تحلیل همدیدی رخداد حفرههای کوچک اُزن در منطقهٔ ایران مرکزی (اصفهان)

منوچهر فرجزاده "*، يوسف قويدل رحيمي"، عباسعلي علىاكبر بيدختي" و سيد شفيع موسوى *

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 ۲. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، 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)

چکیدہ

این تحقیق با بهرهگیری از دادههای روزانهٔ ازن پوشن سپهر روی اصفهان که با حس گرهای زمینی بروئر و ماهوارههای TOMS و MOI از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ اندازه گیری شده، بهمنظور شناسایی و بررسی شدیدترین رخداد کاهش ازن (حفرهٔ کوچک ازن) به کار گرفته شد. با به کارگیری آستانهٔ منفی دوبرابر انحراف معیار ماهانه، ۲۵ رخداد حفرهٔ کوچک ازن در طول دورهٔ مورد بررسی نمایان شد که بیشترین تمرکز آنها با شانزده و هفت مورد بهترتیب در پاییز و زمستان اتفاق افتاده است. دامنهٔ ناهنجاری منفی نمایان نمایان شد که بیشترین تمرکز آنها با شانزده و هفت مورد بهترتیب در پاییز و زمستان اتفاق افتاده است. دامنهٔ ناهنجاری منفی آنها نیز از عمق ۲۰۰۷ در زمستان تا ۲۰ در تابستان در نوسان بوده است. این بررسی روشن ساخت که در مواقع شکل گیری حفرههای کوچک ازن، ارتفاع وردایست (TH) به تراز بالاتر جوّ منتقل می شود و همزمان دما و فشار آن نسبت به میانگین درازمدت، کاهش محسوسی می یابد. نقشههای سطوح زمین پتانسیل در ناحیهٔ وردسپهر بالایی و پوشن سپهر پایینی (UTLS) درازمدت، کاهش محسوسی می یابد. نقشههای سطوح زمین پتانسیل در ناحیهٔ وردسپهر بالایی و پوشن سپهر پایینی (UTLS) مرزامدت، کاهش محسوسی می یابد. نقشههای سطوح زمین پتانسیل در ناحیهٔ وردسپهر بالایی و پوشن سپهر پایینی (PULS) مرزازمدت، کاهش محسوسی می یابد. نقشههای سطوح زمین پتانسیل در ناحیهٔ وردسپهر بالایی و پوشن سپهر پایینی (PULS) مرزازمدت، کاهش محسوسی می یابد. نقشههای سطوح زمین پتانسیل در ناحیهٔ وردسپهر بالایی و پوشن سپهر پایینی (UTLS) مدر ازمدت، کاهش محسوسی می یابد. نقشههای سطوح زمین پتانسیل در ناحیهٔ وردسپهر بالایی و پوشن سپهر پایینی (PULS) مدینرازمدت، کاهش مدید آزن، رازن روی فلات ایران، پشتهٔ عمیقی را روی شمال غربی اروپا که با فرودی در شرق دریای مرزان داده است. علاوه بر الگوی همدیدی مشاهده شده در ناحیهٔ کاروپا که با فردی در ها مرکزی ایران که مدیترانه همراهی داشته نشان داده است. علاوه بر الگوی همدیدی مشاهده شده در ناحیهٔ کانوپی کرد) و عرضهای بالا (حاد ته او موجب تسهیل در وزش افقی هوای ازن کم از منشا عرضهای جنحاره کارو در داخته ۷ ژانویه ۲۰۰۱) و عرضهای بالا (حاد ته او موب تشدید کاهش ازن موجب شرهیر می می شرم می شور و مورای مروزی بولی می مولی موجب تشدید کاهش ازدن پوش موی مولی مولی می موبر مولی مو موب موه مولی مردن بوی مولی مولی موب

واژههای کلیدی: ایران مرکزی، ستون کلی اُزن، حفرهٔ کوچک اُزن، ارتفاع وردایست.

۱. مقدمه

لایهٔ ازن پوشن سپهری نقش مهمی در تعادل اقلیم و محافظت از حیات زمین در برابر پرتو زیانبار فرابنفش خورشید ایفا می کند (یونپ، ۲۰۰۷). ضخامت این لایه در چند دههٔ پایانی قرن بیستم و ابتدای قرن حاضر، به علت مصرف زیاد گازهای مصنوعی کلر و برم و تمرکز آنها روی ابرهای سرد قطبی با شکل گیری حفره های بزرگ ازن روبه کاهش رفته است (ارسلونی و همکاران، ۲۰۰۳). نازک شدن ضخامت لایهٔ ازن پوشن سپهر فقط به عرض های قطبی محدود نشده و این کاهش در سایر از علت های مهم کاهش تدریجی ستون کلی ازن (TOC) در عرض های معتدل می توان به صعود جهانی موقعیت لایهٔ وردایست اشاره داشته است (وارتسوز و همکاران،

۲۰۰۴).گرمایش وردسپهر ناشی از انتشار گازهای

گلخانهای و سرمایش پوشنسپهر مرتبط با کاهش اُزن،

عمدهترين عوامل تغييرات سطح ارتفاع وردايست معرفى

شدهاند (وارتسوس، ۲۰۰۴؛ سان و همکاران، ۲۰۰۹). اُزن

هرساله بعد از تولید فتوشیمیایی روی منطقهٔ حاره، از راه

چرخهٔ عمومی بروئر– دابسُن از لایهٔ پوشنسپهر میانی-

پایینی روی قطب نیمکرهٔ زمستانی تجمع مییابد (هوود و سوخارو، ۲۰۰۵؛ اورسلونی و همکاران، ۲۰۰۳). اگر

ضخامت لايه أزن تحت واكنش هاى نامتجانس شيميايي

درون تاوهٔ قطبی بسیار سرد دچار تخریب شود و یا با

تضعيف چرخه بروئر- دابسُن بين نواحي حاره و قطب، اُزن

کمتری روی عرضهای بالا انباشته شود (هومل و

همکاران، ۲۰۱۴)، قادر خواهد بود سایر نواحی عرضهای

جغرافيايي بالا و متوسط را در مواقع وزش افقي جنوبسو،

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 ناحیهٔ جغرافیایی مرتبط با عرضهای میانه و بالا نیمکره شمالی وجود دارد که در فصلهای مشخصی از سال (اواخر زمستان و اوایل بهار) بیشتر با حادثه های کاهش شدید اُزن پوشن سپهر مواجه می شوند (سیمن و همکاران ۲۰۰۲؛ استیک و همکاران ۲۰۰۶). این حوادث که به حفرههای کوچک اُزن معروف هستند (نیومن و همکاران، ۱۹۸۸)، بیشتر در مسیر عبور سامانههای ناپایدار در جوّ که از جنبههای دینامیک فعالتر هستند مشاهده می شوند (جیمز، ۱۹۹۸). نواحی متأثر از اُزن کم نه فقط مساحت کوچک تری از حفرههای بزرگ دو قطب دارند (۱۰۰۰km) (نیومن و همکاران، ۱۹۸۸) بلکه دوره زمانی شکلگیری آنها نیز کوتاه (حدود دو تا هفت روز) است و بهسرعت ناپدید میشوند (اورسلونی و همکاران، ۲۰۰۳؛ آنتون و همکاران، ۲۰۰۷). سامانههای بندالی جوّی و پشتهٔ موج بادهای غربی از عارضههای مهم همدیدی هستند که در شکل گیری حفرههای کوچک اُزن بهترتیب روی عرضهای بالا و متوسط نیمکره شمالی غلبه دارند (کوچ و همکاران، ۲۰۰۵؛ باروپدرو و همکاران، ۲۰۱۰). بروز ناهنجاری منفی اُزن در همین مدت کوتاه روی عرضهای میانه و محیطهای کوهستانی، بهویژه اگر در فصل های تابستان یا بهار مشاهده شوند، تابش زیانبار UV-B خورشید را بهطور قابلملاحظهای روی سطح زمین افزایش میدهد (استیک، ۲۰۰۶). افزایش شدت تابش زيانبار فرابنفش خورشيد درنهايت منجر به صدمات زیستمحیطی بر بومساز گانهای گیاهی و جانوری میشود (آلادوس و همکاران، ۲۰۰۷). در این تحقیق تمرکز اصلی را ابتدا روی تعیین آستانههای تشخیص حوادث أزن 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 شکل گیری رخداد کاهشی اُزن (حفرههای کوچک اُزن)

خود تحت تأثير ناهنجاريهاي منفي قرار دهد (هاجي نيكولا و پیل، ۲۰۰۴). حفرههای بزرگ اُزن در فصل بهار هر سال روی منطقهٔ جنوبگان مشاهده می شود اما این حادثه در قطب شمال چندان پدیدهٔ شایعی نیست. به همین علت رخداد پیش آمده در ۲۰۱۱ روی شمالگان، از سوی دانشمندان، درحکم نادرترین حادثةناهنجاری منفی اُزن قلمداد شده است (سازمان هواشناسي جهاني، ۲۰۱۴؛ هومل و همکاران، ۲۰۱۴). حادثهٔ مزبور تا بخشهایی از شمال اروپا را با جابهجایی تاوهٔ قطبی بهسمت عرض های جنوبی، تحت تأثير خود قرارداده است. ارسلونی و همکاران (۲۰۰۳) روشن ساختند که منشأ تشکیل تعداد زیادی از حادثههای اُزن کم روی اروپا در سال ۲۰۰۰ مربوط به کاهش افراطی آن روی قطب شمال در طول همان دوره بوده است. باوجود این علت اصلی شکل گیری حوادث اُزن کم روی عرضهای متوسط و بالا از کاهش شیمیایی اُزن روی دو قطب ناشی نشده است بلکه برخی سازوکارهای دینامیکی و فتوشیمیایی گردش عمومی جوّ در بروز آنها نقش بیشتری داشته است. تحقیقات زیادی وجود دارد که دخالت سامانههای واچرخندی (چرخندی) هوا را در شکل گیری رخداد حفرههای (بیشینههای) کوچک اُزن نشان میدهد (وارتسوز و همکاران، ۲۰۰۴؛ کوچ و همکاران، ۲۰۰۵). این سامانهها گاهی با یک پشته (فرود) در امواج بادهای غربی که هوای عرضهای جنوبی تر (شمالی تر) را به عرض های شمالی (جنوبی) هدایت میکنند، میتوانند سطوح معینی از ناهنجاریهای منفی (مثبت) اُزن را در قشر بالایی لایهٔ 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 شکل گیری ناهنجاریهای منفی (مثبت) اُزن کمک خواهد کرد. دو سازوکار مهم همرفت افقی تودههای هوای اُزن کم و صعود محلی سطوح هم آنتروپی، نقش برجستهای در کاهش موقت (چندروزه) و شدید اُزن در عرضهای متوسط و بالا ایفا می کنند (آلن و ناکامورا، ۲۰۰۲؛

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

۲. دادهها و روشها

در این تحقیق دادههای اُزن پوشنسپهر در واحد دابسُن روی موقعیت جغرافیایی اصفهان برای یک دورهٔ آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ استخراج شده است. ستون کلی اُزن (TOC) با دو سامانهٔ اندازه گیری زمینی (از ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۳) و ماهوارهای (از ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۱) بهترتیب از راه دستگاه طيفسنج بروئر و ابزار OMI مرتبط با ماهواره Aura بهدست آمده است. در روش زمینی اندازه گیریها در ظهر محلی بهصورت نقطهای از ایستگاه اُزن سنجی اصفهان (۳۲,۳۷°N) 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. درضمن دادههای روزانه اُزن ۲۰۰۱ متعلق به ماهوارهٔ ایرت پروب از سری ابزار اندازه گیری اُزن TOMS است که شبکهٔ مختصات آن °۲/۲۸×۱ (عرض × طول) گستر دگی داشته است. یکی از وظایف اصلی ابزار OMI، ادامهٔ اندازه گیری اُزن بهدنبال یایان مأموریت TOMS از ژوئیه ۲۰۰۴ بوده است. این ابزار قادر به تصويربر داري طيفي گستر ده با حالت جارويي متوالي تابش پراکنده برگشتی خورشید در باندهای نور مرئی و فرابنفش است. دادههای اُزن در شبکهٔ مختصات E ۱°N×۱°E (عرض جغرافیایی × طول جغرافیایی) گستردگی دارد که هر روز تقریباً هنگام ظهر خورشیدی با در نظر گرفتن موقعیت جغرافيايي ايستگاه اصفهان از نزديکترين محل نسبت به ایستگاه فوق یعنی (°۵۱/۳۰ طول شرقی و[°] ۳۲/۳۰ عرض شمالی) استخراج شدند. براساس بررسی صورتگرفته، دادههای اُزن مرتبط با ابزار اندازه گیری OMI سازگاری خوبی با سری دادههای TOMS نشان داده است و برای بسط طول دورهٔ آماری و تحلیل روند، شرایط مطلوبی دارد

(مکیپیتز و همکاران، ۲۰۰۸). ذکر این نکته نیز ضروری بهنظر میرسد که برپایهٔ 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 مکیپیتز و همکاران (۲۰۰۸) اشاره کرد. آنها از راه مقایسهٔ ۷۶ ایستگاه زمینی که به سامانههای اندازه گیری دابسُن و بروئر مجهز بودهاند مشخص ساختند که میانگین دادههای ستون اُزن OMI-TOMS حدود /۲۰۰۴ بیشتر از میانگین ایستگاههای زمینی بوده است.

همچنین در ادامهٔ پژوهش، برای روزهای همراه با قوىترين بى هنجارى هاى منفى أزن در ايستگاه اصفهان از دادههای پرتوگمانه مرتبط با ناحیهٔ وردسپهر بالایی و پوشنسپهر پایینی استفاده شده است. بهدنبال شناسایی روزهای همراه با بیهنجاری منفی اُزن (Low Ozone Events)، دادههای نیمرُخ دما، فشار و ارتفاع زمین پتانسیلی از تارنمای دانشگاه وایومینگ برای تعیین سطح وردایست و ویژگیهای آن روی ایستگاه مورد اشاره استفاده شده است. براساس تعريف سازمان جهانی هواشناسی، سطح وردایست پایینترین ارتفاع لایهٔ وردسپهر آزاد، محلی که نرخ کاهشی دما به کمتر از دو کلوین در هر کیلومتر برای ضخامت حداقل دو کیلومتر در جوّ میرسد تعیین شده است (UNEP/WMO، ۱۹۵۷ و WMO، ۱۹۹۲). همچنین میانگین درازمدت ماهانه ارتفاع وردایست، دما و فشار از داده های باز تحلیل NCEP-NCAR محاسبه شده است. از سایر دادههایی که در این تحقیق به کار گرفته شد می توان به مدل هیسپلیت (Hybrid Single-Particle lagrangian Integrated Trajectory Model)، نقشههای همدیدی سطوح وردسپهر و پوشنسپهر پايينی و ميزان پوشش اًبرناکی در روزهای مورد بررسی اشاره کرد.

براساس تحقیقات گذشته روی ناهنجاریها منفی اُزن، روشهای متعددی برای تشخیص رخداد کاهش افراطی اُزن در لایهٔ پوشنسپهر پیشنهاد شده است. بعضی محققان در تحقیقات خود از یک آستانهٔ ثابت برای انتخاب چنین به دورهٔ سرد سال با متوسط ۲۷ دابسُن و کمترین تغییرات نیز به دوره گرم سال با ۸ دابسُن اختصاص یافته است. این تغییرات فصلی اُزن با الگوی دینامیک جوّ ارتباط بسیار نزدیکی دارد. افزایش زمستانهٔ اُزن روی عرضهای متوسط زمانی که سامانههای همدیدی منطقه فعال هستند، از گردش نصفالنهاری قطبسوی چرخهٔ بروئر-دابسُن در منطقهٔ حاره در لایه های پوشن سپهر پایینی منشأ می گیرد. اما در فصل تابستان با تضعیف گردش عمومی بروئر – دابسُن، تعدیل اغتشاش ها و تداخل کم تودههای هوای عرضهای بالا و متوسط، شرایط شکل گیری محدودهٔ گستردهای با هوای انباشته از اُزن کم در قطب را فراهم میسازد. (اورسولونی و همکاران.، ۲۰۰۳؛ سولا و لورنتو، ۲۰۱۱). همین عامل نقش مهمی در کاهش تابستانه و پاییزی اُزن روی عرض های متوسط و بالا در نیمکرهٔ تابستان بازی می کند. همچنین در این جدول ارقام ماهانه آستانههای تشخیص LOEs بر مبنای مقادیر منفی دو برابر انحراف معیار (20-) هر ماه مشخص شده است. آستانه های تعیین حفرههای کوچک اُزن از ۵۸– دابسُن در ماه فوریه تا ۱۶– دابسُن در ماههای اوت و سپتامبر متغیر است. درنهایت با استفاده از آستانه های مشخص شده تعداد ۲۵ رخداد حفرهٔ کوچک اُزن (LOE) در فلات مرکزی ایران برای یک دورهٔ ۱۱ ساله شناسایی شده است. مارتینز و همکاران با روش فوق برای شناسایی حفرههای کوچک اُزن روی شرق مرکز اسیانیا در یک دورهٔ 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 اَبرناکی، فشار و دمای ارتفاع وردایست را نشان میدهد. در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۱۱ بهترتیب با هفت و شش مورد حادثه حفرهٔ کوچک اُزن که سه دوره با توالی سه روزه همراه بوده است، بیشترین تعداد را داشته و سال.های ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۹ در این تحقیق، بدون حادثه مشخص شده است. بالاترین درصد کاهش اُزن (۲۴٪) مربوط به دورهٔ سرد سال در ژانویه ۲۰۰۲ و کمترین درصد (۶/۱ ٪) به ماه اوت ۲۰۰۱ اختصاص یافته است.

ناهنجاری های کاهشی اُزن استفاده کردند (جیمز، ۱۹۹۸؛ بوجکوو و بالیز، ۲۰۰۱؛ کرزسین، ۲۰۰۲) و تعدادی دیگر ارقام متغیری برمبنای 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 لورنتو، ۲۰۱۱). با توجه به ضرورت تعیین حادثه های اُزن کم (LOEs) در همهٔ ماههای سال، چنانچه از روش اول در گزینش آنها استفاده شود، دورهٔ بررسی این تحقیق تحتالشعاع فصل های سرد سال به چند حادثه محدود می شود و امکان مشاهدهٔ رخدادها در طول دوره ای گرم سال که تابش UV-B زیادی نیز دارد، از دایرهٔ این تحقیق خارج میشد. 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 پیش گفته برای هر حادثه در یک دورهٔ 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 زمین پتانسیل سطوح ۵۰ و ۱۰۰ (تقریباً پوشن سپهر پایینی)، ۳۰۰ (وردسپهر بالایی) و ۱۰۰۰(سطح زمین) هکتوپاسکال با هدف آشکارسازی نقش فرایندهای دینامیکی و همدیدی در شکل گیری عارضهها، به کمک دادهای بازتحلیل شدهٔ NCEP-NCAR ناسا صورت گرفت.

۳. نتايج و بحث

۳. ۱. آشکارسازی حفرههای کوچک اُزن

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

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

٣. ٢. تغييرات سطح لاية وردايست

در این تحقیق براساس تعریف پیشنهاد شده از حفرهٔ کوچک اُزن، 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 حادثهٔ حفرهٔ کوچک اُزن را داشتهاند. برای آگاهی از کمیت و کیفیت ناهنجاری پارامترهای جوّی سطوح بالا در روزهای حادثه (نسبت به یانگین درازمدت)، متوسط مقادیر مشاهده شده ارتفاع، میانگین درازمدت)، متوسط مقادیر مشاهده شده ارتفاع، مانگین درازمدت)، متوسط مقادیر مشاهده شده ارتفاع، مانگین درازمدت)، متوسط مقادیر مشاهده شده ارتفاع، وردسبهر بالایی هر ماه (در صورت مواجه با رخداد LOE) سرد و کاهش فشار در سطح لایهٔ وردایست یعنی مرز وردسبهر بالایی و پوشنسپهر پایین در همهٔ ماهها (به استئنای حوادث ماه ژانویه) به خوبی قابل تشخیص است.

پوشنسپهر، نرخ دمای این لایه سردتر از میانگین اقلیمی درازمدت خود می شود و همزمان، سطح TH نیز به ترازهای بالاتر جوّ صعود می یابد که در بعضی از رخدادها نظیر حادثهٔ ماه مارس و مه تا ۵/۵ و سه کیلومتر به ترتیب افزایش داشته است.

نتايج اين بخش انطباق خوبي با تحقيقات سولا و لورنت (۲۰۱۱) و مارتینز – لوزانو و همکاران (۲۰۱۱) نشان داده است. آنها نیز در چند رخداد حفرهٔ اُزن با افزایش ارتفاع وردایست که توأم با کاهش فشار و دمای لایه آن بوده است را گزارش کردند. برای نمونه در ۱۰ ژانویه ۲۰۰۴، 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 ناحیهٔ پوشنسپهر پایین به WC°- (۱۵ درجه کمتر از میانگین درازمدت ۱۹۷۷–۲۰۰۱) تنزل یافته بود. اما برخلاف رخدادهای مشاهده شده روی اصفهان، با توجه به بیشترین کاهش اُزن (۲۴٪) در ۷ ژانویهٔ ۲۰۰۲ و چند روز پیرامون آن، تغییرات پارامترهای جوّی لایه وردایست آنگونه که در سایر ماههای مشاهده شده در روزهای مورد اشاره روی نداده است. احتمالاً کاهش افراطی اُزن در طول این چند روز تحت تأثیر عوامل دیگری که به تغییرات سطح وردایست مربوط نمی شد، بوده است، بهویژه اینکه شرایط اَبرناکی بسیار زیاد تا٪۸۰ و ناپایداری جوّی در همان روز نیز حکایت از حضور سامانهٔ کم فشار در سطح منطقه دارد.

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

دسامبر	نوامبر	اكتبر	سپتامبر	اوت	ژوئيه	ژوئن	مى	آوريل	مارس	فوريه	ژانو ی ه	
777	۲۷۳	260	۲۷۳	۲۷۸	۲۷۹	777	۲۸۸	198	298	291	291	ميانگين
۲۵	١٧	۵, ۱۰	٨	٨	۸,۵	٨	۱۵	19,0	74	۳۰	26	انحراف معيار
747	749	749	797	799	111	۲۷۳	262	469	281	404	707	میانگین حداقل
41.	4.1	۲۸۰	777	YAA	YAY	247	317	461	401	***	441	میانگین حداکثر
777	739	74.	747	791	260	261	707	409	241	***	177	حداقل مطلق
***	41.	79 V	290	۳.,	4.0	414	368	484	4.4	۳۸۶	***	حداكثر مطلق
-۵۰	-۳۳	-41	-18	-18	-17	-17	-۳1	-۳۹	-۴۸	-01	-04	-2σ

TT (°C)	TP (hPa)	شرايط اَبرناكي	درصد کاهش	TOC (DU)	روز	سال
-84	۱۸۳	۲ <u>.</u> ۵	./.N/X	۲۳۸	۲ ژانو یه	
-77	٩٥	•	<i>'</i> . <i></i> ?/1	481	۲۴ اوت	21
-64	11.	·/. Y •	·/.A	444	۲۹ اکتبر	
- ۵ •/۵	T 1V	۲.۳۰	·/. ۲۲ /۳	228	۳ ژانو یه	
-۵۸	۱۸۰	7.00	' /۶	221	۶ ژانو یه	.
-06	470	/ . .	% * *	221	۷ ژانو یه	11
-۵۲	74.	·/. * •	·/. ۲۲ /۳	228	۸ ژانو یه	
-\$A/Q	101	۲ <u>/</u> ۱۲	۲ <u>/۸/۳</u>	744	۳۰ اکتبر	
-%٣/٩	۱۳۲	` <u>/.</u> 9•	"/.NA/V	228	۶ دسامبر	
-VY/٣	٩٠	۲/۵/۲/۵	·/. Y •	***	۹ دسامبر	
-08/1	۲۳۳	<i>.</i> ۵٪	7.19	470	۱۰ دسامبر	20
-83/1	۱۳۳	۲/۵/۲/۵	7.19	470	۲۱ دسامبر	
-89/0	10.	<u>٪۳</u> ۰	./ \	***	۲۲ دسامبر	
-80/0	120	' . ۴۵	"/.NA/V	228	۲۳ دسامبر	
-9•/A	۱۷۳	·/.v۵	:/ .۲۳	226	۸ فوريه	79
-V1/٣	1.0	7.10	·/.A	744	۱۸ اکتبر	
-٧٢/٣	٩۴/۵	·/. Y •	'/. A	744	۱۹ اکتبر	*•• V
-64/4	١٠٨	·/. Y •	·/.٨/٣	264	۲۰ اکتبر	
-V۵/V	۱۰۰	·/. * •	1.14/0	739	۱۲ نوامبر	
-۷۴/۵	۸۰/۳	·/. Y •	1/19/0	747	۱۰ مارس	2
-V1/٣	١٠٩	7.0	'/.٨/۶	747	۲۰ اکتبر	2010
-V۶/1	۸۴/۳	<u>'/</u> *•	7/17/0	707	۱۷ مه	
-V۴/۳	١٠٨	<u>//</u> ٣•	1/17/0	707	۱۸ مه	
-VA/1	۸۰/۹	<u>//</u> ٣•	7.11/1	408	۱۹ مه	¥
-V1/V	1.4	<u>/</u> ۱۰	<u>'/۸/۳</u>	264	۱۵ اکتبر	
-V1/V	٧۶	<i>.</i> /۵	% 9/¥	46.	۱۶ اکتبر	
-77/0	٩٥	1.17/0	۲ <u>/۸/۳</u>	264	۱۷ اکتبر	

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

جدول ۳. تعداد حفرههای کوچک اُزن و تغییرات ماهانهٔ دما، فشار و ارتفاع ژئوپتانسیل نسبت به میانگین درازمدت ۱۹۸۱–۲۰۱۰ مرتبط با سطح وردایست

دسامېر	نوامبر	اكتبر	سپتامبر	اوت	ژوئيه	ژوئن	مە	آوريل	مارس	فوريه	ژانویه	
۶	١	٩	•	١		٠	٣	•	١	١	۵	تعداد حفرههای کوچک اُزن
-4	-14/1	-٣/۵	NE	-4	NE	NE	-17	NE	-10/0	- ۲ /۳	٣/۶	بیهنجاری دمایی (°C)
-44	۵۵–	-74	NE	-V	NE	NE	-04	NE	-110	-44	۱۹	بیهنجاری فشار (hPa)
*•٧٨	264.	177.	NE	400	NE	NE	2974	NE	۵۵۷۶	11	-240	بیهنجاری ارتفاع TH (metre)

NE (No Event) دلالت بر مشاهده نشدن حادثهٔ حفرهٔ کوچک اُزن و تحلیل داده جوّی در همان دوره دارد.

حارهای را در شکل گیری حفرههای کوچک اُزن مشخص می کند. البته در یک دورهٔ سه روزه، رخداد کاهش اُزن 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 دربارهٔ شکل ۱ قابل بیان است، جابهجایی ارتفاع بعضی از سطوح همآنتروپی در هنگام وزش افقی تودههای هوا روی موقعیت اصفهان یا در مجاورت آن است. در بعضی رخدادها از میان ۲۵ حادثه، می توان یک جابه جایی عمودی روبه بالای سطوح هم آنتروپي درحوالي موقعيت اصفهان را مشاهده كرد (همهٔ تصاویر آورده نشده است). اما با توجه به ارقام جدول ۳ درخصوص میانگین جابهجاییهای عمودی ارتفاع وردایست (TH) میتوان اذعان داشت که تغییرات کاهشی فشار در محدودهٔ UTLS از راه واگرایی ناحیهٔ یوشن سیهر پایینی و اُفت فشار اُزن نقش برجستهای در کاهش ستون کلی اُزن در روزهای حادثه داشته است. مثلاً در یدیدهٔ ۷ ژانویه ۲۰۰۲ با کمترین ضخامت اُزن با ۲۲۱ دابسُن (۲۴٪-) در طول دورهٔ آماری به ثبت رسیده است. بااینکه عامل گردش سریع هوای عرضهای پایین (دارای اُزن کم) به طرف عرضهای بالاتر در بروز حادثه فوق سهم بیشتری داشته است، اما جابهجایی ضعیف روبه بالای سطوح هم آنتروپی (تقریباً نیم کیلومتر) در محدودهٔ ۱۶ کیلومتری روی ناحیهٔ غرب ایران در تشدید این حادثه بی تاثیر نبوده است. البته درخصوص شديدترين حادثهٔ مشاهده شده دهه اول قرن بیستم انتظار میرود که خسارتهای احتمالی تابش فرابنفش خورشید در سطوح پایینتر جوّ با وجود شرایط اَبرناکی ۸۰ درصد، تا حدودی تضعیف شده باشد. بااين حال با توجه به مساحت گستردهٔ حفرهٔ کوچک اُزن در منطقه و تغییریذیری محلی پوشش اَبرناکی، احتمالاً این کاهش تابش فرابنفش به یک اندازه در نواحی پیرامونی استان اصفهان روی نداده است. به منظور مقایسه، در حادثهٔ ۳. ۳. الگوهای گردشی سطح وردسپهر بالا و پوشنسپهر پایین
۳. ۳. ۳. تحلیل مسیریابی چند روزه

با توجه به مقیاس زمانی فراوانی حفرههای کوچک اُزن (جدول ۲) می توان دریافت که مقیاس زمانی پاییز و زمستان با ۲۱ رخداد بیشترین سهم را از میان سایر فصل ها داشته است. در این دوره از سال بهعلت اینکه جوّ، دینامیک پویاتری دارد، دامنهٔ 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 اُزن (سه حادثه در ۲۰۰۲ و شش حادثه در ۲۰۱۱) روی اصفهان را در سه طبقهٔ ارتفاعی جوّ در محدودة Upper Troposphere Lower) UTLS Stratosphere) نشان داده است. شکل پیش گفته مرتبط با نسخهٔ چهار مدل هیسیلیت است که مرکز تحقیقات علمی منابع هوایی(Arr Resources Laboratory) (ARL) از سازمان ملی اقیانوس و جوّ (NOAA) آن را توسعه داده است. بررسی مسیریابی روبه عقب ۹۶ ساعته سطوح گوناگون همآنتروپی با استفاده از دادههای بازتحلیل شده NCEP/NCAR با ضريب تفكيك مكانى ۲/۵° و زمانى 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 ۲۴km (زمستان و بهار) و ۲۲ تا ۲۸ km (تابستان و پاییز) که شامل تمرکز حداکثری اُزن نیز بوده است (شرعیپور، ۱۳۹۱)، از عرضهای بهمراتب پایینتر از مدار ۳۲^۰N منشأ یافته یا از روی آن مناطق عبور کرده است. از میان سه تراز ارتفاعی مورد بررسی، پایین ترین سطح که نزدیک ترین فاصله را با لايهٔ وردايست دارد بيشتر در موقعيت جنوبي تري نسبت به سایر سطوح قرار گرفته بود. همانگونه که در قسمت مقدمه نیز اشاره شد مقدار کلی اُزن با کاهش عرض جغرافیایی به نرخهای کمتری میرسد و منشأ گرفتن خصوصیات هوای روزهای حادثه از عرضهای با سطح اُزن كمتر، نقش انكارناپذير جريان افقي هواي نواحي جنب

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

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 حادثهٔ اکتبر ۲۰۱۱ سطوح همآنتروپی نه از عرضهای پایینتر عبور کرده و نه افزایش مشخصی درارتفاع نشان داده است.



شکل ۱. مسیریابی روبه عقب تودههای هوای منجر به رخداد نه پدیده حفرهٔ کوچک اُزن روی اصفهان در سه لایهٔ مجزا در جوّ (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 منطقهٔ مورد بررسی دارد. شکل ۲. الگوی موقعیت همدیدی سطوح زمین پتانسیل در لایههای گوناگون جوّ را برای حادثهٔ 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 اُزن پوشنسپهر در سطوح بالاتر تا ٪۲۴ کاهش نشان داد که این شرایط قادر بود میزان تابش فرابنفش خورشید را تا حد قابل توجهي افزايش دهد، اما ميزان أبرناكي تحت تأثير ناپايداري جوّ تقريباً ٪٨٠ آسمان اصفهان را در همان روز پوشاند که با توجه به اثر تعدیلی ابرها روی تابش زیانبار خورشید (آلادوس و همکاران، ۲۰۰۷) نمی توان افزایش چشمگیری در میزان تابش UV رسیده به سطح زمین را توقع داشت. با شکل گیری یک فرود بریده مستقر روی دریای مدیترانه در سطح ۳۰۰hPa (وردسپهر بالایی) و ادامهٔ این عمق در لایههای بالاتر ۱۰۰ و ۵۰ هکتوپاسکال بهترتیب در نواحي بالاتر از سطوح وردايست و پوشن سپهر پاييني که حاشيهٔ استوايي آن از كرانهٔ جنوبي دريا مديترانه عبور -کرده است، شرایط مناسبی برای هدایت تودههای هوای اُزن کم از عرضهای پایینتر در نواحی صحرا و بیابانهای افریقا به طرف منطقهٔ شمال شرق روی ایران فراهم ساخته است (شكل ٢).

لازم به ذکر است که در تصویر ستون کلی ازن پوشنسپهر مربوط به همان روز در شکل ۳. می توان ناحیهٔ دیگری با کاهش افراطی ازن روی جزایر بریتانیا و غرب اروپا مشاهده کرد که با توجه به نقشههای زمین پتانسیل طبقات بالای جوّ، نقش صعود سطوح هم آنتروپی لایههای وردسپهر و پوشن سپهر پایینی جوّ در مقایسه با جابه جایی افقی تودههای هوا، در کاهش ضخامت لایه ازن مشخص می شود. به عبارت دیگر، هرچند دخالت صعود محلی سطوح هم آنتروپی در هر دو حادثه روی بخش های جنوبی ایران و غرب اروپا

ر برابر نيمة سرد سال، با مشاهدة چهار رخداد حفرة کوچک اُزن می توان احتمال کمی را برای وقوع حوادث کاهش افراطی اُزن در فصل های گرم تابستان و بهار انتظار داشت. سه حادثهٔ 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 پوشنسپهر 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 اُزن کمی نسبت به نواحی پیرامون بوده است، مربوط به شمال هندوستان، ارتفاعات هيماليا و فلات تبت است (جیمز، ۱۹۹۸). در این تحقیق گرچه معلوم شد که تعداد وقوع حوادث افراطی ناهنجاریهای منفی اُزن 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 اُزن می تواند بخش زیانبار تابش خورشیدی یعنی باند B را تقویت کند. مارتینز – لوزانو و همکاران (۲۰۱۱) روشن ساختند که با یک درصد کاهش اُزن بهطور متوسط تا ۱/۳ برابر تابش فرابنفش خورشيد روى كشور اسپانيا افزايش مییابد. همچنین این نسبت برای فصلهای پاییز و زمستان (بیشترین فراوانی حفرههای کوچک اُزن نیز در سرزمین ایران در همین دوره به ثبت رسیده) تا ۱/۴۴ برابر قابل تشديد است.

۳. ۳. ۲. ویژگیهای همدیدی ترازهای گوناگون جو بهمنظور بررسی سامانههای گردش جوّی مربوط به حفرههای کوچک اُزن، دو نمونه از ۲۵ حادثهٔ مورد بررسی مرتبط با زمانهای پُرمخاطره از نظر عمق و فراوانی (بهترتیب ۷ ژانویه ۲۰۰۲ و ۱۶ اکتبر ۲۰۱۱) برای بررسی بیشتردر نظر گرفته شده است. از ویژگیهای دو نمونهٔ انتخابی میتوان به توالی سه روزهٔ هرکدام از دورهها و تمرکز عمیقترین آنها در میانهٔ دو حفرهٔ کوچک اُزن دیگر در روزهای قبل و بعد از پدیدهها غرب اروپا همراهی داشته است (شکل ۴-الف). این الگو تا حدودی مشابه با حادثه حفرهٔ کوچک اُزن در ۷ ژانویه ۲۰۰۲ است؛ با این تفاوت که مرکز واچرخندی روی سطح زمین در مرکز و شرق اروپا و سامانهٔ بندالی وردسپهر بالایی- پوشنسپهر پایینی در غرب اروپا استقرار یافته است. در توپوگرافی سطوح زمین پتانسیل نقشههای ۲۰۰۰ 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 شکل۳-د. که الگوی گردشی هوا در ارتفاع بالاتر از ۲۰ کیلومتر در سطح ۵۰hPa را نشان میدهد، بیانگر شکل گیری یک نوار پرارتفاع غربی-شرقی روی شمال قارهٔ افریقا است که جهت شرقسوی آن همراه با ۲۵ متر اُفت از روی شمال شرق ایران خارج شده است. با کمی دقت روی پراکندگی ستون اُزن (شکل ۵) مشخص می شود که پشتهٔ بادهای غربی مورد اشاره، اينبار نيز موجب شكل گيري حفرهٔ كوچك أزن روى غرب اروپا شده است. با وجود اينكه كاهش اُزن روى نواحى مركزي ايران در مقايسه با شمال غرب اروپا خیلی عمیق و متمرکز نبوده است بااینحال به نظر میرسد که گردش جنوبسوی هوای دربردارنده ازن کم از روی منطقهٔ شمال غرب اروپا در امتداد پشتهٔ بادهای غربی، نقش تعیین کنندهای در شکل گیری کاهش افراطی اُزن روی فلات مرکزی ایران داشته است؛ ضمن اینکه حادثهٔ کاهش اُزن روی ایران، تحت تأثير سازوكار ديناميكي صعود سطوح هم آنتروپي در حضور سامانهٔ پرارتفاع مانع روی اروپا شکل یافته و در روز حادثه حرکت صعودی تا ۱۸۵۰ متر به لایههای بالاتر جوّ نیز در مرز وردایست برآورد شده است. لذا وزش افقی تودهٔ هوای متأثر از ناهنجاری منفی اُزن عرضهای بالا به سمت عرضهای جنوبی همراه با دخالت صعود ناحيهاي سطوح زمين پتانسيل لايههاي مجاور وردایست در شکل گیری این حادثه مشارکت

اتفاق افتاده است اما به نظر میرسد که در این پدیده نقش جابهجایی افقی تودههای هوای اُزن کم روی ایران چشمگیرتر بوده است، بهویژه اینکه در بخش قبلی مشخص شده است که بی هنجاری های جابه جایی عمودی وردایست در ماه ژانویه بهجای افزایش ارتفاع، کاهش آن را نشان داده است.بااین حال علی رغم شکل گیری وضعیت فوق، یک روز پیش تر از حادثهٔ تحت بررسي (اولين روز حادثه)، ارتفاع وردايست تقريباً ۴۰۰ متر بالاتر از سطح میانگین ماهانه قرار داشت که این موقعیت در روز حادثه بیش از یک کیلومتر اُفت پیدا کرده بود و تا حدود ۱/۵ کیلومتر کاهش سطح در اثر عبور سامانه های همدیدی پرارتفاع به کم ارتفاع، نسبت به روز گذشته، مشاهده شده است. بنابراین نمی توان در شکل گیری حادثهٔ اخیر دخالت صعود سطوح همآنتروپی و نقش تشدیدکننده آن در کاهش دینامیکی اُزن، بهویژه در روزهای قبلی را کاملاً رد کرد.

دومین حادثه مورد بررسی که بیشترین تمرکز ماهانهٔ حفرههای کوچک اُزن 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 می گیرد. سه مورد از نه حادثهٔ فوق از ۱۵ تا ۱۷ اکتبر در ۲۰۱۱ اتفاق افتاده است؛ وقتی که در بهار همان سال عمیق ترین حفره اُزن قطب شمال نیز مشاهده شده بود. ارسولونی و همکاران (۲۰۰۳) گزارش مشاهد که کاهش شدید اُزن در ژوئیه ۲۰۰۰ روی قطب ممال و گردش نصف النهاری هوای سطح پوشن سپهر میانی به طرف شمال نروژ موجب رخداد اُزن کم در عرض های بالا شده است. براساس این تحقیق، می توان بیان داشت که حادثه های فوق قابلیت آن را دارند تا عرض های متوسط از اروپا تا آسیا شوند.

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

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

روی عرض های بالا و متوسط را به تر تیب بیشتر ناشی از پدیده انسداد جوّی و پشته بادهای غربی معرفی کرده، انطباق خوبی نشان داده است (مشابه حادثه هفت ژانویه ۲۰۰۲).



شکل ۲. ارتفاعات ژنوپتانسیل در سطوح ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰ هکتوپاسکالی روی خاورمیانه در روز هفت ژانویه ۲۰۰۲. فاصلهٔ پربندها بهترتیب ۲۵، ۵۰، ۵۰ و ۲۵ متر است.



شکل ۲. پراکندگی اُزن ستون کلی برای ۷ ژانویه ۲۰۰۲ از ماهوارهٔ TOMS. فاصلهٔ پربندها ۲۵ دابسُن است. در تصویر دو منطقهٔ بسیار مهم با کاهش کمتر از تقریباً ۲۲۸ دابسُن با رنگ تیره مشخص شده است.



شکل ۴. ارتفاعات ژئوپتانسیل در سطوح ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰ هکتوپاسکالی روی خاورمیانه در روز ۱۶ اکتبر ۲۰۱۱. فاصلهٔ پربندها بهترتیب ۲۵، ۵۰، ۵۰ و ۲۵ متر است.



شکل ۵. پراکندگی اُزن ستون کلی برای ۱۶اکتبر ۲۰۱۱ از ماهواره OMI. فاصلهٔ پربندها ۱۹ دابسُن است.

۴. نتيجه گيري

براساس دورهٔ یازده سالهٔ دادههای روزانه اُزن پوشنسپهر (طیف- ۲۰۱۱) که با ابزار اندازه گیریی زمینی (طیف-سنج بروئر) و ماهوارهای (حس گرهای TOMSو OMI) استخراج شدند، بیشترین میانگین ماهانه اُزن در انتهای

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

اقیانوس اطلس/غرب قارهٔ اروپا که منتهی به شکل گیری سامانه های بندالی شده است، حفر ه های کو چک اُز ن نیز در شمال غرب ارویا مشاهده شد. با توجه به حاکمیت صعود سطوح همآنترویی مربوط به واچرخند مانع در همان منطقه و نبود نفوذ تودههای هوای مشخصی که اًزن کمی داشتهاند می توان بر بر تری نقش سازو کار اول در شکل گیری حوادث فوق صحه گذاشت. درعوض، دو رخداد مشاهده شده روی فلات مرکزی ایران تحت تأثير دو سازوكار مورد اشاره، ولى با اولويت وزش افقی تودههای هوای أزن کم که از طریق فرایند ديناميك دوم يعنى جابهجايي صعودي تشديد شده است، تشکیل شدهاند. به عبار ت دیگر حفرهٔ کو چک اُزن فلات مرکزی ایران در حادثهٔ ۷ ژانویه ۲۰۰۲ (۱۶ اکتبر ۲۰۱۱) تحت تأثیر جابهجایی افقی روبه شمال (رو به جنوب) موجهای عبوری که شامل هوای اُزن کم نواحی جنبحاره به طرف عرضهای شمالی تر (جابهجایی افقی هوای کم اُزن ناشی از کاهش دینامیکی عرض های شمالی بهطرف جنوب و جابهجایی صعودی) بوده تشکیل شده است حالآنکه شکل گیری حفرههای کوچک اُزن در عرضهای جغرافیایی بالا بیشتر تحت تأثير صعود ناحيهاي وابسته به سامانههاي بندالي جوّ قرار داشته است.

مراجع

- شرعی پور، ز.، ۱۳۹۱، توزیع قائم اُزن 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 erythemal 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 minihole over southwestern Spain during January 2004: Influnce over ultraviolet radiation,

برابر انحراف معيار ماهانه بهمنزلة روش انتخاب شدیدترین رخداد کاهش ستون کلی اُزن، تعداد LOEs تا ۲۵ حادثه که بیشتر آنها (کمتر) به فصل های یاییز 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 کو چک اُزن در فصل زمستان تا حدود ۴۰٪ روی برخی از نواحی ارویا مشاهده شده است، اما کاهش ضخامت اُزن روی ایران مرکزی عمق بیشتر از ۲۴٪ در ماه ژانویه را نشان نداده است و كمعمق ترين حادثه نيز در ماه اوت تا ۶٪ به چشم رسیده است. در اغلب روزهای رخداد كاهش شديد أزن، موقعيت لايهٔ وردايست به سطوح بالاتر هدایت شده و همزمان، مقدار فشار و دمای آن نیز کاهش محسوسی داشته است. در مواقع شکل گیری حفرههای کوچک اُزن کاهش دما در لایهٔ پوشنسپهر ياييني بهمراتب شديدتر از افزايش دما در لايهٔ وردسيهر بالایی بودہ است.

تحلیل مسیریابی روبه عقب تودههای هوا در لایه وردسپهر بالایی – پوشنسپهر پایینی نیز اغلب جابهجایی هوا را از عرضهای بهنسبت پایین تر 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 زمین پتانسیل ۳۰۰، ۱۰۰ و ۵۰ هکتو پاسکال، فرود عمیقی در شرق حوضه دریای مدیترانه بهدنبال یک پشتهٔ وسیع در غرب اروپا مشاهده شد. همزمان با تشکیل الگوی پشتهٔ 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 minihole 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 Erythemal radiation, Int. J. Climatol., 31, 1554-1566.
- McPeters, R., Kroon, M., Labow, G., Brinksma, 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., Kyr[°]o, 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 minihole in the Northern Hemisphere stratosphere at midlatitudes 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., Kr^uger, 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 propertes, 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

Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
 Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
 Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran
 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 don 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).