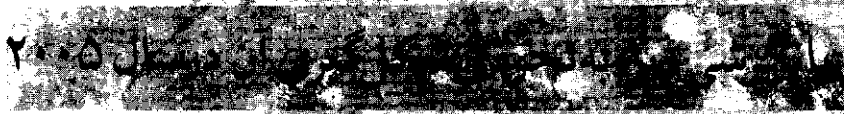


پدیده‌های ابرهای ازن بر فراز قطب جنوب

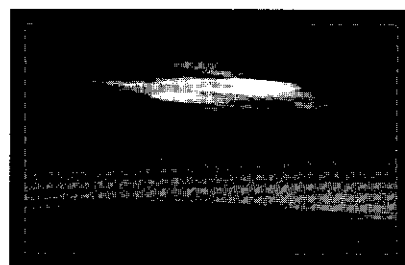


سروآغاز

هر ساله در آغاز فصل بهار و درست زمانی که اولین اشعه‌های خورشید، جو قاره‌ی جنوبگان را روشن می‌کند، پدیده‌ای بر فراز قطب جنوب شکل می‌گیرد که حیات موجودات زنده‌ی کره‌ی زمین را با مخاطره مواجه می‌سازد. ابرهای زیبایی که در فصل زمستان و در دمای پائین تر از -78° سانتی‌گراد در ارتفاع حدود بیست کیلومتری بر فراز قطب جنوب شکل گرفته‌اند (شکل ۱)، با دریافت

اولین اشعه‌ی خورشید، در پس جلوه‌ی زیبای خود، پدیده‌ای را به دنبال دارند که اثرات زیانبار بسیاری را برای ساکنان کره‌ی زمین به ارمغان می‌آورد. این ابرها طی فصل زمستان محل تجمع انواع گازهایی هستند که با فرار رسیدن فصل بهار سبب کاهش شدید ازن بر فراز قطب جنوب می‌شوند. در سال ۱۹۸۵، پرفسور فارمن و همکارانش، از پژوهشگران مرکز بریتانیایی بررسی قطب جنوب، نتایجی را منتشر کردند که نشان می‌داد، لایه‌ی ازن بر فراز قطب جنوب در طول فصل بهار نیم کره‌ی جنوبی، به طور قابل ملاحظه‌ای نازک شده است. آن‌ها این پدیده را «حفره‌ی ازن قطب جنوب»^۱ نامیدند. از آن پس، دانشمندان هر ساله در پایان ماه سپتامبر (آغاز بهار نیم کره‌ی جنوبی)، شاهد پدیدار شدن حفره‌ی ازنی بر فراز قطب جنوب هستند که طی ماه اکتبر و نیمه‌ی اول ماه نوامبر گسترش می‌یابد و در برخی سال‌ها وسعتی برابر با مساحت آمریکای شمالی پیدا می‌کند و سپس طی روزهای پایانی ماه نوامبر و ماه دسامبر، مجدداً ترمیم می‌شود.

کاهش شدید مقدار ازن و پیدایش حفره بر فراز قطب جنوب



شکل ۱- ابرهای استراتوسفری قطبی

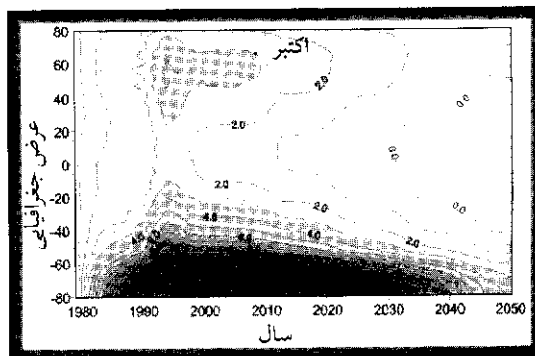
[Shindell, etal, 1998 and 1999; Tabazadeh, 2002]. در این نوشته سعی بر آن است، به طور مختصر عواملی که در ایجاد حفره‌ی ازن قطب جنوب نقش دارند و موجب شکل‌گیری آن در فصل بهار نیم‌کره‌ی جنوبی می‌شوند، بیان گردند و وضعیت ازن در سال ۲۰۰۵، تا قبل از پدیدار شدن حفره‌ی ازن بررسی شود.

بحث

به طور کلی، تخریب ازن و به دنبال آن پیدایش حفره‌ی ازن در آن قسمت از جو زمین رخ خواهد داد که این شرایط به طور هم‌زمان حکمفرما باشد [Solomon, 1999]: ۱. دما پائین‌تر از (سردتر از) -78°C باشد؛ ۲. مواد شیمیایی به صورت واکنشی و فعال (رادیکال‌های آزاد کلر و بروم) به مقدار کافی وجود داشته باشند؛ ۳. اشعه‌ی ماورای بنفش خورشید تابش کند. چنین شرایطی تنها بر فراز قطب جنوب آن هم فقط در روزهای پایانی فصل زمستان (ماه سپتامبر) و ماه‌های آغازین فصل بهار (اکتبر و نوامبر) مهیا خواهد بود [Anderson et al, 1990]. نکته‌ای که یادآوری آن در این جا لازم به نظر می‌رسد آن است که شرایط فوق از سالی به سال دیگر روی قطب جنوب تغییر می‌کند؛ به طوری که برای مثال، حفره‌ی ازن در سال ۲۰۰۲ بسیار کوچک‌تر و در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۳ بزرگ‌تر از حد معمول بوده است. در ادامه نحوه‌ی شکل‌گیری این حفره به صورت مرحله به مرحله تشریح خواهد شد.

مرحله‌ی اول: جو کره‌ی زمین، با توجه به خصوصیات

متفاوت حرارتی، به لایه‌های متفاوتی تقسیم شده است. در این بین، لایه‌ی مجاور سطح زمین «تروپوسفر» نامیده می‌شود که با دربرگرفتن ۹۰ درصد جرم جو، بیش‌ترین نقش را از نظر تغییر و تحولات هواشناسی و آب و هواشناسی داراست (شکل ۳). بالای تروپوسفر لایه‌ی «استراتوسفر» قرار دارد که حدود ۱۰ درصد جرم جو را به خود اختصاص می‌دهد (شکل ۳). وجود مولکول‌های ازن و جذب اشعه‌ی ماورای بنفش خورشیدی توسط آن‌ها، علت اصلی پیدایش لایه‌ی استراتوسفر است. گازهای مخرب ازن که در نتیجه‌ی فعالیت‌های صنعتی، به واسطه‌ی فعالیت‌های آتشفشانی و یا سایر فعالیت‌های طبیعی و انسانی تولید می‌شوند و تحت عنوان CFCها از آن‌ها نام خواهیم برد، پس از تولید در سطح زمین توسط بادهای لایه‌ی تروپوسفر پخش می‌شوند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند، CFCها تنها از طریق صعود در منطقه‌ی استوایی امکان نفوذ عمیق و مداوم از



شکل ۲. افزایش درصدی تابش اشعه‌ی ماورابنفش خورشید در ماه اکتبر از سال ۱۹۸۰. همان طوری که در شکل ملاحظه می‌کنید، افزایش تابش اشعه‌ی ماورابنفش در عرض‌های قطبی از اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰ بسیار قابل ملاحظه است. مقادیر بعد از سال ۲۰۰۲، با استفاده از مدل‌های متفاوت پیش‌بینی شده‌اند. [WMO, 2003]

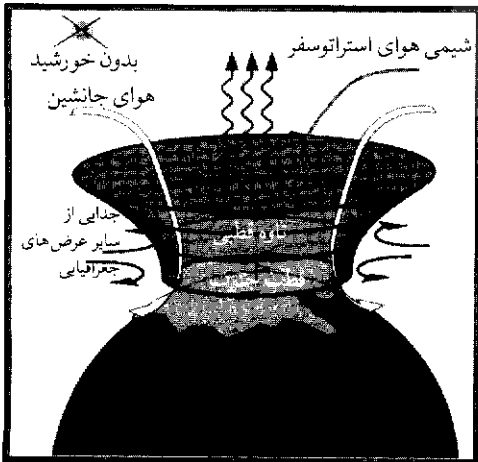
در فصل بهار، همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌کنید، موجب افزایش قابل ملاحظه‌ی تابش اشعه‌ی ماورای بنفش خورشیدی بر سطح زمین می‌شود؛ چراکه لایه‌ی ازن ضمن جذب اشعه‌ی ماورای بنفش خورشیدی، مانع از نفوذ آن به قسمت تحتانی جو زمین می‌شود. برای درک اهمیت موضوع، یادآوری این نکته مهم است که اشعه‌ی ماورای بنفش، آن قسمتی از طیف خورشیدی است که برای زندگی و حیات زیان دارد. مطالعات نشان می‌دهند، این اشعه علاوه بر ایجاد سرطان‌های پوستی (هر دو نوع بدخیم و خوش‌خیم)، به چشم‌ها نیز آسیب می‌رساند و به خصوص موجب افزایش ابتلا به آب مروارید می‌شود. UNEP (برنامه‌ی زیست محیطی سازمان ملل)، در سال ۱۹۹۱ مدارک و شواهد زیادی را ارائه کرد مبنی بر این که تنها قسمتی از اشعه‌ی ماورای بنفش خورشید به از بین رفتن سیستم ایمنی بشر (سیستم دفاعی) منجر می‌شود. مطالعاتی که در مورد گیاهان صورت گرفته نشان می‌دهد، هم رشد و هم میزان محصول و فتوسنتز در گیاهان کاهش می‌یابد. به علاوه، اثر مضر این اشعه بر اکوسیستم‌های آبی نیز بسیار قابل توجه دانسته شده است [Drake, ۱۹۹۵].

طی روزهای آینده^۱ و تنها ظرف دو تا سه هفته، حفره‌ی ازن دیگری بر فراز قطب جنوب شکل خواهد گرفت و حیات موجودات زنده، به خصوص ساکنان کشورهای مجاور قاره‌ی جنوبگان (استرالیا، نیوزیلند، آفریقای جنوبی و نیمه‌ی جنوبی شیلی و آرژانتین) را تهدید خواهد کرد. از طرف دیگر، بررسی محققان نشان از آن دارد که در سال‌های آینده و تا سال ۲۰۲۰، امکان شکل‌گیری حفره‌ی ازن دیگری بر فراز قطب شمال وجود دارد

همچون طوفه ای، استراتوسفر قطبی را در برگرفته‌اند و از غرب به سمت شرق می‌وزند، به «جت شب قطبی» معروف هستند و در زمستان نیم کره ی جنوبی با سرعتی بیش از ۳۵۰ کیلومتر در ساعت، هوای موجود در جانب داخلی خود و روی قطب را از هوای سایر بخش های جو جدا می‌سازند یا اصطلاحاً «ایزوله» می‌کنند (شکل ۴). این هوای ایزوله شده که جت شب قطبی را در حاشیه ی بیرونی خود دارد، «ورتکس قطبی» یا «تاوه ی قطبی» خوانده می‌شود. تسلط شب طولانی قطبی به همراه ایزوله شدن هوا و عدم مبادله ی انرژی با عرض های پائین تر - به دلیل استقرار جت شب قطبی - موجب خروج تدریجی انرژی از قاره ی جنوبگان و از جو مناطق قطبی، و دماهای بسیار پائین در داخل ورتکس قطبی می‌شود (شکل ۴). [Andrew et al, 1987; Schoeberl&Hartmann, 1991; Manney&Zurek, 1993]

بدین ترتیب، گردش بروئر دابسون موجب انتقال CFC ها از استراتوسفر استوایی به مناطق قطبی می‌شود (مرحله ی اول) و پیدایش ورتکس قطبی، کاهش شدید دما را در تحتانی ترین بخش استراتوسفر قطبی به دنبال دارد (مرحله ی دوم). اما هنوز شرایط برای پیدایش حفره ی ازن کامل نیست، چراکه گازهای مخرب ازن (کلر و بروم) به صورت غیر واکنشی و غیرفعال در استراتوسفر قطبی وجود دارند و از طرف دیگر، در این زمان از سال، اشعه ی ماورای بنفش خورشید برای تجزیه ی ازن وجود ندارد.

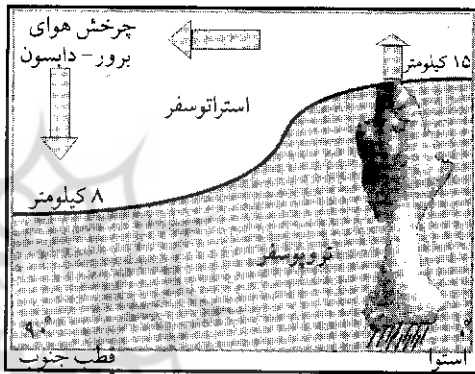
مرحله ی سوم: تداوم ورتکس قطبی در سرتاسر زمستان موجب سرد شدن شدید هوای داخل ورتکس در استراتوسفر



شکل ۴. در دوره ی سرد سال و به دنبال فرا رسیدن شب قطبی، یک طوفه ی بزرگ باد غربی سرتاسر استراتوسفر را تا نیمه ی تروپوسفر در عرض های قطبی تحت تسلط خود دارد. این طوفه به همراه هوای داخل آن، ورتکس قطبی خوانده می‌شود. [Turco, 1997]

تروپوسفر به استراتوسفر را پیدا خواهند کرد (شکل ۳)، [Newell & Gould-Stewart, 1981; Holton et al, 1995; Plumb, 2002; Shepherd, 2000; 2002; Stohl et al, 2003]

در استراتوسفر، به دلیل پایداری و سکون نسبی هوا، مواد مخرب ازن یا CFC ها همراه با جریانی بطنی، ابتدا از قسمت تحتانی استراتوسفر استوایی به سمت بالا صعود می‌کنند و سپس در امتداد نصف النهارات به سمت قطبین جابه جا می‌شوند. این گردش آرام استراتوسفری که بر فراز استوا سرعت متوسطی حدود یک کیلومتر در ماه دارد و به پاس تلاش دو دانشمندی که



شکل ۳. هوا و جرم تروپوسفری، در منطقه ی هم گرایی حاره ی (استوایی) به واسطه ی هم رفت عمیق، وارد استراتوسفر می‌شود و سپس توسط گردشی بطنی نصف النهاری موسوم به گردش بروئر - دابسون، به استراتوسفر قطبی انتقال می‌یابد.

نخستین بار به مطالعه ی آن پرداختند، گردش «بروئر - دابسون» خوانده می‌شود.

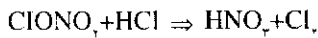
[Holton et al, 1995; Holton&Lelieveld, 1996; Plumb, 1999; Plumb, 2002].

پس از حدود سه تا چهار سال، CFC ها را به قطبین زمین انتقال می‌دهد (شکل ۳) [Rosenlof, 1995; Waugh&Hall, 2002]

مرحله ی دوم: با فرارسیدن فصل پائیز در نیم کره ی جنوبی

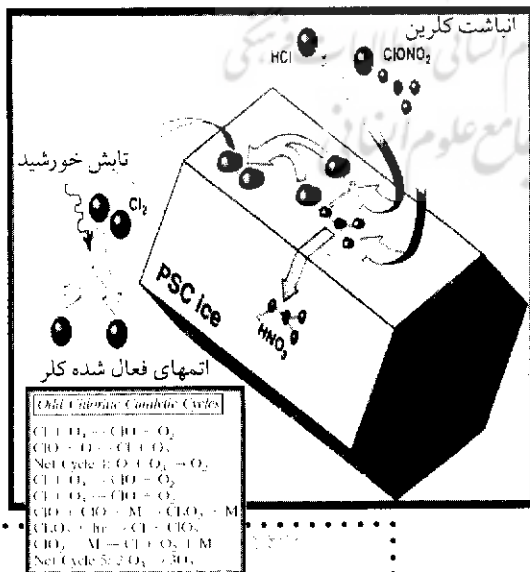
و کاهش شدت تابش خورشید در عرض های قطبی، دمای هوا بر فراز قطب جنوب، همچون قاره ی جنوبگان، به سرعت کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، مناطق استوایی به واسطه ی دریافت انرژی بالای خورشیدی دمای بالایی دارند. این ویژگی در فصل پائیز به تدریج موجب پیدایش اختلاف حرارتی شدید و به دنبال آن اختلاف فشار شدیدی بین مناطق قطبی و مناطق استوایی می‌شود که نتیجه ی آن، پیدایش قوی ترین بادهای کره ی زمین در شب قطبی و در استراتوسفر (در عرض های بالا) است. این بادهای که

[Turco, 1997; Shanklin, 2001; WMO, 2003]



کلر مولکولی، با توجه به این که میل ترکیب با یخ را ندارد، از سطح ابر تبخیر می شود؛ در حالی که اسید نیتریک روی ذرات ابر به صورت یخ زده باقی می ماند. کلر مولکولی حاصل از این واکنش به دلیل این که قادر نیست به طور مستقیم با ازن استراتوسفری واکنشی انجام دهد، در سرتاسر فصل زمستان در داخل ورتکس قطبی انباشته، و به محض تابش اولین اشعه های ماورای بنفش خورشیدی در ماه سپتامبر (ابتدای فصل بهار نیمکره ی جنوبی) تجزیه و به کلر اتمی (Cl) تبدیل می شود. در این زمان از سال، رادیکال های کلر (اتم های کلر آزاد) به شدت با ازن موجود در ورتکس قطبی واکنش می کنند و موجب تخریب ازن و پیدایش حفره ی ازن در داخل ورتکس قطبی می شوند (شکل ۶) [Turco, 1997; WMO, 2003].

بدین ترتیب، در ابتدای فصل بهار نیم کره ی جنوبی، با تابش اولین اشعه ی خورشیدی، در کنار جلوه ی زیبای ابرهای استراتوسفری قطبی، تخریب ازن استراتوسفری به سرعت آغاز، و ظرف تنها دو تا سه هفته، حفره ی ازن بر فراز قطب جنوب پدیدار می شود. (شکل ۷)، مقدار متوسط ازن را در مناطق قطبی در ابتدای فصل بهار دو نیمکره نشان می دهد. همان طوری که در شکل مشاهده می کنید، حفره ی ازن مختص استراتوسفر قطب

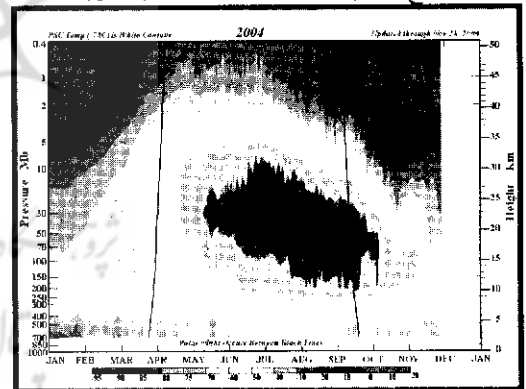


شکل ۶. نحوه ی تبدیل ذخایر کلر غیر واکنشی به اتم های کلر فعال و واکنشی در ابرهای استراتوسفری قطبی [Turco, 1997]، به همراه فرایند تجزیه ی ازن توسط اتم های کلر [Solomon, 1999].

تحتانی می شود؛ به طوری که دما برای چندین ماه به پائین تر از -78°C سانتی گراد می رسد و در اوج زمستان، از مرز -90°C سانتی گراد نیز عبور می کند (شکل ۵). چنین وضعیتی موجب شکل گیری نوع خاصی از ابرها در استراتوسفر قطبی موسوم به «ابرهای استراتوسفری قطبی» می شود. این ابرها که حاوی مواد انتقال یافته توسط گردش بروئر-دابسون به مناطق قطبی هستند (عمدتاً تری هیدرات اسید نیتریک $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{HNO}_3$)، در دمای آستانه ی -78°C سانتی گراد در داخل ورتکس قطبی و در استراتوسفر تحتانی به صورت مایع تشکیل می شوند که به «ابرهای نوع اول مشهور هستند (شکل ۱). در اوج زمستان یا در بخش مرکزی ورتکس که دما به پائین تر از -88°C یا -78°C سانتی گراد کاهش می یابد، ابرها به طور کامل یخ می زنند و نوع جدیدی از ابرها شکل می گیرند که به «ابرهای نوع دوم» معروف شده اند [Solomon, 1999; WMO, 2003; IPCC, 2005].

در واقع، ابرهای استراتوسفری قطبی مؤلفه ای کلیدی در تخریب ازن و پیدایش حفره ی ازن قطب جنوب محسوب

مقطع حرارتی CPT و NCEP در قطب جنوب

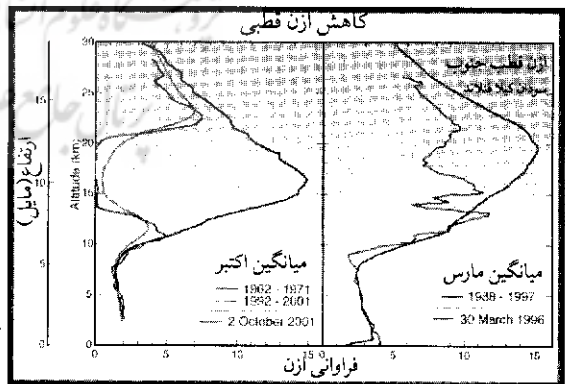


شکل ۵. نیم رخ قائم دما در قطب جنوب در سال ۲۰۰۴. دو خط سیاه عمودی شروع و پایان شب قطبی را در قطب جنوب، و خط سفید دمای آستانه ی تشکیل ابرهای استراتوسفری قطبی (-78°C) را نشان می دهد. در سال ۲۰۰۴، همچون سال های گذشته، پائین ترین دماها طی ماه های ژوئن تا اکتبر در استراتوسفر تحتانی (حدود ۲۰ کیلومتری) ثبت شده است. [http://www.cpc.ncep.noaa.gov]

می شوند. ابرهای استراتوسفری قطبی که چاهه ای محلی برای جمع شدن CFC ها در داخل ورتکس قطبی هستند، در شب طولانی قطبی، طی یک سلسله واکنش های «ناهمگن»، انواع کلر تقریباً غیر واکنشی همچون نیترات کلر (ClONO_2) و اسید هیدروکلرید (HCl) را روی سطح خود به کلر مولکولی Cl_2 و اسید نیتریک (HNO_3) تبدیل می کنند (شکل ۶)

جنوب است و چنین حفره‌ای در قطب شمال مشاهده نمی‌شود. نکته‌ی دیگری که در این شکل حائز اهمیت است، نبود حفره‌ی ازن طی سال‌های دهه‌ی ۱۹۶۰ (۱۹۷۱-۱۹۶۲) بر فراز قطب جنوب است. این در حالی است که نیم‌رخ قائم تهیه شده برای سال‌های اخیر (۲۰۰۱-۱۹۹۲)، حفره‌ای را در حد فاصل ۱۵ تا ۲۰ کیلومتری روی قطب جنوب نشان می‌دهد.

بررسی آخرین داده‌های موجود از وضعیت ورتکس قطبی و مقادیر ازن و دما در قطب جنوب، بیانگر تشکیل حفره‌ی بزرگ دیگری در بهار امسال (بهار سال ۲۰۰۵ در نیم‌کره‌ی جنوبی) بر فراز قطب جنوب است (شکل ۸). ورتکس قطبی یک پیش شرط در ایجاد دماهای خیلی پائین و به تبع آن، پیدایش ابرهای استراتوسفری قطبی است و در واقع، اندازه و وسعت ورتکس قطبی تعیین‌کننده‌ی حداکثر پوشش منطقه‌ای حفره‌ی ازن محسوب می‌شود [Schoeberl&Hartmann, 1991]. بدین دلیل، وسعت و اندازه‌ی ورتکس قطبی در سال ۲۰۰۵ از ابتدای شکل‌گیری آن در استراتوسفر تحتانی تا پایان ماه اوت^۲ نشان داده شده است (شکل ۸a). برای فراهم آوردن امکان مقایسه، اندازه‌ی ورتکس در سال ۲۰۰۴ به همراه اندازه‌ی حداکثر، حداقل و میانگین آن طی ده سال گذشته (۲۰۰۴-۱۹۹۵) به نمایش درآمده است. با توجه به شکل، اندازه‌ی ورتکس قطبی طی زمستان ۲۰۰۵ (خط قرمز^۱) مشابه میانگین دهساله‌ی آن (نقطه چین سبز) است. به



شکل ۷. مقایسه‌ی میزان کاهش ازن از منظر اقلیمی در ابتدای بهار در نیم‌کره‌ی جنوبی در ایستگاه قطب جنوب واقع در عرض ۹۰° جنوبی (سمت چپ) و ایستگاه سودانکیلائی فنلاند واقع در ۶۷° عرض شمالی (سمت راست) [WMO, 2003].

منظور فراهم کردن درکی مناسب از شرایط حاکم بر استراتوسفر قطبی، شکل‌های ۸b و ۸c به ترتیب نیم‌رخ قائم مقدار ازن و دمای ماهانه را در قطب جنوب نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۸c، از ابتدای ماه ژوئن امکان تشکیل ابرهای استراتوسفری قطبی نوع اول در استراتوسفر قطبی (به خصوص استراتوسفر تحتانی) فراهم شده و از اواسط ماه ژوئیه، با تشکیل ابرهای استراتوسفری قطبی، نوع دوم استراتوسفر تحتانی محل انباشت کلر مولکولی شده است. مقایسه‌ی مقادیر ازن کلی^۲ مربوط به روزهای هفتم (خط آبی) و بیستم و هشتم اوت (خط قرمز) در شکل ۸b، آغاز روند کاهش ازن استراتوسفری را نشان می‌دهد؛ به طوری که مقدار ازن کلی در ایستگاه قطب جنوب در پایان ماه اوت ۲۰۰۵ از ۲۶۶ دابسون به ۲۲۲ دابسون کاهش یافته است. این کاهش ازن که نشانه‌ی حضور اولین اشعه‌های خورشیدی در پایان زمستان جنوبی است، تنها با سپری شدن دو تا سه هفته در ماه سپتامبر، به حفره‌ی ازن سال ۲۰۰۵ مبدل خواهد شد. لازم به ذکر است، هنگامی که مقدار ازن کلی از حد آستانه‌ی ۲۲۰ دابسون کم‌تر باشد، اصطلاحاً حفره‌ی ازن پدیدار می‌شود.

نتیجه

در بررسی عوامل کاهش ازن استراتوسفری و پیدایش حفره‌ی ازن قطب جنوب، عمدتاً تولید مقادیر عظیم گازهای CFC در نتیجه‌ی مصرف بیش از حد سوخت‌های فسیلی، علت اصلی دانسته می‌شود و توجیه علمی این پدیده عموماً با ارائه فرمول‌های شیمی و بیان ادله‌های مربوط به علم شیمی بیان می‌گردد. اما حقیقت امر آن است که پذیرش ادله‌ی شیمی به عنوان عامل اصلی کاهش ازن استراتوسفری برخی از سؤالات کلیدی ما را بی‌پاسخ می‌گذارد؛ از جمله: «وردش‌پذیری و نوسانات سال به سال ازن استراتوسفری و حفره‌ی ازن قطب جنوب، چگونه با تغییرات بطنی در تمرکز CFCها قابل توجیه است؟» یا: «چرا استراتوسفر قطبی نیم‌کره‌ی شمالی، حفره‌ای را در ابتدای فصل بهار شمالی تجربه نمی‌کند؟» و: «چرا سایر عرض‌های جغرافیایی در لایه‌ی استراتوسفر با وجود میزان تمرکز CFCهای برابر با عرض‌های قطبی، این چنین کاهش شدید ازن را در ابتدای بهار تجربه نمی‌کنند؟» و بسیاری سؤالات بی‌پاسخ دیگر.

جمع‌بندی یافته‌ها نشان می‌دهد، درک کامل پیدایش حفره‌ی ازن بر فراز قطب جنوب نیازمند شناخت نحوه‌ی برهم‌کنش فرایندهای فتوشیمیایی، تابشی و دینامیکی در استراتوسفر است و واکنش‌های شیمیایی تنها بخش کوچکی از کل فرایند را به خود اختصاص می‌دهند. باید پذیرفت، صرفاً تمرکز CFCها علت

دو دهه‌ی آینده به «حفره‌ای» بر فراز قطب شمال تبدیل شود. آخرین گزارش «پانل بین‌المللی تغییر اقلیم» (IPCC) با موضوع ویژه‌ی «اُزن و اقلیم»، معیار اصلی بررسی اُزن در مناطق قطبی را «دما» ذکر کرده و صرف نظر از مؤلفه‌های شیمیایی، دو عامل دما و ورتکس قطبی را از نظر دینامیکی کاملاً با هم مرتبط دانسته است [IPCC, 2005].

نکته‌ی دیگری که در چند سال اخیر نظر پژوهشگران را به خود جلب کرده، ارتباط بین کاهش اُزن در استراتوسفر قطبی و ورودش‌ها و تغییرات اقلیمی است؛ به طوری که نتایج به دست آمده بیانگر آن است که تغییرات اُزن، حدود ۵۰ درصد تغییرات دما را در استراتوسفر قطبی توجیه می‌کند. در این زمینه، محققان معتقدند، تخریب اُزن استراتوسفری از اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ منجر به سرد شدن استراتوسفر شده است [Hu&Tung, 2003; IPCC, 2005]. بدین ترتیب که کاهش اُزن در استراتوسفر قطبی، موجب شکل‌گیری یک سلسله پس‌خور مثبت به صورت زیر گردیده است:

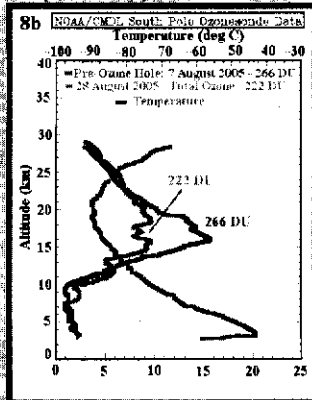
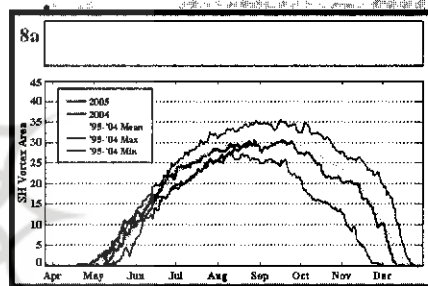
کاهش اُزن استراتوسفری \Rightarrow ورتکس قطبی سردتر و قوی‌تر \Rightarrow کاهش فعالیت امواج راسی مقیاس سیاره‌ای \Rightarrow گرمایش دینامیکی کم‌تر و انتقال اُزن کم‌تر به مناطق قطبی (گردش بروثر-دایسون ضعیف‌تر) \Rightarrow ورتکس قطبی خیلی سردتر و قوی‌تر \Rightarrow کاهش اُزن بیش‌تر جدیدترین گرایش‌ها و بررسی‌ها، روند رو به کاهش مواد شیمیایی مخرب اُزن را در استراتوسفر قطبی تأیید، و تقویت و تداوم ورتکس قطبی را به عنوان بستر اصلی تشکیل ابرهای استراتوسفری قطبی گزارش کرده‌اند [Waugh et al, 1999; IPCC, 2005; WMO, 2003; IPCC, 2005]. در این بین، سه عامل بیش از سایر عوامل در تقویت و تداوم بیش‌تر ورتکس قطبی در فصل بهار نقش دارند: ۱. کاهش اُزن استراتوسفری قطبی [Hu&Tung, 2005; IPCC, 2003]; ۲. کاهش فعالیت امواج راسی مقیاس سیاره‌ای در اواخر زمستان و اوایل بهار [Waugh et al, 1999]; ۳. انفجارات آتشفشانی و فرایندهای حاصل از ورود مواد آتشفشانی به داخل استراتوسفر (Robock, 2000).

توضیح برخی اصطلاحات: [Glossary]

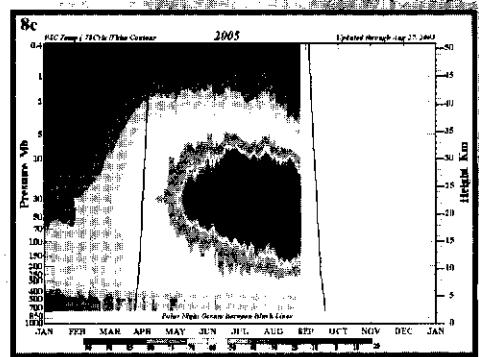
۱- ورتکس قطبی [Polar Vortex]: توده‌ی هوای همگن بالای قطبین زمین که به واسطه تسلط بادهای غربی پرسرعت پیرامون قطبی یا اصطلاحاً جت شب قطبی از هوای عرض‌های پائین‌تر جدا شده و گردشی همسو با گردش وضعی زمین دارد. جت شب قطبی حاشیه خارجی ورتکس را تشکیل می‌دهد و در استراتوسفر فوقانی و مزوسفر تحتانی به حداکثر گستردگی و شدت خود می‌رسد. در اوج زمستان هر نیمکره، ورتکس قطبی بخش

تخریب اُزن نیست و به همین علت، حتی اگر مقادیر کلر استراتوسفری به سطح اولیه‌ی خود بازگردد، ضرورتاً لایه‌ی اُزن به وضعیت اولیه‌ی خود برنخواهد گشت [IPCC, 2005]. شاهد این مدعا، روند رو به کاهش اُزن استراتوسفری در قطب شمال است که با وجود روند رو به کاهش CFCها، می‌رود تا در یکی

شکل ۸. آخرین اندازه‌گیری‌ها از مساحت ورتکس قطبی (۸a)، مقیاس اُزن (۸b) و دما (۸c) مربوط به ایستگاه قطب جنوب تا پایان ماه اوت ۲۰۰۵. مساحت ورتکس قطبی در شکل (۸a) به میلیون کیلومتری مربع بیان شده است. خط سبز در شکل ۸b، وخط‌های آبی و قرمز مقدار اُزن (به دو واحد دایسون و واحد جزو در میلیون) را به ترتیب در ۷ و ۲۸ اوت ۲۰۰۵ نشان می‌دهند.



در شکل ۸c، دو خط سیاه همودی نیز شروع و پایان شب قطبی را در قطب جنوب و خط سفید دمای استانه‌ی تشکیل ابرهای استراتوسفری قطبی (۷۸۰- سانتی‌گراد) را نشان می‌دهند.
http://www.ncep.noaa.gov



زیادی از لایه استراتوسفر را تحت تسلط خود دارد به طوری که جت شب قطبی در استراتوسفر نیمکره جنوبی و شمالی در ارتفاع حدود ۴۰ کیلومتری (استراتوسفر فوقانی) به ترتیب در عرض های ۴۵ و ۵۵ درجه استقرار می یابد. ورتکس در زمستان هر نیمکره تمامی ضخامت جو را از مزوسفر تحتانی تا تروپوسفر میانی در برمی گیرد [Waugh & Randel, 1999].

۲- امواج راسبی [Rossby Waves]: بادهای غربی عرض های میانی در نتیجه وجود موانع مرتفع کوهستانی یا تضادهای حرارتی بین خشکی و دریا از مسیر اولیه خود در ترازهای میانی و فوقانی تروپوسفر منحرف شده و به صورت جریانات موجی شکل که دامنه موج آن ها بین ۵۰ الی ۱۲۰ درجه در امتداد طول جغرافیایی است درمی آیند. به این امواج بسیار بلند و بسیار کند که در امتداد نصف النهاری و قائم گسترش می یابند و هدایت سیستم های جوی سطحی را در این عرض ها برعهده دارند اصطلاحاً امواج راسبی گویند [Harman, 1987]. امواج راسبی تنها در نیمکره زمستانی یعنی زمانی که بادهای غربی در استراتوسفر غالب هستند امکان گسترش قائم به درون لایه استراتوسفر را پیدا می نمایند. شکست این امواج در استراتوسفر موجب ایجاد بی نظمی شدیدی در جریان جت قطبی و ورتکس قطبی استراتوسفری می گردد که در نهایت با افزایش دمای استراتوسفر قطبی و کاهش فرایند تخریب ازن همراه است. به همین جهت میزان فعالیت امواج راسبی در زمستان هر نیمکره همچنین وردش پذیری سال به سال آن در مطالعه اقلیمی استراتوسفر از جمله اقلیم شناسی ازن استراتوسفری از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است [Shepherd, T., 2000; 2002].

۳- وردش پذیری اقلیمی: این واژه معادل فارسی کلمه Climatic Variability در زبان انگلیسی است. در ادبیات اقلیمی فارسی عمدتاً از کلمه «تغییرپذیری اقلیمی» به جای این واژه استفاده می شود. در واقع وردش های اقلیمی نوعی تغییرات آب و هوایی است که در مقیاس زمانی کوتاه (سالانه، چندساله) به وقوع می پیوندد و با تغییرات اقلیمی Climatic Changes که در مقیاس های زمانی طولانی (سده، هزاره) به وقوع می پیوندد متفاوت است. برای مثال تغییرات و ناهنجاری های سال به سال دما و بارش و وقوع متوالی خشکسالی ها و ترسالی ها از ویژگی وردش پذیری اقلیم محسوب می گردند.

* عضو هیئت علمی مؤسسه ی آموزش عالی طبرستان

زیرنویس

۲. این مقاله در نیمه ی اول شهریور ۱۳۸۴ (پایان ماه اوت و اوایل سپتامبر ۲۰۰۵) نوشته شده است.
۳. ازن کلی عبارت است از تعداد کل مولکول های ازن موجود در ستونی از هوا به ضخامت کل جو و به مساحت یک سانتی متر مربع. ازن کلی عمدتاً به واحد دایسون (DU) بیان می شود. متوسط جهتی ازن کلی در جو کره ی زمین برابر با ۳۰۰ دایسون است [Turco, 1997].
۴. نمودارهای این مقاله بصورت رنگی در صفحه ۲ جلد چاپ شده است.



منابع

1. Anderson, etal, (1991), Free Radical within the Antarctic Vortex: The role of CFCs in Antarctic ozone loss. Science., Vol.251,pp.39-46.
2. Anderson, S. and B.Kundsen (2002), The influence of vortex ozone depletion on Arctic ozone trends, Geoph. Res. Lett., Vol. 29, No.21,pp.9.1-9.4.
3. Andrews, D.G., Holton, J.R.,Leovy, C.B., (1987), Middle Atmosphere Dynamics, Academic press, pp.343-414.
4. Coy,L.,Nash,E.R., Newman, P.A., (1997). Meteorology of the Polar Vortex: Spring 1997, Geophysical Research Letters, Vol.24, No. 22, pp.2693-2696.
5. Darke, F. (1995), Stratospheric ozone depletion: An overview of the scientific debate, Prog. Physi. Geography, Vol. 19,No.1,pp.1017.
6. Gardiner, B. (1989), The Antarctic ozone hole. Weather, Vol. 44, No.7, pp. 291-298.
7. Hartmann, D., etal (2000), Can ozone depletion and global warming interact to produce rapid climate change. Proceeding of National Academic Science (PNAS), Vol. 97,No.4,pp.1412-1417.
8. Holton,J.R.,etal (1995), Stratosphere-Troposphere Exchange, Reviws of Geophysics, Vol.33, No.4,pp. 403-439.
9. Holton, J.R., and J. Lelieveld, (1996), Stratosphere-Troposphere exchange and its role in the buget of tropospheric ozone. ANTO, ASI series, Vol. I 35, Springer Verlag,pp. 173-190.
10. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar>.
11. Hu, Y.,and Tung, K.K. (2003), Possible ozone-induced

1. Antarctic Ozone Hole

ozone, and climate, *Science*, Vol. 284, pp. 305-308.

25. Shindell, D., et al (1998), Increased polar stratospheric ozone losses and delayed eventual recovery wing to increasing greenhouse-gas concentrations, *Nature*, Vol. 392, pp. 589-592.

26. Solomon, S., (1999), Stratospheric Ozone Depletion: A Review of Concepts and History, *Reviews of Geophysics*, Vol. 37, No. 3, pp. 275-316.

27. Stohl, A., et al, (2003), Stratospheric-Troposphere Exchange: A review, *J. Geoph. Res.*, Vol. 108, No. D12, pp. 8516, doi: 10.1029/2002/Jdoo2490.

28. Tabazadeh, et al (2002), Arctic "ozone hole" in a cold Volcanic stratosphere, *Proceeding of National Academic Science (PNAS)*, Vol. 99, No. 5, pp. 2609-2612.

29. Thompson, D., & Solomon, S., (2002), Interpretation of recent southern hemisphere climate change, *Science*, Vol. 296, pp. 895-899.

30. Turco, R.P., (1997), *Earth under Siege*. Oxford University press, pp. 407-450.

31. Waugh, D., et al, (1999), Persistence of the lower stratospheric polar vortexes, *J. Geophys. Res.*, Vol. 104, No. D22, pp. 27191-27201.

32. Waugh, D., and Randel, W., (1999), Climatology of Arctic and Antarctic polar vortexes using elliptical diagnostics, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 56, No. 11, pp. 1594-1613.

33. Waugh, D., and T.M. Hall, (2002), Age of Stratospheric air: Theory, Observations, Models, *Reviews of Geophysics*, Vol. 40, No. 4, pp. 1-26.

34. World Meteorological Organization/United Nations Environment Programme (WMO/UNEP), (2003), *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002*, Report, 47, Geneva.

35. Zhou, S., et al, (2000), An inter-hemisphere of the persistent stratospheric polar vortex, *Geoph. Res. Lett.*, Vol. 27, No. 8, pp. 1123-1126.

* برای کسب اطلاعات بیش تر درباره‌ی ازن استراتوسفری و وضعیت حفره‌ی ازن، به آدرس های اینترنتی زیر مراجعه کنید:

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/>

<http://www.nas.nasa.gov/About/Education/Ozone/>

long-term changes in planetary wave activity in late winter, *J. Climate*, Vol. 16, No. 18, pp. 3027-3038.

12. IPCC (2005), *Ozone and Climate: A review of interconnections*, In: IPCC/TEAP Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons, Special report on ozone and climate, Oxford university Press, In Press.

13. Labitzke, K. and Van Loon, H (1999), *The Stratosphere: Phenomena, History, Relevance*, Springer verlag. 180p.

14. Manney, and Zurek, (1993), Inter hemispheric comparison of the development of the stratospheric polar vortex during fall: A 3-dimensional perspective for 1991-1992, *Geophysical Research Letters*, Vol. 20, No. 12, pp. 1275-1278.

15. Newell, R.E., and Gould-Stewart, S., (1981), A stratospheric fountain? *J. Atmos. Sci.*, Vol. 38, pp. 2789-2796.

16. Plumb, R.A., (2002), Stratospheric transport, *J. Met. Soc. Japan*, Vol. 80, pp. 793-809.

17. Plumb, R.A., and Eluszkiewicz, (1999), The Brewer-Dobson circulation: dynamics of the tropical upwelling, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 56, pp. 868-890.

18. Robock, A., (2000), Volcanic eruptions and climate, *Reviews of Geophysics*, Vol. 38, No. 2, pp. 191-219.

19. Rosenlof, K.H., (1995), Seasonal cycle of the residual mean meridional circulation in the stratosphere, *J. Geoph. Res.*, Vol. 100, No. D3, pp. 5173-5191.

20. Schoeberl, M., Hartmann, D., (1991), The Dynamics of the Stratospheric Polar Vortex and It's Relation to Springtime Ozone Depletion, *Science*, Vol. 251, pp. 46-52.

21. Shepherd, T., (2000), The Middle Atmosphere, *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, Vol. 62, pp. 1587-1601.

22. Shepherd, T.G., (2002), Issues in stratosphere-troposphere coupling, *J. Met. Soc. Japan*, Vol. 80, No. 4B, pp. 769-792.

23. Shanklin, (2001), Back to basics: the Ozone Hole, *Weather*, Vol. 56, pp. 222-230.

24. Shindell, D., et al (1999), Solar cycle variability,