

تحلیل همدیدی رخداد حفره‌های کوچک ازن در منطقه ایران مرکزی (اصفهان)

منوچهر فرج‌زاده^{۱*}، یوسف قویدل رحیمی^۲، عباسعلی علی‌اکبر بیدختی^۳ و سید شفیع موسوی^۴

۱. استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۴. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت: ۹۴/۸/۲۵، پذیرش نهایی: ۹۵/۷/۲۷)

چکیده

این تحقیق با بهره‌گیری از داده‌های روزانه ازن پوشن‌سپهر روی اصفهان که با حس‌گرهای زمینی بروئر و ماهواره‌های TOMS و OMI از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ اندازه‌گیری شده، به منظور شناسایی و بررسی شدیدترین رخداد کاهش ازن (حفره کوچک ازن) به کار گرفته شد. با به کارگیری آستانه منفی دوبرابر انحراف معیار ماهانه، ۲۵ رخداد حفره کوچک ازن در طول دوره مورد بررسی نمایان شد که بیشترین تمرکز آنها با شانزده و هفت مورد به ترتیب در پاییز و زمستان اتفاق افتاده است. دامنه ناهنجاری منفی آنها نیز از عمق ۲۴٪ در زمستان تا ۶٪ در تابستان در نوسان بوده است. این بررسی روشن ساخت که در مواقع شکل‌گیری حفره‌های کوچک ازن، ارتفاع وردایست (TH) به تراز بالاتر جو منتقل می‌شود و هم‌زمان دما و فشار آن نسبت به میانگین درازمدت، کاهش محسوس می‌یابد. نقشه‌های سطوح زمین‌پتانسیل در ناحیه وردسپهر بالایی و پوشن‌سپهر پایینی (UTLS) مرتبط با دو حادثه کاهش شدید ازن روی فلات ایران، پشته عمیقی را روی شمال غربی اروپا که با فرودی در شرق دریای مدیترانه همراهی داشته نشان داده است. علاوه بر الگوی همدیدی مشاهده شده در ناحیه UTLS روی فلات مرکزی ایران که موجب تسهیل در وزش افقی هوای ازن کم از منشأ عرض‌های جنب‌حاره (حادثه ۷ ژانویه ۲۰۰۲) و عرض‌های بالا (حادثه ۱۶ اکتبر ۲۰۱۱) شده است، می‌توان به عامل دینامیکی دوم که با صعود محلی سطوح هم‌انترویی موجب تشدید کاهش ازن پوشن‌سپهر می‌شود، هم‌زمان برای شکل‌گیری چنین رخداد‌های مهمی اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی: ایران مرکزی، ستون کلی ازن، حفره کوچک ازن، ارتفاع وردایست.

۱. مقدمه

۲۰۰۴). گرمایش وردسپهر ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و سرمایه‌های پوشن‌سپهر مرتبط با کاهش ازن، عمده‌ترین عوامل تغییرات سطح ارتفاع وردایست معرفی شده‌اند (وارتسوس، ۲۰۰۴؛ سان و همکاران، ۲۰۰۹). ازن هرساله بعد از تولید فتوشیمیایی روی منطقه حاره، از راه چرخه عمومی بروئر- دابسن از لایه پوشن‌سپهر میانی- پایینی روی قطب نیمکره زمستانی تجمع می‌یابد (هوود و سوخارو، ۲۰۰۵؛ اورسلونی و همکاران، ۲۰۰۳). اگر ضخامت لایه ازن تحت واکنش‌های نامتجانس شیمیایی درون تاوه قطبی بسیار سرد دچار تخریب شود و یا با تضعیف چرخه بروئر- دابسن بین نواحی حاره و قطب، ازن کمتری روی عرض‌های بالا انباشته شود (هومل و همکاران، ۲۰۱۴)، قادر خواهد بود سایر نواحی عرض‌های جغرافیایی بالا و متوسط را در مواقع وزش افقی جنوب‌سو،

لایه ازن پوشن‌سپهری نقش مهمی در تعادل اقلیم و محافظت از حیات زمین در برابر پرتو زیان‌بار فرابنفش خورشید ایفا می‌کند (یونپ، ۲۰۰۷). ضخامت این لایه در چند دهه پایانی قرن بیستم و ابتدای قرن حاضر، به علت مصرف زیاد گازهای مصنوعی کلر و برم و تمرکز آنها روی ابرهای سرد قطبی با شکل‌گیری حفره‌های بزرگ ازن روبه کاهش رفته است (ارسلونی و همکاران، ۲۰۰۳). نازک شدن ضخامت لایه ازن پوشن‌سپهر فقط به عرض‌های قطبی محدود نشده و این کاهش در سایر عرض‌های جغرافیایی نیز با شدت کمتر مشاهده شده است. از علت‌های مهم کاهش تدریجی ستون کلی ازن (TOC) در عرض‌های معتدل می‌توان به صعود جهانی موقعیت لایه وردایست اشاره داشت که در طول چند دهه اخیر روند روبه رشدی داشته است (وارتسوس و همکاران،

خود تحت تأثیر ناهنجاری‌های منفی قرار دهد (هاجی نیکولا و پیل، ۲۰۰۴). حفره‌های بزرگ ازن در فصل بهار هر سال روی منطقه جنوبگان مشاهده می‌شود اما این حادثه در قطب شمال چندان پدیده شایعی نیست. به همین علت رخداد پیش آمده در ۲۰۱۱ روی شمالگان، از سوی دانشمندان، در حکم نادرترین حادثه ناهنجاری منفی ازن قلمداد شده است (سازمان هواشناسی جهانی، ۲۰۱۴؛ هومل و همکاران، ۲۰۱۴). حادثه مزبور تا بخش‌هایی از شمال اروپا را با جابه‌جایی تاوه قطبی به سمت عرض‌های جنوبی، تحت تأثیر خود قرار داده است. ارسلونی و همکاران (۲۰۰۳) روشن ساختند که منشأ تشکیل تعداد زیادی از حادثه‌های ازن کم روی اروپا در سال ۲۰۰۰ مربوط به کاهش افراطی آن روی قطب شمال در طول همان دوره بوده است. با وجود این علت اصلی شکل‌گیری حوادث ازن کم روی عرض‌های متوسط و بالا از کاهش شیمیایی ازن روی دو قطب ناشی نشده است بلکه برخی سازوکارهای دینامیکی و فتوشیمیایی گردش عمومی جو در بروز آنها نقش بیشتری داشته است. تحقیقات زیادی وجود دارد که دخالت سامانه‌های واچرخندی (چرخندی) هوا را در شکل‌گیری رخداد حفره‌های (بیشینه‌های) کوچک ازن نشان می‌دهد (وارتسوز و همکاران، ۲۰۰۴؛ کوچ و همکاران، ۲۰۰۵). این سامانه‌ها گاهی با یک پشته (فرود) در امواج بادهای غربی که هوای عرض‌های جنوبی‌تر (شمالی‌تر) را به عرض‌های شمالی (جنوبی) هدایت می‌کنند، می‌توانند سطوح معینی از ناهنجاری‌های منفی (مثبت) ازن را در قشر بالایی لایه وردایست ایجاد کنند. گاهی سامانه‌های مورد اشاره در مکان‌های معینی از عرض‌های جغرافیایی متوسط و بالا بیشتر به شکل یک واچرخند مانع (فرود بریده) تکامل می‌یابند که در ادامه به شکل‌گیری ناهنجاری‌های منفی (مثبت) ازن کمک خواهد کرد. دو سازوکار مهم همرفت افقی توده‌های هوای ازن کم و صعود محلی سطوح هم‌انرژی، نقش برجسته‌ای در کاهش موقت (چندروزه) و شدید ازن در عرض‌های متوسط و بالا ایفا می‌کنند (آلن و ناکامورا، ۲۰۰۲؛

کرزسین، ۲۰۰۲؛ ارسلونی و همکاران، ۲۰۰۳؛ کوچ و همکاران، ۲۰۰۵؛ آنتون و همکاران، ۲۰۰۷؛ ورنر و همکاران، ۲۰۰۹؛ مارتینز-لوزانو و همکاران، ۲۰۱۱؛ سولا و لورنت، ۲۰۱۱). چندین ناحیه جغرافیایی مرتبط با عرض‌های میانه و بالا نیمکره شمالی وجود دارد که در فصل‌های مشخصی از سال (اواخر زمستان و اوایل بهار) بیشتر با حادثه‌های کاهش شدید ازن پوشن سپهر مواجه می‌شوند (سیمن و همکاران ۲۰۰۲؛ استیک، ۲۰۰۶). این حوادث که به حفره‌های کوچک ازن معروف هستند (نیومن و همکاران، ۱۹۸۸)، بیشتر در مسیر عبور سامانه‌های ناپایدار در جو که از جنبه‌های دینامیک فعال‌تر هستند مشاهده می‌شوند (جیمز، ۱۹۹۸). نواحی متأثر از ازن کم نه فقط مساحت کوچک‌تری از حفره‌های بزرگ دو قطب دارند (۱۰۰۰-۳۰۰۰ km) (نیومن و همکاران، ۱۹۸۸) بلکه دوره زمانی شکل‌گیری آنها نیز کوتاه (حدود دو تا هفت روز) است و به سرعت ناپدید می‌شوند (اورسلونی و همکاران، ۲۰۰۳؛ آنتون و همکاران، ۲۰۰۷). سامانه‌های بندالی جو و پشته موج بادهای غربی از عارضه‌های مهم همدیدی هستند که در شکل‌گیری حفره‌های کوچک ازن به ترتیب روی عرض‌های بالا و متوسط نیمکره شمالی غلبه دارند (کوچ و همکاران، ۲۰۰۵؛ باروپدرو و همکاران، ۲۰۱۰). بروز ناهنجاری منفی ازن در همین مدت کوتاه روی عرض‌های میانه و محیط‌های کوهستانی، به‌ویژه اگر در فصل‌های تابستان یا بهار مشاهده شوند، تابش زیان‌بار UV-B خورشید را به‌طور قابل ملاحظه‌ای روی سطح زمین افزایش می‌دهد (استیک، ۲۰۰۶). افزایش شدت تابش زیان‌بار فرابنفش خورشید در نهایت منجر به صدمات زیست‌محیطی بر بوم‌سازگان‌های گیاهی و جانوری می‌شود (آلادوس و همکاران، ۲۰۰۷). در این تحقیق تمرکز اصلی را ابتدا روی تعیین آستانه‌های تشخیص حوادث ازن کم روی فلات مرکزی ایران قرار داده‌ایم و بعد از آشکارسازی گردش فصلی و توصیف سایر ویژگی‌های آن به الگوی تغییرات پارامترهای هواشناسی در مواقع شکل‌گیری رخداد کاهش ازن (حفره‌های کوچک ازن)

(مک‌پیتز و همکاران، ۲۰۰۸). ذکر این نکته نیز ضروری به نظر می‌رسد که بر پایه مشاهدات و گزارش‌های به‌دست آمده می‌توان حداقل اختلاف را تا کمتر از یک تا دو درصد بین اندازه گیری‌های زمینی و ماهواره‌ای انتظار داشت (مارتینز - لوزانو و همکاران، ۲۰۱۱ و آنتون و همکاران، ۲۰۰۷). در این خصوص می‌توان به تحقیق مک‌پیتز و همکاران (۲۰۰۸) اشاره کرد. آنها از راه مقایسه ۷۶ ایستگاه زمینی که به سامانه‌های اندازه‌گیری دابسن و پروتر مجهز بوده‌اند مشخص ساختند که میانگین داده‌های ستون ازن OMI-TOMS حدود ۰/۰۴٪ بیشتر از میانگین ایستگاه‌های زمینی بوده است.

همچنین در ادامه پژوهش، برای روزهای همراه با قوی‌ترین بی‌هنجاری‌های منفی ازن در ایستگاه اصفهان از داده‌های پرتوگمانه مرتبط با ناحیه وردسپهر بالایی و پوشن‌سپهر پایینی استفاده شده است. به دنبال شناسایی روزهای همراه با بی‌هنجاری منفی ازن (Low Ozone Events)، داده‌های نیم‌رخ دما، فشار و ارتفاع زمین‌پتانسیلی از تارنمای دانشگاه وایومینگ برای تعیین سطح وردایست و ویژگی‌های آن روی ایستگاه مورد اشاره استفاده شده است. براساس تعریف سازمان جهانی هواشناسی، سطح وردایست پایین‌ترین ارتفاع لایه وردسپهر آزاد، محلی که نرخ کاهشی دما به کمتر از دو کلوین در هر کیلومتر برای ضخامت حداقل دو کیلومتر در جو می‌رسد تعیین شده است (UNEP/WMO، ۱۹۵۷ و WMO، ۱۹۹۲). همچنین میانگین درازمدت ماهانه ارتفاع وردایست، دما و فشار از داده‌های بازتحلیل NCEP-NCAR محاسبه شده است. از سایر داده‌هایی که در این تحقیق به کار گرفته شد می‌توان به مدل هیسپلیت (Hybrid Single-Particle lagrangian Integrated Trajectory Model)، نقشه‌های همدیدی سطوح وردسپهر و پوشن‌سپهر پایینی و میزان پوشش ابرناکی در روزهای مورد بررسی اشاره کرد.

براساس تحقیقات گذشته روی ناهنجاری‌ها منفی ازن، روش‌های متعددی برای تشخیص رخداد کاهش افراطی ازن در لایه پوشن‌سپهر پیشنهاد شده است. بعضی محققان در تحقیقات خود از یک آستانه ثابت برای انتخاب چنین

در ناحیه وردسپهر بالایی و پوشن‌سپهر پایینی پرداخته خواهد شد. در ادامه بررسی، دو سازوکار مهم دینامیکی محرک‌های افقی و عمودی جو مورد تحلیل قرار گرفته است تا برتری یا سهم هر کدام در جریان شکل‌گیری رخداد‌های کاهشی ازن روی منطقه مشخص شود.

۲. داده‌ها و روش‌ها

در این تحقیق داده‌های ازن پوشن‌سپهر در واحد دابسن روی موقعیت جغرافیایی اصفهان برای یک دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ استخراج شده است. ستون کلی ازن (TOC) با دو سامانه اندازه‌گیری زمینی (از ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۳) و ماهواره‌ای (از ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۱) به ترتیب از راه دستگاه طیف‌سنج پروتر و ابزار OMI مرتبط با ماهواره Aura به‌دست آمده است. در روش زمینی اندازه‌گیری‌ها در ظهر محلی به‌صورت نقطه‌ای از ایستگاه ازن سنجی اصفهان ($32^{\circ}37'N$ ، $51^{\circ}40'E$ و ارتفاع ۱۵۷۰ متر) و در روش ماهواره‌ای با ضریب تفکیک یک درجه طول و عرض جغرافیایی در همان زمان (ظهر محلی) به‌صورت روزانه استخراج شده است. در ضمن داده‌های روزانه ازن ۲۰۰۱ متعلق به ماهواره ایرت پروب از سری ابزار اندازه‌گیری ازن TOMS است که شبکه مختصات آن $1^{\circ} \times 1^{\circ} / 25^{\circ}$ (عرض \times طول) گسترده‌تری داشته است. یکی از وظایف اصلی ابزار OMI، ادامه اندازه‌گیری ازن به دنبال پایان مأموریت TOMS از ژوئیه ۲۰۰۴ بوده است. این ابزار قادر به تصویربرداری طیفی گسترده با حالت جاروبی متوالی تابش پراکنده برگشتی خورشید در باندهای نور مرئی و فرابنفش است. داده‌های ازن در شبکه مختصات $1^{\circ}N \times 1^{\circ}E$ (عرض جغرافیایی \times طول جغرافیایی) گسترده‌تری دارد که هر روز تقریباً هنگام ظهر خورشیدی با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی ایستگاه اصفهان از نزدیک‌ترین محل نسبت به ایستگاه فوق یعنی ($51^{\circ}30'$ طول شرقی و $32^{\circ}30'$ عرض شمالی) استخراج شدند. براساس بررسی صورت‌گرفته، داده‌های ازن مرتبط با ابزار اندازه‌گیری OMI سازگاری خوبی با سری داده‌های TOMS نشان داده است و برای بسط طول دوره آماری و تحلیل روند، شرایط مطلوبی دارد

ناهنجاری‌های کاهشی اُزن استفاده کردند (جیمز، ۱۹۹۸؛ بوجکو و بالیز، ۲۰۰۱؛ کرزین، ۲۰۰۲) و تعدادی دیگر ارقام متغیری بر مبنای الگوی تغییرات فصلی برای هر ماه را در نظر گرفتند (کوچ و همکاران، ۲۰۰۵؛ آنتون و همکاران، ۲۰۰۷؛ مارتینز - لوزانو و همکاران، ۲۰۱۱؛ سولا و لورتو، ۲۰۱۱). با توجه به ضرورت تعیین حادثه‌های اُزن کم (LOEs) در همه ماه‌های سال، چنانچه از روش اول در گزینش آنها استفاده شود، دوره بررسی این تحقیق تحت الشعاع فصل‌های سرد سال به چند حادثه محدود می‌شود و امکان مشاهده رخدادها در طول دوره‌های گرم سال که تابش UV-B زیادی نیز دارد، از دایره این تحقیق خارج می‌شود. لذا از روش دوم که شامل منفی دوبرابر انحراف استاندارد داده‌های ماهانه است برای گزینش و تفکیک LOEs روی سرزمین ایران استفاده شد. از راه مدل هیسپلیت تحلیل مسیریابی روبه عقب سطوح هم‌آنتروپی برای شناسایی منشأ توده هوای رسیده به مرکز ایران مورد استفاده قرار گرفته است. مدل پیش‌گفته برای هر حادثه در یک دوره ۹۶ ساعته با ضریب تفکیک شش ساعت درون شبکه مختصات ۲/۵ درجه‌ای طول و عرض جغرافیایی در سه تراز ارتفاعی مجزا استخراج شده است. همچنین بررسی نقشه‌های زمین‌پتانسیل سطوح ۵۰ و ۱۰۰ (تقریباً پوشش سپهر پایینی)، ۳۰۰ (وردسپهر بالایی) و ۱۰۰۰ (سطح زمین) هکتوپاسکال با هدف آشکارسازی نقش فرایندهای دینامیکی و همدیدی در شکل‌گیری عارضه‌ها، به کمک داده‌های بازتحلیل شده NCEP-NCAR ناسا صورت گرفت.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. آشکارسازی حفره‌های کوچک اُزن

اطلاعات آماری تغییرات TOC روی ایران در جدول ۱ به صورت ماهانه نشان داده شده است. براساس اطلاعات مندرج، انتهای فصل زمستان و ابتدای بهار بیشترین میزان اُزن پوشش سپهری و انتهای تابستان و ابتدای فصل پاییز کمترین مقدار برای یک دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ مشخص شده است. همچنین بیشترین نوسان‌های میزان اُزن

به دوره سرد سال با متوسط ۲۷ دابسن و کمترین تغییرات نیز به دوره گرم سال با ۸ دابسن اختصاص یافته است. این تغییرات فصلی اُزن با الگوی دینامیک جو ارتباط بسیار نزدیکی دارد. افزایش زمستانه اُزن روی عرض‌های متوسط زمانی که سامانه‌های همدیدی منطقه فعال هستند، از گردش نصف‌النهاری قطب‌سوی چرخه بروئر-دابسن در منطقه حاره در لایه‌های پوشش سپهر پایینی منشأ می‌گیرد. اما در فصل تابستان با تضعیف گردش عمومی بروئر-دابسن، تعدیل اغتشاش‌ها و تداخل کم توده‌های هوای عرض‌های بالا و متوسط، شرایط شکل‌گیری محدوده گسترده‌ای با هوای انباشته از اُزن کم در قطب را فراهم می‌سازد. (اورسولونی و همکاران، ۲۰۰۳؛ سولا و لورتو، ۲۰۱۱). همین عامل نقش مهمی در کاهش تابستانه و پاییزی اُزن روی عرض‌های متوسط و بالا در نیمکره تابستان بازی می‌کند. همچنین در این جدول ارقام ماهانه آستانه‌های تشخیص LOEs بر مبنای مقادیر منفی دو برابر انحراف معیار (2σ-) هر ماه مشخص شده است. آستانه‌های تعیین حفره‌های کوچک اُزن از ۵۸- دابسن در ماه فوریه تا ۱۶- دابسن در ماه‌های اوت و سپتامبر متغیر است. در نهایت با استفاده از آستانه‌های مشخص شده تعداد ۲۵ رخداد حفره کوچک اُزن (LOE) در فلات مرکزی ایران برای یک دوره ۱۱ ساله شناسایی شده است. مارتینز و همکاران با روش فوق برای شناسایی حفره‌های کوچک اُزن روی شرق مرکز اسپانیا در یک دوره هشت ساله (۲۰۰۷-۲۰۰۰) ۳۶ رخداد کاهش افراطی اُزن را به ثبت رسانده‌اند. جدول ۲ سال‌های وقوع حفره‌های کوچک اُزن همراه با ضخامت TOC، نرخ کاهش و شرایط ابرناکی، فشار و دمای ارتفاع وردایست را نشان می‌دهد. در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۱۱ به ترتیب با هفت و شش مورد حادثه حفره کوچک اُزن که سه دوره با توالی سه روزه همراه بوده است، بیشترین تعداد را داشته و سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۹ در این تحقیق، بدون حادثه مشخص شده است. بالاترین درصد کاهش اُزن (۲۴٪) مربوط به دوره سرد سال در ژانویه ۲۰۰۲ و کمترین درصد (۱/۶٪) به ماه اوت ۲۰۰۱ اختصاص یافته است.

پوشن سپهر، نرخ دمای این لایه سردتر از میانگین اقلیمی درازمدت خود می‌شود و هم‌زمان، سطح TH نیز به ترازهای بالاتر جو صعود می‌یابد که در بعضی از رخدادها نظیر حادثه ماه مارس و مه تا ۵/۵ و سه کیلومتر به ترتیب افزایش داشته است.

نتایج این بخش انطباق خوبی با تحقیقات سولا و لورنت (۲۰۱۱) و مارتینز - لوزانو و همکاران (۲۰۱۱) نشان داده است. آنها نیز در چند رخداد حفره ازن با افزایش ارتفاع وردایست که توأم با کاهش فشار و دمای لایه آن بوده است را گزارش کردند. برای نمونه در ۱۰ ژانویه ۲۰۰۴، در TH در ارتفاع ۱۳ کیلومتری حدفاصل ۱۵۰hPa-۲۰۰- در موقعیت بالاتری نسبت به میانگین درازمدت قرار داشته است. در همین روز دمای سطح ۵۰hPa یعنی در ناحیه پوشن سپهر پایین به $^{\circ}\text{WC}$ (۱۵) درجه کمتر از میانگین درازمدت (۱۹۷۷-۲۰۰۱) تنزل یافته بود. اما برخلاف رخدادهای مشاهده شده روی اصفهان، با توجه به بیشترین کاهش ازن (۲۴٪) در ۷ ژانویه ۲۰۰۲ و چند روز پیرامون آن، تغییرات پارامترهای جوئی لایه وردایست آن‌گونه که در سایر ماه‌های مشاهده شده در روزهای مورد اشاره روی نداده است. احتمالاً کاهش افراطی ازن در طول این چند روز تحت تأثیر عوامل دیگری که به تغییرات سطح وردایست مربوط نمی‌شد، بوده است، به‌ویژه اینکه شرایط ابرناکی بسیار زیاد تا ۸۰٪ و ناپایداری جوئی در همان روز نیز حکایت از حضور سامانه کم فشار در سطح منطقه دارد.

شرایط ابرناکی جو مرتبط با روزهای حادثه نیز بیانگر کمترین میزان در روز ۲۴ اوت ۲۰۰۱ است اما در سایر روزها، شرایط ابرناکی از ۲/۵٪ تا ۸۰٪ در نوسان بوده است. توالی سه روزه حفره‌های کوچک ازن با پنج مورد، در مجموع شامل ۵۵٪ (۱۵مورد) حادثه‌ها بوده است. تغییرات دما و فشار سطح TH مربوط به حوادث ازن کم در ماه‌های متفاوت نشان می‌دهد که از مقادیر زیاد دوره سرد به مقادیر کم در نیمه گرم سال با جابه‌جایی فصلی سطح وردایست هماهنگی داشته است.

۲.۳. تغییرات سطح لایه وردایست

در این تحقیق براساس تعریف پیشنهاد شده از حفره کوچک ازن، ابتدا فراوانی ماهانه و گردش فصلی آن در طول دوره مورد بررسی مشخص شده است. جدول ۳. نشان می‌دهد که در ایران؛ فصل‌های پاییز و زمستان بیشترین و تابستان و بهار کمترین حادثه حفره کوچک ازن را داشته‌اند. برای آگاهی از کمیت و کیفیت ناهنجاری پارامترهای جوئی سطوح بالا در روزهای حادثه (نسبت به میانگین درازمدت)، متوسط مقادیر مشاهده شده ارتفاع، دما و فشار برای هر ماه (در صورت مواجهه با رخداد LOE) محاسبه شده است. براساس همین جدول، بی‌هنجاری‌های سرد و کاهش فشار در سطح لایه وردایست یعنی مرز وردسپهر بالایی و پوشن سپهر پایین در همه ماه‌ها (به استثنای حوادث ماه ژانویه) به خوبی قابل تشخیص است. به عبارت دیگر به موازات کاهش ضخامت ازن در لایه

جدول ۱. اطلاعات آماری ستون کلی ازن (TOC) به دابسن روی ایران مرکزی همراه با مقادیر منفی دوبرابر انحراف معیار هر ماه

ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	
۲۹۱	۲۹۱	۲۹۶	۲۹۶	۲۸۸	۲۸۲	۲۷۹	۲۷۸	۲۷۳	۲۶۵	۲۷۳	۲۷۸	میانگین
۲۶	۳۰	۲۴	۱۹٫۵	۱۵	۸	۸٫۵	۸	۸	۱۰٫۵	۱۷	۲۵	انحراف معیار
۲۵۲	۲۵۴	۲۶۱	۲۶۹	۲۶۸	۲۷۳	۲۷۱	۲۶۹	۲۶۲	۲۴۹	۲۴۹	۲۴۸	میانگین حداقل
۳۴۷	۳۴۴	۳۵۲	۳۴۱	۳۱۷	۲۹۸	۲۸۷	۲۸۸	۲۸۲	۲۸۰	۳۰۲	۳۲۰	میانگین حداکثر
۲۲۱	۲۲۴	۲۴۷	۲۵۹	۲۵۲	۲۶۷	۲۶۵	۲۶۱	۲۴۷	۲۴۰	۲۳۹	۲۲۲	حداقل مطلق
۳۷۸	۳۸۶	۴۰۲	۳۶۴	۳۶۶	۳۱۳	۳۰۵	۳۰۰	۲۹۵	۲۹۷	۳۲۰	۳۴۴	حداکثر مطلق
-۵۲	-۵۸	-۴۸	-۳۹	-۳۱	-۱۷	-۱۷	-۱۶	-۱۶	-۲۱	-۳۳	-۵۰	-2σ

جدول ۲. روزهای وقوع حفره‌های کوچک آزن همراه با درصد کاهش، شرایط آبرناکی، فشار و دمای سطح وردایست برای دوره ۱۱ ساله از ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱

سال	روز	TOC (DU)	درصد کاهش	شرایط آبرناکی	TP (hPa)	TT (°C)
۲۰۰۱	۲ ژانویه	۲۳۸	٪۱۸/۲	٪۵	۱۸۳	-۶۳
	۲۴ اوت	۲۶۱	٪۶/۱	۰	۹۵	-۷۷
	۲۹ اکتبر	۲۴۴	٪۸	٪۲۰	۱۱۰	-۶۸
۲۰۰۲	۳ ژانویه	۲۲۶	٪۲۲/۳	٪۳۰	۲۱۷	-۵۰/۵
	۶ ژانویه	۲۳۱	٪۲۰/۶	٪۵۵	۱۸۰	-۵۸
	۷ ژانویه	۲۲۱	٪۲۴	٪۸۰	۲۲۵	-۵۶
	۸ ژانویه	۲۲۶	٪۲۲/۳	٪۴۰	۲۴۰	-۵۲
۲۰۰۵	۳۰ اکتبر	۲۴۳	٪۸/۳	٪۱۲	۱۵۱	-۶۸/۵
	۶ دسامبر	۲۲۶	٪۱۸/۷	٪۶۰	۱۳۲	-۶۳/۹
	۹ دسامبر	۲۲۲	٪۲۰	٪۲/۵	۹۰	-۷۲/۳
	۱۰ دسامبر	۲۲۵	٪۱۹	٪۵	۲۳۳	-۵۶/۱
	۲۱ دسامبر	۲۲۵	٪۱۹	٪۲/۵	۱۳۳	-۶۳/۱
	۲۲ دسامبر	۲۲۸	٪۱۸	٪۳۰	۱۵۰	-۶۹/۵
	۲۳ دسامبر	۲۲۶	٪۱۸/۷	٪۴۵	۱۲۰	-۶۵/۵
۲۰۰۶	۸ فوریه	۲۲۴	٪۲۳	٪۷۵	۱۷۳	-۶۰/۸
۲۰۰۷	۱۸ اکتبر	۲۴۴	٪۸	٪۱۵	۱۰۵	-۷۱/۳
	۱۹ اکتبر	۲۴۴	٪۸	٪۲۰	۹۴/۵	-۷۲/۳
	۲۰ اکتبر	۲۴۳	٪۸/۳	٪۲۰	۱۰۸	-۶۹/۹
	۱۲ نوامبر	۲۳۹	٪۱۳/۵	٪۴۰	۱۰۰	-۷۵/۷
۲۰۰۸	۱۰ مارس	۲۴۷	٪۱۶/۵	٪۲۰	۸۰/۳	-۷۴/۵
۲۰۱۰	۲۰ اکتبر	۲۴۲	٪۸/۶	٪۵	۱۰۹	-۷۱/۳
۲۰۱۱	۱۷ مه	۲۵۲	٪۱۲/۵	٪۴۰	۸۴/۳	-۷۶/۱
	۱۸ مه	۲۵۲	٪۱۲/۵	٪۳۰	۱۰۸	-۷۴/۳
	۱۹ مه	۲۵۶	٪۱۱/۱	٪۳۰	۸۰/۹	-۷۸/۱
	۱۵ اکتبر	۲۴۳	٪۸/۳	٪۱۰	۱۰۳	-۷۱/۷
	۱۶ اکتبر	۲۴۰	٪۹/۴	٪۵	۷۶	-۷۱/۷
	۱۷ اکتبر	۲۴۳	٪۸/۳	٪۱۲/۵	۹۵	-۷۲/۵

جدول ۳. تعداد حفره‌های کوچک آزن و تغییرات ماهانه دما، فشار و ارتفاع ژئوپتانسیل نسبت به میانگین درازمدت ۱۹۸۱-۲۰۱۰ مرتبط با سطح وردایست

ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
۵	۱	۱	۰	۳	۰	۰	۱	۰	۹	۱	۶
۳/۶	-۲/۳	-۱۵/۵	NE	-۱۲	NE	NE	-۴	NE	-۳/۵	-۱۳/۲	-۴
۱۹	-۲۷	-۱۱۵	NE	-۵۴	NE	NE	-۷	NE	-۲۴	-۵۵	-۳۷
-۲۹۵	۱۱۰۰	۵۵۷۶	NE	۲۹۸۹	NE	NE	۳۵۵	NE	۱۲۷۰	۲۶۸۰	۲۰۷۸

NE (No Event) دلالت بر مشاهده نشدن حادثه حفره کوچک آزن و تحلیل داده جوی در همان دوره دارد.

۳.۳. الگوهای گردشی سطح و ردسپهر بالا و پوشش سپهر پایین

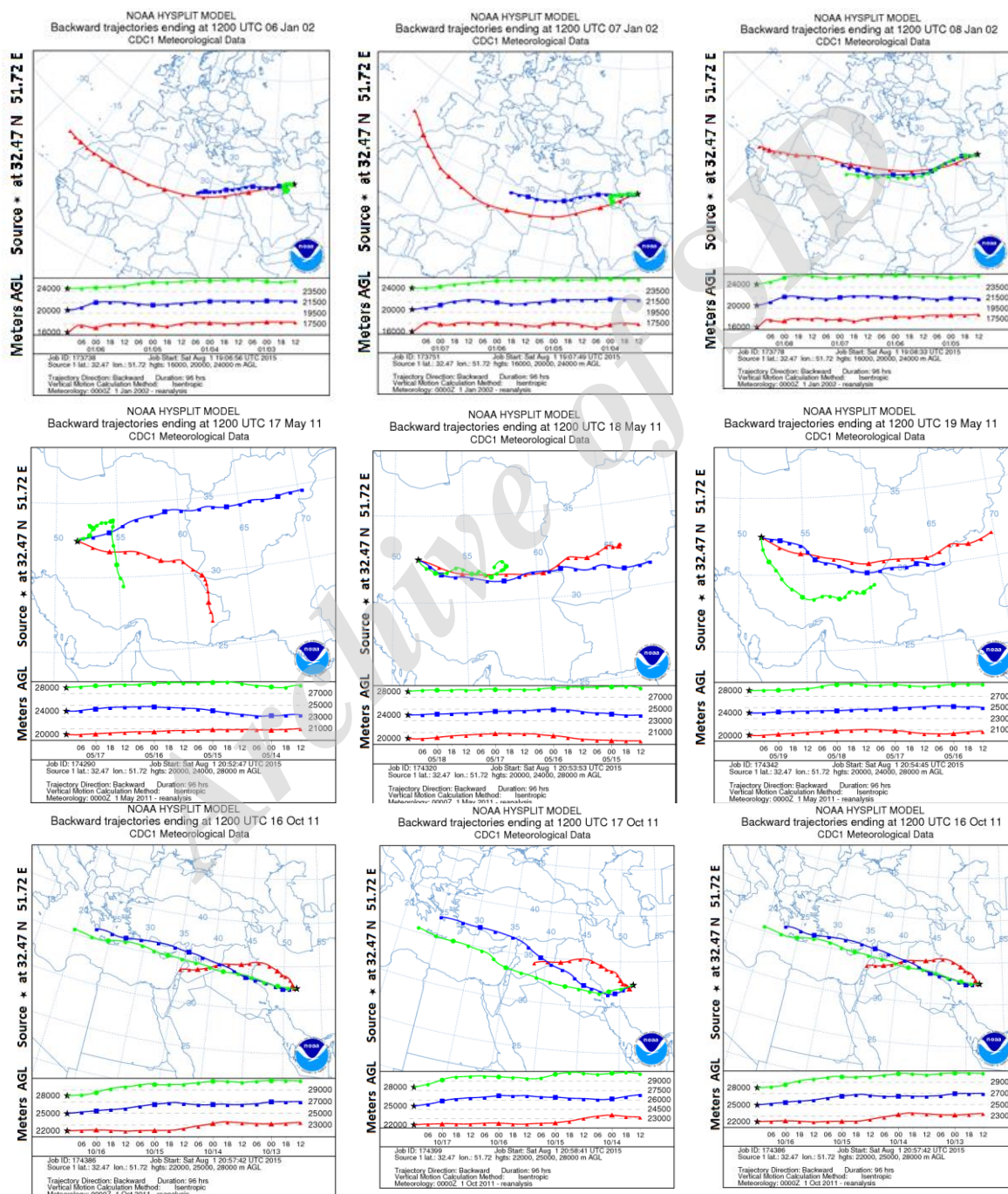
۳.۳.۱. تحلیل مسیریابی چند روزه

با توجه به مقیاس زمانی فراوانی حفره‌های کوچک ازن (جدول ۲) می‌توان دریافت که مقیاس زمانی پاییز و زمستان با ۲۱ رخداد بیشترین سهم را از میان سایر فصل‌ها داشته است. در این دوره از سال به‌علت اینکه جو، دینامیک پویاتری دارد، دامنه زمانی و مکانی حادثه‌ها نسبت به دوره‌های دیگر سال تغییرات بیشتری دارند. شکل ۱. منشأ و مسیر توده‌های هوای نه روز همراه با شرایط کاهش شدید ازن (سه حادثه در ۲۰۰۲ و شش حادثه در ۲۰۱۱) روی اصفهان را در سه طبقه ارتفاعی جو در محدوده UTLS (Upper Troposphere Lower Stratosphere) نشان داده است. شکل پیش‌گفته مرتبط با نسخه چهار مدل هیسپلیت است که مرکز تحقیقات علمی منابع هوایی (ARL) (Air Resources Laboratory) از سازمان ملی اقیانوس و جو (NOAA) آن را توسعه داده است. بررسی مسیریابی روبه عقب ۹۶ ساعته سطوح گوناگون هم‌آنروپی با استفاده از داده‌های بازتحلیل شده NCEP/NCAR با ضریب تفکیک مکانی $2/5^\circ$ و زمانی ۶ ساعته محاسبه شده است. با توجه به تحلیل مسیریابی توده‌های هوای مؤثر در وقوع رخدادها (حوادث ژانویه ۲۰۰۲ و مه ۲۰۱۱)، مسیر جریان اکثر توده‌های هوای رسیده به موقعیت اصفهان در سطوح ۱۶ تا ۲۴ km (زمستان و بهار) و ۲۲ تا ۲۸ km (تابستان و پاییز) که شامل تمرکز حداکثری ازن نیز بوده است (شرعی‌پور، ۱۳۹۱)، از عرض‌های به‌مراتب پایین‌تر از مدار $32^\circ N$ منشأ یافته یا از روی آن مناطق عبور کرده است. از میان سه تراز ارتفاعی مورد بررسی، پایین‌ترین سطح که نزدیک‌ترین فاصله را با لایه وردایست دارد بیشتر در موقعیت جنوبی‌تری نسبت به سایر سطوح قرار گرفته بود. همان‌گونه که در قسمت مقدمه نیز اشاره شد مقدار کلی ازن با کاهش عرض جغرافیایی به نرخ‌های کمتری می‌رسد و منشأ گرفتن خصوصیات هوای روزهای حادثه از عرض‌های با سطح ازن کمتر، نقش انکارناپذیر جریان افقی هوای نواحی جنب

حاره‌ای را در شکل‌گیری حفره‌های کوچک ازن مشخص می‌کند. البته در یک دوره سه روزه، رخداد کاهش ازن مربوط به ماه اکتبر (از ماه‌های پرحادثه) در ۲۰۱۱ مشاهده می‌شود که جهت حرکت هوا حدود ارتفاع ۲۲ km تا اندازه‌ای از طرف شمال متمایل به طرف جنوب بوده است. نکته دیگری که درباره شکل ۱ قابل بیان است، جابه‌جایی ارتفاع بعضی از سطوح هم‌آنروپی در هنگام وزش افقی توده‌های هوا روی موقعیت اصفهان یا در مجاورت آن است. در بعضی رخدادها از میان ۲۵ حادثه، می‌توان یک جابه‌جایی عمودی روبه بالای سطوح هم‌آنروپی در حوالی موقعیت اصفهان را مشاهده کرد (همه تصاویر آورده نشده است). اما با توجه به ارقام جدول ۳ درخصوص میانگین جابه‌جایی‌های عمودی ارتفاع وردایست (TH) می‌توان اذعان داشت که تغییرات کاهش فشار در محدوده UTLS از راه واگرایی ناحیه پوشش سپهر پایینی و اُفت فشار ازن نقش برجسته‌ای در کاهش ستون کلی ازن در روزهای حادثه داشته است. مثلاً در پدیده ۷ ژانویه ۲۰۰۲ با کمترین ضخامت ازن با ۲۲۱ دابسن (-24%) در طول دوره آماری به ثبت رسیده است. بااینکه عامل گردش سریع هوای عرض‌های پایین (دارای ازن کم) به طرف عرض‌های بالاتر در بروز حادثه فوق سهم بیشتری داشته است، اما جابه‌جایی ضعیف روبه بالای سطوح هم‌آنروپی (تقریباً نیم کیلومتر) در محدوده ۱۶ کیلومتری روی ناحیه غرب ایران در تشدید این حادثه بی‌تاثیر نبوده است. البته درخصوص شدیدترین حادثه مشاهده شده دهه اول قرن بیستم انتظار می‌رود که خسارت‌های احتمالی تابش فرابنفش خورشید در سطوح پایین‌تر جو با وجود شرایط ابرناکی ۸۰ درصد، تا حدودی تضعیف شده باشد. بااین‌حال با توجه به مساحت گسترده حفره کوچک ازن در منطقه و تغییرپذیری محلی پوشش ابرناکی، احتمالاً این کاهش تابش فرابنفش به یک اندازه در نواحی پیرامونی استان اصفهان روی نداده است. به‌منظور مقایسه، در حادثه

حادثه) ارتباط داشته است (سولا و لورنت، ۲۰۱۱). البته در این بررسی حوادثی نیز مشاهده شد که به نظر می‌رسد شرایط ژانویه ۲۰۰۲ کاملاً با آن انطباق نداشته است. مثلاً در سه حادثه اکتبر ۲۰۱۱ سطوح هم‌آنتروپی نه از عرض‌های پایین‌تر عبور کرده و نه افزایش مشخصی در ارتفاع نشان داده است.

دیگر روی شرق اسپانیا که در ۱۰ ژانویه ۲۰۰۴ اتفاق افتاده بود، تحلیل مسیریابی رخداد حفره کوچک ازن نشان داده است که منشأ توده‌های هوا در ارتفاع ۱۸ کیلومتری از حوضه آتلانتیک جنب حاره‌ای، دقیقاً در ناحیه‌ای که در چند روز پیش از رخداد حادثه با کاهش ازن مواجه بوده، همراه با صعود محلی روی منطقه مورد بررسی (در روزهای



شکل ۱. مسیریابی رویه عقب توده‌های هوای منجر به رخداد نه پدیده حفره کوچک ازن روی اصفهان در سه لایه مجزا در جو (ردیف قرارگیری آنها براساس ترتیب زمانی وقوع رخداد است که در بالای هریک از شکل‌ها آمده است). از ۶ تا ۸ ژانویه ۲۰۰۲، از ۱۷ تا ۱۹ مه ۲۰۱۱ و از ۱۶ تا ۱۸ اکتبر ۲۰۱۱). مسیر سطح پایین (—)، مسیر سطح میانه (—)، مسیر سطح بالا (—)

اشاره داشت که دلالت بر شدت و دوام نسبی آنها در همین منطقه مورد بررسی دارد. شکل ۲. الگوی موقعیت هم‌دیدي سطوح زمین‌پتانسیل در لایه‌های گوناگون جو را برای حادثه ۷ ژانویه ۲۰۰۲ نشان می‌دهد. در مجاورت سطح زمین دو مرکز کم‌فشار در دو سوی شمال و جنوب دریاچه خزر تشکیل شده که در سطوح بالاتر این سامانه به طرف غرب به یک تراف روی شرق دریای مدیترانه منتهی شده است. در همین روز، ستون ازن پوشن سپهر در سطوح بالاتر تا ۲۴٪ کاهش نشان داد که این شرایط قادر بود میزان تابش فرابنفش خورشید را تا حد قابل‌توجهی افزایش دهد، اما میزان ابرناکی تحت‌تأثیر ناپایداری جو تقریباً ۸۰٪ آسمان اصفهان را در همان روز پوشاند که با توجه به اثر تعدیلی ابرها روی تابش زیان‌بار خورشید (آلادوس و همکاران، ۲۰۰۷) نمی‌توان افزایش چشمگیری در میزان تابش UV رسیده به سطح زمین را توقع داشت. با شکل‌گیری یک فرود بریده مستقر روی دریای مدیترانه در سطح ۳۰۰hPa (وردسپهر بالایی) و ادامه این عمق در لایه‌های بالاتر ۱۰۰ و ۵۰ هکتوپاسکال به‌ترتیب در نواحی بالاتر از سطوح وردایست و پوشن سپهر پایینی که حاشیه استوایی آن از کرانه جنوبی دریا مدیترانه عبور کرده است، شرایط مناسبی برای هدایت توده‌های هوای ازن کم از عرض‌های پایین‌تر در نواحی صحرا و بیابان‌های افریقا به طرف منطقه شمال شرق روی ایران فراهم ساخته است (شکل ۲).

لازم به ذکر است که در تصویر ستون کلی ازن پوشن سپهر مربوط به همان روز در شکل ۳. می‌توان ناحیه دیگری با کاهش افراطی ازن روی جزایر بریتانیا و غرب اروپا مشاهده کرد که با توجه به نقشه‌های زمین‌پتانسیل طبقات بالای جو، نقش صعود سطوح هم‌آنتروپی لایه‌های وردسپهر و پوشن سپهر پایینی جو در مقایسه با جابه‌جایی افقی توده‌های هوا، در کاهش ضخامت لایه ازن مشخص می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، هرچند دخالت صعود محلی سطوح هم‌آنتروپی در هر دو حادثه روی بخش‌های جنوبی ایران و غرب اروپا

ر برابر نیمه سرد سال، با مشاهده چهار رخداد حفره کوچک ازن می‌توان احتمال کمی را برای وقوع حوادث کاهش افراطی ازن در فصل‌های گرم تابستان و بهار انتظار داشت. سه حادثه ۱۷ تا ۱۹ مه ۲۰۱۱ (شکل ۱، ردیف میانی) و ۲۴ اوت ۲۰۰۱ (اینجا نشان داده نشده است) توده‌های هوای مرتبط با لایه‌های پیرامون سطح وردایست و پوشن سپهر پایینی از ویژگی‌های آب و هوایی مناطق شمال هندوستان و پاکستان تأثیر پذیرفته است. گفتنی است که یکی از نواحی شناسایی شده روی نیمکره شمالی که به‌طور نیمه ثابت مواجه با ازن کمی نسبت به نواحی پیرامون بوده است، مربوط به شمال هندوستان، ارتفاعات هیمالیا و فلات تبت است (جیمز، ۱۹۹۸). در این تحقیق گرچه معلوم شد که تعداد وقوع حوادث افراطی ناهنجاری‌های منفی ازن در فصل‌های بهار و تابستان کمتر رایج است اما باید گفت که تابش خورشید در این موقع از سال در شدیدترین وضعیت خود قرار دارد و کمترین کاهش ازن می‌تواند بخش زیان‌بار تابش خورشیدی یعنی باند B را تقویت کند. مارتینز - لوزانو و همکاران (۲۰۱۱) روشن ساختند که با یک درصد کاهش ازن به‌طور متوسط تا ۱/۳ برابر تابش فرابنفش خورشید روی کشور اسپانیا افزایش می‌یابد. همچنین این نسبت برای فصل‌های پاییز و زمستان (بیشترین فراوانی حفره‌های کوچک ازن نیز در سرزمین ایران در همین دوره به ثبت رسیده) تا ۱/۴۴ برابر قابل‌تشدید است.

۲.۳.۳. ویژگی‌های هم‌دیدي ترازهای گوناگون جو به‌منظور بررسی سامانه‌های گردش جوئی مربوط به حفره‌های کوچک ازن، دو نمونه از ۲۵ حادثه مورد بررسی مرتبط با زمان‌های پرمخاطره از نظر عمق و فراوانی (به‌ترتیب ۷ ژانویه ۲۰۰۲ و ۱۶ اکتبر ۲۰۱۱) برای بررسی بیشتر در نظر گرفته شده است. از ویژگی‌های دو نمونه انتخابی می‌توان به توالی سه روزه هرکدام از دوره‌ها و تمرکز عمیق‌ترین آنها در میانه دو حفره کوچک ازن دیگر در روزهای قبل و بعد از پدیده‌ها

اتفاق افتاده است اما به نظر می‌رسد که در این پدیده نقش جابه‌جایی افقی توده‌های هوای ازن کم روی ایران چشمگیرتر بوده است، به‌ویژه اینکه در بخش قبلی مشخص شده است که بی‌هنجاری‌های جابه‌جایی عمودی وردایست در ماه ژانویه به‌جای افزایش ارتفاع، کاهش آن را نشان داده است. با این حال علی‌رغم شکل‌گیری وضعیت فوق، یک‌روز پیش‌تر از حادثه تحت بررسی (اولین روز حادثه)، ارتفاع وردایست تقریباً ۴۰۰ متر بالاتر از سطح میانگین ماهانه قرار داشت که این موقعیت در روز حادثه بیش از یک کیلومتر افت پیدا کرده بود و تا حدود ۱/۵ کیلومتر کاهش سطح در اثر عبور سامانه‌های همدیدی پراارتفاع به کم ارتفاع، نسبت به روز گذشته، مشاهده شده است. بنابراین نمی‌توان در شکل‌گیری حادثه اخیر دخالت صعود سطوح هم‌آنژیوبی و نقش تشدیدکننده آن در کاهش دینامیکی ازن، به‌ویژه در روزهای قبلی را کاملاً رد کرد. دومین حادثه مورد بررسی که بیشترین تمرکز ماهانه حفره‌های کوچک ازن نیز در همان مقیاس زمانی مشاهده می‌شود مربوط به ماه اکتبر است که با نه رخداد LOE نسبت به سایر ماه‌های سال در ردیف بالاتری از لحاظ فراوانی قرار می‌گیرد. سه مورد از نه حادثه فوق از ۱۵ تا ۱۷ اکتبر در ۲۰۱۱ اتفاق افتاده است؛ وقتی که در بهار همان سال عمیق‌ترین حفره ازن قطب شمال نیز مشاهده شده بود. ارسولونی و همکاران (۲۰۰۳) گزارش دادند که کاهش شدید ازن در ژوئیه ۲۰۰۰ روی قطب شمال و گردش نصف‌النهاری هوای سطح پوشن‌سپهر میانی به طرف شمال نروژ موجب رخداد ازن کم در عرض‌های بالا شده است. براساس این تحقیق، می‌توان بیان داشت که حادثه‌های فوق قابلیت آن را دارند تا منجر به شکل‌گیری کاهش ازن روی مناطقی از عرض‌های متوسط از اروپا تا آسیا شوند.

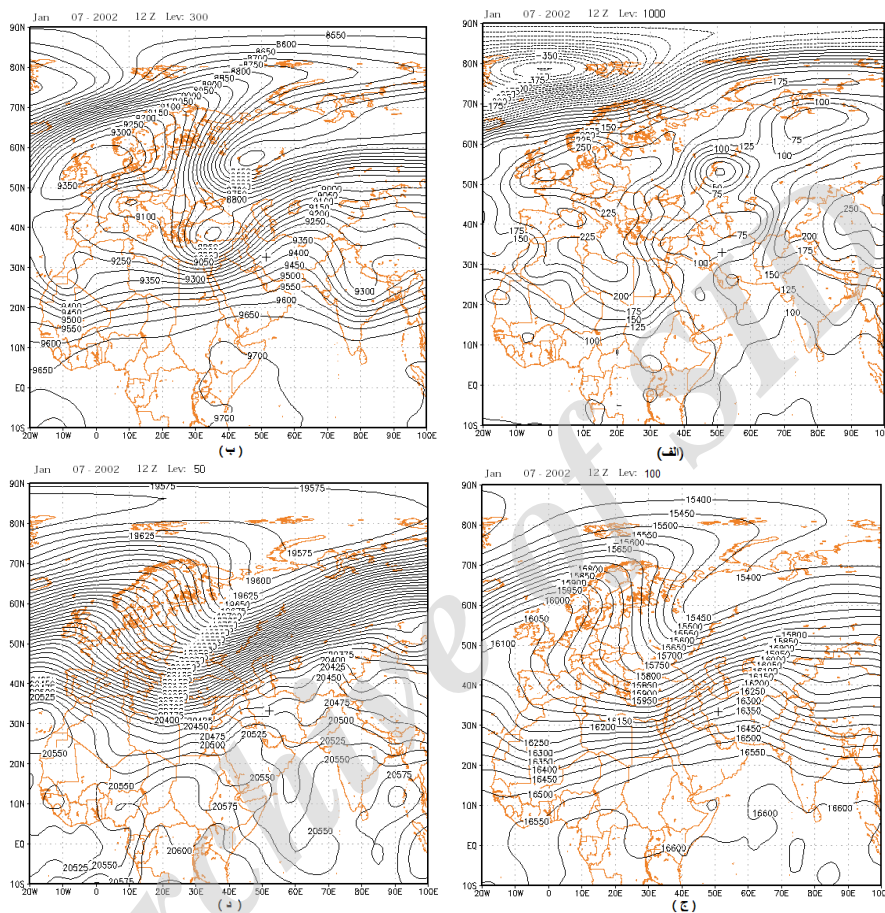
الگوهای گردشی در دومین حادثه (روز ۱۶ اکتبر با ۲۴۰ دابسون)، یک سامانه پرفشار زمینی را در مرکز اروپا نشان داده که با پشته بادهای غربی در سطوح بالاتر روی

غرب اروپا همراهی داشته است (شکل ۴-الف). این الگو تا حدودی مشابه با حادثه حفره کوچک ازن در ۷ ژانویه ۲۰۰۲ است؛ با این تفاوت که مرکز واپرخندی روی سطح زمین در مرکز و شرق اروپا و سامانه بندالی وردسپهر بالایی- پوشن‌سپهر پایینی در غرب اروپا استقرار یافته است. در توپوگرافی سطوح زمین‌پتانسیل نقشه‌های ۳۰۰ و ۱۰۰ هکتوپاسکال فرود عمیقی با محور شمال شرقی- جنوب غربی روی شرق دریای مدیترانه که با شیب تند دامنه غربی محور فرود همراهی داشته مشخص شده است.

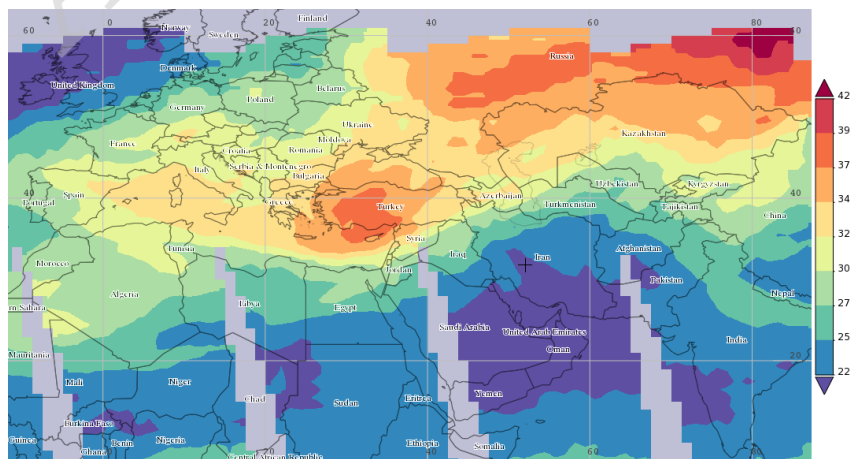
با توجه به شکل ۳-د. که الگوی گردشی هوا در ارتفاع بالاتر از ۲۰ کیلومتر در سطح ۵۰ hPa را نشان می‌دهد، بیانگر شکل‌گیری یک نوار پراارتفاع غربی- شرقی روی شمال قاره آفریقا است که جهت شرق‌سوی آن همراه با ۲۵ متر افت از روی شمال‌شرق ایران خارج شده است. با کمی دقت روی پراکندگی ستون ازن (شکل ۵) مشخص می‌شود که پشته بادهای غربی مورد اشاره، این بار نیز موجب شکل‌گیری حفره کوچک ازن روی غرب اروپا شده است. با وجود اینکه کاهش ازن روی نواحی مرکزی ایران در مقایسه با شمال غرب اروپا خیلی عمیق و متمرکز نبوده است با این حال به نظر می‌رسد که گردش جنوب‌سوی هوای دربردارنده ازن کم از روی منطقه شمال غرب اروپا در امتداد پشته بادهای غربی، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری کاهش افراطی ازن روی فلات مرکزی ایران داشته است؛ ضمن اینکه حادثه کاهش ازن روی ایران، تحت‌تأثیر سازوکار دینامیکی صعود سطوح هم‌آنژیوبی در حضور سامانه پراارتفاع مانع روی اروپا شکل یافته و در روز حادثه حرکت صعودی تا ۱۸۵۰ متر به لایه‌های بالاتر جو نیز در مرز وردایست برآورد شده است. لذا وزش افقی توده هوای متأثر از ناهنجاری منفی ازن عرض‌های بالا به سمت عرض‌های جنوبی همراه با دخالت صعود ناحیه‌ای سطوح زمین‌پتانسیل لایه‌های مجاور وردایست در شکل‌گیری این حادثه مشارکت

روی عرض‌های بالا و متوسط را به ترتیب بیشتر ناشی از پدیده انسداد جوئی و پشته بادهای غربی معرفی کرده، انطباق خوبی نشان داده است (مشابه حادثه هفت ژانویه ۲۰۰۲).

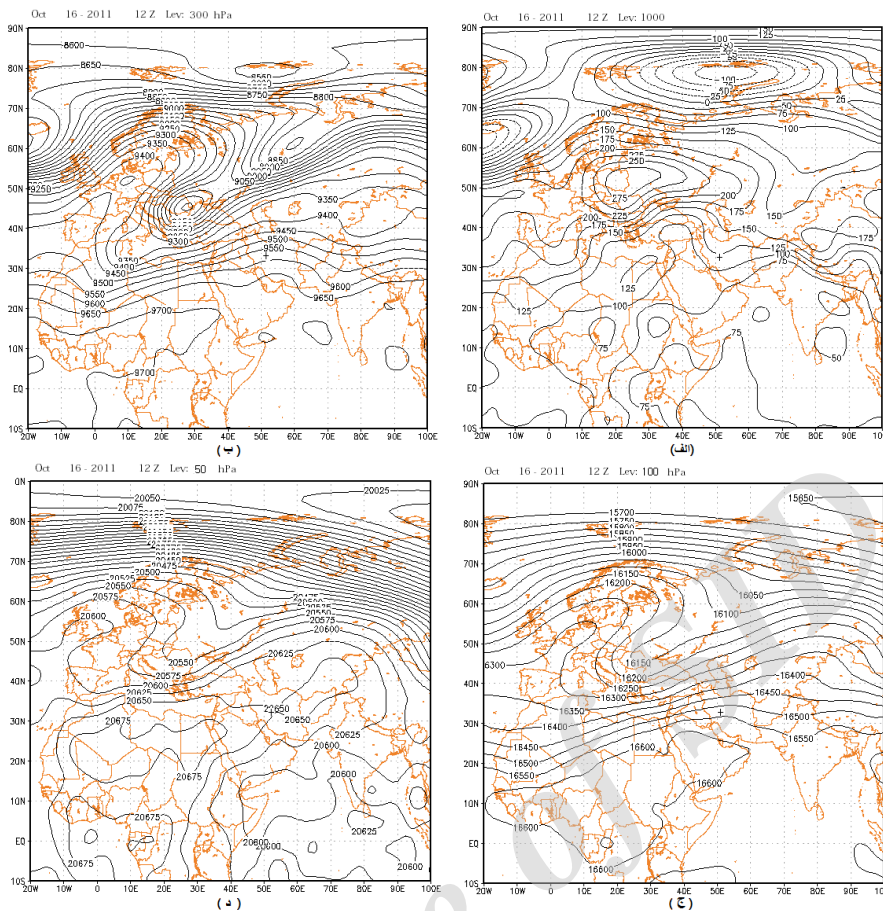
داشته است. اگر احتمال جابه‌جایی جنوب‌سوی هوای ازن کم از شمال غرب اروپا که در حادثه دوم به علت کاهش دینامیکی ازن روی اروپا استنباط شده است کنار گذاشته شود، این مشاهدات تقریباً با نتایج تحقیقات باروپدرو و همکاران (۲۰۱۰) که حفره‌های کوچک ازن



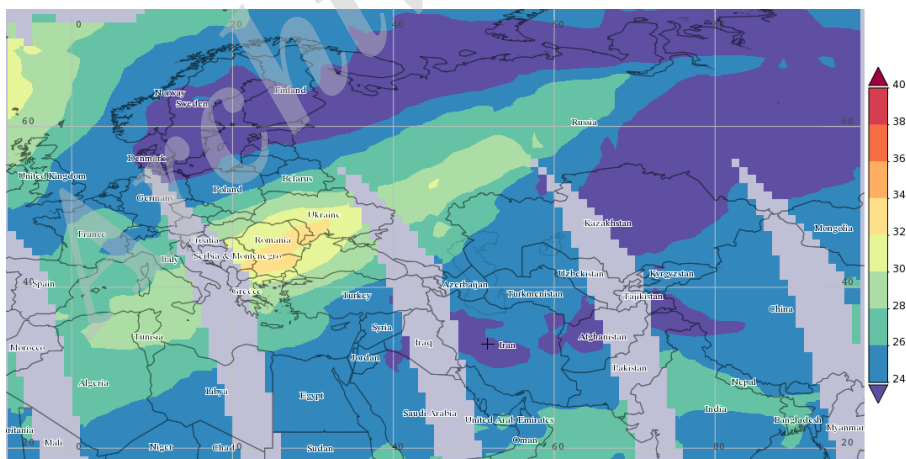
شکل ۲. ارتفاعات ژئوپتانسیل در سطوح ۱۰۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰ و ۵۰ هکتوپاسکالی روی خاورمیانه در روز هفت ژانویه ۲۰۰۲. فاصله پرندها به ترتیب ۲۵، ۵۰، ۲۵ و ۵۰ متر است.



شکل ۳. پراکندگی ازن ستون کلی برای ۷ ژانویه ۲۰۰۲ از ماهواره TOMS. فاصله پرندها ۲۵ دابسن است. در تصویر دو منطقه بسیار مهم با کاهش کمتر از تقریباً ۲۲۸ دابسن با رنگ تیره مشخص شده است.



شکل ۴. ارتفاعات ژئوپتانسیل در سطوح ۱۰۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰ و ۵۰ هکتوپاسکالی روی خاورمیانه در روز ۱۶ اکتبر ۲۰۱۱. فاصله پرندها به ترتیب ۲۵، ۵۰، ۵۰ و ۲۵ متر است.



شکل ۵. پراکندگی آزن ستون کلی برای ۱۶ اکتبر ۲۰۱۱ از ماهواره OMI. فاصله پرندها ۱۹ دابسن است.

۴. نتیجه گیری

براساس دوره یازده ساله داده های روزانه آزن پوشش سپهر (۲۰۱۱-۲۰۰۱) که با ابزار اندازه گیری زمینی (طیف-سنج پروتر) و ماهواره ای (حس گرهای TOMS و OMI) استخراج شدند، بیشترین میانگین ماهانه آزن در انتهای

فصل زمستان و ابتدای بهار و کمترین نیز در انتهای تابستان و ابتدای پاییز به ثبت رسیده است. آهنگ تغییرات انحراف معیار آزن نیز با پیروی از این الگو حداکثر و حداقل خود را به ترتیب در میانه زمستان و تابستان نشان داده است. در این تحقیق آستانه منفی دو

اقیانوس اطلس/غرب قاره اروپا که منتهی به شکل‌گیری سامانه‌های بندالی شده است، حفره‌های کوچک ازن نیز در شمال غرب اروپا مشاهده شد. با توجه به حاکمیت صعود سطوح هم‌آنتروپی مربوط به واچرخند مانع در همان منطقه و نبود نفوذ توده‌های هوای مشخصی که ازن کمی داشته‌اند می‌توان بر برتری نقش سازوکار اول در شکل‌گیری حوادث فوق‌صحه گذاشت. در عوض، دو رخداد مشاهده شده روی فلات مرکزی ایران تحت‌تأثیر دو سازوکار مورد اشاره، ولی با اولویت وزش افقی توده‌های هوای ازن کم که از طریق فرایند دینامیک دوم یعنی جابه‌جایی صعودی تشدید شده است، تشکیل شده‌اند. به عبارت دیگر حفره کوچک ازن فلات مرکزی ایران در حادثه ۷ ژانویه ۲۰۰۲ (۱۶ اکتبر ۲۰۱۱) تحت‌تأثیر جابه‌جایی افقی روبه شمال (رو به جنوب) موج‌های عبوری که شامل هوای ازن کم نواحی جنب‌حاره به طرف عرض‌های شمالی‌تر (جابه‌جایی افقی هوای کم ازن ناشی از کاهش دینامیکی عرض‌های شمالی به طرف جنوب و جابه‌جایی صعودی) بوده تشکیل شده است حال آنکه شکل‌گیری حفره‌های کوچک ازن در عرض‌های جغرافیایی بالا بیشتر تحت‌تأثیر صعود ناحیه‌ای وابسته به سامانه‌های بندالی جو قرار داشته است.

مراجع

شرعی پور، ز.، ۱۳۹۱، توزیع قائم ازن و دما روی اصفهان، پانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.

- Alados, I., Gomera, M. A., Foyo-Moreno, I. and Alados-Arboledas, L., 2007, Neural network for the estimation of UV erythema irradiance using solar broadband irradiance, *Int. J. Climatol.*, 27, 1791-1799.
- Allen, D. R. and Nakamura, N., 2002, Dynamical reconstruction of the record low column ozone over Europe on 30 November 1999, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1362, doi:10.1029/2002GL014935.
- Anton, M., Cancillo, L., Serrano, A., Vaquero, J. M. and Garcia, J. M., 2007, Ozone mini-hole over southwestern Spain during January 2004: Influence over ultraviolet radiation,

برابر انحراف معیار ماهانه به‌منزله روش انتخاب شدیدترین رخداد کاهش ستون کلی ازن، تعداد LOEs تا ۲۵ حادثه که بیشتر آنها (کمتر) به فصل‌های پاییز و زمستان (تابستان و بهار) تعلق داشته روی مرکز ایران آشکار شده است. با وجود اینکه در برخی منابع، گزارش‌هایی مبنی بر وجود عمیق‌ترین حفره‌های کوچک ازن در فصل زمستان تا حدود ۴۰٪ روی برخی از نواحی اروپا مشاهده شده است، اما کاهش ضخامت ازن روی ایران مرکزی عمق بیشتر از ۲۴٪ در ماه ژانویه را نشان نداده است و کم‌عمق‌ترین حادثه نیز در ماه اوت تا ۶٪ به چشم رسیده است. در اغلب روزهای رخداد کاهش شدید ازن، موقعیت لایه وردایست به سطوح بالاتر هدایت شده و هم‌زمان، مقدار فشار و دمای آن نیز کاهش محسوسی داشته است. در مواقع شکل‌گیری حفره‌های کوچک ازن کاهش دما در لایه پوشن سپهر پایینی به مراتب شدیدتر از افزایش دما در لایه وردسپهر بالایی بوده است.

تحلیل مسیریابی روبه عقب توده‌های هوا در لایه وردسپهر بالایی- پوشن سپهر پایینی نیز اغلب جابه‌جایی هوا را از عرض‌های به‌نسبت پایین‌تر از موقعیت اصفهان به همراه حرکت ضعیف روبه بالا در غرب ایران نشان داده است. هنگام رخداد ناهنجاری‌های منفی شدید ازن روی ایران در سطوح زمین‌پتانسیل ۳۰۰، ۱۰۰ و ۵۰ هکتوپاسکال، فرود عمیقی در شرق حوضه دریای مدیترانه به دنبال یک پشته وسیع در غرب اروپا مشاهده شد. هم‌زمان با تشکیل الگوی پشته بادهای غربی شرق

Geo Res., 34, 1-5.

- Barriopedro, D., Anton, M. and Garcia, J. A., 2010, Atmospheric blocking signatures in total ozone and ozone miniholes, *J. Climate.*, 23, 3967-3983.
- Bojkov, R. and Balis, D., 2001, Characteristics of episodes with extremely low ozone values in the northern middle latitudes 1957-2000, *Annales Geophysicae*, 19, 797-807.
- Hadjinicolaou, P. and Pyle, J., 2004, The impact of Arctic Ozone depletion on Northern Middle Latitudes, interannual variability and dynamical control, *J. Atmos. Chem.*, 47, 25-43.
- Hommel, R., Eichmann, K. U., Aschmann, J.,

- Bramstedt, K., Weber, M., Savigny, C., von Richter, A., Rozanov, A., Wittrock, F., Khosravi, F., Bauer, R. and Burrows, J. P., 2014, Chemical ozone loss and ozone mini-hole event during the Arctic winter 2010/2011 as observed by SCIAMACHY and GOME-2., *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 3247-3276.
- Hood, L. L. and Soukharev, B. E., 2005, Interannual variation of total Ozone at Northern Midlatitudes correlated with stratospheric EP flux and potential vortices, *Journal of the Atmospheric sciences.*, 62, 3724-3740
- James, P. M., 1998, A climatology of ozone mini-holes over the northern hemisphere, *Int. J. Climatol.*, 18, 1287-1303.
- Koch, G., Wernli, H., Schwierz, C., Staehelin, J. and Peter, T., 2005, A composite study on the structure and formation of ozone miniholes and minihighs over central Europe, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12810, doi:10.1029/2004GL022062.
- Krzyscin, J., 2002, Long-term changes in ozone mini-hole event frequency over the Northern Hemisphere derived from ground-based measurements, *Int. J. Climatol.*, 22, 1425-1439.
- Martinez-Lozano, J. A., Utrillas, M. P., Nunez, J. A., Tamayo, J., Marin, M. J., Esteve, A. R., Canada, J. and Moreno, J. C., 2011, Ozone mini-holes Valencia (Spain) and their influence on the UV Erythema radiation, *Int. J. Climatol.*, 31, 1554-1566.
- McPeters, R., Kroon, M., Labow, G., Brinkma, E., Balis, D., Petropavlovskikh, I., Veefkind, J. P., Bhartia, P. K. and Levelt, P. F., 2008, Validation of the Aura Ozone monitoring instrument total column ozone product, *Journal of Geophysical Research*, 113(D15S14), 1-9.
- Newman, P. A., Lait, L. R. and Schoerbel, M. R., 1988, The morphology and meteorology of southern hemisphere Spring total ozone mini-hole, *Geophysical Research Letters*, 15, 923-926.
- Orsolini, Y., Eskes, H., Hansen, G., Hoppe, U., Kylling, A., Kyrö, E., Notholt, J., van der A. R. and von der Gathen, P., 2003, Summertime lowozone episodes at northern high latitudes, *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 129, 3265-3275.
- Seman, N., Teitelbaum, H. and Basdevant, C., 2002, A very deep ozone mini-hole in the Northern Hemisphere stratosphere at mid-latitudes during the winter of 2000, *Tellus*, 54A, 382-389.
- Sola, Y. and Lorent, J., 2011, Impact of two low Ozone event on surface solar UV radiation over Northeast of Spanish, *Int. J. Climatol.*, 31, 1724-1734.
- Son, S. W., Polvani, M. P., Waugh, D. W., Birner, T., Akiyoshi, H., Garcia, R. R., Gettelman, A., Plummer, D. A. and Rozanov, E., 2009, The impact of stratospheric Ozone recovery on tropopause height trends, *Journal of Climate*, 22, 429-445.
- Stick, C., Krüger, K., Schade, N., Sandmann, H. and Macke, A., 2006, Episode of unusual high solar ultraviolet radiation over central Europe due to dynamical reduced total ozone in May 2005, *Atmospheric Chemistry Physics*, 6, 1771-1776.
- United Nation Environment Program (UNEP), 2007, Environmental effects of Ozone depletion and the interaction with climate change, 2006 Assessment, 978-92-807-2821-7, OZO/0947/NA.
- Varotsos, C., Cartalis, C. and Valamakis, A., 2004, Long-term coupling between column Ozone and tropopause properties, *J. climatol.*, 17, 3843-3854.
- Werner, R., Valev, D., Atanassov, At., Kostadinov, I., Petkov, B., Giovanelli, G., Stebel, K., Petritoli, A., Palazzi, E., Gausa, M. and Markova, T., 2009, Ozone mini-hole observation over the Balkan Peninsula in March 2005, *Advances in Space Research*, 43, 195-200.
- WMO, 2014, Scientific assessment of Ozone depletion; 2014. Report No. 56, Global Ozone Research and Monitoring Project, Geneva, Switzerland.
- WMO, 1992, International meteorological vocabulary WMO/OMM/BMO – No. 182. (Second edn). Secretariat of the World Meteorological Organization–Geneva–Switzerland: Geneva; 784.
- UNEP/WMO, 1957, Definition of the thermal tropopause. 195 pp.

The synoptic analysis of ozone mini-hole events over central Iran (Esfahan)

Farajzadeh, M.^{1*}, Ghavidel Rahimi, Y.², Ali-Akbari Bidokhti, A. A.³ and Moosavi, S.⁴

1. Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3. Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

4. Ph.D. Student, Department of Physical Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received: 16 Nov 2015, Accepted: 18 Oct 2016)

Summary

In this study, the daily Total Ozone Column (TOC) measured by the instruments of TOMS (2001) and OMI (2005-2011) satellites and Brewer ground station (2002-2004) is used to investigate the extreme ozone mini-holes over Esfahan. Based on previous reports on validation of the TOC data products, it is found that there is no problem with homogenization of data records, which was provided by the above measuring instruments. Firstly, it is shown that the TOC monthly mean and standard deviation over central Iran depend on the seasonal cycle with maximum values of 298 and 27 DU in winter and minimum values of 270 and 8 DU in summer, respectively. The difference between the maximum and minimum climatological monthly means is 53 DU. Regarding the absolute values of TOC, the maximum (minimum) amplitude is related to the winter season with 169 DU in Feb (summer with 39 DU in Aug). Due to the minus twice standard deviation of the monthly average which is known as the threshold chosen to identify the possible ozone mini-holes, 25 events are detected during the study period with maximum concentrations, of which 16 and 7 cases occurred in autumn and winter seasons, respectively. The most occurrences of ozone mini-hole are seen in 2005 and 2011 with 7 and 6 events, respectively. It is worthwhile to mention that the lowest levels of ozone in Arctic were also seen during the two mentioned years from 2001 to 2011. Nevertheless, no mini-holes were detected for three years 2003, 2004 and 2009. The range of ozone negative anomalies is confined from around 24% in winter (Jan) to 6% in summer (Aug). However, it was reported that ozone mini-holes in some regions have reduced the TOC up to 40% of climatology mean of mid and high latitudes over the northern hemisphere. It is found that during ozone mini-hole events, the Tropopause Height (TH) tends to move upwards (with a maximum of 5.5 km higher than monthly average on 10 March 2008) which in turn leads to decrease in the temperature and pressure of TH. Similar to its seasonal cycle, the low observed values of the tropopause temperature and pressure in summer is stronger than winter season. In general, the ranges of temperature (pressure) in the thermal tropopause during low ozone events becomes from -2.3°C (-27 hPa) in February 2006 to -15.5°C (-115 hPa) in March 2008. However, the mentioned above pattern almost explains the maximum events, the observed ozone mini-holes in January 2002 do not show similar anomalies in TH. It is more probably that low ozone events during the January of 2002 are more related to the meridional transport of air masses with climatology low ozone from the subtropical latitude which is poleward near the tropopause. Backward trajectory analysis also showed that the origins of poor ozone air masses in the spring/summer (autumn/winter) seasons are related to the eastern areas (western areas) of Iran. On 7 Jan 2002 at 16 km altitude (on 16 Oct 2011 at 22^{km} altitude), the lower part of trajectory analysis, is more characterized by horizontal movement of poor ozone air mass from lower latitude (higher latitude). During the two extreme low ozone events over Esfahan which approximately correspond to the deepest events and eventful periods, two broad ridges are seen over coastal line of North-West Europe along with two deep troughs in the eastern-central Mediterranean Sea. The blocking ozone mini-holes over North-West Europe are related to the upward movement of geopotential height in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) region which is in agreement with both the advection of poor ozone air from the sub-tropical (7 Jan 2002) and the higher latitudes (16 Oct 2011) toward the mid latitudes over central Iran.

Keywords: Central Iran, Total Ozone Column (TOC), Ozone mini-hole, Tropopause Height (TH).

*Corresponding author:

farajzam@modares.ac.ir