

پیدایش حفره ی اُزن بر فراز قطب جنوب

«با نگرشی ویژه به نحوه شکل گیری آن در سال ۲۰۰۵»

عباس مفیدی*

عضو هیأت علمی گروه جغرافیای مؤسسه آموزش عالی طبرستان

آدرس مکاتبات:

مازندران، چالوس، خیابان ۱۷ شهریور، مؤسسه آموزش عالی طبرستان، گروه جغرافیا.

(کد پستی ۶۹۴۱۴-۴۶۶۱۹)

رشد آموزش زمین شناسی، شماره ۴۴، (بهار ۱۳۸۵)، صفحه ۸-۱۵

تاریخ ارسال مقاله: شهریور ۱۳۸۴

تاریخ پذیرش مقاله: مهرماه ۱۳۸۴

تاریخ انتشار مقاله: بهار ۱۳۸۵

*E-mail: abbasmofidi@hotmail.com

پیدایش حفره ی ازن بر فراز قطب جنوب

«با نگرشی ویژه به نحوه شکل گیری آن در سال ۲۰۰۵»

عباس مفیدی

گروه جغرافیای مؤسسه آموزش عالی طبرستان

E-mail: abbasmofidi@hotmail.com

چکیده: درک قانونمندی های حاکم بر فرآیندهایی که در پیدایش حفره ازن بر فراز قطب جنوب نقش دارند هدف اصلی مقاله حاضر می باشد. بدین منظور ابتدا عواملی که در ایجاد حفره ازن بر فراز قطب جنوب نقش دارند تشریح گردیده و سپس نحوه پیدایش حفره ازن در آغاز بهار سال ۲۰۰۵ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان می دهد که دمای پائین تر از -78°C و وجود مواد شیمیایی بصورت واکنشی و فعال همراه با تابش اشعه ماوراء بنفش خورشیدی پیش شرطهای لازم جهت پیدایش حفره ازن در جو زمین هستند. پیدایش حفره ازن نتیجه برهم کنش فرآیندهای دینامیکی، شیمیایی و فتوشیمیایی در آغاز بهار نیمکره جنوبی در استراتوسفر قطبی است. بدین ترتیب که فرآیندهای دینامیکی نقش انتقال CFCها را از استراتوسفر حاره ای به مناطق قطبی از طریق شکل گیری گردش نصف النهاری بروئر-دابسون و ممانعت از تبادل انرژی بین عرض های قطبی و سایر عرض ها در نتیجه استقرار گردش مداری موسوم به جت شب قطبی و ورتکس قطبی برعهده دارند. نتیجه استقرار فرآیندهای دینامیکی عدم تبادل انرژی و کاهش شدید دما در قسمت تحتانی استراتوسفر قطبی است که پیدایش ابرهای استراتوسفری قطبی را بدنبال دارد. ابرهای استراتوسفری قطبی بواسطه انجام یک سری فرآیندهای شیمیایی ناهمگن بر سطح خود نقشی کلیدی در آماده سازی ترکیب شیمیایی در داخل ورتکس قطبی جهت بروز پدیده حفره ازن دارند. در نهایت ترکیبات شیمیایی جدید با تابش اولین اشعه های ماوراء بنفش خورشیدی در پایان زمستان و در آغاز بهار جنوبی بصورت فعال و واکنشی در آمده و طی یک فرآیند فتوشیمیایی تخریب شدید ازن در داخل ورتکس قطبی را موجب می گردند.

کلید واژگان: حفره ازن قطب جنوب، ورتکس قطبی استراتوسفری، ابرهای استراتوسفری قطبی، حفره ازن سال ۲۰۰۵.

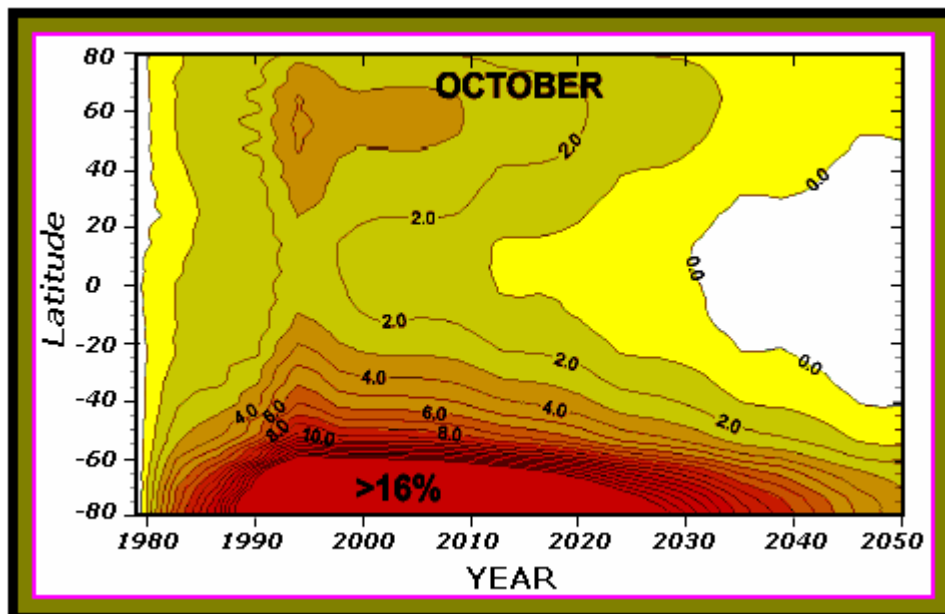
مقدمه: هر ساله در آغاز فصل بهار و درست زمانی که اولین اشعه های خورشید، جو قاره جنوبگان را روشن می کند پدیده ای بر فراز قطب جنوب شکل می گیرد که حیات موجودات زنده کره زمین را با مخاطره مواجه می سازد. ابرهای زیبایی که در فصل زمستان و در دمای پائین تر از -78°C سانتیگراد در ارتفاع حدود بیست کیلومتری بر فراز قطب جنوب شکل گرفته اند (شکل ۱) با دریافت اولین اشعه های خورشیدی در پس جلوه زیبای خود پدیده ای را بدنبال دارند که اثرات زیانبار بسیاری را برای ساکنین کره زمین به ارمغان می آورد. این ابرها در طی فصل زمستان محل تجمع انواع گازهایی هستند که با فرا رسیدن فصل بهار سبب کاهش شدید ازن بر فراز قطب جنوب می گردند. در سال ۱۹۸۵ «فارمن» و همکارانش از پژوهشگران مرکز بریتانیایی بررسی قطب جنوب نتایجی را منتشر کردند که نشان می داد لایه ازن بر فراز قطب جنوب در طول فصل بهار نیمکره جنوبی بطور قابل ملاحظه ای نازک شده است. آنها این پدیده را «حفره ی ازن قطب جنوب» [Antarctic Ozone Hole] نامیدند. از آن پس دانشمندان هر ساله در پایان ماه سپتامبر (آغاز بهار نیمکره جنوبی) شاهد پدیدار شدن حفره ازنی بر فراز قطب جنوب هستند که طی ماه اکتبر و نیمه اول ماه نوامبر گسترش یافته و در برخی سالها وسعتی برابر با

مساحت امریکای شمالی پیدا نموده و سپس در طی روزهای پایانی ماه نوامبر و ماه دسامبر مجدداً ترمیم گردیده است.



شکل ۱. ابرهای استراتوسفری قطبی

کاهش شدید مقدار ازن و پیدایش حفره بر فراز قطب جنوب در فصل بهار همانطوریکه در شکل ۲ مشاهده می کنید موجب افزایش قابل ملاحظه تابش اشعه ماوراءبنفش خورشیدی بر روی سطح زمین می گردد. چرا که لایه ازن ضمن جذب اشعه ماوراء بنفش خورشیدی مانع از نفوذ آن به قسمت تحتانی جو زمین می گردد. برای درک اهمیت موضوع یادآوری این نکته مهم است که اشعه ماوراء بنفش آن قسمتی از طیف خورشیدی است که برای زندگی و حیات مضر است.



شکل ۲. افزایش درصدی تابش اشعه ماوراءبنفش خورشید در ماه اکتبر از سال ۱۹۸۰. همانطوری که در شکل ملاحظه می کنید افزایش تابش اشعه ماوراءبنفش در عرضهای قطبی از اواخر دهه ۱۹۸۰ بسیار قابل ملاحظه می باشد. مقادیر بعد از سال ۲۰۰۲ با استفاده از مدل های مختلف پیش بینی شده است [WMO, 2003].

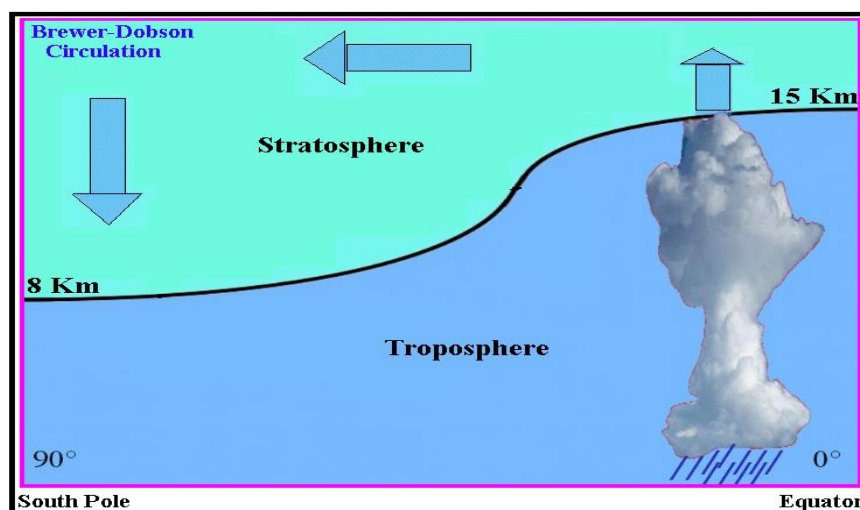
مطالعات نشان می دهد که این اشعه علاوه بر ایجاد سرطان های پوستی (هر دو نوع بدخیم و خوش خیم) به چشم ها نیز آسیب رسانده و بخصوص موجب افزایش ابتلاء به آب مروارید می شود. UNEP (برنامه زیست محیطی سازمان ملل) در سال ۱۹۹۱ مدارک و شواهد زیادی را ارائه نمود که تنها قسمتی از اشعه ماوراء بنفش خورشید منجر به از بین رفتن سیستم ایمنی بشر (سیستم دفاعی) می شود. مطالعاتی که در مورد گیاهان صورت گرفته نشان می دهد که هم رشد وهم میزان محصول و فتوستت در گیاهان کاهش می یابد. علاوه بر این اثر مضر این اشعه بر اکوسیستم های آبی نیز بسیار قابل توجه دانسته شده است [Drake, 1995].

با توجه به اینکه بررسی محققین نشان از آن دارد که در سالهای آینده و تا سال ۲۰۲۰ امکان شکل گیری حفره ازن دیگری بر فراز قطب شمال وجود دارد [Shindell et al., 1998; 1999; Tabazadeh, 2002]. از طرفی در طی روزهای ماه سپتامبر سال جاری و تنها ظرف ۲ تا ۳ هفته حفره ازن دیگری بر فراز قطب جنوب شکل خواهد گرفت و حیات موجودات زنده، بخصوص ساکنین کشورهای مجاور قاره جنوبگان (استرالیا، نیوزیلند، آفریقای جنوبی و نیمه جنوبی شیلی و آرژانتین) را تهدید خواهد کرد. در این مقاله سعی بر آن است تا بطور مختصر عوامل ایجاد حفره ازن قطب جنوب و فرآیندهای مؤثر در شکل گیری آن در فصل بهار نیمکره جنوبی تشریح گردیده و وضعیت ازن در سال ۲۰۰۵ قبل و بعد از پدیدار شدن حفره ازن بررسی گردد.

بحث: بطور کلی تخریب ازن و بدنال آن پیدایش حفره ازن در آن قسمت از جو رخ خواهد داد که شرایط زیر بطور همزمان حکمفرما باشد [Solomon, 1999]: ۱- دما پائین تر از (سردتر از) $78^{\circ}C$ - باشد. ۲- مواد شیمیایی بصورت واکنشی و فعال (رادیکال های آزاد کلر و بروم) به مقدار کافی وجود داشته باشد. ۳- اشعه ماوراء بنفش خورشید تابش نماید. چنین شرایطی تنها بر فراز قطب جنوب آنهم فقط در روزهای پایانی فصل زمستان (ماه سپتامبر) و ماههای آغازین فصل بهار (اکتبر و نوامبر) مهیا خواهد بود [Anderson et al., 1991]. نکته ای که یادآوری آن در اینجا لازم بنظر میرسد آنست که شرایط فوق از سالی به سال دیگر بر روی قطب جنوب تغییر می نماید، بطوریکه برای مثال حفره ی ازن در سال ۲۰۰۲ بسیار کوچکتر و در سالهای ۲۰۰۱ و ۲۰۰۳ بزرگتر از حد معمول بوده است. در ادامه نحوه شکل گیری حفره ی ازن بصورت مرحله به مرحله تشریح خواهد شد.

مرحله اول: جو کره زمین با توجه به خصوصیات متفاوت حرارتی به لایه های مختلفی تقسیم گردیده است. در این بین لایه مجاور سطح زمین تروپوسفر نامیده می شود که با دربرگرفتن ۹۰٪ جرم جو بیشترین نقش را از جهت تغییر و تحولات هواشناسی و آب و هواشناسی دارا می باشد. در بالای تروپوسفر لایه استراتوسفر قرار دارد که حدود ۱۰٪ جرم جو را بخود اختصاص می دهد (شکل ۳). وجود مولکول های ازن و جذب اشعه ماوراء بنفش خورشیدی توسط آنها علت اصلی پیدایش لایه

استراتوسفر است. گازهای مخرب ازن که در نتیجه فعالیت های صنعتی و یا بواسطه فعالیت های آتشفشانی و یا سایر فعالیت های طبیعی و انسانی تولید می شوند و تحت عنوان CFC ها از آنها نام خواهیم برد پس از تولید در سطح زمین توسط بادهای لایه تروپوسفر پخش می شوند. بررسی های انجام شده نشان می دهد CFCها تنها از طریق صعود در منطقه استوایی امکان نفوذ عمیق و مداوم از تروپوسفر به استراتوسفر را پیدا خواهند نمود (شکل ۳)، [Newell & Gould-Stewart, 1981; Holton et al., 1995; Plumb, 2002; Shepherd, 2000; 2002; Stohl et al., 2003]



شکل ۳. هوا و جرم تروپوسفری در منطقه همگرایی حاره ای (استوایی) بواسطه همرفت عمیق وارد استراتوسفر شده و سپس توسط یک گردش بطئی نصف النهاری موسوم به گردش بروئر-دابسون به استراتوسفر قطبی انتقال می یابد.

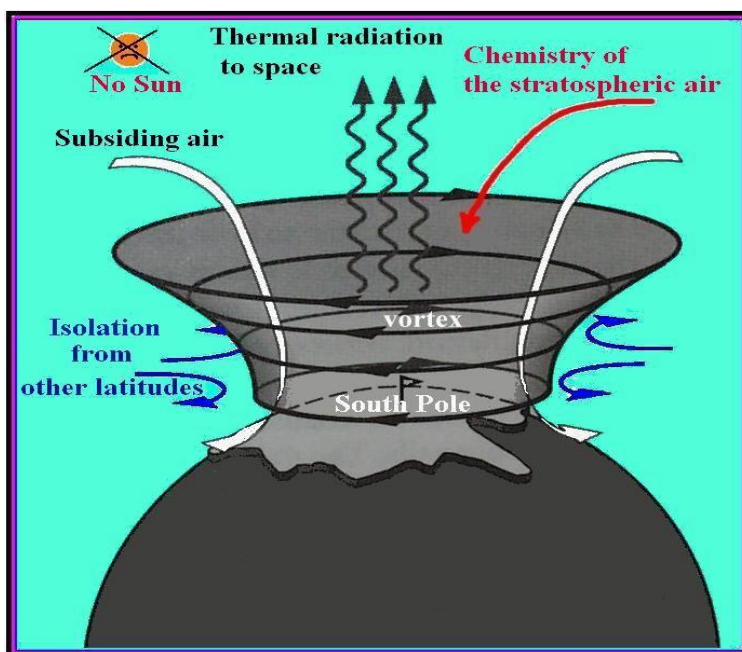
در استراتوسفر به جهت پایداری و سکون نسبی هوا، مواد مخرب ازن یا CFCها همراه با یک جریان بطئی ابتدا از قسمت تحتانی استراتوسفر استوایی به سمت بالا صعود کرده و سپس در امتداد نصف النهارات به سمت قطبین جابجا می شوند. این گردش آرام استراتوسفری که بر فراز استوا سرعت متوسطی حدود یک کیلومتر در ماه دارد و به پاس تلاش دو دانشمندی که نخستین بار به مطالعه آن پرداختند گردش «بروئر-دابسون»^۱ خوانده می شود [Holton et al., 1995; Holton & Lelieveld, 1996; Plumb, 1999; Plumb, 2002] پس از حدود ۳ تا ۴ سال CFCها را به قطبین زمین انتقال می دهد (شکل ۳)، [Rosenlof, 1995; Waugh & Hall, 2002].

مرحله دوم: با فرا رسیدن فصل پائیز در نیمکره جنوبی و کاهش شدت تابش خورشید در عرض های قطبی، دمای هوا بر فراز قطب جنوب همچون قاره جنوبگان به سرعت کاهش می یابد. از طرفی مناطق استوایی بواسطه دریافت انرژی بالای خورشیدی دمای بالایی دارا می باشند. این ویژگی در فصل پائیز بتدریج موجب پیدایش اختلاف حرارتی شدید و بدنبال آن اختلاف فشار شدیدی بین مناطق قطبی و مناطق استوایی می گردد که نتیجه آن پیدایش قوی ترین بادهای کره زمین در شب قطبی و در

1. Brewer-Dobson Circulation

استراتوسفر (در عرض های بالا) است. این بادهای که همچون طوقه ای استراتوسفر قطبی را در بر گرفته و از غرب به سمت شرق می وزند به «جت شب قطبی» معروف هستند و در زمستان نیمکره جنوبی با سرعتی بیش از ۳۵۰ کیلومتر در ساعت هوای موجود در جانب داخلی خود و بر روی قطب را از هوای سایر بخش های جو جدا می سازند یا اصطلاحاً «ایزوله» می نمایند (شکل ۴). این هوای ایزوله شده که جت شب قطبی را در حاشیه بیرونی خود دارد اصطلاحاً «ورتکس قطبی یا تاوه قطبی» خوانده می شود. تسلط شب طولانی قطبی به همراه ایزوله شدن هوا و عدم مبادله انرژی با عرض های پائین تر - بواسطه استقرار جت شب قطبی - موجب خروج تدریجی انرژی از قاره جنوبگان و از جو مناطق قطبی شده و دماهای بسیار پائینی را در داخل ورتکس قطبی موجب می گردد (شکل ۴)،

[Andrew et al., 1987; Schoeberl & Hartmann, 1991; Manney & Zurek, 1993].

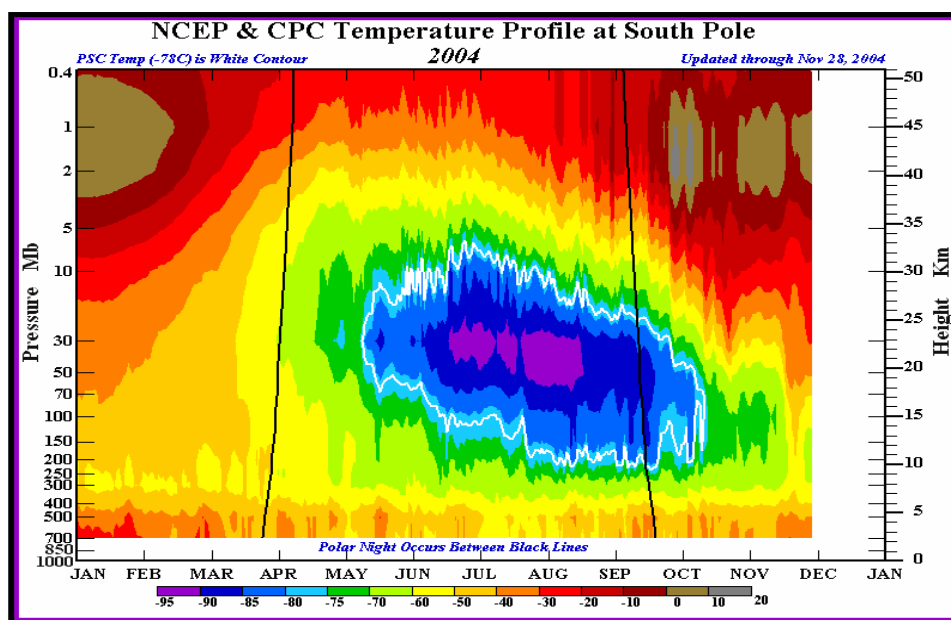


شکل ۴. در دوره سرد سال و بدنبال فرا رسیدن شب قطبی یک طوقه بزرگ باد غربی سرتاسر استراتوسفر را تا نیمه تروپوسفر در عرضهای قطبی تحت تسلط خود دارد. این طوقه به همراه هوای داخل آن ورتکس قطبی خوانده می شود. [Turco, 1997].

بدین ترتیب گردش بروئر- دابسون موجب انتقال CFCها از استراتوسفر استوایی به مناطق قطبی گردیده (مرحله اول) و پیدایش ورتکس قطبی کاهش شدید دما را در تحتانی ترین بخش استراتوسفر قطبی بدنبال داشته است (مرحله دوم). اما هنوز شرایط برای پیدایش حفره ی ازن کامل نیست چرا که گازهای مخرب ازن (کلر و بروم) بصورت غیر واکنشی و غیر فعال در استراتوسفر قطبی وجود دارند و از طرفی در این زمان از سال اشعه ماوراءبنفش خورشید جهت تجزیه ازن وجود ندارد.

مرحله سوم: تداوم ورتکس قطبی در سرتاسر زمستان موجب سرد شدن شدید هوای داخل ورتکس در استراتوسفر تحتانی می گردد. بطوریکه دما برای چندین ماه به پائین تر از -78°C می رسد و در اوج زمستان از مرز -90°C نیز عبور می نماید (شکل ۵). چنین وضعیتی موجب شکل گیری نوع خاصی از

ابرهای استراتوسفر قطبی موسوم به «ابرهای استراتوسفری قطبی»^۲ می گردد. این ابرها که حاوی مواد انتقال یافته توسط گردش بروئر- دابسون به مناطق قطبی هستند (عمدتاً تری هیدرات اسید نیتریک $HNO_3 \cdot 3H_2O$) در دمای آستانه $-78^\circ C$ در داخل ورتکس قطبی و در استراتوسفر تحتانی بصورت مایع تشکیل می شوند که به «ابرهای نوع اول» مشهور هستند (شکل ۱) و در اوج زمستان یا در بخش مرکزی ورتکس که دما به پائین تر از $-88^\circ C$ کاهش می یابد ابرها بطور کامل یخ زده و نوع جدیدی از ابرها شکل میگیرد که به «ابرهای نوع دوم» معروف شده اند [Solomon,1999; WMO,2003; IPCC,2005]. در واقع ابرهای استراتوسفری قطبی یک مؤلفه کلیدی در تخریب ازن و پیدایش حفره ی ازن قطب جنوب محسوب می گردند. ابرهای استراتوسفری قطبی که چاه ای محلی برای جمع شدن CFCها در داخل ورتکس قطبی محسوب می شوند در شب طولانی قطبی، طی یک سری واکنش های «ناهمگن» انواع کلر تقریباً غیرواکنشی همچون نترات کلر ($ClONO_2$) و اسید نیتریک (HNO_3) تبدیل میکنند (شکل ۶)،

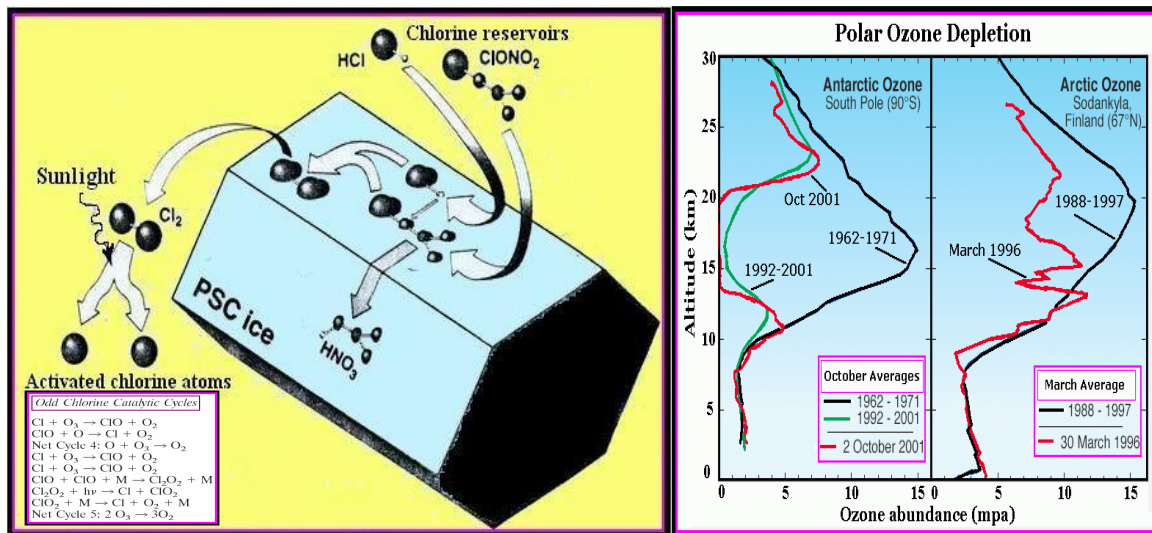


شکل ۵. نیمرخ قائم دما در قطب جنوب در سال ۲۰۰۴. دو خط سیاه عمودی شروع و پایان شب قطبی را در قطب جنوب و خط سفید دمای آستانه تشکیل ابرهای استراتوسفری قطبی ($-78^\circ C$) را نشان می دهد. در سال ۲۰۰۴ همچون سالهای گذشته، پائین ترین دماها در طی ماههای ژوئن تا اکتبر در استراتوسفر تحتانی (حدود ۲۰ کیلومتری) ثبت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

کلر مولکولی با توجه به اینکه میل ترکیب با یخ را ندارد از سطح ابر تبخیر می شود درحالیکه اسید نیتریک بر روی ذرات ابر بصورت یخ زده باقی می ماند و کلر مولکولی حاصل از این واکنش به جهت اینکه قادر نیست بطور مستقیم با ازن استراتوسفری واکنشی انجام دهد در سرتاسر فصل زمستان در

2. Polar Stratospheric Clouds[PSCs]

داخل ورتکس قطبی انباشته شده و به محض تابش اولین اشعه های ماوراء بنفش خورشیدی در ماه سپتامبر (ابتدای فصل بهار جنوبی) تجزیه شده و به کلر اتمی (Cl) تبدیل میگردد. در این زمان از سال رادیکال های کلر (اتمهای کلر آزاد) به شدت با ازن موجود در ورتکس قطبی واکنش نموده و موجب تخریب ازن و پیدایش حفره ی ازن در داخل ورتکس قطبی می گردند (شکل ۶)، [Turco, 1997; WMO, 2003]. بدین ترتیب در ابتدای فصل بهار نیمکره جنوبی با تابش اولین اشعه های خورشیدی در کنار جلوه زیبای ابرهای استراتوسفری قطبی تخریب ازن استراتوسفری به سرعت آغاز می گردد و ظرف تنها ۲ تا ۳ هفته حفره ی ازن بر فراز قطب جنوب پدیدار می گردد. شکل ۷ مقدار متوسط ازن را در مناطق قطبی در ابتدای فصل بهار دو نیمکره نشان می دهد. همانطوریکه در شکل مشاهده می کنید حفره ی ازن مختص استراتوسفر قطب جنوب است و چنین حفره ای در قطب شمال مشاهده نمی شود. نکته دیگری که در این شکل حائز اهمیت می باشد عدم وجود حفره ی ازن در طی سالهای دهه ۱۹۶۰ (۱۹۶۲-۱۹۷۱) بر فراز قطب جنوب است. این در حالی است که نیمرخ قائم تهیه شده برای سالهای اخیر (۲۰۰۱-۱۹۹۲) حفره ای را در حد فاصل ۱۵ تا ۲۰ کیلومتری بر روی قطب جنوب نشان می دهد.

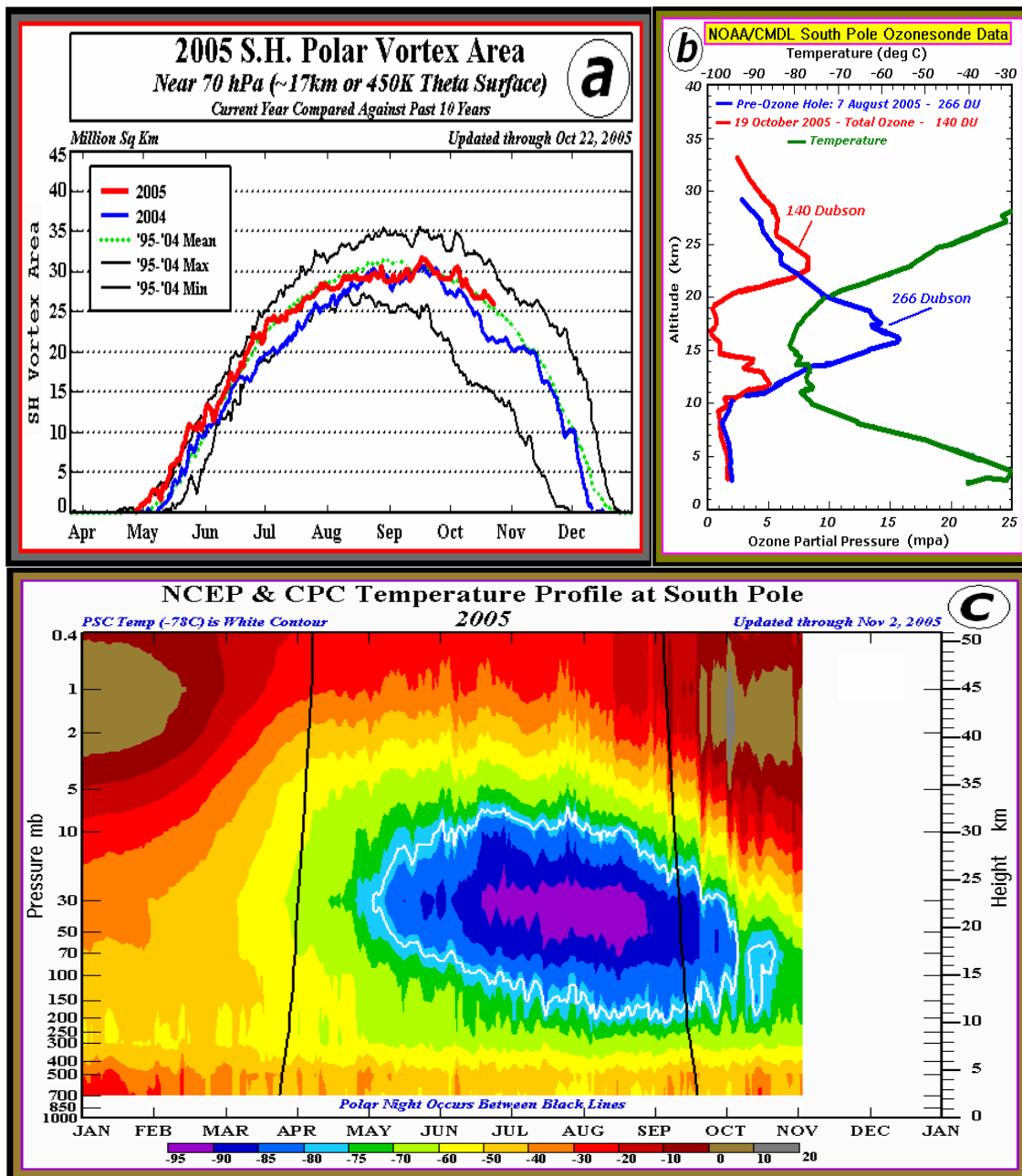


شکل ۶ (سمت چپ). نحوه تبدیل ذخایر کلر غیر واکنشی به اتمهای کلر فعال و واکنشی در ابرهای استراتوسفری قطبی در طول فصل زمستان و آغاز فصل بهار جنوبی [Turco, 1997]. فرآیند تجزیه ازن توسط اتمهای کلر در پائین شکل نشان داده شده است [Solomon, 1999].

شکل ۷ (سمت راست). مقایسه میزان کاهش ازن از منظر اقلیمی در ابتدای بهار دو نیمکره به ترتیب در ایستگاه قطب جنوب واقع در عرض ۹۰° جنوبی (سمت چپ) و ایستگاه سودانکیلائی فنلاند واقع در ۶۰° عرض شمالی (سمت راست)، [WMO, 2003].

بررسی آخرین داده های موجود از وضعیت ورتکس قطبی و مقادیر ازن و دما در قطب جنوب بیانگر تشکیل حفره ی بزرگ دیگری در بهار امسال (بهار سال ۲۰۰۵ در نیمکره جنوبی) بر فراز قطب جنوب است (شکل ۸). از آنجائیکه 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 تعیین کننده حداکثر پوشش منطقه ای حفره ی ازن محسوب می گردد [Schoeberl & Hartmann, 1991]، بدین جهت وسعت و اندازه ورتکس قطبی در سال ۲۰۰۵ از ابتدای شکل گیری آن در استراتوسفر تحتانی تا روز ۲۲ اکتبر نشان داده شده است (شکل ۸a).



شکل ۸. آخرین اندازه گیری ها از مساحت ورتکس قطبی (۸a)، مقدار ازن (۸b) و دما (۸c) مربوط به ایستگاه قطب جنوب تا پایان ماه اکتبر ۲۰۰۵. مساحت ورتکس قطبی در شکل ۸a به میلیون کیلومتر مربع بیان گردیده است. خط سبز در شکل ۸b دما، وخط های آبی و قرمز مقدار ازن (به دو واحد دابسون و واحد جزء در میلیون) را به ترتیب در ۷ اوت و ۱۹ اکتبر ۲۰۰۵ نشان می دهند. در شکل ۸c دوخط سیاه عمودی شروع و پایان شب قطبی را در قطب جنوب و خط سفید دمای آستانه تشکیل ابرهای استراتوسفری قطبی (-78°C) را نشان می دهد [http://www.cpc.ncep.noaa.gov].

برای مقایسه اندازه ورتکس در سال ۲۰۰۴ به همراه اندازه حداکثر، حداقل و میانگین آن طی ده سال گذشته (۲۰۰۴-۱۹۹۵) به نمایش در آمده است. با توجه به شکل، اندازه ورتکس قطبی در طی زمستان ۲۰۰۵ (خط قرمز) مشابه میانگین ده ساله آن (نقطه چین سبز) می باشد. جهت فراهم نمودن درکی مناسب از شرایط حاکم بر استراتوسفر قطبی، شکل های ۸b و ۸c به ترتیب نیمرخ قائم مقدار ازن و دمای ماهانه را در قطب جنوب نشان می دهند. با توجه به شکل ۸c از ابتدای ماه ژوئن امکان تشکیل ابرهای استراتوسفری قطبی نوع اول در استراتوسفر قطبی (بخصوص استراتوسفر تحتانی) فراهم شده و از اواسط ماه ژوئیه با تشکیل ابرهای استراتوسفری قطبی نوع دوم استراتوسفر تحتانی محل انباشت کلر مولکولی گردیده است.

مقایسه مقادیر ازن کلی^۳ مربوط به روزهای هفتم اوت (خط آبی) و نوزدهم اکتبر (خط قرمز) در شکل ۸b پدیدار شدن حفره ی ازن استراتوسفری را نشان می دهد بطوریکه مقدار ازن کلی در ایستگاه قطب جنوب از ۲۶۶ دابسون در هفتم اوت به ۱۴۰ دابسون در ۲۲ اکتبر ۲۰۰۵ رسیده است. این کاهش ازن که نشانه حضور اشعه های خورشیدی در پایان زمستان جنوبی است تنها با سپری شدن ۲ تا ۳ هفته در ماه سپتامبر حفره ی ازن سال ۲۰۰۵ را بدنال داشته است (لازم به ذکر است هنگامیکه مقدار ازن کلی از حد آستانه ۲۲۰ دابسون کمتر باشد اصطلاحاً حفره ی ازن پدیدار می گردد).

نتیجه گیری: در بررسی عوامل کاهش ازن استراتوسفری و پیدایش حفره ی ازن قطب جنوب عمدتاً تولید مقادیر عظیم گازهای CFC در نتیجه مصرف بیش از حد سوخت های فسیلی علت اصلی دانسته می شود و توجه علمی این پدیده عموماً با ارائه فرمول های شیمی و بیان ادله های مربوط به علم شیمی بیان می گردد. اما حقیقت امر آنست که پذیرش ادله شیمی بعنوان عامل اصلی کاهش ازن استراتوسفری برخی از سؤالات کلیدی ما را بی پاسخ می گذارد. از آن جمله «وردش پذیری^۴ (تغییرپذیری) و نوسانات سال به سال ازن استراتوسفری و حفره ی ازن قطب جنوب چگونه با تغییرات بطئی در تمرکز CFCها قابل توجیه است؟» و یا سؤالات دیگری که با این دیدگاه بی پاسخ می ماند آنست که «چرا استراتوسفر قطبی نیمکره شمالی حفره ای را در ابتدای فصل بهار شمالی تجربه نمی کند؟» و «چرا سایر عرض های جغرافیایی در لایه استراتوسفر با وجود میزان تمرکز CFCهای برابر با عرض های قطبی اینچنین کاهش ازن شدیدی را در ابتدای بهار تجربه نمی کنند؟» و بسیاری سؤالات بی پاسخ دیگر. جمع بندی یافته ها نشان می دهد که درک کامل پیدایش حفره ی ازن بر فراز قطب جنوب نیازمند شناخت نحوه برهم کنش فرآیند های فتوشیمیایی، تابشی و دینامیکی در استراتوسفر است و واکنش های شیمیایی تنها بخش کوچکی از کل فرآیند را به خود اختصاص می دهند. باید

۳. ازن کلی عبارت است از تعداد کل مولکول های ازن موجود در ستونی از هوا به ضخامت کل جو و به مساحت یک سانتیمتر مربع. ازن کلی عمدتاً به واحد دابسون (DU) بیان میشود. متوسط جهانی ازن کلی در جو کره زمین برابر با ۳۰۰ دابسون می باشد [Turco, 1997].

پذیرفت که صرفاً تمرکز CFCها علت تخریب ازن نیست و به همین علت حتی اگر مقادیر کلر استراتوسفری به سطح اولیه خود باز گردد ضرورتاً لایه ازن به وضعیت اولیه خود بر نخواهد گشت [IPCC, 2005]. شاهد این مدعا روند رو به کاهش ازن استراتوسفری در قطب شمال است که علیرغم روند رو به کاهش CFCها می رود تا در یکی دو دهه آینده به «حفره ای» برفراز قطب شمال تبدیل گردد. آخرین گزارش پانل بین الدول تغییر اقلیم (IPCC) با موضوع ویژه «ازن و اقلیم» معیار اصلی بررسی ازن در مناطق قطبی را «دما» ذکر نموده و صرف نظر از مؤلفه های شیمیایی، دو عامل دما و ورتکس قطبی را از نظر دینامیکی کاملاً با هم مرتبط دانسته است (IPCC, 2005). نکته دیگری که در چند سال اخیر نظر پژوهشگران را به خود جلب نموده است ارتباط بین کاهش ازن در استراتوسفر قطبی و ورتکس ها و تغییرات اقلیمی است. بطوریکه نتایج بدست آمده بیانگر آنست که تغییرات ازن حدود ۵۰٪ تغییرات دما را در استراتوسفر قطبی توجیه می کند. در این رابطه محققین معتقدند تخریب ازن استراتوسفری از اوایل دهه ۱۹۸۰ منجر به سرد شدن استراتوسفر گردیده است [Hu & Tung, 2003; IPCC, 2005]. بدین ترتیب که کاهش ازن در استراتوسفر قطبی موجب شکل گیری یک سری پس خور مثبت به صورت زیر گردیده است:

کاهش ازن استراتوسفری \Rightarrow ورتکس قطبی سردتر و قویتر \Rightarrow کاهش فعالیت امواج راسبی مقیاس سیاره ای \Rightarrow گرمایش دینامیکی کمتر و انتقال ازن کمتر به مناطق قطبی (گردش بروئر- دابسون ضعیف تر) \Rightarrow ورتکس قطبی خیلی سردتر و قویتر \Rightarrow کاهش ازن بیشتر.

جدیدترین گزارشات و بررسی ها روند روبه کاهش مواد شیمیایی مخرب ازن را در استراتوسفر قطبی تأیید نموده و تقویت و تداوم ورتکس قطبی را بعنوان بستر اصلی تشکیل ابرهای استراتوسفری قطبی گزارش نموده اند [Waugh et al., 1999; 2002; 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 ازن استراتوسفری قطبی [Hu & Tung, 2003; IPCC, 2005]. ۲- کاهش فعالیت امواج راسبی مقیاس سیاره ای در اواخر زمستان و اوایل بهار [Waugh et al., 1999; Zhou et al., 2000] ۳- انفجارات آتشفشانی و فرآیندهای حاصل از ورود مواد آتشفشانی به داخل استراتوسفر [Robock, 2000].

توضیح برخی اصطلاحات: [Glossary]

۱- **ورتکس قطبی** [Polar Vortex]: توده هوای همگن بالای قطبین زمین که بواسطه تسلط بادهای غربی پرسرعت پیرامون قطبی یا اصطلاحاً جت شب قطبی از هوای عرض های پائین تر جدا شده و گردشی همسو با گردش وضعی زمین دارد. جت شب قطبی حاشیه خارجی ورتکس قطبی را تشکیل می دهد و در استراتوسفر فوقانی و مزوسفر تحتانی به حداکثر گستردگی و شدت خود می رسد. در اوج زمستان هر نیمکره، ورتکس قطبی بخش زیادی از لایه استراتوسفر را تحت تسلط خود دارد بطوریکه جت شب

قطبی در استراتوسفر نیمکره جنوبی و شمالی در ارتفاع حدود ۴۰ کیلومتری (استراتوسفر فوقانی) به ترتیب در عرضهای ۴۵ و ۵۵ درجه استقرار می یابد. ورتکس در زمستان هر نیمکره تمامی ضخامت جو را از مزوسفر تحتانی تا تروپوسفر میانی در بر می گیرد [Waugh & Randel, 1999].

۲- **امواج راسبی** [Rossby Waves]: بادهای غربی عرضهای 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 بصورت جریانات موجی شکل که دامنه موج آنها بین ۵۰ تا ۱۲۰ درجه در امتداد طول جغرافیایی است در می 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 عرضها بر عهده 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 فرآیند 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, 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، چند ساله) بوقوع می پیوندد و با تغییرات اقلیمی Climatic Changes که در مقیاس های زمانی طولانی (سده، هزاره) بوقوع می پیوندد متفاوت است. برای مثال تغییرات و ناهنجارهای سال به سال دما و بارش و وقوع متوالی خشکسالی ها و ترسالی ها از ویژگی وردش پذیری اقلیم محسوب می گردند.

References:

1. Anderson, et al, 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. Kundsén, 2002, The influence of vortex ozone depletion on Arctic ozone trends, *Geophysical Research Letters*, 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, *Progress in Physical Geography*, Vol. 19, No. 1, pp. 1-17
6. Gardiner, B., 1989, The Antarctic ozone hole. *Weather*, Vol. 44, No. 7, pp. 291-298.
7. Harman, J.R., 1987, *Rossby Wave*. In: *Encyclopedia of Climatology*, Edited by, J. Oliver, and R.W. Fairbridge, Van Nostrand Reinhold, pp. 724-727.

8. Hartmann, D., et al., 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.
9. Holton, J.R., et al., 1995, Stratosphere-Troposphere Exchange, *Reviews of Geophysics*, Vol. **33**, No. 4, pp. 403-439.
10. Holton, J.R., and J. Lelieveld, 1996, 1996, Stratosphere-Troposphere exchange and its role in the budget of tropospheric ozone, *NATO ASI series*, Vol. **I 35**, Springer Verlag, pp. 173-190.
11. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar>.
12. Hu, Y., and Tung, K.K., 2003, Possible ozone-induced long-term changes in planetary wave activity in late winter, *Journal of Climate*, Vol. **16**, No. 18, pp. 3027-3038.
13. 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, Cambridge university Press.
14. Labitzke, K. and Van Loon, H., 1999, *The Stratosphere: Phenomena, History, Relevance*, Springer verlag, 180p.
15. 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.
16. Newell, R.E., and Gould-Stewart, S., 1981, A stratospheric fountain? *Journal of Atmospheric Science*, Vol. **38**, pp. 2789-2796.
17. Plumb, R.A., 2002, Stratospheric transport, *Journal of Meteorological Society of Japan*, Vol. **80**, pp. 793-809.
18. Plumb, R.A., and Eluszkiewicz, 1999, The Brewer-Dobson circulation: Dynamics of the tropical upwelling, *Journal of Atmospheric Science*, Vol. **56**, pp. 868-890.
19. Robock, A., 2000, Volcanic eruptions and climate, *Reviews of Geophysics*, Vol. **38**, No. 2, pp. 191-219.
20. Rosenlof, K.H., 1995, Seasonal cycle of the residual mean meridional circulation in the stratosphere, *Journal of Geophysical Research*, Vol. **100**, No. D3, pp. 5173-5191.
21. Schoeberl, M., and Hartmann, D., 1991, The Dynamics of the Stratospheric Polar Vortex and It's Relation to Springtime Ozone Depletion, *Science*, Vol. **251**, pp. 46-52.
22. Shepherd, T., 2000, The Middle Atmosphere, *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, Vol. **62**, pp. 1587-1601.
23. Shepherd, T.G., 2002, Issues in stratosphere-troposphere coupling, *Journal of Meteorological Society of Japan*, Vol. **80**, No. 4B, pp. 769-792.
24. Shanklin, 2001, Back to basics: the Ozone Hole, *Weather*, Vol. **56**, pp. 222-230.
25. Shindell, D., et al., 1999, Solar cycle variability, ozone and climate, *Science*, Vol. **284**, pp. 305-308.
26. 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.
27. Solomon, S., 1999, Stratospheric Ozone Depletion: A Review of Concepts and History, *Reviews of Geophysics*, Vol. **37**, No. 3, pp. 275-316.
28. Stohl, A., et al., 2003, Stratosphere-Troposphere Exchange: A Review, *Journal of Geophysical Research*, Vol. **108**, No. D12, pp. 8516, doi:10.1029/2002/Jd002490.
29. 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.
30. Thompson, D., and Solomon, S., 2002, Interpretation of recent southern hemisphere climate change, *Science*, Vol. **296**, pp. 895-899.
31. Turco, R.P., 1997, *Earth under Siege*, Oxford university press, pp. 407-450.
32. Waugh, D., et al., 1999, Persistence of the lower stratospheric polar vortices, *Journal of Geophysical Research*, Vol. **104**, No. D22, pp. 27191-27201.
33. Waugh, D., and Randel, W., 1999, Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics, *Journal of Atmospheric Science*, Vol. **56**, No. 11, pp. 1594-1613.
34. Waugh, D., and T.M. Hall, 2002, Age of Stratospheric Air: Theory, Observations, Models, *Reviews of Geophysics*, Vol. **40**, No. 4, pp. 1-26.

35. World Meteorological Organization/United Nations Environment Programme(WMO/UNEP), 2003, **Scientific Assessment of Ozone Depletion:2002**, Report,47, Geneva.
36. Zhou,S., et al., 2000, An inter-hemisphere of the persistent stratospheric polar vortex, **Geophysical Research Letters**,Vol.27, No.8, pp.1123-1126.

*خوانندگان محترم می توانند جهت کسب اطلاعات بیشتر در رابطه با ازن استراتوسفری و وضعیت حفره ی ازن به آدرس های اینترنتی زیر مراجعه نمایند:

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

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

http://www.cmdl.noaa.gov/ozwv/ozsondes/spo/ozone_anim2005.html