای آلوده، این بندال در حال از بین رفتن است. با تضعیف ناحیه کم‌ارتفاع واقع در شرق مرکز پراارتفاع، بادهای عبوری از جنوب این منطقه با بی‌هنجاری بزرگ‌تر و مثبت ارتفاع مصادف می‌شوند و ناحیه پراارتفاعی که هسته آن در شمال دریای مدیترانه قرار دارد، مانع عبور جریان‌ها از روی این منطقه می‌شود. در



(الف)



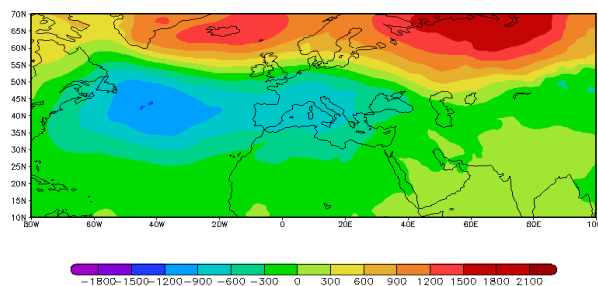
(ب)

شکل ۵. مانند شکل ۳ ولی برای دوره هوای سالم ۱.

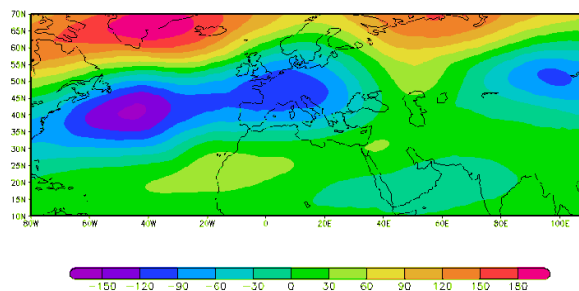
این منطقه انتظار می‌رود. الگوی میانگین بی‌هنجاری میدان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال بسیار مشابه دوره‌های هوای آلوده ۲، ۳ و ۴ است؛ از این رو، نقشه‌های میدان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال مربوط به این دوره آورده نشده است. پیش از شروع دوره، یکی از هسته‌های جت جنب‌حاره‌ای روی شمال‌شرق آفریقا و شمال عربستان مستقر است و سواحل جنوبی دریای خزر در بخش شمالی ورودی هسته این جت قرار دارد. وجود بی‌هنجاری مثبت دما روی اقیانوس اطلس و تشکیل پشته ارتفاعی قوی در این منطقه موجب شده است تا جت جنب‌قطبی از بالای این منطقه عبور کرده و محور آن نیز از هسته جت به سمت جت جنب‌حاره باشد که این امر می‌تواند تقویت جت جنب‌قطبی را به دنبال داشته باشد. در دوره هوای سالم، جت جنب‌حاره نسبت به بازه زمانی پیش از دوره قوی‌تر شده است و در نتیجه، حرکات صعودی بیشتر در سواحل جنوبی دریای خزر انتظار می‌رود. همچنین جت جنب-قطبی از جت جنب‌حاره جدا شده است و محور آن به سمت شمال‌شرق انحراف دارد. بنابراین، قرار گرفتن پرفشار آزرورز در اقیانوس اطلس در عرض‌های بالاتر نسبت به حالت میانگین و انحراف محور آن به سمت شمال‌شرق و همچنین پیوستن زبانه آن به زبانه پرفشار سبیری موجب شده است این دو مانند مانع در عرض‌های میانی عمل کرده و باعث مداری شدن جریان‌ها شوند.

در بازه زمانی پیش از شروع دوره هوای سالم ۲، الگوی فاز منفی NAO روی اقیانوس اطلس مشاهده می‌شود به گونه‌ای که محور پرفشار آزرورز و کم‌فشار ایسلند به سمت شمال‌شرق متمایل است (بدون شکل). از طرفی، بی‌هنجاری مثبت فشار در شمال اقیانوس اطلس و منطقه گرینلند با نواری از بی‌هنجاری‌های مثبت به منطقه بی‌هنجاری مثبت فشار در ناحیه سبیری پیوسته است. نواحی مرکزی و سواحل دریای خزر نیز بی‌هنجاری منفی ضعیف فشار دارند. مطابق شکل ۶-الف، در دوره هوای

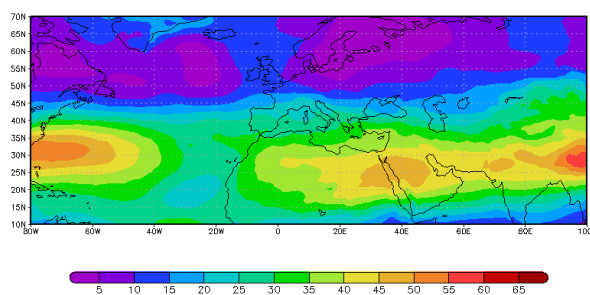
منفی فشار حاکم است. شکل ۵-الف مربوط به دوره هوای سالم ۱، وجود الگوی ضعیف NAO مثبت را روی اقیانوس اطلس نشان می‌دهد. در این قسمت نیز شایان ذکر است، با در نظر گرفتن تأخیر زمانی، الگوی مثبت NAO به‌طور کامل غالب نبوده است و تعداد روزهای زیادی همراه با شاخص منفی NAO هستند؛ بنابراین، وجود چنین الگویی غیرمنطقی نیست. در این دوره، محور پرفشار آزرورز اندکی انحراف به سمت شمال‌شرق دارد. این وضعیت مشابه دوره هوای آلوده شماره ۱ است، با این تفاوت که در دوره هوای سالم ۱، پرفشار آزرورز در عرض‌های بالاتری دیده می‌شود. قرار گرفتن پرفشار آزرورز در عرض‌های بالاتر از حالت معمول و انحراف محور آن به سمت شمال‌غرب اروپا و پیوستن آن به بی‌هنجاری مثبت واقع در شمال‌غرب آسیا مانند سدّی در عرض‌های میانی عمل کرده و مانع نفوذ جریان‌ها به عرض‌های بالاتر شده است که در نتیجه آن، جریان‌ها امکان عبور از روی جنوب اروپا و دریای مدیترانه را ندارند. پیش از شروع این دوره، بی‌هنجاری مثبت ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روی ایران مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده وجود هسته گرم مرکز کم‌فشار در این منطقه است که باعث به وجود آمدن پشته ارتفاعی شده است (شکل آورده نشده است). در بازه زمانی دوره هوای سالم (شکل ۵-ب) از میزان بی‌هنجاری‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی کاسته شده و وجود نوار پراارتفاع از سواحل شرقی آمریکای شمالی تا شمال‌غرب آسیا، باعث ایجاد مانع در برابر نفوذ جریان‌ها به عرض‌های بالاتر و انحراف نصف‌النهاری آنها می‌شود که از مشخصه‌های فاز مثبت NAO است. در منطقه ایران، به‌ویژه شهرهای ساحل جنوبی دریای خزر و شمال‌غرب ایران، بی‌هنجاری مثبت ارتفاع ژئوپتانسیلی کاهش یافته است که می‌تواند ناشی از کاهش بی‌هنجاری مثبت دما در این ناحیه باشد (شکل ارائه نشده است). با تضعیف پشته، نفوذ جریان‌ها بیشتر به



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶. مانند شکل ۱ ولی برای دوره هوای سالم ۲.

ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پیش از شروع دوره هوای سالم، یک ناحیه بی‌هنجاری مثبت ارتفاع دیده می‌شود که محور آن جنوب‌غربی-شمال‌شرقی است و از شمال قاره آفریقا تا شمال‌شرق ایران ادامه دارد و نیمه شمالی ایران در مرزهای بیرونی آن قرار گرفته است (بدون شکل). وجود این ناحیه مانع نفوذ جریانات به سمت شرق و موجب انحراف نصف‌النهاری سامانه‌ها و جریانات به سمت عرض‌های بالاتر و شمال‌غرب اروپا می‌شود. همچنین یک ناحیه با بی‌هنجاری منفی ارتفاع به موازات

سالم همچنان الگوی NAO منفی حاکم است. بی‌هنجاری مثبت فشار واقع بر ناحیه سبیری به عرض‌های پایین‌تر منتقل شده و منطقه با بی‌هنجاری منفی فشار روی غرب اروپا را نیز به عرض‌های پایین هدایت کرده به طوری که محور پرفشار آزرز در این بازه زمانی مداری شده است. به غیر از جنوب‌غرب و جنوب‌شرق ایران، بقیه مناطق کشور بی‌هنجاری منفی ضعیف فشار دارند؛ لذا در این مناطق حرکات صعودی انتظار می‌رود که موجب انتقال و پخش آلاینده‌ها می‌شود. در نقشه میانگین بی‌هنجاری

در نتیجه، مداری و قوی تر شدن جریانات، انتظار بهبود کیفیت هوا در مناطق جریان سو می رود.

الگوهای میانگین بی‌هنجاری فشار و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مربوط به دوره هوای سالم ۸، مشابه دوره هوای سالم ۲ است. در دوره هوای سالم ۸ نیز با مداری شدن محور کم فشار ایسلند و پرفشار آزرورز از یک سو و تضعیف نوار بی‌هنجاری مثبت ارتفاع ژئوپتانسیلی در عرض‌های جنب‌حاره و میانی از سوی دیگر، جریاناتی که نسبت به بازه زمانی پیش از شروع دوره مداری تر شده اند، به سهولت از روی این مناطق عبور می کنند. در نقشه میانگین بی‌هنجاری میدان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال، مشابه دوره هوای آلوده ۵ که در فصل پاییز بوده است، در این دوره و همچنین دوره‌های هوای سالم ۵، ۶ و ۷ موقعیت جت جنب‌حاره نسبت به دیگر دوره‌ها که در فصل زمستان رخ داده اند، در عرض‌های بالاتری قرار دارد. پیش از شروع دوره ۸ هسته‌های جت جنب‌حاره از روی جنوب دریای خزر عبور کرده اند که در اثر آن شمال غرب و شمال شرق ایران بیشترین سرعت را در این تراز دارد و در مناطق فوق تهویه آلاینده‌ها به بیشترین مقدار خود رسیده است، اما در دوره هوای سالم، هسته جت جنب‌حاره علاوه بر پیشروی به سمت شرق، اندکی به عرض‌های پایین تر آمده است و سواحل جنوبی دریای خزر در امتداد محور جت قرار گرفته اند (شکل ارائه نشده است). از آنجا که بیشینه سرعت در محور جت واقع است، انتظار می رود در این بازه زمانی بیشترین تهویه آلاینده‌ها در سواحل جنوبی دریای خزر رخ دهد.

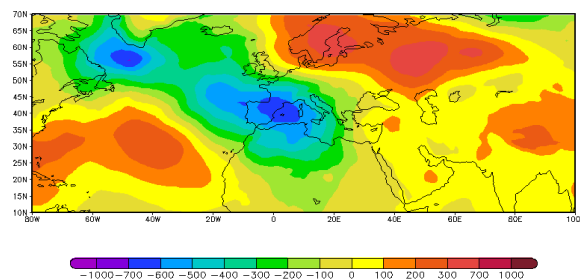
پیش از شروع دوره هوای سالم ۳، NAO به طور میانگین در فاز مثبت بوده و پرفشار سیبری نیز نسبت به میانگین بلندمدت، قوی تر و یکی از زبانه‌های آن تا نیمه شمالی کشور کشیده شده است؛ بنابراین، این وضعیت می تواند شرایط پایداری را به ویژه در سواحل جنوبی دریای خزر فراهم سازد (شکل ارائه نشده است). در دوره

ناحیه با بی‌هنجاری مثبت وجود دارد که از عرض‌های جنب‌حاره اقیانوس اطلس شروع شده و تا شمال غرب قاره اروپا ادامه یافته است. در دوره استقرار هوای سالم (شکل ۶-ب)، ناحیه با بی‌هنجاری مثبت ذکر شده نسبت به بازه زمانی پیش از شروع دوره بسیار ضعیف شده است و هم محور آن و هم کم ارتفاع واقع بر شرق اقیانوس اطلس و غرب اروپا مداری شده و موجب ورود سامانه‌ها و جریانات از اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه به سمت شرق می شود.

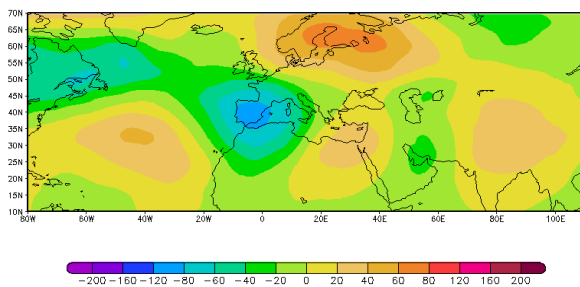
در نقشه میانگین بی‌هنجاری مربوط به میدان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال پیش از شروع دوره هوای سالم (شکل ارائه نشده است)، نیمه شمالی ایران در بخش شمالی ورودی جت جنب‌حاره‌ای قرار گرفته است و در این ناحیه و شمال عربستان و به میزان بیشتر، در شمال شرق قاره آفریقا حرکت‌های نزولی و نشست هوا انتظار می رود. به طور کلی در این تراز، روی نیمه شمالی ایران، سرعت‌های کم حاکم است. به علاوه، جت جنب‌قطبی به عرض‌های پایین تر منتقل شده است و به دلیل وجود بی‌هنجاری مثبت ارتفاع ژئوپتانسیلی در شمال آفریقا، محور جت انحراف نصف‌النهاری به سمت جنوب غرب و غرب اروپا دارد. در دوره هوای سالم (شکل ۶-ج)، محور جت جنب‌قطبی مداری است و با پیوستن به جت جنب‌حاره‌ای در یک راستا قرار گرفته اند که مطابق الگوی فاز منفی NAO است. در این بازه زمانی، ایران در لبه شمالی بخش خروجی یکی از هسته‌های جت جنب‌قطبی واقع در مرکز عربستان قرار گرفته است و حرکت‌های صعودی در این ناحیه انتظار می رود. همچنین نیمه شمالی جت (شکل ۶-ج) نسبت به پیش از شروع دوره، سرعت‌های بیشتری دارد که موجب انتقال جرم بیشتر در ترازهای بالا و همگرایی در سطح زمین و در نتیجه، صعود بیشتر هوا می شود. بنابراین، در این دوره با مداری شدن محور پرفشار آزرورز و ناحیه پراارتفاع روی شمال آفریقا و

مثبت فشار روی سواحل جنوبی دریای خزر کاهش محسوسی داشته است که می‌تواند به بهبود کیفیت هوا کمک کند. در نقشه میانگین بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پیش از دوره هوای سالم ۳، منطقه ایران در مرکز بی‌هنجاری منفی ارتفاع میان دو بندال امگا محصور شده است و بادها در حال فرارفت هوای گرم‌تر از سمت شرق و جنوب شرق به این منطقه هستند (شکل ۷-آوردن نشده است). در دوره هوای سالم (شکل ۷-ب)، محور مرکز کم ارتفاع واقع بر جنوب غرب اروپا از حالت شمال به جنوب به سمت جنوب شرق

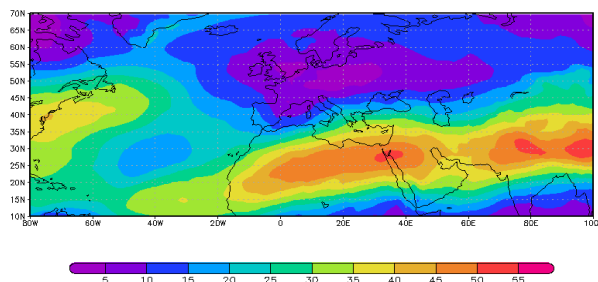
هوای سالم (شکل ۷-الف)، همچنان الگوی فاز مثبت NAO اما به طور ضعیف‌تر روی اقیانوس اطلس مشاهده می‌شود. نوار با بی‌هنجاری منفی فشار که در شمال اقیانوس اطلس وجود دارد، نسبت به بازه زمانی پیش از دوره، وسیع‌تر شده و نواحی بیشتری را در شمال غرب اقیانوس اطلس، جنوب غرب اروپا و شمال آفریقا پوشش داده است. گستردگی این منطقه با بی‌هنجاری منفی فشار و متمایل شدن محور آن به سمت جنوب شرق، پرفشار آزرز و پرفشار سبیری را که نسبت به قبل ضعیف‌تر شده‌اند، محدودتر کرده است. متعاقب آن، بی‌هنجاری



(الف)



(ب)



(ج)

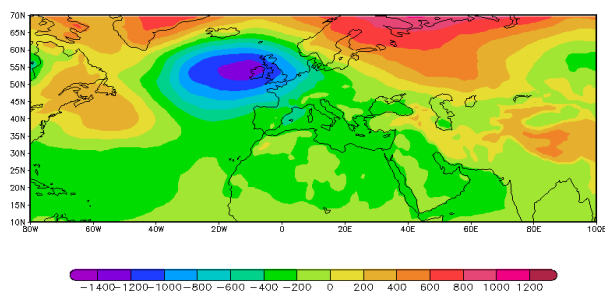
شکل ۷. مانند شکل ۱ ولی برای دوره هوای سالم ۳.

سالم (شکل ۸-ب)، محور مرکز کم‌ارتفاع در شرق اقیانوس اطلس به سمت شمال شرق منحرف شده است و پشته ارتفاعی واقع در شمال دریای خزر را اندکی به عرض‌های بالاتر می‌راند که موجب کاهش بی‌هنجاری مثبت ارتفاع روی ایران می‌شود. الگوی میانگین بی‌هنجاری سرعت‌های تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال این دوره مشابه دوره هوای سالم ۳ است (شکل آورده نشده است). پیش از شروع دوره، نیمه شمالی ایران در شمال ورودی هسته جت واقع بر جنوب آسیای میانه قرار گرفته است و مانند دوره هوای سالم ۳، سواحل جنوبی دریای خزر سرعت‌های کمی در این تراز دارند. در دوره استقرار هوای سالم، این سرعت‌ها افزایش یافته‌اند و ناحیه فوق در شمال خروجی هسته جت واقع بر عربستان قرار گرفته است که می‌تواند از حرکت‌های صعودی بیشتری برخوردار باشد. بنابراین، در این دوره قرارگرفتن هسته پرفشار آزرز در شمال شرق اقیانوس اطلس و انحراف محور ناوه مستقر روی این ناحیه به سمت شمال شرق موجب شده است پشته ارتفاعی بنیاد امگایی که هسته آن در شمال دریای خزر قرار دارد، ضمن تضعیف به عرض‌های بالاتر رفته و در نتیجه، مسیر عبور جریانات را تسهیل کند.

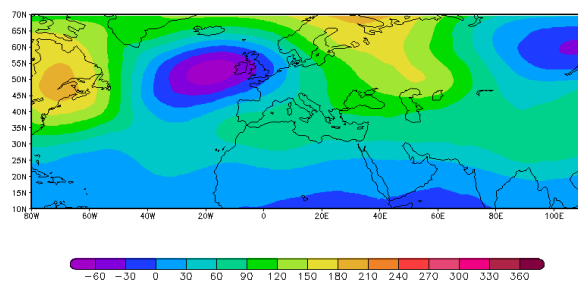
پیش از شروع دوره هوای سالم ۵، الگوی فاز منفی NAO روی اقیانوس اطلس دیده می‌شود (شکل آورده نشده است). به جز بخش‌هایی در نیمه غربی ایران، در بقیه نواحی بی‌هنجاری منفی فشار وجود دارد. در دوره هوای سالم (شکل ۹-الف)، همچنان به‌طور میانگین الگوی فاز منفی NAO حاکم است. شایان ذکر است مطابق جدول ۱، اگرچه تعداد روزهایی که فاز مثبت NAO وجود داشته بیشتر از روزهای فاز منفی است، ولی مقادیر شاخص‌های NAO در این بازه زمانی بیانگر آن است که بیشتر این مقادیر مثبت، کوچک‌تر از ۰/۵ و نزدیک به صفر هستند؛ در نتیجه، مشاهده الگوی ضعیف فاز منفی NAO به‌طور

متماایل شده است و در عین حال، بندها به شدت تضعیف شده‌اند. مطابق نقشه میانگین بی‌هنجاری میدان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال پیش از شروع دوره هوای سالم، در سواحل جنوبی دریای خزر سرعت‌های کم در این تراز وجود دارد. اما در دوره هوای سالم (شکل ۷-ج)، علاوه بر اینکه سواحل جنوبی دریای خزر در شمال خروجی هسته جت واقع بر روی عربستان و شمال آفریقا قرار گرفته‌اند، از سرعت‌های زیادی نیز برخوردار هستند که می‌تواند به حرکت‌های صعودی بیشتر و تهویه آلاینده‌ها کمک کند. بنابراین، در این دوره می‌توان گفت با انحراف به سمت جنوب شرق کم‌فشار ایسلند و ناوهای که روی این منطقه شکل گرفته است و همچنین تضعیف پشته واقع بر جنوب شرق اروپا و شمال شرق آفریقا، جریانات راحت‌تر از بازه زمانی قبل از روی این مناطق عبور کرده و به سمت شرق می‌روند.

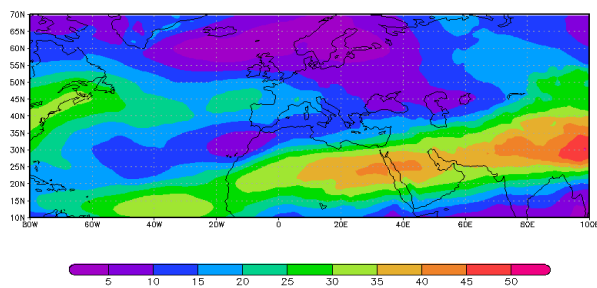
پیش از شروع دوره هوای سالم ۴، فاز منفی NAO در اقیانوس اطلس حاکم است و روی ایران نیز به‌خصوص نیمه غربی و سواحل جنوبی دریای خزر بی‌هنجاری مثبت فشار دیده می‌شود (شکل آورده نشده است). در دوره هوای سالم (شکل ۸-الف)، همچنان به‌طور میانگین الگوی فاز منفی به چشم می‌خورد. نکته شایان توجه در این شکل آن است که مرکز پرفشار آزرز در عرض‌های میانی و در شمال شرق اقیانوس اطلس متمرکز و محور آن مداری است؛ در نتیجه، بی‌هنجاری‌های مثبت فشار به عرض‌های بالا رانده شده‌اند. در منطقه ایران بی‌هنجاری مثبت فشار کاهش پیدا کرده است و انتظار می‌رود در این منطقه حرکات صعودی بیشتری نسبت به بازه زمانی قبل رخ دهد. مطابق نقشه میانگین بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پیش از شروع دوره (شکل ارائه نشده است)، نیمه شمالی ایران در لبه خارجی مرکز پرفشار یک بنیاد امگاشکل واقع شده است که هسته آن در شمال دریای خزر قرار دارد. در دوره هوای



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸. مانند شکل ۱ ولی برای دوره هوای سالم ۴.

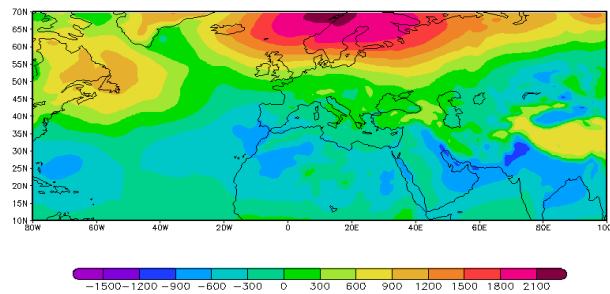
نشان می‌دهد. با بررسی شاخص کیفیت هوا در این بازه زمانی، مشخص شد این شاخص با اینکه در محدوده سالم قرار دارد ولی مقادیر آن نزدیک به مرز ناسالم است. در نقشه میانگین بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پیش از شروع دوره (شکل ارائه نشده است)، میزان بی‌هنجاری ارتفاع در نواحی مرکزی ایران نسبت به دوره هوای سالم (شکل ۹-ب) اندکی بیشتر است. مطابق شکل ۹-ب، گسترش ناحیه کم‌ارتفاع واقع در شمال شرق اقیانوس اطلس که محور آن نیز به سمت جنوب شرق

میانگین در این بازه زمانی غیرمنطقی نیست. در شکل ۹-الف نواری از بی‌هنجاری مثبت فشار در عرض‌های میانی و جنب‌قطب دیده می‌شود که از اقیانوس اطلس شروع شده است و تا آسیا ادامه دارد. همچنین نواری از بی‌هنجاری منفی فشار در عرض‌های حاره‌ای و جنب‌حاره‌ای وجود دارد که در اثر آن وجود جریانات مداری در این مناطق انتظار می‌رود. علاوه بر نواحی غربی ایران، میزان بی‌هنجاری فشار در سواحل جنوبی دریای خزر، نسبت به بازه زمانی پیش از دوره، اندکی افزایش

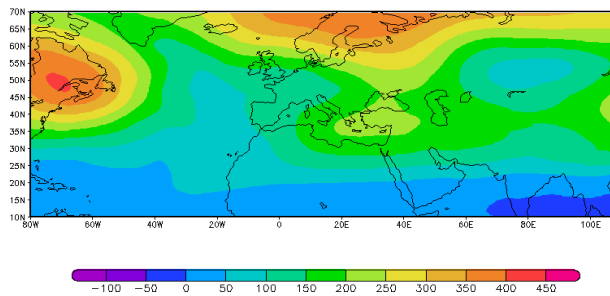
ایسلند و پرفشار آزرز در دوره هوای سالم نسبت به بازه زمانی پیش از دوره، انحراف به سمت شمال شرق دارند. در نقشه میانگین بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال پیش از شروع دوره، ایران و به خصوص نیمه شمالی آن در محدوده پشته ارتفاعی بندال امگایی واقع شده است که در شمال اروپا قرار دارد. در دوره هوای سالم، این بندال ضعیف‌تر شده و محور ناحیه کم‌ارتفاع این بندال واقع در شرق اقیانوس اطلس کمی به سمت شمال شرق منحرف شده و پشته ارتفاعی بندال را محدودتر کرده است. با انحراف محور کم‌ارتفاع شرق اقیانوس اطلس و ضعیف‌تر شدن بندال، جریانات نسبت به بازه زمانی پیش از دوره، مداری‌تر می‌شوند. در این دوره نیز مشابه دوره‌های هوای سالم ۵، ۶ و ۸ با عبور محور جت جنب‌حاره از روی سواحل جنوبی دریای خزر شرایط برای تهویه بیشتر آلاینده‌ها مهیا می‌شود.

انحراف دارد و همچنین تقویت و گسترش ناحیه کم‌ارتفاع واقع در آسیای میانه موجب شده است ناحیه پراارتفاع واقع در شمال غرب اروپا، به شدت محدود و مسیر برای جریان‌های مداری روی این منطقه هموار شود. به علاوه، یک نوار از بی‌هنجاری‌های مثبت ارتفاع در عرض‌های میانی و جنب‌قطب دیده می‌شود که تا شمال غرب اقیانوس اطلس ادامه دارد و محور آن تقریباً مداری است و مانند سدّی در مقابل نفوذ جریانات به عرض‌های بالاتر عمل می‌کند. الگوی میانگین بی‌هنجاری میدان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال مربوط به این دوره مشابه دوره هوای سالم ۸ است که پیش‌تر به آن اشاره شد.

از آنجا که الگوهای بی‌هنجاری مربوط به دوره هوای سالم ۶ بسیار شبیه به دوره هوای سالم ۵ است، از ارائه شکل‌ها و توضیحات آنها صرف‌نظر می‌شود. الگوهای میانگین بی‌هنجاری فشار دوره هوای سالم ۷ نیز مشابه دوره هوای سالم ۵ است با این تفاوت که محور کم‌فشار



(الف)



(ب)

شکل ۹. مانند شکل ۱ ولی برای دوره هوای سالم ۵.

۴ نتیجه گیری

در این پژوهش برای بررسی نقش NAO بر کیفیت هوای تهران، ابتدا با استفاده از شاخص کیفیت هوا دوره‌های سالم و آلوده رخ داده در پاییز و زمستان سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ تعیین و سپس ضریب همبستگی بین شاخص کیفیت هوای هر دوره با شاخص روزانه NAO، با در نظر گرفتن تأخیرهای زمانی مختلف محاسبه شد. نتایج نشان‌دهنده آن است که در پنج دوره هوای آلوده، به غیر از دوره ۱، شاخص NAO اغلب مثبت بوده است؛ حال آنکه در هشت دوره هوای سالم تفاوت درخور توجهی بین رخداد فازهای مثبت و منفی NAO وجود ندارد. با این حال، براساس نتایج می‌توان گفت که به غیر از دوره‌های هوای سالم ۱، ۳ و ۵، در بقیه دوره‌ها، به طور نسبی فاز منفی NAO بیشتر رخ داده است. از آنجا که سال‌های مورد مطالعه در این پژوهش به علت نبود داده‌های شاخص کیفیت هوا طولانی نبودند، لذا نمی‌توان الگوی ثابت و قابل استناد آماری ارائه کرد؛ اما می‌توان نتیجه گرفت طی ده سال مورد مطالعه، در بیشتر دوره‌های آلوده‌ای که با شاخص NAO همبستگی معنادار داشته‌اند، فاز مثبت و در دوره‌های سالم، فاز منفی NAO رخ داده است. در ادامه، نقشه‌های بی‌هنجاری کمیت‌های هواشناختی به کاررفته، نسبت به میانگین بلندمدت، برای تمامی دوره‌های آلوده و سالم تعیین شده بررسی شدند تا چگونگی تأثیر NAO بر شرایط هواشناختی هریک از این دوره‌ها مشخص شود. با این کار و براساس نتایج بررسی همدیدی و دینامیکی سعی شد نتیجه‌گیری کلی از اثر NAO بر شرایط هواشناختی کیفیت هوای شهر تهران به دست آید.

از بررسی وضعیت همدیدی و تحلیل دینامیکی نقشه‌های بی‌هنجاری کمیت‌های به کاررفته برای هریک از دوره‌های هوای آلوده و سالم به طور کلی می‌توان گفت نوع جهت‌گیری محور کم‌فشار ایسلند و پرفشار آزرورز در اقیانوس اطلس و همچنین محور ناوه‌ها و پشته‌های ارتفاعی

تراز میانی در این نواحی برای کیفیت هوای مناطق مختلف واقع در جریان سو از اهمیت فراوانی برخوردار است؛ زیرا وضعیت‌های مختلف یا مانند سدی در برابر نفوذ جریانات غربی به سمت شرق عمل می‌کنند (مانند دوره‌های هوای آلوده ۱ و ۳) یا مسیر را برای عبور جریانات هموار می‌کنند (مانند دوره‌های هوای سالم ۱، ۳، ۵، ۶ و ۷). همان‌طور که در تعریف NAO و فازهای آن گفته شد، به طور معمول کم‌فشار ایسلند در شمال اقیانوس اطلس و پرفشار آزرورز در نواحی حاره‌ای و جنب‌حاره‌ای این اقیانوس قرار دارند. اما در مواردی از دوره‌های مورد بررسی مشاهده شد که ممکن است این دو سامانه فشاری تحت شرایطی، در عرض‌هایی خارج از حالت معمول قرار گیرند که این وضعیت هم در جهت جریان‌ها و هم در تهویه هوای مناطق پایین‌دست تأثیر بسزایی دارد (مانند دوره هوای آلوده ۵ و دوره‌های هوای سالم ۱ و ۴). لازم به تاکید است عوامل و سامانه‌های منطقه‌ای و بزرگ‌مقیاس متعددی در ایجاد هوای آلوده یا سالم مناطق گوناگون نقش دارند که دورپیوند NAO یکی از آنها است. بنابراین، در بررسی شرایط آلوده یا سالم هوا باید نقش پدیده‌های دیگر را نیز در نظر گرفت. از جمله این عوامل بزرگ‌مقیاس می‌توان به پرفشار سبیری اشاره کرد که در این مطالعه مشاهده شد شدت و ضعف این سامانه و موقعیت آن نسبت به حالت میانگین و همچنین نوع جهت‌گیری محور آن، نقش بسزایی در تضعیف یا تقویت اثرهای NAO دارد (مانند دوره‌های هوای آلوده ۱ و ۳).

نکته شایان ذکر دیگر این است که عوامل یادشده تأثیر بسزایی در شکل‌گیری و ساختار بندها به خصوص در عرض‌های جنب‌حاره‌ای و میانی و همچنین موقعیت جت‌های جنب‌حاره‌ای و جنب‌قطبی دارند. پشته‌های ارتفاعی که مانند حباب‌های با سرعت بسیار کم برای مدت به نسبت طولانی در یک منطقه مستقر می‌شوند و همچنین ناوه‌ها بر روی مسیر جریان‌ها که موجب فرارفت

در فاز مثبت است، جریانات جوی انحراف نصف‌النهاری داشته و موجب انتقال رطوبت و هوای گرم‌تر از عرض‌های جنب‌حاره اقیانوس اطلس به سمت شمال و شمال‌غرب اروپا می‌شوند. در این حالت، منطقه ایران شرایط خشک‌تر و سردتر از حالت معمول را تجربه کرده و در حبابی از سرعت‌های کم محبوس می‌شود که مانع تهویه آلاینده‌ها است (مانند دوره هوای آلوده ۲). از سوی دیگر، زمانی که NAO به‌طور غالب در فاز منفی است، با مداری شدن جریانات و افزایش انتقال رطوبت و دمای کمتر از اقیانوس اطلس به سمت شرق، مناطق جریان‌سوز هوای خنک‌تر و رطوبت بیشتری برخوردار می‌شوند و بادهای قوی‌تر این مناطق به انتقال و تهویه آلاینده‌ها کمک زیادی می‌کنند (مانند دوره هوای سالم ۲).

منابع

حافظی، م.، رضایی‌منش، م.، محب‌الحجه، ع. ر.، علی‌اکبری‌بیدختی، ع. ع. و نصراصفهان‌نی، م. ع.، ۱۳۹۴، کاربست شاخص‌های دوشاخه‌شدگی جت و شکست موج راسبی برای بررسی دوره آلودگی حاد تهران در آذرماه ۱۳۸۹: مجله ژئوفیزیک ایران، ۱، ۱۳۴-۱۴۹.

علی‌اکبری‌بیدختی، ع. ع. و شرعی‌پور، ز.، ۱۳۸۸، شرایط هواشناختی جو بالا و وضعیت حاد آلودگی هوا (مطالعه موردی: شهر تهران): مجله محیط‌شناسی، ۵۲، ۱-۱۴.

گزارش سالانه کیفیت هوای تهران در سال ۱۳۹۶ "QM97/02/01(U)/I"، اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۷.

Ahrens, C. D., 2013, *Meteorology Today*, 10th edition: Brooks/Cole, 642 pp.
Bacer, S., Christoudias, T., and Pozzer, A., 2016, Projection of North Atlantic Oscillation and its effect on tracer transport: *Atmospheric Chemistry and Physics*, **16**, 15581-15592.
Comrie, A. C., and Yarnal, B., 1992, Relationships between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone

دما و رطوبت می‌شوند، تأثیر می‌گذارند و اینکه منطقه مورد مطالعه در کدام قسمت از این سامانه‌های ارتفاعی قرار گیرد، در ایجاد دوره‌های با هوای آلوده و سالم نقش دارد. از طرفی، موقعیت مکانی جت‌ها و همچنین جهت‌گیری محور آنها نیز تحت تأثیر این عوامل است. در فصل زمستان که به دلیل افزایش گرادیان دمایی بین قطب و استوا تمام سامانه‌ها، از جمله جت جنب‌حاره‌ای و جت جنب‌قطبی به سمت نیمکره تابستانی جابه‌جا می‌شوند (آرنز، ۲۰۱۳)، مشاهده شد زمانی که NAO در فاز مثبت قرار دارد، جت جنب‌قطبی از جت جنب‌حاره‌ای جدا و محور آن به سمت شمال‌شرق است؛ اما زمانی که فاز منفی NAO روی اقیانوس اطلس حاکم است، جت جنب‌قطبی به جت جنب‌حاره‌ای می‌پیوندد و باعث تقویت آن می‌شود. حال اگر منطقه مورد مطالعه در شمال خروجی یا جنوب ورودی جت جنب‌حاره‌ای قرار گرفته باشد، حرکات صعودی در ترازهای پایین‌تر افزایش یافته و تهویه آلاینده‌ها بیشتر صورت می‌گیرد؛ اما اگر این منطقه در شمال ورودی یا جنوب خروجی این جت قرار گیرد، حرکات نزولی شدت می‌یابد و مانع تهویه آلاینده‌ها می‌شود. در فصل پاییز نیز مشاهده شد که جت جنب‌حاره‌ای به عرض‌های بالاتر (نسبت به فصل زمستان) رفته و در دوره‌های با هوای سالم غالباً سواحل جنوبی دریای خزر در امتداد محور این جت قرار می‌گیرند. بنابراین، با افزایش سرعت در ترازهای فوقانی جو، حرکات صعودی بیشتر در این مناطق انتظار می‌رود.

نتیجه دیگر پژوهش حاضر این است که وقتی NAO بیشترین همبستگی را با شاخص کیفیت هوا دارد و concentrations in metropolitan Pittsburgh, Pennsylvania: *Atmospheric Environment, Part B Urban Atmosphere*, **26**, 301-312.
Hafezi, M., Mohebalhojeh, A., Aliakbari-Bidokhti, A., Irannejad, P., Sabetghadam, S., 2017, On the relation between the large-scale tropospheric circulation and air quality in Tehran: *Journal of the Earth and Space Physics*, **43**(4), 83-95.

- Holton, J. R., 2004, *An Introduction to Dynamic Meteorology*: Academic Press, 535 pp.
- Hurrell, J. W., 1995, Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation: *Science*, **269**, 676–678.
- Hurrell, J. W., 1996, Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere temperature: *Geophysical Research Letters*, **23**, 665–668.
- Jerez, S., Jimenez-Guerrero, P., Montávez, J. P., and Trigo, R. M., 2013, Impact of the North Atlantic Oscillation on European aerosol ground levels through local processes: a seasonal model-based assessment using fixed anthropogenic emissions: *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13**, 11195.
- Jones, P. D., Jonsson, T., and Wheeler, D., 1997, Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland: *International Journal of Climatology*, **17**, 1433–1450.
- Khokhlov, V. N., and Romanova, A. V., 2011, NAO-induced spatial variations of total ozone column over Europe at near-synoptic time scale: *Atmospheric Environment*, **45**, 3360–3365.
- Marshall, J., Johnson, H., and Goodman, J., 2001, A study of the interaction of the North Atlantic Oscillation with ocean circulation: *Journal of Climate*, **14**, 1399–1421.
- Ragsdale, K. M., Barrett, B. S., and Testino, A. P., 2013, Variability of particulate matter (PM10) in Santiago, Chile by phase of the Madden-Julian Oscillation (MJO): *Atmospheric Environment*, **81**, 304–310.
- Rogers, J. C., 1984, The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the northern hemisphere: *Monthly Weather Review*, **112**, 1999–2015.
- Slonosky, V. C., and Yiou, P., 2001, Secular changes in the North Atlantic Oscillation and its influence on 20th century warming: *Geophysical Research Letters*, **28**, 807–810.

Impacts of NAO on the meteorological conditions of air quality in Tehran during 2006-2017

Elham Momenzadeh¹, Farhang Ahmadi-Givi^{2*} and Samaneh Sabetghadam³

¹M.Sc. Student, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran

²Associate Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran

³Assistant Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran

(Received: 30 July 2019, Accepted: 15 October 2019)

Summary

In this research, the possible effects of NAO, on Tehran air quality during 2007-2016 were investigated. First, the daily indices of air quality of Tehran in the autumn and winter seasons for the study period were applied to identify polluted and unpolluted periods. The 1th, 5th and 9th deciles of the air quality indices were chosen as the indicator for good, middle and bad air qualities. Based on these indices, five polluted and eight unpolluted periods were identified. Then, the daily indices of NAO and air quality of Tehran were used to calculate the Pearson correlation coefficients and discuss the relationships between air quality and the NAO indices. In this regard, we attempted to find out the optimum time lag for each case by examining different times that there was maximum correlation between air quality index and the NAO indices. For dynamical study, the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (ERA- Interim) reanalysis data set including mean sea level pressure, wind, temperature, geopotential height, and specific humidity in a time period from 1979 to 2017 were used. The horizontal resolution of the initial data is $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ in longitudinal and latitudinal directions prepared operationally every six hours at 60 levels.

The statistical analysis of the NAO indices shows that in the polluted periods, the positive phase of NAO is dominant, while there is no significant statistical difference between the positive and negative phases of NAO in the unpolluted periods. In general, the unpolluted periods (five cases) are associated mostly with the negative phase of NAO. Because of this limitation, we decided to analyze the synoptic-dynamic situations of all cases using the anomaly maps of the quantities relative to their long means. Thus, it is possible to improve the reliability of the results concerning the effects of NAO on air quality in Tehran.

Synoptic-dynamic analysis of the cases with the highest correlation between Tehran air quality index and NAO daily indices indicates that in the positive phase of NAO, there was advection of warm and humid air to the study area, while the Middle East region had a cold and dry conditions. On the other hand, when NAO was in the negative phase, advection of moist and colder air from the Atlantic Ocean toward the east occurred, thereby existing better air quality in the region. Besides, when polluted air period coincided with the negative phase of NAO, in contrast to the normal situation, the deviation of the Siberian high-pressure axis into the meridian and adhering to the Azores high-pressure created a barrier against the westerly winds causing their meridional deviations. In the unpolluted air periods associated with the positive phase of NAO, in contrast to the normal situation, the positioning of the Atlantic high-pressure at higher latitudes, with respect to the mean state, and joining with the Siberian high-pressure make them act as a barrier in the middle latitudes, thereby existing zonal winds in the study area.

Keywords: North Atlantic Oscillation, air quality index, time lag, correlation coefficient, Tehran region

*Corresponding author:

ahmadig@ut.ac.ir